

第九章 輪胎噪音降低技術 Tire Noise Reduction Technologies

摘要 (Abstract)

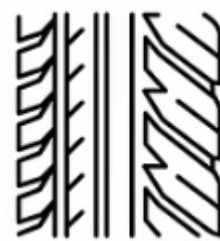
隨著車輛動力系統日益靜音化，特別是在電動車快速普及的背景下，輪胎噪音已成為道路交通噪音與車內噪音的主導來源之一。當行駛速度超過約四十公里每小時後，輪胎與路面交互作用所產生的滾動噪音即明顯凌駕於引擎或



馬達噪音之上，使輪胎噪音降低技術成為當代輪胎工程與車輛聲學領域的核心研究課題。本章系統性整合輪胎噪音降低技術的理論基礎、工程方法與實務應用，全面剖析如何透過多層次、跨學科的設計策略，有效抑制輪胎噪音的產生與傳播。本章首先從輪胎噪音的物理生成機制出發，說明結構傳遞噪音與空氣傳播噪音在整體輪胎聲學表現中的角色，並指出胎面花紋撞擊、空氣泵浦效應、溝槽與空腔共振以及喇叭效應等，構成輪胎噪音的主要來源。在此基礎上，章節建構一套以「聲源控制—傳遞路徑控制—接收端控制」為主軸的降噪技術分類架構，說明現代輪胎降噪設計已由單一手段，發展為結合材料科學、結構工程、聲學設計與路面工程的整合性技術體系。

在具體技術層面，本章深入探討多項關鍵降噪策略。胎面花紋設計優化透過變節距配置、溝槽幾何調整與胎肩設計改良，有效分散噪音頻譜能量並降低人耳敏感頻段的峰值噪音；輪胎結構改進則藉由胎體層、帶束層與胎側之剛性與阻尼調諧，抑制結構振動與力傳遞；材料與配方設計利用高阻尼橡膠與複合材料，提升能量耗散能力；而胎內吸音材料、輪圈共鳴器等被動降噪裝置，則進一步針對中低頻噪音提供有效抑制。章節同時指出，路面降噪技術作為系統層級解方，對輪胎噪音控制具有不可忽視的輔助效果。

輪胎噪音是現代車輛運行過程中最主要的噪音來源之一,尤其在車速超過 40 公里/小時之後,輪胎與路面的交互作用所產生的噪音將超越動力系統噪音成為主導聲源。隨著全球對環境品質和駕駛舒適性要求的不斷提升,輪胎噪音降低技術已成為輪胎工業和汽車工業共同關注的重要研究領域。根據聯合國歐洲經濟委員會制定的 ECE R117 法規,輪胎滾動噪音已被列為輪胎型式認證的三大關鍵性能指標之一,與滾動阻力和濕地抓地力並列為強制性檢測項目[1]。國際標準化組織發布的 ISO 13325:2019 標準則進一步規範了輪胎路面噪音排放的測量方法,為全球輪胎噪音評估提供了統一的技術基準[2]。



輪胎噪音的產生機制極為複雜,涉及多種物理現象的耦合作用。從聲學角度分析,輪胎噪音主要包括結構傳遞噪音(structure-borne noise)和空氣傳播噪音(air-borne noise)兩大類別。結構傳遞噪音主要源於輪胎結構振動透過懸吊系統傳遞至車身內部,而空氣傳播噪音則直接在輪胎與路面接觸區域產生並向外輻射。具體而言,空氣傳播噪音包含多種產生機制:胎面衝擊噪音(tread impact noise)是由胎面花紋塊撞擊路面產生的衝擊振動所引起;空氣泵浦噪音(air pumping noise)則源於花紋溝槽內空氣在接地區被急速壓縮和排出的過程;溝槽共振噪音(groove resonance noise)是花紋溝槽作為聲學共振腔體產生的共鳴現象;喇叭效應(horn effect)是指輪胎與路面之間形成的楔形空間對聲波的放大作用;輪胎空腔共振(tire cavity resonance)則是輪胎內部空氣腔體在特定頻率下產生的強烈共振現象[3][4]。近年來,隨著電動車輛的快速發展,輪胎噪音問題變得更加突出。由於電動馬達的運轉噪音遠低於傳統內燃機,原本被動力系統噪音掩蔽的輪胎噪音成為電動車輛內部主要的噪音來源,嚴重影響駕駛者和乘客的舒適性體驗。因此,開發低噪音輪胎技術不僅對傳統車輛具有重要意義,對於提升電動車輛的市場競爭力更是至關重要。全球主要輪胎製造商如 Michelin、Continental、Bridgestone、Pirelli 和 Goodyear 等均已投入大量研發資源,開發出多種創新的輪胎噪音降低技術,並將這些技術應用於量產輪胎產品中。

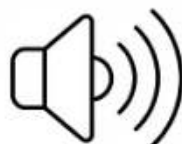
輪胎噪音降低技術的發展方向呈現多元化特徵,涵蓋從材料科學、結構工程到聲學設計的廣泛領域。胎面花紋設計優化透過變節距(variable pitch)技術、溝槽幾何優化和胎肩設計改進,能夠有效分散噪音頻譜能量,降低峰值噪音水平;輪胎結構改進則著重於胎體層、帶束層和胎側的設計優化,透過調整結構剛性和阻尼特性來抑制振動傳遞;材料選擇與配方開發利用先進橡膠配方、高阻尼材料和特殊填

充材料來提升輪胎的噪音吸收能力;降噪裝置的應用包括胎內吸音材料、輪圈共鳴器等被動降噪裝置的開發與整合;此外,路面降噪技術作為系統性解決方案的重要組成部分,透過多孔隙路面和低噪音路面的應用,從聲源產生端控制輪胎路面噪音[5][6]。

本章將系統性地介紹當前輪胎噪音降低技術的最新發展,從理論基礎、技術原理到工程應用進行全面深入的探討。首先概述降噪技術的整體框架和發展趨勢,隨後分別詳細闡述胎面花紋設計優化、輪胎結構改進、材料選擇與配方、降噪裝置以及路面降噪技術等各個技術領域的原理、方法和應用案例。透過整合國際學術研究成果、工業技術標準和實際工程經驗,本章旨在為輪胎設計工程師、聲學研究人員和相關領域從業者提供全面、深入且實用的技術參考。

9.1 降噪技術概述 (Overview of Noise Reduction Technologies)

輪胎噪音降低技術的系統性發展始於 20 世紀 70 年代,當時歐美國家開始制定車輛噪音法規,促使輪胎製造商開

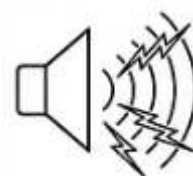


9.1 Noise Reduction Technologies

始關注產品的聲學性能。經過近半個世紀的技術演進,輪胎噪音控制已從單一的花紋設計優化發展為涵蓋材料、結構、聲學裝置和路面工程的綜合技術體系。當前的降噪技術發展呈現出多學科交叉融合、數值模擬與實驗驗證並重、被動控制與主動控制結合的特點。

從技術路徑來看,輪胎噪音降低技術可分為聲源控制、傳遞路徑控制和接收端控制三個層次。聲源控制著重於降低噪音在產生源頭的強度,包括胎面花紋設計優化、接地壓力分佈控制、胎面材料阻尼特性提升等技術;傳遞路徑控制旨在阻斷或衰減噪音從聲源向車內外傳播的過程,包括輪胎結構振動控制、胎側阻尼設計、輪圈共鳴器等技術;接收端控制則是在噪音到達駕駛者或乘客位置之前進行最後一道防線的抑制,包括車身隔音、主動噪音控制系統等技術。其中,輪胎本身的設計優化主要集中在聲源控制和部分傳遞路徑控制技術上[7]。

現代輪胎噪音降低技術的理論基礎建立在聲學、振動力學、流體動力學和材料科學等多學科知識之上。從聲學角度,輪胎噪音的頻譜特性決定了人耳的主觀感受,一般而言,中高頻噪音(500-5000 Hz)對人體的煩擾程度最高,因此降噪設計



通常優先針對此頻段進行優化。振動力學理論則解釋了輪胎結構在滾動過程中的動態響應特性,結構固有頻率、阻尼比和模態振型是影響振動噪音傳遞的關鍵參

數。流體動力學原理用於分析花紋溝槽內的空氣流動和壓縮過程,是理解空氣泵浦噪音和溝槽共振噪音機制的基礎。材料科學則為開發高性能降噪材料提供理論指導,特別是粘彈性材料的動態力學行為和能量耗散機制是設計低噪音橡膠配方的核心知識[8][9]。

在技術實踐層面,國際標準化組織(ISO)和各國政府機構制定了一系列輪胎噪音測量標準和法規限值,為技術發展提供了明確的目標導向。ISO 13325:2019 標準規定了利用滑行法(coast-by method)測量輪胎路面噪音排放的程序,測試在平坦、乾燥的瀝青路面上進行,車輛在規定速度下滑行透過測量區域,記錄輪胎產生的最大噪音值[2]。ISO 11819-2 標準則描述了密接法(close-proximity method, CPX)的測量程序,該方法使用特製的測試拖車,在輪胎附近位置安裝麥克風,能夠更精確地評估輪胎路面交互作用產生的噪音,且可在實際道路上連續測量,評估路面狀況對噪音的影響[10]。

歐盟 ECE R117 法規對不同類別輪胎的滾動噪音設定了嚴格的限值標準,並實施分階段逐步降低的策略。以 C1 類乘用車輪胎為例,截至 2024 年,標稱胎面寬度不超過 185mm 的輪胎噪音限值為 68 dB(A),寬度為 185-215mm 的輪胎限值為 69 dB(A),寬度大於 245mm 的輪胎限值為 72 dB(A)[1]。這些法規要求持續推動輪胎製造商改進產品設計,開發更安靜的輪胎技術。值得注意的是,法規限值的降低並非線性過程,每降低 1-2 dB(A)都需要技術上的重大突破,因為噪音能量是對數尺度,噪音值降低 3 dB 相當於噪音能量減半,降低 10 dB 則相當於人耳感受到的音量減半。



輪胎製造商在產品開發過程中普遍採用數值模擬與實驗驗證相結合的研發方法。有限元分析(FEA)用於預測輪胎結構在靜態和動態載荷下的應力分佈、變形模式和振動特性;邊界元法(BEM)和統計能量分析(SEA)則用於預測聲輻射特性和車內噪音水平;計算流體動力學(CFD)模擬花紋溝槽內的空氣流動和壓力變化,預測空氣泵浦噪音的產生機制。這些數值工具大幅縮短了產品開發週期,降低了試製成本,使設計師能夠在虛擬環境中快速評估多種設計方案的降噪效果[11][12]。

當前輪胎噪音降低技術的研究熱點包括:基於人工智能和機器學習的花紋設計優化,利用遺傳算法、神經網絡等智能算法自動搜索最佳花紋配置;超材料(metamaterial)在輪胎降噪中的應用,利用週期性結構的帶隙特性阻斷特定頻率噪音的傳播;主動噪音控制技術,透過傳感器檢測輪胎振動信號,驅動致動器產生反

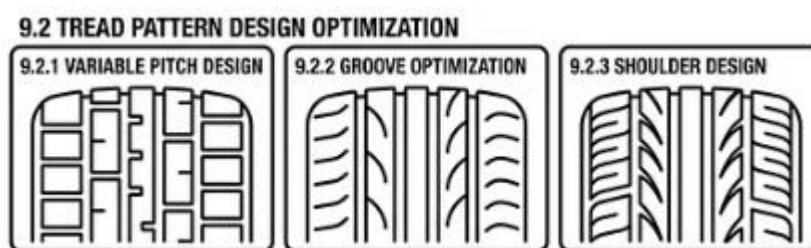
相聲波進行噪音抵消;多功能智能輪胎的開發,整合壓力監測、磨耗檢測和噪音控制等多種功能於一體。這些前沿技術雖然仍處於研究階段,但展現出廣闊的應用前景,有望在未來十年內逐步轉化為商業化產品[13][14]。

輪胎噪音降低技術的發展也面臨諸多挑戰。首先是多目標優化的困難,降低噪音往往與其他性能指標如濕地抓地力、滾動阻力、磨耗壽命等存在衝突,需要在多個性能維度之間尋求最佳平衡點。其次是成本控制壓力,先進的降噪技術如胎內吸音泡棉、特殊橡膠配方等會增加製造成本,需要在性能提升和市場接受度之間權衡。再者是測試評估的複雜性,輪胎噪音受多種因素影響包括路面條件、環境溫濕度、輪胎磨耗狀態等,建立可靠的預測模型和測試方法仍是技術難題。最後是法規持續收緊帶來的技術挑戰,隨著環保要求不斷提高,未來的噪音限值將更加嚴格,需要持續的技術創新才能滿足法規要求[15]。

從產業發展趨勢來看,輪胎噪音降低技術正朝向系統化、智能化和個性化方向發展。系統化表現在輪胎設計不再孤立考慮,而是與車輛懸吊系統、車身結構、路面特性等進行協同優化,追求整車層級的最佳降噪效果。智能化則表現在利用先進的傳感技術和控制算法,實現輪胎噪音的實時監測和自適應控制,根據行駛條件動態調整降噪策略。個性化是指根據不同市場區隔和消費者偏好,開發差異化的降噪產品,如針對豪華車市場的極致靜音輪胎、針對運動車市場的性能與靜音平衡型輪胎等[16]。

9.2 胎面花紋設計優化 (Tread Pattern Design Optimization)

胎面花紋設計是影響輪胎噪音最直接且最重要的因素之一。花紋不僅決定了輪胎的排水性能、抓



地力和操控特性,更是產生空氣傳播噪音的主要聲源。花紋設計優化的核心目標是在保證安全性能的前提下,透過精心設計的幾何配置來減少噪音的產生強度並分散噪音頻譜能量,避免在特定頻率形成突出的噪音峰值。現代花紋設計已從經驗驅動轉向科學化、系統化的設計方法,大量運用計算機輔助設計、數值模擬和優化算法來尋求最佳的降噪花紋配置。

胎面花紋產生噪音的機制主要包括花紋塊撞擊噪音和空氣動力學噪音兩大類。花紋塊撞擊噪音源於胎面花紋塊在接地前緣撞擊路面和在離地後緣脫離路面時產

生的瞬態衝擊力,這些衝擊力激發輪胎結構振動並向外輻射噪音。空氣動力學噪音則包括多種機制:當花紋塊進入接地區時,花紋溝槽內的空氣被急速壓縮,在接地區出口處空氣高速噴出形成空氣泵浦噪音;花紋溝槽作為聲學共振腔體,在特定頻率下產生強烈的共振現象;輪胎與路面之間形成的楔形空間對聲波具有喇叭效應,放大了聲輻射效率。研究表明,在總體輪胎噪音中,花紋塊撞擊噪音主要集中在 1000 Hz 以下的中低頻段,而空氣泵浦噪音和溝槽共振則主要貢獻於 1000-5000 Hz 的中高頻噪音[17][18]。



花紋設計優化的關鍵技術包括變節距設計、花紋溝槽優化和胎肩設計三個主要方面。變節距設計透過改變花紋塊的排列序列來分散噪音頻譜,避免週期性撞擊產生的單頻噪音;花紋溝槽優化則著重於改變溝槽的幾何形狀、深度、寬度和走向,以減少空氣泵浦效應和溝槽共振;胎肩設計則針對輪胎外側區域的花紋配置進行優化,因為胎肩區域是聲輻射效率最高的部位,對整體噪音水平影響最大。這三個方面相互關聯、相互影響,需要進行系統性的整合設計才能達到最佳的降噪效果[19]。

花紋設計的計算機輔助優化方法近年來取得顯著進展。傳統的試錯法設計週期長、成本高,且難以探索廣闊的設計空間。現代設計方法利用多目標優化算法如遺傳算法、粒子群優化、模擬退火等,能夠在數千甚至數萬種花紋配置中自動搜索最優解。



Mohammadi 和 Ohadi(2021)發展了一種基於多目標最小化的新型輪胎設計方法,將輪胎噪音產生的八種主要機制(包括胎側衝擊、胎面衝擊、空氣泵浦、管道共振、亥姆霍茲共振、空腔共振和喇叭效應)作為優化目標,透過調整材料特性和花紋參數,實現了總體噪音降低約 2 dB(A)的效果[3]。

花紋設計優化還需要考慮與其他性能指標的平衡。增加溝槽深度和寬度有利於排水性能,但會增加空氣泵浦噪音;增加花紋塊剛性可以提升操控性能,但可能加劇撞擊噪音;減少橫向溝槽有助於降噪,但可能影響橫向抓地力。因此,花紋設計是一個複雜的多目標優化問題,需要在噪音、濕地性能、乾地性能、磨耗壽命、滾動阻力等多個維度之間尋求最佳平衡點。現代輪胎製造商普遍採用數值模擬工具預測各項性能指標,並利用加權評分法或 Pareto 前沿分析來輔助設計決策[20]。

9.2.1 變節距設計 (Variable Pitch Design)

變節距設計是輪胎花紋降噪技術中最成熟也最有效的方法之一,其基本原理是透過改變胎面圓周方向上花紋塊的間距排列序列,將原本集中在單一頻率的噪音能量分散到較寬的頻率範圍,從而降低噪音的峰值水平和主觀煩擾度。這項技術的理論基礎源於聲學中的頻譜整形原理:當花紋塊以固定間距排列時,其撞擊路面產生的噪音具有明顯的週期性,在頻譜上表現為基頻及其諧波處的尖銳峰值;而變節距設計破壞了這種週期性,使得頻譜能量趨於平坦化,雖然總體能量未必減少,但峰值降低使得人耳感受到的響度明顯下降。



變節距設計的歷史可追溯至 1970 年代,當時輪胎工程師發現,採用兩種或更多種不同長度的花紋節距進行組合排列,可以有效降低輪胎的滾動噪音。早期的變節距設計主要採用經驗方法,透過試驗不同的節距組合來尋找較優方案。隨著計算機技術的發展,1980 年代開始出現基於傅立葉分析的理論設計方法,工程師可以預測不同節距序列的頻譜特性,並據此優化設計。進入 21 世紀後,遺傳算法、模擬退火等智能優化算法被引入變節距設計,使得可以在更大的設計空間中搜索全局最優解[21]。

變節距設計的核心參數包括節距數量、節距長度比例和節距排列序列。節距數量是指採用幾種不同長度的花紋節距,一般為 2-5 種,過多的節距種類會增加製造複雜度和成本;節距長度比例決定了各種節距之間的相對尺寸關係,通常最長節距與最短節距的比例



在 1.2-1.8 之間,過大的比例差異可能影響磨耗均勻性;節距排列序列則是最關鍵的設計變量,決定了頻譜整形的效果。對於採用 N 種節距的設計,若輪胎圓周包含 M 個花紋塊,則理論上存在 N^M 種可能的排列組合,即使對於中等規模的問題(如 $N=3$, $M=60$),設計空間也是天文數字,因此需要高效的優化算法來搜索最優序列 [22]。

變節距序列的優化目標通常是使噪音頻譜盡可能平坦,避免出現突出的峰值。常用的評估指標包括峰值因子(crest factor)、頻譜平坦度(spectral flatness)和主觀響度(loudness)等。峰值因子定義為頻譜最大值與平均值的比值,數值越小表示頻譜越平坦;頻譜平坦度則計算頻譜的幾何平均與算術平均的比值,接近 1 表示白噪音特性,接近 0 表示存在強烈的單頻分量;主觀響度則基於心理聲學模型計算,考慮人耳對不同頻率噪音的敏感度差異,能夠更準確地反映實際聽感。現代優化設計通常同時考慮多個目標函數,在客觀噪音級別和主觀舒適性之間尋求平衡[23]。

遺傳算法是變節距序列優化中應用最廣泛的智能算法之一。Becker 等人(2006)開發了基於遺傳算法的輪胎胎面花紋設計系統,該系統將花紋節距序列編碼為染色體,透過選擇、交叉和突變操作進行進化搜索,成功找到了比傳統設計方法更優的節距排列方案,在主觀噪音測試中獲得了顯著改善[24]。遺傳算法的優勢在於不需要目標函數的梯度資訊,能夠處理離散的組合優化問題,且具有良好的全局搜索能力,不易陷入局部最優。然而,遺傳算法的計算成本較高,對於大規模問題可能需要評估數萬次候選方案,因此實際應用中常結合快速的噪音預測模型來提高效率。節距序列設計還需要考慮製造約束和性能均勻性要求。從製造角度,模具分型面通常將輪胎分為兩半,兩個半模的花紋在分型線處需要精確對接,這對節距序列施加了相位約束。Li(2018)的研究指出,節距相對相位(pitch phase offset)的調整對降噪效果有顯著影響,最多可達 0.7 dB 的差異[18]。從性能角度,節距排列應盡可能均勻分佈各種長度的花紋塊,避免某些區域集中過多相同節距造成不平衡力矩,影響輪胎的動態均勻性和高速性能。一些先進的優化算法在目標函數中加入了均勻性約束,確保優化後的序列同時滿足降噪和均勻性要求。

變節距設計的降噪效果在實際應用中已得到充分驗證。根據文獻報導,相比固定節距設計,採用變節距技術通常可以降低噪音 2-4 dB(A),相當於噪音能量減少約 40-60%。這種效果在中高速行駛時尤為明顯,因為花紋塊撞擊頻率與車速成正比,高速時撞



擊噪音的基頻移向人耳更敏感的頻段,變節距設計的頻譜分散效果能有效降低此頻段的峰值噪音。值得注意的是,變節距設計對主觀噪音品質的改善往往大於客觀噪音值的降低,這是因為人耳對純音和窄頻噪音的煩擾度遠高於寬頻噪音,即使總體能量相同,頻譜平坦的噪音聽起來更柔和、更容易接受[25]。

近年來變節距設計技術持續進化,出現了多維變節距、自適應變節距等新概念。多維變節距不僅在圓周方向改變節距,還在徑向上(胎肩到胎面中央)採用不同的節距配置,進一步增加了設計自由度;自適應變節距則利用智能材料或機械結構,根據行駛速度和路面條件動態調整花紋節距,實現全工況下的最佳降噪效果。這些前沿技術目前仍處於研究階段,但展現出巨大的潛力,有望在未來成為高端輪胎的標準配置。

變節距設計也存在一些局限性。首先,它主要針對花紋塊撞擊產生的週期性噪音有效,對於空氣泵浦噪音、溝槽共振等其他機制產生的噪音效果有限。其次,變節距設計增加了模具製造和輪胎成型的複雜度,特別是對於採用多種節距的設計,需

要更精密的模具加工和更嚴格的品質控制。再者,節距變化會影響胎面剛性分佈,如果設計不當可能導致磨耗不均或操控性能波動。因此,變節距設計需要與其他降噪技術協同應用,並在整個產品開發過程中進行充分的模擬分析和實驗驗證,才能實現最佳的綜合性能。

9.2.2 花紋溝槽優化 (Groove Optimization)

花紋溝槽是輪胎花紋設計中的關鍵要素,其主要功能是排除接地區域的水膜,保證濕地條件下輪胎與路面的接觸,維持足夠的抓地力和操控性能。然而,溝槽的存在也是產生輪胎噪音的重要原因,特別是空氣泵浦噪音和溝槽共振噪音主要源於溝槽內空氣的動態行為。因此,花紋溝槽優化的核心挑戰是在保證排水性能的前提下,透過精心設計溝槽的幾何參數和空間配置,最小化溝槽產生的噪音。這需要深入理解溝槽內的空氣動力學過程和聲學共振機制,並利用數值模擬工具進行定量分析和優化。



空氣泵浦噪音是溝槽產生噪音的主要機制之一,其物理過程可描述如下:當輪胎滾動時,花紋溝槽在接地區前緣被壓縮,溝槽內的空氣體積急劇減小,壓力升高;隨著輪胎繼續滾動,高壓空氣從溝槽兩端或側面的開口處高速噴出,形成脈衝性的空氣射流;這些射流與周圍空氣交互作用,產生湍流和壓力擾動,向外輻射噪音;在接地區後緣,溝槽重新打開,形成負壓吸入周圍空氣,同樣產生空氣擾動和噪音。這個過程在輪胎滾動的每一圈中重複發生,產生連續的寬頻噪音,其頻譜特性取決於溝槽的幾何形狀、車速、接地壓力等因素[26][27]。

Gautam 和 Chandy(2016)利用三維計算流體動力學(CFD)模擬詳細研究了輪胎溝槽內的空氣泵浦噪音產生機制。研究發現,溝槽的橫向和縱向配置對噪音產生有顯著影響:橫向溝槽(與行駛方向垂直)產生的噪音強度通常高於縱向溝槽(與行駛方向平行),因為橫向溝槽在接地區被完全閉合,空氣壓縮更劇烈;溝槽深度和寬度的增加會提高空氣泵浦噪音,但這種關係不是線性的,存在最佳的深寬比使噪音最小化;溝槽端部的幾何形狀對噪音輻射效率有重要影響,銳角端部比圓角端部產生更強的噴流和更高的噪音[27]。這些發現為溝槽優化設計提供了重要的理論指導。溝槽共振噪音是另一個重要的噪音源,其機制是花紋溝槽作為聲學共振腔體,在特定頻率下產生強烈的共振現象。溝槽可以被視為開口管或半開口管的聲學共振器,其共振頻率取決於溝槽的長度、寬度、深度以及溝槽兩端的邊界條件。對於典型的輪胎橫向溝槽,共振頻率通常在 800-2000 Hz 範圍內,正好落在人耳敏感度最高的頻段。當輪胎滾動時,如果空氣泵浦或路面激勵的頻率接近溝槽共振頻率,就會

激發強烈的共振,導致噪音顯著增加。Pinay 等人(2020)研究了不同路面和操作條件下溝槽共振對輪胎路面噪音的貢獻,發現在某些條件下溝槽共振可使總體噪音增加 2-5 dB,是不可忽視的噪音源[28]。

基於對溝槽噪音機制的理解,已發展出多種優化策略。溝槽寬度和深度的優化是最直接的方法,一般而言,減小溝槽寬度和深度可以降低空氣泵浦噪音,但過度減小會影響排水能力。研究表明,存在一個最佳的溝槽寬深比(通常在 1:3 到 1:5 之間),在此比例下可以實現排水性能和噪音性能的良好平衡。溝槽傾斜角度的優化也很重要,與行駛方向成一定角度的斜向溝槽可以使空氣逐漸壓縮和釋放,而非瞬間壓縮,從而降低噴流速度和噪音強度。一些高級設計採用變角度溝槽,即溝槽在不同徑向位置具有不同的傾斜角度,進一步優化空氣流動特性[29]。

溝槽端部幾何形狀的優化是近年來的研究熱點。傳統的直角溝槽端部會產生強烈的空氣射流和高頻噪音,而採用圓角、斜角或漸變深度的溝槽端部設計可以使空氣流出更加平緩,顯著降低噴流噪音。Continental、Michelin 等輪胎製造商的專利中披露了多種溝槽端部優化設計,包括喇叭狀擴張端部、階梯式深度變化、多孔隙端部等。這些設計的共同特點是增加溝槽出口面積,降低出口流速,從而減少湍流和噪音產生。實驗測試顯示,優化的溝槽端部設計可以降低中高頻噪音 3-5 dB,效果顯著[30]。



溝槽內部結構的創新設計也在探索之中。一些設計在溝槽底部或側壁設置微小的凸起、凹陷或多孔結構,用於改變溝槽內的空氣流動模式或吸收聲能。例如,在溝槽側壁加工微細的凹槽可以產生邊界層擾動,破壞層流向湍流的轉變,降低流動噪音;在溝槽底部使用多孔材料可以吸收溝槽共振產生的聲能,降低共振峰值。然而,這些精細結構的製造難度和成本較高,且可能影響輪胎的磨耗壽命,目前主要應用於高端產品或概念設計中[31]。

溝槽優化設計通常需要利用計算流體動力學(CFD)和聲學模擬工具進行分析。CFD 模擬可以詳細計算溝槽內的空氣流場、壓力分佈和速度分佈,預測空氣泵浦噪音的強度和頻譜特性。Wei 等人(2016)發展了一種混合數值-實驗分析方法,結合 CFD 模擬和實驗測量來研究輪胎空氣泵浦噪音,並應用於花紋優化,成功降低了特定頻段的噪音峰值[29]。聲學模擬則利用邊界元法(BEM)或有限元法(FEM)計算溝槽共振頻率和模態,預測共振對總體噪音的貢獻。這些數值工具使設計師能夠在原型製作之前評估多種設計方案,大幅提高了開發效率。

溝槽優化設計通常需要利用計算流體動力學(CFD)和聲學模擬工具進行分析。CFD 模擬可以詳細計算溝槽內的空氣流場、壓力分佈和速度分佈,預測空氣泵浦噪音的強度和頻譜特性。Wei 等人(2016)發展了一種混合數值-實驗分析方法,結合 CFD 模擬和實驗測量來研究輪胎空氣泵浦噪音,並應用於花紋優化,成功降低了特定頻段的噪音峰值[29]。聲學模擬則利用邊界元法(BEM)或有限元法(FEM)計算溝槽共振頻率和模態,預測共振對總體噪音的貢獻。這些數值工具使設計師能夠在原型製作之前評估多種設計方案,大幅提高了開發效率。

溝槽優化設計的實際應用需要平衡多個性能目標。排水性能是首要考慮因素,溝槽的總體積和連通性決定了輪胎排水能力,過度優化降噪可能導致濕地性能下降,增加水滑風險。國際標準和法規通常對輪胎的濕地抓地力有明確要求,溝槽設計必須確保滿足這些要求。操控性能也受溝槽配置影響,溝槽會降低胎面剛性,特別是橫向溝槽對橫向剛性影響較大,可能影響轉向響應和側向抓地力。因此,溝槽優化往往採用多目標優化方法,在噪音、排水、操控、磨耗等多個維度之間尋求最佳妥協。

未來溝槽優化技術的發展方向包括:利用拓撲優化算法自動生成最優溝槽配置,不受傳統設計慣例的限制;開發自清潔溝槽設計,防止泥沙和小石子嵌入溝槽影響性能;探索可變幾何溝槽,利用智能材料或機械機構根據行駛條件調整溝槽開度,實現乾地和濕地的最佳性能切換。這些前瞻性技術雖然面臨技術和成本挑戰,但代表了溝槽設計的未來發展趨勢,有望為輪胎性能帶來革命性提升。

9.2.3 胎肩設計 (Shoulder Design)

輪胎胎肩區域是指胎面兩側靠近胎側的部分,這個區域在輪胎噪音產生和輻射中扮演著特殊而關鍵的角色。從聲學角度,胎肩區域是輪胎的主要聲輻射表面,由於其位置遠離接地中心且



面向車外和車內,胎肩振動產生的噪音能夠更有效地傳播到環境和車艙內部。從結構角度,胎肩區域連接胎面和胎側,是應力集中和變形較大的區域,容易產生強烈的振動。從空氣動力學角度,胎肩處的花紋溝槽開口直接與外部空氣接觸,是空氣泵浦噪音和溝槽共振噪音的主要輻射位置。因此,胎肩設計優化對於整體輪胎降噪效果具有決定性影響,往往能夠以較小的設計改動實現顯著的噪音降低[32]。胎肩設計對噪音影響的理論基礎涉及振動聲學和結構動力學。輪胎可以被視為一個薄殼結構,其振動模態包括徑向、側向和周向多種振型。研究表明,低階模態(主要是徑向振動模態)對結構傳遞噪音貢獻最大,而高階模態(包括周向波動模態)則與空氣傳播噪音關係密切。胎肩區域由於其曲率變化大、剛性相對較低,容易激發高階振動模態,特別是在 200-1000 Hz 頻段內產生強烈的振動響應。這些振動透過胎側傳遞至輪圈和懸吊系統,形成結構傳遞噪音;同時振動輪胎表面也作為聲源向外輻射噪音。Kim(2003)的研究顯示,胎肩區域的振動幅度通常是胎冠中心區域的 2-3 倍,對總體噪音的貢獻可達 30-40%[33]。

胎肩花紋設計的降噪策略主要包括剛性優化、質量分佈調整和花紋配置改進。剛性優化旨在提高胎肩區域的局部剛性,減少振動幅度,這可以透過增加花紋塊尺寸、

減少溝槽密度、加強花紋塊之間的連接橋等方式實現。然而,過高的胎肩剛性會影響輪胎的舒適性和抓地力,因此需要精細調整。質量分佈調整則是透過改變花紋塊的質量分佈來調諧胎肩區域的固有頻率,避免與主要激勵頻率共振。這通常透過在花紋塊內部設計空腔或變密度結構來實現。花紋配置改進包括採用漸變式花紋過渡,使胎肩花紋與胎冠中心花紋逐漸變化而非突變,減少應力集中和振動不連續性[34]。

胎肩溝槽的優化是胎肩設計的重點之一。由於胎肩溝槽直接開口於輪胎外側,空氣泵浦效應產生的噪音可以不受阻礙地向外輻射,因此胎肩溝槽對總體噪音的貢獻比例很高。降噪設計通常採用以下策略:減小胎肩溝槽的寬度和深度,在保證必要排水能力的前提下最小化溝槽容積;採用封閉式或半封閉式胎肩溝槽,即溝槽不直接開口於胎肩邊緣,而是透過狹窄的通道與外界連通,限制空氣射流;使用變深度溝槽,即溝槽深度在胎肩處逐漸變淺,減少空氣體積變化;在胎肩溝槽內設置降噪片(noise barrier),物理阻斷空氣流動和聲傳播路徑[35]。

Bridgestone 的 QuietTrack 技術是胎肩設計優化的典型應用案例。該技術的核心特徵包括:在胎肩位置設置溝內靜音軌道(in-groove quiet tracks),這些微小的凸起結構設置在溝槽底部,可以破壞空氣流動模式,降低空氣泵浦噪音;採用無倒角胎肩槽設計



(non-chamfered shoulder slots),避免傳統倒角設計造成的空氣湍流和噪音;優化節距排序(optimized pitch sequencing),在胎肩區域採用特殊的變節距序列,針對性地降低胎肩產生的噪音頻譜峰值。根據 Bridgestone 的測試數據,QuietTrack 技術可以使胎肩產生的噪音降低 4-6 dB,對總體輪胎噪音貢獻降低 2-3 dB[36]。

胎肩倒角設計是影響噪音的另一個重要因素。胎肩倒角是指胎肩花紋塊邊緣的斜面處理,傳統設計通常採用倒角以改善磨耗性能和外觀。然而,研究發現倒角會加劇空氣動力學噪音,因為倒角形成的斜面會產生額外的空氣擾動和湍流。近年來一些低噪音輪胎採用無倒角或微倒角設計,雖然可能略微影響磨耗均勻性,但能夠顯著降低噪音。Continental 和 Michelin 的一些高端產品中也採用了類似設計理念,透過精確控制胎肩幾何形狀來優化聲學性能[37]。

胎肩與胎側的過渡區域設計同樣重要。這個區域的剛性梯度和幾何形狀變化會影響振動的傳遞特性。過於急劇的剛性變化會造成振動反射和能量集中,加劇局部振動和噪音。優化設計採用漸變式剛性過渡,透過逐步改變橡膠層厚度、簾線密度

或材料配方,使胎肩到胎側的剛性平滑變化。一些先進設計還在過渡區域設置阻尼層或隔振結構,阻斷振動從胎面向胎側的傳遞,進一步降低結構傳遞噪音[38]。胎肩設計空氣動力學優化近年來受到越來越多關注。Zhou 等人(2020)研究了非充氣輪胎(NPT)的空氣動力學噪音,提出採用非光滑 riblet 表面結構來降低噪音。雖然該研究針對的是非充氣輪胎,但其原理也適用於傳統充氣輪胎的胎肩設計。riblet 結構是一種微小的溝槽陣列,靈感來源於鯊魚皮表面的結構,可以減少邊界層湍流和空氣阻力,同時降低氣動噪音。在輪胎胎肩表面應用類似的仿生學結構,有望在不影響其他性能的前提下實現額外的降噪效果[39]。

胎肩設計優化需要利用先進的模擬工具進行分析和驗證。有限元分析(FEA)用於計算胎肩區域的應力分佈、變形模式和振動特性,預測設計改動對結構動力學性能的影響。模態分析可以識

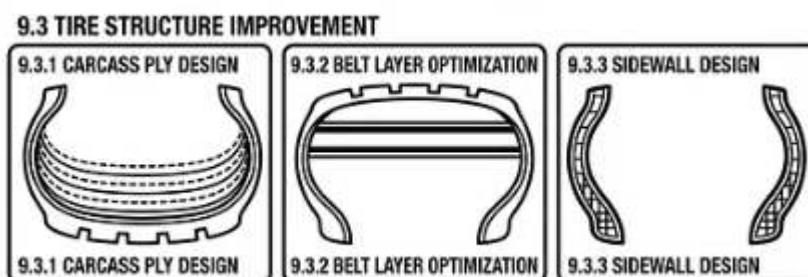


別胎肩區域的共振頻率和振型,指導阻尼設計和質量調諧。邊界元法(BEM)則用於計算胎肩振動的聲輻射效率,評估不同設計方案的噪音輻射特性。CFD 模擬用於分析胎肩溝槽的空氣流動和噪音產生機制。這些數值工具的綜合應用使設計師能夠在多物理場耦合框架下進行胎肩優化設計[40]。

胎肩設計優化的挑戰在於需要平衡多個相互制約的性能要求。降低噪音往往需要增加胎肩剛性和減少溝槽開口,但這可能影響輪胎的側向抓地力和轉向響應;優化胎肩花紋配置可能改變磨耗模式,導致胎肩區域磨耗過快或過慢;過度強調降噪可能損害排水性能,增加濕地行駛風險。因此,胎肩設計需要採用多學科優化方法,綜合考慮噪音、操控、磨耗、排水等多個目標,並透過實車測試驗證設計效果。隨著計算能力的提升和優化算法的改進,未來胎肩設計將更加精細化和智能化,為輪胎降噪性能提供更大的提升空間。

9.3 輪胎結構改進 (Tire Structure Improvement)

輪胎結構設計對噪音特性具有深遠影響,雖然其效果不如花紋設計那樣直觀,但結構優化能夠從根本上改變輪胎的振動響應



和聲輻射特性,實現持久且穩定的降噪效果。輪胎結構主要包括胎體層(carcass ply)、帶束層(belt layer)、胎側(sidewall)以及各層之間的橡膠覆蓋層。這些結構元

件的材料、幾何配置、層數和取向角度共同決定了輪胎的剛性分佈、阻尼特性和振動模態,進而影響噪音的產生、傳遞和輻射。結構改進的核心理念是透過優化設計來降低輪胎對外部激勵的振動響應,增加結構阻尼以耗散振動能量,調整固有頻率以避開主要激勵頻率,從而在聲源端和傳遞路徑上實現噪音控制[41][42]。

輪胎結構對噪音影響的物理機制涉及結構動力學和振動聲學的多個方面。首先,輪胎的模態特性決定了其對不同頻率激勵的響應。輪胎作為一個複雜的彈性殼體結構,具有多個固有頻率和對應的振動模態,包括徑向模態、側向模態、周向波動模態等。當外部激勵頻率(如花紋塊撞擊頻率、路面不平度激勵頻率)接近某個固有頻率時,就會發生共振,導致振動幅度急劇增大,產生強烈的噪音。透過結構設計調整這些固有頻率,使其遠離主要激勵頻率範圍,可以有效避免共振現象。其次,結構阻尼決定了振動能量的衰減速率,阻尼越大,振動衰減越快,噪音持續時間越短,總體噪音能量越低。再次,結構剛性分佈影響輪胎在滾動過程中的變形模式和接地壓力分佈,進而影響花紋塊撞擊的衝擊力和空氣泵浦效應,間接影響噪音產生[43][44]。



從歷史發展來看,輪胎結構設計的主要驅動力長期以來是安全性、耐久性和操控性能,降噪性能並非首要考慮因素。然而,隨著環保法規日趨嚴格和消費者對舒適性要求不斷提高,結構降噪設計逐漸受到重視。早期的研究主要集中在識別不同結構元件對噪音的貢獻,透過實驗測量和數值分析揭示結構參數與噪音之間的關係。近年來,隨著多物理場耦合模擬技術的成熟,結構設計已經能夠在開發初期就考慮降噪目標,透過多目標優化方法在多個性能維度之間尋求最佳平衡[45]。

9.3.1 胎體層設計 (Carcass Ply Design)

胎體層是輪胎的骨架結構,承擔著支撐車輛重量、抵抗內壓和傳遞驅動制動力的功能。胎體層通常由橡膠包覆的簾線(cord)組成,簾線材料可以是聚酯(polyester)、尼龍(nylon)、人造絲(rayon)或鋼絲(steel wire),這些簾線以特定角度排列並被橡膠層包覆。乘用車輪胎通常採用子午線結構(radial structure),簾線從一側胎圈到另一側胎圈呈徑向排列,這種結構相比傳統的斜交結構(bias structure)具有更低的滾動阻力、更好的操控性能和更長的使用壽命。胎體層的設計參數包括簾線材料、簾線密度、簾線角度、層數以及橡膠層厚度和配方,這些參數共同決定了輪胎的剛性、阻尼和振動特性[46]。



胎體層對輪胎噪音的影響主要透過改變輪胎的整體剛性和振動模態來實現。增加簾線密度或使用高模量簾線材料會提高輪胎的徑向和側向剛性,減少在外部激勵下的變形幅度,從而降低振動和噪音。然而,過高的剛性會損害輪胎的舒適性,使輪胎對路面不平度更加敏感,可能反而增加高頻振動和噪音。因此,存在一個最佳的剛性範圍,在此範圍內可以實現噪音、舒適性和操控性的良好平衡。Molisani 等人(2003)發展了輪胎結構與聲學腔體的耦合模型,研究表明胎體剛性的適度增加可以提高輪胎的第一階固有頻率,使其遠離典型的行駛激勵頻率,從而降低共振響應和噪音[47]。

簾線材料的選擇對輪胎的阻尼特性有重要影響。不同材料具有不同的內部摩擦特性和能量耗散能力,從而表現出不同的阻尼水平。研究表明,有機纖維簾線(如聚酯、尼龍)通常比鋼絲簾線具有更高的阻尼,能夠更快地耗散振動能量,降低噪音。然而,鋼絲簾線具有更高的強度和尺寸穩定性,常用於商用車輪胎或高性能乘用車輪胎。一些先進設計採用混合簾線結構,在不同部位使用不同材料的簾線,既保證強度和剛性要求,又在關鍵區域提供足夠的阻尼。例如,在胎體主體部分使用高強度聚酯簾線,在胎肩區域使用高阻尼尼龍簾線,實現性能的最佳組合[48]。

胎體層的層數也是重要的設計參數。增加胎體層數可以提高輪胎的承載能力和耐久性,但同時也增加了輪胎的質量和滾動阻力。從噪音角度,多層胎體結構可以提供更好的阻尼效果,因為層與層之間的橡膠層可以耗散振動能量,且多層結構具有更複雜的振動模態,不容易產生單一頻率的強烈共振。然而,現代輪胎設計趨向於減少層數以降低重量和滾動阻力,因此需要透過優化單層胎體的設計來實現降噪目標。一些高端輪胎採用變密度簾線設計,在不同區域使用不同密度的簾線排列,實現剛性和阻尼的區域化優化[49]。

胎體橡膠層的配方設計對阻尼特性有直接影響。胎體橡膠需要在簾線之間提供良好的黏合和保護,同時也是振動能量耗散的重要介質。高阻尼橡膠配方通常含有較高比例的合成橡膠(如丁基橡膠)和阻尼填料(如炭黑、二氧化矽),這些材料在



動態載荷下表現出較高的損耗因子,能夠有效耗散振動能量。然而,高阻尼配方通常也意味著較高的滾動阻力和生熱,需要在阻尼性能和其他性能之間權衡。一些先進設計採用多區域配方技術,在不同部位使用不同配方的橡膠,在關鍵降噪區域使用高阻尼配方,在其他區域使用低滾動阻力配方,實現整體性能的優化[50]。

胎體層設計對結構傳遞噪音的影響特別顯著。結構傳遞噪音是透過輪胎-輪圈-懸吊系統傳遞到車身內部的噪音,在低頻段(20-200 Hz)對車內噪音貢獻很大。胎體剛性和阻尼直接影響輪胎向輪圈的力傳遞特性,較軟且高阻尼的胎體可以隔離更多的振動,減少傳遞到懸吊系統的力,從而降低結構傳遞噪音。Cao 等人(2018)研究了載荷狀態下輪胎結構-聲學耦合模型的力傳遞特性,發現透過優化胎體和胎側的剛性匹配,可以顯著降低特定頻率下的力傳遞,實現結構噪音的有效控制[51]。

胎體層設計的優化通常採用有限元分析和實驗驗證相結合的方法。有限元模型包含簾線的各向異性特性、橡膠的超彈性和粘彈性行為、以及不同材料層之間的黏合特性。透過模態分析可以預測輪胎的固有頻率和振型,透過頻率響應分析可以預測輪胎在不同激勵下的振動響應,透過聲學分析可以預測振動產生的聲輻射。這些模擬結果指導設計改進,減少物理原型的數量,加快開發進度。實驗驗證包括模態測試、振動傳遞函數測量和噪音測試,用於驗證模擬結果的準確性並評估最終產品性能[52]。

胎體層設計面臨的挑戰包括多性能目標的平衡、製造工藝的限制和成本控制。降噪優化的胎體設計可能需要使用特殊材料、增加製造步驟或提高製造精度,這些都會增加成本。在競爭激烈的輪胎市場中,成本是重要的考慮因素,因此降噪設計必須在性能提升和成本增加之間找到平衡點。此外,胎體設計的改動可能影響輪胎的其他關鍵性能如承載能力、高速性能、耐久性等,需要進行全面的性能評估和驗證。未來的胎體設計將更多地利用先進材料(如高性能纖維、納米複合材料)和智能製造技術(如 3D 編織、變密度鋪層),實現更精細的性能調控和更好的降噪效果。

9.3.2 帶束層優化 (Belt Layer Optimization)

帶束層位於胎體層外側、胎面橡膠內側,是子午線輪胎的關鍵結構元件。帶束層通常由 2-4 層鋼絲簾線或芳綸(aramid)纖維簾線組成,簾線相對於輪胎圓周方向呈小角度排列(通常 15-25 度),且



相鄰層的簾線角度相反,形成交叉結構。帶束層的主要功能是約束胎面變形,提供環向剛性,抵抗離心力,保持接地形狀穩定,同時傳遞驅動和制動力矩。從降噪角度,帶束層對輪胎的振動特性和噪音產生機制有重要影響,是結構降噪設計的關鍵優化對象[53]。

帶束層對噪音的影響機制是多方面的。首先,帶束層剛性直接影響胎面的接地壓力分佈和花紋塊的變形模式,進而影響花紋塊撞擊噪音和空氣泵浦噪音的產生強

度。較高的帶束層剛性可以使接地壓力分佈更加均勻,減少花紋塊進入和離開接地區時的衝擊力,從而降低撞擊噪音。其次,帶束層的振動特性決定了輪胎對路面激勵的響應。帶束層與胎體層共同構成輪胎的振動系統,其固有頻率、阻尼比和模態振型決定了在不同頻率下的振動幅度。最後,帶束層的質量分佈影響輪胎的轉動慣量和不平衡特性,這些因素也會間接影響輪胎的噪音和振動性能[54]。

帶束層簾線角度是重要的設計參數,對輪胎性能有多方面影響。較小的簾線角度(15-18 度)提供更高的環向剛性,有利於高速穩定性和操控性能,但可能增加振動傳遞和噪音;較大的簾線角度(22-25 度)提供較柔和的特性,有利於舒適性和降噪,但可能降低操控響應。Kim(2003)的研究表明,增加帶束角度和輪胎半徑可以改變聲輻射特性,對結構傳遞噪音有顯著影響[33]。現代設計通常採用優化算法在多個性能目標之間尋找最佳簾線角度,或者採用變角度設計,即在帶束層不同區域使用不同的簾線角度,實現局部優化。

帶束層寬度也是影響噪音的重要因素。帶束層寬度決定了其覆蓋範圍,影響胎面剛性的分佈。較寬的帶束層提供更大範圍的剛性約束,有利於接地壓力均勻性和高速性能,但可能增加輪胎質量和剛性不連續性。較窄的帶束層則在胎肩區域留下較大的柔性過渡區,有利於舒適性和降噪,但可能影響操控性能和耐久性。一些設計採用分段式帶束層,在胎冠中央使用較寬的主帶束層保證剛性,在兩側添加較窄的輔助帶束層進行局部補強,實現剛性和柔性的區域化配置[55]。

帶束層材料的選擇對阻尼特性有重要影響。傳統的鋼絲帶束層具有極高的強度和剛性,但阻尼較低,振動衰減較慢。芳綸纖維帶束層(如 Kevlar)具有與鋼絲相當的強度,但重量輕且



阻尼較高,能夠更有效地耗散振動能量,降低噪音。Michelin、Continental 等製造商在一些高端輪胎中採用混合帶束層結構,結合鋼絲和芳綸纖維的優點,在保證強度的同時提供更好的降噪性能。此外,帶束層覆蓋橡膠的配方設計也影響阻尼特性,使用高阻尼橡膠可以增加層間能量耗散,降低振動傳遞[56]。

帶束層的層數和疊層結構也是優化對象。傳統設計通常採用 2 層交叉結構,現代高性能輪胎可能增加到 3-4 層以提供額外的剛性和耐久性。從降噪角度,增加帶束層數可以提供更複雜的振動模態和更高的結構阻尼,但同時也增加質量和滾動阻力。一些研究探索了網格化帶束層結構(meshed belt layer structure),即在簾線排

列中引入週期性的空隙或變密度區域,這種結構可以在保持足夠強度的同時降低整體剛性,改善接地特性,據報導可以優化輪胎的接地性能並可能對降噪有益[57]。帶束層邊緣的設計是近年來的研究熱點。帶束層邊緣是應力集中的部位,也是振動能量從胎冠向胎肩傳遞的關鍵路徑。銳利的帶束層邊緣會造成剛性突變,產生強烈的振動和噪音。優化設計採用多種策略:帶束層端部削薄(tapered ending),即在帶束層末端逐漸減少簾線密度或層數,實現剛性的平滑過渡;帶束層端部包邊(turned-up ending),即將帶束層末端向上或向下彎折,改變力傳遞路徑,減少應力集中;在帶束層邊緣區域插入高阻尼橡膠層或阻尼墊片,吸收振動能量,阻斷振動傳遞。這些設計改進已在商業化產品中得到應用,效果顯著[58]。

帶束層優化設計通常需要考慮與輪胎空腔共振的耦合效應。輪胎空腔共振是輪胎內部空氣在特定頻率(通常 200-250 Hz)下產生的強烈共振現象,是車內噪音的重要來源。帶束層的振動特性與空腔聲學特性相互耦合,帶束層振動可以激發空腔共振,反之空腔壓力波動也會驅動帶束層振動。透過優化帶束層的剛性和阻尼,可以減少其對空腔共振的激發,或者提高對空腔壓力波動的隔離能力,從而降低輪胎空腔共振噪音。一些研究利用結構-聲學耦合模型研究這種交互作用,為帶束層優化設計提供理論指導[59]。

帶束層優化面臨的主要挑戰是多性能目標之間的衝突。提高帶束層剛性有利於高速性能



和操控性,但可能損害舒適性和增加噪音;降低剛性有利於降噪和舒適性,但可能影響安全性和耐久性。使用高性能材料如芳綸纖維可以改善降噪效果,但成本顯著增加。帶束層設計的改動可能需要相應調整胎體、胎面等其他部件的設計,增加開發的複雜度。因此,帶束層優化需要採用系統工程方法,利用多目標優化算法在多個性能維度之間尋求帕累托最優解,並透過實驗驗證確保各項性能指標滿足要求。未來的帶束層設計將更多地利用先進製造技術如 3D 編織、變角度鋪層、智能材料等,實現更精細的性能調控和更好的綜合性能。

9.3.3 胎側設計 (Sidewall Design)

胎側是連接胎面和胎圈的輪胎側壁部分,在輪胎結構中起著支撐、緩衝和傳遞力的作用。胎側的設計對輪胎的舒適性、操控性和噪音特性都有重要影響。從結構角度,胎側包含胎體簾線、內外襯層橡膠以及可能的補強層,其剛性遠低於帶束層覆蓋的胎冠部分,是輪胎的柔性區域。從動力學角度,胎側在輪胎滾動和承載過程中發生明顯的週期性變形,這種變形以及相關的應變能變化是產生振動和噪音的

重要原因。胎側設計的降噪優化主要集中在調整剛性分佈、增加阻尼特性、優化幾何形狀等方面[60]。

胎側對輪胎噪音的影響機制涉及多個方面。首先,胎側剛性影響輪胎的整體振動特性,特別是側向和徑向振動模態。較軟的胎側提供更好的舒適性和路面隔離效果,能夠吸收路面不平度激勵,減少高頻振動傳遞到車身。然而,過軟的胎側可能降低輪胎的穩定性和操控響應,且在高速行駛時容易產生駐波(standing wave)現象,反而增加振動和噪音。因此,存在一個最佳的胎側剛性範圍。其次,胎側是振動從胎面向輪圈傳遞的主要路徑,其阻尼特性決定了振動傳遞的強度。高阻尼胎側可以耗散更多的振動能量,減少傳遞到懸吊系統的振動,降低結構傳遞噪音。最後,胎側的幾何形狀影響應力分佈和變形模式,進而影響振動特性和噪音[61]。

胎側橡膠配方是影響阻尼特性的關鍵因素。胎側橡膠需要滿足多種性能要求:良好的耐疲勞性以承受週期性變形;足夠的耐候性和耐臭氧性以抵抗環境侵蝕;適當的剛性以支撐輪胎結構;以及較高的阻尼以耗散振動能量。傳統的胎側橡膠配方通常以天然橡膠(NR)或順丁橡膠(BR)為基礎,添加炭黑作為補強填料。為了提高阻尼性能,可以增加丁基橡膠(IIR)或丁苯橡膠(SBR)的比例,這些合成橡膠具有較高的損耗因子,能夠更有效地耗散能量。然而,高阻尼配方通常也意味著較高的生熱和較低的耐疲勞性,需要在阻尼和耐久性之間權衡。一些先進設計採用分層配方技術,胎側內層使用高阻尼配方以降噪,外層使用高耐候配方以保護,實現性能的最佳組合[62]。

胎側幾何形狀的設計對振動特性有重要影響。

Graham(2013)發展了精確的二維胎側模型來研究胎側振動特性,結果表明胎側的截面形狀、厚度分佈和曲率對振動模態有顯著影響[63]。現代輪胎設計利用有限元分析優化胎側輪廓,目標是實現應力分佈均勻化、避免應力集中、優化變形模式。一些設計採用變厚度胎側,即胎側厚度在不同



位置有所不同,在應力集中區域增加厚度以提高耐久性,在其他區域減少厚度以降低質量和生熱。胎側外表面的花紋和裝飾線也有功能意義,除了美觀作用外,適當的表面紋理可以改變空氣流動模式,降低空氣動力學噪音[64]。

胎側補強層的設計是改善降噪性能的有效手段。一些高性能輪胎或缺氣保用輪胎(run-flat tire)在胎側內部設置額外的補強層,通常由高模量橡膠或纖維增強橡膠製成。這些補強層可以增加胎側剛性,改善操控性能,同時也能改變振動傳遞特性。

從降噪角度,補強層可以阻斷振動從胎冠向胎圈的傳遞,特別是如果補強層採用高阻尼材料,可以顯著降低結構傳遞噪音。然而,補強層會增加輪胎質量和滾動阻力,且可能損害舒適性,因此需要精細設計以平衡各項性能。一些研究探索了在胎側嵌入阻尼層或隔振層的可能性,這些特殊層使用高損耗材料,專門用於耗散振動能量,類似於建築物中的阻尼器[65]。

胎側與胎冠、胎圈的連接區域是振動傳遞的關鍵路徑,也是設計優化的重點。胎肩區域(胎側與胎冠的過渡區)前面已經討論過。胎圈區域(胎側與胎圈的連接區)同樣重要,這裡是輪胎與輪圈的接觸部位,是振動傳入懸吊系統的入口。胎圈區域通常包含鋼絲胎圈芯、胎圈包布、三角膠等元件,形成高剛性的錨固結構。從降噪角度,可以在胎圈區域設計緩衝層或阻尼層,在高剛性的胎圈芯和相對柔性的胎側之間插入阻尼材料,減少振動傳遞。一些專利披露了在胎圈區域使用特殊形狀的橡膠墊片或多層結構來優化力傳遞特性,實現降噪效果[66]。

胎側對輪胎空腔共振的影響也不容忽視。如前所述,輪胎空腔共振是車內噪音的重要來源。胎側作為空腔的邊界之一,其振動特性影響空腔聲學特性。Choi(2011)研究了空腔模態對輪胎表面振動的影響,發現胎側和胎面的振動與空腔聲學模態存在強烈耦合[67]。透過增加胎側阻尼,可以減少空腔壓力波動對胎側的激勵效應,或者增加胎側對空腔振動的耗散作用,從而降低空腔共振噪音。一些研究提出在胎側內表面附著吸音材料或阻尼層的方案,雖然製造複雜度較高,但可以有效降低空腔共振[68]。

胎側設計優化的數值模擬方法包括有限元分析、模態分析和結構-聲學耦合分析。有限元模型需要精確描述胎側橡膠的非線性粘彈性行為、大變形特性以及與簾線의 交互作用。模態分析用於識別胎側的固有頻率和振型,評估設計改動對振動特性的影響。結構-聲學耦合分析則考慮胎側振動與空腔聲學的交互作用,預測空腔共振特性。這些模擬工具使設計師能夠在虛擬環境中評估多種胎側設計方案,快速篩選出最優方案進行原型驗證[69]。



胎側設計優化面臨的挑戰包括多性能目標的衝突、製造工藝的限制和成本控制。高阻尼胎側配方可能影響耐久性和滾動阻力;複雜的胎側結構(如多層設計、變厚度設計)增加製造複雜度和成本;胎側補強層改善操控性能但損害舒適性。因此,胎側設計需要採用多目標優化方法,綜合考慮降噪、舒適性、操控性、耐久性、滾動阻力等多個目標,並透過實驗驗證確保各項性能達標。未來的胎側設計將更多地

利用智能材料(如形狀記憶聚合物、磁流變彈性體)和先進製造技術(如 3D 打印、變剛度結構),實現自適應性能調控和更好的綜合性能。

9.4 材料選擇與配方 (Material Selection and Formulation)

輪胎材料的選擇和配方設計對噪音性能有根本性影響。輪胎是一個複雜的複合材料系統,包含多種橡膠基體、補強填料、加工助劑、硫化劑和功能添加劑。不同部位的橡膠組分需要滿足不同的性能要求:胎面需要耐磨、抓地力好、滾動阻力低;胎側需要耐疲勞、耐



候性好;內襯層需要氣密性好;各個部位都需要適當的阻尼特性以降低噪音。材料的粘彈性行為決定了輪胎在動態載荷下的響應特性,包括剛性、阻尼、能量耗散和振動傳遞,這些特性直接影響噪音的產生、傳遞和輻射。因此,材料選擇與配方設計是輪胎降噪技術的基礎,透過優化材料體系可以從根本上改善輪胎的聲學性能[70][71]。

橡膠材料的粘彈性特性是理解其降噪機制的關鍵。橡膠在動態載荷下表現出粘性(viscous)和彈性(elastic)的雙重特性:彈性使橡膠能夠儲存變形能並在卸載後恢復;粘性則導致能量耗散,表現為遲滯現象和阻尼。在頻率域內,橡膠的複數模量可以表示為 $E^* = E' + iE''$,其中 E' 是儲能模量(storage modulus),代表彈性特性; E'' 是損耗模量(loss modulus),代表粘性特性;損耗因子 $\tan \delta = E''/E'$ 是衡量材料阻尼能力的指標,數值越大表示阻尼越高、能量耗散越多。對於輪胎降噪,理想的材料應該在相關頻率範圍(100-5000 Hz)內具有較高的損耗因子,能夠有效耗散振動能量,同時保持足夠的模量以維持結構完整性[72]。

橡膠材料的粘彈性行為依賴於溫度和頻率,這種依賴性可以用時間-溫度等效原理(time-temperature superposition principle)描述。在較高溫度或較低頻率下,橡膠表現出較軟、較高阻尼的



特性;在較低溫度或較高頻率下,橡膠變得較硬、阻尼降低。這種特性對輪胎設計有重要啟示:輪胎在不同工作條件下(不同速度、溫度、路面)的噪音性能可能有顯著差異。設計時需要考慮典型使用條件,確保材料在目標工作範圍內具有良好的降噪性能。Maghami(2016)對含矽橡膠胎面配方進行了系統研究,建立了動態力學性能主曲線(master curve),揭示了材料在寬頻率範圍內的粘彈性特性與輪胎性能的關係[73]。

9.4.1 橡膠配方 (Rubber Compound)

橡膠配方設計是輪胎材料技術的核心,決定了輪胎的各項性能表現。典型的輪胎橡膠配方包含多種成分:橡膠基體(如天然橡膠、丁苯橡膠、丁二烯橡膠等)提供基本的彈性和力學性能;補強填料(如炭黑、二氧化矽)增強橡膠的強度、耐磨性和模量;硫化體系(如硫磺、促進劑)形成交聯網絡,將線性分子鏈連接成三維網絡結構;加工助劑(如油類、軟化劑)改善加工性能;防老劑提高耐候性和耐久性。這些成分的種類、用量和相互作用共同決定了配方的綜合性能,包括降噪相關的粘彈性特性[74]。

橡膠基體的選擇是配方設計的首要決策。天然橡膠(NR)具有優異的力學性能、低滾動阻力和良好的耐疲勞性,但阻尼相對較低,常用於胎面基部和胎體橡膠。丁苯橡膠(SBR)具有較高的阻尼和耐磨性,但滾動阻力較高,常用於胎面表層以提供抓地力。丁二烯橡膠(BR)具有優異的耐磨性和低溫柔韌性,常與其他橡膠並用以改善性能。丁基橡膠(IIR)具有極低的氣體滲透率和較高的阻尼,用於內襯層和降噪應用。現代輪胎配方通常採用多種橡膠並用,利用不同橡膠的優勢實現性能的最佳組合。從降噪角度,增加高阻尼橡膠(如 SBR、IIR)的比例可以提高整體阻尼水平,但需要注意對其他性能如滾動阻力、耐久性的影響[75]。



補強填料是影響橡膠性能的關鍵因素,特別是二氧化矽(silica)在現代輪胎配方中的應用具有革命性意義。傳統輪胎主要使用炭黑作為填料,炭黑提供良好的補強效果和耐磨性,但也增加滾動阻力和生熱。1990 年代 Michelin 開發的綠色輪胎(green tire)技術採用二氧化矽作為主要填料,結合硅烷偶聯劑實現矽與橡膠的化學鍵合,大幅降低了滾動阻力而不犧牲濕地抓地力。從降噪角度,二氧化矽填充的橡膠具有不同的粘彈性特性:在低應變下(對應於滾動阻力)具有較低的損耗,在高應變下(對應於濕地抓地力和噪音吸收)具有較高的損耗。這種非線性特性有利於降噪,因為振動通常涉及較高的應變水平[76][77]。

二氧化矽的類型、粒徑、表面積和用量都影響橡膠的性能。高分散性二氧化矽(highly dispersible silica)具有特殊的表面處理和粒徑分佈,能夠在橡膠基體中均勻分散,避免填料團聚,提供更好的補強效果和更穩定的性能。研究表明,提高二氧化矽的用量可以改善濕地抓地力,但過高用量會增加混煉難度和滾動阻力。存在一個最佳的二氧化矽用量範圍(通常 60-80 phr),在此範圍內可以實現濕地性能、滾動阻力和耐磨性的良好平衡。二氧化矽配方的粘彈性特性也更有利於降噪,因為其較高的高頻阻尼能夠更有效地耗散振動能量[78][79]。

硅烷偶聯劑是二氧化矽配方的關鍵成分,其作用是在二氧化矽表面和橡膠分子之間建立化學鍵合,克服二氧化矽的高表面能和極性,實現良好的分散和補強效果。常用的硅烷偶聯劑包括雙-(三乙氧基矽丙基)四硫化物(TESPT,Si69)和雙-(三乙氧基矽丙基)二硫化物(TESPD,Si266)。偶聯劑的類型和用量需要與二氧化矽匹配,以實現最佳的反應效率和性能表現。從降噪角度,偶聯劑提高了填料-橡膠界面的結合強度,減少了界面滑移和能量損失,使材料的阻尼特性更加穩定和可控[80]。

混合填料體系是當前研究的熱點,即同時使用炭黑和二氧化矽,或者添加第三種填料如粘土、石墨烯、納米管等,利用不同填料的協同效應進一步優化性能。研究表明,少量添加第二種填料(如在二氧化矽主體中添加 10-20%的炭黑)可以顯著



改善加工性能和某些物理性能,而不明顯損害滾動阻力和降噪特性。納米填料如納米粘土、碳納米管、石墨烯等具有極高的比表面積和獨特的結構,能夠在很低的用量下提供顯著的補強效果,同時改善阻尼特性,是未來高性能輪胎配方的發展方向[81]。

配方設計需要考慮多性能目標的平衡,這通常稱為"魔法三角"(magic triangle)或"魔法矩形"(magic rectangle)問題,即滾動阻力、濕地抓地力和耐磨性(有時加上降噪性能)之間存在相互制約關係,改善一個性能往往會損害另一個性能。例如,提高配方的阻尼可以改善濕地抓地力和降噪性能,但會增加滾動阻力和生熱;增加填料用量可以提高耐磨性,但會增加硬度和噪音。現代配方設計採用多目標優化方法,利用實驗設計(DOE)和統計分析工具系統地探索配方空間,尋找帕累托最優解。計算機模擬如分子動力學(MD)、有限元分析(FEA)也被用於預測配方性能,指導實驗設計[82]。

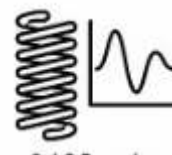
橡膠配方對降噪性能的影響已在多項研究中得到驗證。較高的損耗因子能夠更有效地耗散振動能量,降低振動幅度和噪音輻射;較軟的配方(較低的模量)能夠更好地適應路面微觀紋理,減少撞擊力和噪音產生;適當的非線性粘彈性特性使橡膠在低速低應變下保持高效率(低滾動阻力),在高速高應變下提供高阻尼(低噪音)。Mohammadi 和 Ohadi(2021)的研究表明,透過優化材料特性可以降低胎面衝擊噪音約 80%,整體噪音降低約 2 dB(A)[3]。然而,配方優化需要考慮整個產品生命週期,包括不同磨耗狀態下的性能,因為橡膠配方會隨著磨耗而暴露新的表面,性能可能發生變化。

未來橡膠配方技術的發展方向包括:生物基橡膠和填料的應用,以提高永續性;智能材料如自修復橡膠、變剛度材料的開發;納米技術和分子設計方法的應用,實現性能的精準調控;數字化配方設計平台的建立,整合材料數據庫、模擬工具和機器學習算法,加速配方開發過程。這些技術將推動輪胎材料性能的持續提升,為實現更安靜、更安全、更環保的輪胎提供材料基礎。

9.4.2 阻尼材料 (Damping Materials)

阻尼材料是專門設計用於耗散振動能量、降低振動幅度和噪音的材料。在輪胎應用中,阻尼材料可以作為獨立的功能層嵌入輪胎結構,也可以透過配方優化使橡膠本身具有更高的阻尼特性。阻尼材料的基本原理是利用材料的粘彈性或其他能量耗散機制,將振動的機械能轉化為熱能散失,從而減少振動的傳遞和持續時間。高性能阻尼材料在輪胎降噪中的應用是近年來的研究熱點,展現出良好的應用前景[83]。

阻尼材料的關鍵性能指標是損耗因子(loss factor, $\tan \delta$),定義為損耗模量與儲能模量的比值。損耗因子越高,材料的阻尼能力越強,能夠耗散的能量比例越大。一般橡膠材料的損耗因子在 0.1-



0.3 之間,而高阻尼材料可以達到 0.5 甚至更高。然而,高損耗因子通常伴隨著較高的生熱和較低的彈性,可能影響材料的耐久性和力學性能。因此,阻尼材料的設計需要在高阻尼和其他性能之間尋求平衡,或者透過複合結構設計實現局部高阻尼而不影響整體性能[84]。

聚合物基阻尼材料是最常見的類型,透過調整聚合物分子結構和配方實現高阻尼特性。丁基橡膠(IIR)和鹵化丁基橡膠(HIIR)由於其分子鏈段運動性好,表現出較高的阻尼,常用於需要振動隔離的應用。丙烯酸橡膠和氫化丁腈橡膠也具有較高的阻尼,且耐熱性和耐油性好,適用於特殊環境。在配方設計中,可以透過增加增塑劑用量、選用高阻尼樹脂、添加阻尼填料等方式提高損耗因子。一些研究開發了專用的高阻尼橡膠配方,損耗因子可達 0.5-1.0,在輪胎胎側或緩衝層中應用,顯著降低了振動傳遞和噪音[85]。

粘彈性阻尼材料是一類特殊設計的複合材料,通常由約束阻尼層(constrained damping layer)結構組成,即在兩層剛性材料之間夾入一層高阻尼粘彈性材料。當結構振動時,剪切變形發生在粘彈性層中,產生顯著的能量耗散。這種結構廣泛應用於航空航天、汽車等領域的振動控制。在輪胎應用中,可以在胎側內表面或帶束層下方設置約束阻尼結構,利用輪胎滾動過程中的週期性變形產生的剪切應變來

耗散能量。雖然這種設計增加了結構複雜度和質量,但降噪效果顯著,在一些高端輪胎中已有應用[86]。

磁流變彈性體(magnetorheological elastomer, MRE)是一種智能阻尼材料,由橡膠基體和分散其中的磁性顆粒組成。在外加磁場作用下,磁性顆粒排列成鏈狀結構,材料的剛性和阻尼特性發生變化,可以實時調控。移除磁場後,材料恢復到初始狀態。MRE 在輪胎降噪中的應用前景在於可以根據行駛條件(速度、路面、載荷)動態調整輪胎的阻尼特性,實現自適應降噪。例如,在高速行駛時增加阻尼以降低噪音,在低速時減少阻尼以改善舒適性。雖然目前 MRE 在輪胎中的應用仍處於研究階段,面臨成本、可靠性和控制系統複雜度等挑戰,但代表了未來智能輪胎的發展方向[87]。

相變材料和形狀記憶材料也在探索應用於輪胎降噪。相變材料利用相變過程吸收或釋放大量能量的特性,可以作為熱管理和振動吸收裝置。形狀記憶聚合物在特定溫度下可以改變形狀和剛性,可用於溫度自適應的阻尼結構。雖然這些材料在輪胎中的應用還非常有限,但展現出獨特的功能特性,值得進一步研究[88]。



阻尼材料的應用位置是設計的關鍵考慮因素。將阻尼材料應用在振動幅度大、應變能密度高的部位可以獲得最大的降噪效果。對於輪胎,胎肩區域、胎側彎曲最大處、帶束層邊緣等是應力集中和變形劇烈的部位,也是阻尼材料的優選應用位置。有限元分析可以預測輪胎在滾動過程中各部位的應變能分佈,指導阻尼材料的優化配置。一些研究還探索了在花紋溝槽內或胎面橡膠中局部應用阻尼材料,直接在噪音產生源頭進行控制[89]。

阻尼材料的性能需要在輪胎的實際工作條件下評估,包括溫度、頻率、應變幅度等因素的影響。輪胎在行駛過程中溫度可能從環境溫度升高到 60-80°C 甚至更高,溫度變化會顯著改變橡膠的粘彈性特性。阻尼材料需要在整個工作溫度範圍內保持較高的損耗因子,這要求材料的玻璃化轉變溫度(T_g)在適當範圍,或者採用多組分設計實現寬溫度範圍的高阻尼。動態力學分析(DMA)是評估阻尼材料性能的主要方法,透過測量不同溫度和頻率下的儲能模量、損耗模量和損耗因子,全面表徵材料的粘彈性特性[90]。

阻尼材料在輪胎中的應用面臨一些挑戰。首先是成本問題,高性能阻尼材料通常比常規橡膠更昂貴,需要評估成本增加與性能提升之間的性價比。其次是製造工藝的兼容性,某些阻尼材料可能需要特殊的加工條件或無法與現有製程良好整合。

再次是耐久性問題,阻尼材料在輪胎的苛刻工作環境下(高應變、高溫、氧化)需要保持長期穩定的性能。最後是系統集成問題,阻尼材料的應用需要與輪胎整體設計協調,避免對其他性能如承載能力、高速性能產生負面影響。因此,阻尼材料的開發和應用需要多學科協作和系統工程方法[91]。

未來阻尼材料技術的發展方向包括:開發低成本高性能的阻尼配方,降低應用門檻;探索新型阻尼機制如摩擦阻尼、微結構阻尼等;發展智能阻尼材料,實現自適應性能調控;建立阻尼材料數據庫和設計工具,支持快速選材和優化。隨著材料科學和製造技術的進步,阻尼材料在輪胎降噪中的應用將更加廣泛和有效,為實現超靜音輪胎提供重要的技術支撐。

9.4.3 填充材料 (Filler Materials)

填充材料在橡膠配方中起著至關重要的作用,不僅提供機械補強效果,還顯著影響橡膠的粘彈性特性、加工性能和最終產品的各項性能包括降噪性能。輪胎橡膠中使用的填料主要包括補強性填料(如炭黑、二氧化矽)和功能性填料(如粘土、碳酸鈣、雲母等)。填料的類型、粒徑、比表面積、表面化學性質、用量以及在橡膠基體中的分散狀態,都會影響複合材料的力學性能和阻尼特性,進而影響輪胎的噪音表現[92]。



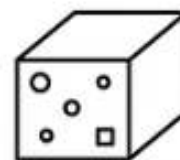
炭黑是傳統輪胎配方中最重要填料,已有超過百年的應用歷史。炭黑透過物理吸附和化學作用與橡膠分子相互作用,形成填料網絡和橡膠-填料界面,顯著提高橡膠的強度、模量和耐磨性。炭黑的補強效果主要取決於其粒徑和結構度:粒徑越小(比表面積越大),補強效果越強;結構度越高(聚集體越複雜),補強效果越強。從降噪角度,炭黑填充橡膠的阻尼特性受填料網絡的影響:在低應變下,填料網絡完整,橡膠表現出較高的模量和較低的阻尼;在高應變下,填料網絡部分破壞(Payne效應),模量下降,阻尼增加。這種非線性特性可以被利用來優化降噪性能,使橡膠在振動的高應變條件下提供較高的能量耗散[93]。

二氧化矽作為綠色輪胎技術的核心填料,前面已經討論過其在降低滾動阻力和改善濕地抓地力方面的優勢。從降噪角度,二氧化矽填充橡膠具有獨特的粘彈性特性。由於二氧化矽表面的矽羟基與硅烷偶聯劑的反應形成化學鍵合,填料-橡膠界面的相互作用機制與炭黑不同,導致不同的應變依賴性和頻率依賴性。研究表明,二氧化矽配方在高頻和高應變條件下通常表現出較高的損耗因子,這對於輪胎降噪是有利的,因為振動噪音主要涉及中高頻成分和較高的應變水平。此外,二氧化

矽的較低滾動阻力意味著較低的生熱,有助於保持輪胎的溫度穩定性,避免因過熱導致的性能退化[94][95]。

二氧化矽的類型對性能有重要影響。高分散性二氧化矽(HDS)經過特殊的表面處理和粒徑控制,能夠在橡膠中更均勻地分散,避免填料團聚,提供更一致的性能。研究發現,使用 HDS 可以改善胎面的物理性能、撕裂能量和耐磨性,同時保持低滾動阻力和良好的濕地抓地力。從降噪角度,良好的二氧化矽分散可以減少材料的不均勻性,降低應力集中,改善振動特性。Bhattacharyya 等人(2019)的研究表明,二氧化矽的分散性對輪胎胎面的綜合性能有顯著影響,良好分散可以實現噪音、磨耗和抓地力的更好平衡[96]。

混合填料系統是當前研究的重點,即在配方中同時使用兩種或更多種填料,利用不同填料的協同效應優化性能。最常見的是炭黑-二氧化矽混合系統,既利用炭黑的良好加工性和補強效果,又利用二氧化矽的低滾動阻力和高濕抓地力。研究表明,在二氧化矽主體中添加 10-30%的炭黑可以改善加工性能和導電性(避免靜電積累),而不顯著損害滾動阻力和濕地性能。從降噪角度,混合填料系統可以提供更寬的粘彈性調控範圍,透過調整兩種填料的比​​例和分散狀態,可以精細調整材料的阻尼特性和頻率依賴性[97]。



納米填料的應用是填料技術的前沿方向。納米粘土、碳納米管、石墨烯等納米材料具有極高的比表面積和獨特的結構,能夠在很低的用量下(通常<10 phr)提供顯著的性能提升。例如,添加少量納米粘土可以提高橡膠的模量和阻隔性,同時可能改善阻尼特性。碳納米管和石墨烯不僅提供機械補強,還可以改善導電性和導熱性,有利於輪胎的熱管理。然而,納米填料的應用面臨分散性挑戰,由於粒徑極小和高比表面積,納米填料容易團聚,難以在橡膠中均勻分散。需要採用特殊的表面修飾、分散技術和加工工藝來實現良好的分散效果[98]。

功能性填料如雲母、滑石粉、硫酸鋇等在輪胎中也有特定應用。這些填料通常不提供顯著的機械補強,但可以改善加工性、降低成本或提供特殊功能。從降噪角度,某些功能性填料可能透過改變材料的密度、剛性分佈或界面特性來影響振動和聲學性能。例如,高密度填料如硫酸鋇可以增加材料的質量阻尼,利用慣性效應減少振動幅度;片狀填料如雲母可以形成定向排列的層狀結構,影響應力傳遞和振動傳播方向。這些效應目前還處於研究階段,未來可能在特定降噪應用中發揮作用[99]。

填料表面改性是提高填料性能的重要手段。除了硅烷偶聯劑用於二氧化矽改性外,還可以使用其他表面處理劑如鈦酸酯、鋁酸酯、脂肪酸等來改善填料與橡膠的相容性和界面黏合。表面改性可以降低填料表面能,減少填料-填料相互作用,促進分散,改善加工性能。從降噪角度,良好的界面黏合可以提高能量耗散效率,改善阻尼特性。一些研究探索了功能化填料的開發,即在填料表面接枝特定的功能基團或聚合物鏈,實現填料性能的定製化設計[100]。

填料網絡結構對橡膠的動態力學性能有重要影響。填料顆粒在橡膠基體中不是孤立存在的,而是透過接觸、吸附和橋接形成連續或半連續的網絡結構。填料網絡與橡膠交聯網絡共同構成複合材料的結構



基礎,決定了材料的力學響應。在動態載荷下,填料網絡會發生可逆的破壞和重建過程,表現為 Payne 效應(模量隨應變幅度增加而降低)和 Mullins 效應(首次加載後模量軟化)。這些非線性效應對輪胎的動態性能包括降噪性能有重要影響,可以透過填料類型、用量、分散狀態和表面處理來調控[101]。

填料對輪胎降噪性能的影響是多方面的,需要從材料粘彈性、結構設計和系統性能等多個層面綜合考慮。高性能填料系統可以提供適當的模量和較高的阻尼,改善胎面與路面的接觸特性,減少衝擊力和噪音產生;同時,填料影響橡膠的生熱和溫度穩定性,間接影響噪音性能;此外,填料還影響輪胎的磨耗特性,而磨耗會改變花紋深度和表面粗糙度,進而影響噪音隨使用時間的變化。因此,填料選擇和配方優化需要考慮輪胎的全生命週期性能表現[102]。

未來填料技術的發展方向包括:開發多功能納米複合填料,同時提供補強、阻尼和其他功能;發展永續填料如生物基填料、廢橡膠粉等,減少環境影響;建立填料結構-性能關係的預測模型,利用計算模擬和機器學習加速填料開發;探索新型填料如金屬有機框架(MOF)、氣凝膠等先進材料在輪胎中的應用。這些技術將推動輪胎材料性能的持續提升,為實現更安靜、更安全、更永續的輪胎提供材料基礎。

由於內容篇幅龐大,我將繼續在下一部分撰寫 9.5、9.6 節以及參考文獻。讓我繼續完成剩餘部分。

9.5 降噪裝置 (Noise Reduction Devices)

除了透過花紋設計、結構優化和材料改進等被動方法降低輪胎噪音外,在輪胎或輪圈上安裝專門的降噪裝置是近年來發展迅速的技術路線。這些裝置通常針對特定的噪音機制,如輪胎空腔共振噪音,透過聲學原理如吸音、共振抑制或相位抵消來降低噪音水平。降噪裝



置的優勢在於可以在不改變輪胎基本設計的情況下實現顯著的降噪效果,且可以作為模組化方案應用於不同型號的輪胎產品。主要的降噪裝置包括胎內吸音材料、輪圈共鳴器以及其他創新裝置[103][104]。

輪胎空腔共振噪音是車內噪音的重要來源,其物理機制是輪胎內部空氣腔體在特定頻率下產生的聲學共振。輪胎空腔可以被視為一個環形封閉腔體,其共振頻率主要取決於腔體的容積和幾何形狀。對於典型的乘用車輪胎,第一階空腔共振頻率通常在 200-250 Hz 範圍內,這正好處於人耳敏感且難以被其他車內噪音掩蔽的頻段。當輪胎在路面上滾動時,路面激勵、花紋塊撞擊或胎面振動都可能激發空腔共振,產生低頻的"嗡嗡聲"(booming noise),嚴重影響駕駛舒適性。研究表明,空腔共振可使車內噪音增加 10-15 dB,因此抑制空腔共振成為輪胎降噪的重要目標 [105][106]。

9.5.1 胎內吸音材料 (Inner Tire Sound Absorbing Material)

胎內吸音材料是當前最成功的輪胎降噪裝置,已被多家主要輪胎製造商商業化應用。其基本原理是在輪胎內表面黏附一層多孔吸音材料,通常是聚氨酯泡棉(polyurethane foam),利用材料的多孔結構吸收聲能,抑制輪胎空腔內的聲波傳播和共振,從而降低傳入車內的噪音。這項技術簡單有效,且對輪胎的其他性能影響很小,因此得到廣泛應用。Continental 的 ContiSilent、Michelin 的 Acoustic Technology、Pirelli 的 PNCS(Pirelli Noise Cancelling System)和 Goodyear 的 SoundComfort Technology 都是基於這一原理的商業化技術[107][108]。



Continental 的 ContiSilent 技術是行業內最早商業化的胎內吸音技術之一。該技術使用特製的聚氨酯泡棉,厚度約 5-10mm,黏附在輪胎內表面的胎冠區域。泡棉具有開孔結構,當聲波進入泡棉的孔隙結構時,在孔壁和內部通道中發生摩擦和粘性損耗,將聲能轉化為熱能散失。根據 Continental 的測試數據,ContiSilent 技術可以降低車內噪音高達 9 dB(A),平均降低約 3-5 dB,相當於主觀噪音感受降低約 50%。這種降噪效果在各種路面條件下都很穩定,對於粗糙路面的效果尤為明顯。泡棉材料經過特殊設計,能夠承受輪胎運轉時的離心力、溫度變化和機械應力,確保長期使用的可靠性[109]。

Michelin 的 Acoustic Technology 採用類似的原理,但在泡棉的設計和黏附工藝上有所創新。Michelin 使用定製設計的聚氨酯泡棉,其孔隙率、孔徑分佈和密度經過優化,以在目標頻率範圍(特別是空腔共振頻率附近)提供最大的吸音效果。泡棉透

過專用膠黏劑牢固地黏附在輪胎內襯層上,形成永久性的結合。Michelin 聲稱該技術可以降低車內噪音約 20%,有效改善駕駛舒適性,同時不影響輪胎的安全性能、滾動阻力或磨耗壽命。該技術特別受到電動車製造商的青睞,因為電動車對輪胎噪音更加敏感[110]。

Pirelli 的 PNCS(Pirelli Noise Cancelling System)技術也採用胎內吸音泡棉,但 Pirelli 強調其在泡棉配方和黏附系統上的創新。PNCS 泡棉設計用於特定的頻率範圍,針對性地抑制空腔共振和其他煩擾性噪音。根據 Pirelli 的數據,PNCS 可以降低車內噪音 2-3 dB,相當於主觀噪音減半。該技術已應用於 Pirelli 的多個產品系列,包括 P Zero、Cinturato 等高端輪胎,獲得了市場的積極反饋。然而,也有用戶報告泡棉在長期使用或高溫條件下可能出現脫落或分解的問題,顯示耐久性仍是需要持續關注的課題[111]。

Goodyear 的 SoundComfort Technology 同樣基於胎內吸音泡棉原理,宣稱可以減少車內噪音高達 50%。Goodyear 在泡棉材料的選擇和應用範圍上進行了優化,確保在保持輕量化的同時提供足夠的吸音效果。該技術已應用於 Eagle Touring 等產品系列,特別針對追求靜音舒適的消費者群體[112]。



胎內吸音材料的聲學性能取決於多個因素。材料的吸音係數(sound absorption coefficient)是關鍵指標,描述材料吸收聲能的能力,數值從 0(完全反射)到 1(完全吸收)。聚氨酯泡棉的吸音係數依賴於頻率,通常在中高頻(500 Hz 以上)具有較高的吸音係數,在低頻則較低。對於輪胎空腔共振噪音(通常 200-250 Hz),需要特別設計泡棉的孔隙結構來提高低頻吸音性能。材料的厚度也影響吸音效果,一般而言,較厚的材料對低頻吸音更有效,但受到輪胎內部空間和重量限制,實際應用中厚度通常在 5-15mm 之間[113]。

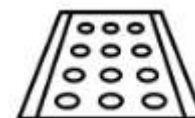
泡棉的黏附工藝是確保長期可靠性的關鍵。泡棉需要在輪胎製造過程中或事後黏附到內襯層上,黏附界面必須承受輪胎運轉時的離心力(高速時可達數千 G)、溫度變化(可能從-30°C 到+80°C 甚至更高)以及輪胎變形產生的剪切應力。常用的黏附方法包括壓敏膠黏帶、熱熔膠和結構膠黏劑。壓敏膠使用方便但長期耐久性可能不足;熱熔膠需要加熱工藝但黏附強度較好;結構膠黏劑提供最強的黏附但需要較長的固化時間。一些製造商開發了專用的黏附系統,結合表面處理和多層黏附結構來確保可靠性[114]。

胎內吸音材料對輪胎其他性能的影響一般很小但需要評估。泡棉會增加輪胎的質量,通常增加 100-300 克,對於高性能車輛可能需要考慮非懸掛質量的增加。泡棉也會略微增加輪胎的轉動慣量,理論上可能影響加速和制動響應,但實際測試中這種影響通常可以忽略。泡棉的存在可能略微影響輪胎內部的熱傳導,但由於泡棉主要位於內襯層,遠離胎面生熱區域,實際影響有限。輪胎修補性是一個實際問題:當輪胎被釘子等物體刺穿需要修補時,泡棉的存在可能增加修補的複雜度,需要移除或處理泡棉區域。一些輪胎維修指南建議在修補區域移除泡棉,可能局部降低降噪效果[115]。

胎內吸音材料的未來發展方向包括:開發更高效的吸音材料,在更輕、更薄的條件下提供更好的降噪效果;改善耐久性和耐溫性,確保材料在輪胎全生命週期內保持性能;探索可回收或生物基泡棉材料,提高永續性;開發智能吸音材料,能夠根據頻率或工況自適應調整吸音特性。此外,也有研究探索將吸音材料與其他功能(如溫度感測、壓力監測)集成,發展多功能智能輪胎內襯系統[116]。

9.5.2 輪圈共鳴器 (Wheel Resonator)

輪圈共鳴器是安裝在車輪輪圈上的聲學裝置,利用赫姆霍茲共振器(Helmholtz resonator)原理來抑制輪胎空腔共振噪音。赫姆



霍茲共振器是一種聲學裝置,由一個封閉腔體和一個連接外界的窄頸組成,當外部聲波頻率與共振器的固有頻率相匹配時,共振器會產生強烈共振,吸收該頻率的聲能。透過設計共振器的腔體容積和頸部尺寸,可以將其固有頻率調諧到輪胎空腔共振頻率,從而有效抑制空腔共振噪音[117]。

輪圈共鳴器的設計通常包括一個或多個共振腔體,集成在輪圈結構中或作為附加裝置安裝在輪圈上。共振器的固有頻率由以下公式近似計算: $f = (c/2\pi)\sqrt{S/(V \times L)}$,其中 c 是聲速, S 是頸部截面積, V 是腔體容積, L 是頸部長度。對於典型的乘用車輪胎空腔共振頻率約 220 Hz,可以設計相應的共振器參數使其固有頻率與之匹配。當輪胎空腔產生共振時,聲能會被共振器吸收並在其內部轉化為熱能,從而降低空腔共振的振幅和向車內傳遞的噪音[118]。

早期的輪圈共鳴器研究可追溯到 2000 年代初期。Periyathamby(2004)報導了一種安裝在輪圈上的赫姆霍茲共振器系統,透過在輪圈輻條之間安裝共振器裝置,成功降低了輪胎空腔共振噪音。該研究顯示,單個共振器可以降低共振峰值約 5-8 dB,但只對很窄的頻率範圍有效。為了覆蓋更寬的頻率範圍或應對不同輪胎尺寸的共振頻率變化,需要使用多個調諧到不同頻率的共振器[119]。

Daniel(2020)發展了整合在汽車輪圈中的被動共振器系統,用於抑制輪胎空腔共振噪音。該研究採用有限元方法和邊界元方法模擬輪胎-輪圈-空腔系統的聲學特性,優化了共振器的設計參數。結果顯示,使用三個調諧共振器可以將空腔共振峰值從 103 dB 降低到約 90 dB,降噪效果顯著。使用五個共振器可以進一步改善效果,實現更寬頻段的噪音抑制。該研究還探討了共振器位置對效果的影響,發現將共振器均勻分佈在輪圈圓周上可以獲得最佳效果[120]。

Zhao 等人(2021)設計和模擬了用於抑制輪胎空腔共振噪音的赫姆霍茲共振器組件。研究建立了詳細的輪胎-輪圈系統有限元模型,包括輪胎結構、空氣腔體和共振器的耦合效應。透過參數研究確定了最佳的共振器幾何參數,並透過實驗驗證了模擬結果。研究發現,共振器的頸部長度和直徑對調諧頻率有最大影響,而腔體形狀(圓柱形、球形或不規則形)的影響相對較小。該研究還討論了共振器的製造可行性和與輪圈結構的集成方案[121]。

輪圈共鳴器的實際應用面臨一些挑戰。首先是空間限制,輪圈內部空間有限且需要容納制動系統,留給共振器的空間受限制,這限制了共振器的腔體容積和降噪效果。其次是調諧精度問題,空



腔共振頻率隨輪胎尺寸、充氣壓力、溫度等因素變化,共振器需要能夠覆蓋一定的頻率範圍或具備可調諧能力。再次是製造成本和複雜度,在輪圈中集成共振器需要改變輪圈設計和製造工藝,增加成本。最後是可靠性和耐久性,共振器需要承受車輪運轉的離心力、振動、溫度變化等嚴苛環境,長期保持性能[122]。

為了解決調諧範圍問題,一些研究探索了可調諧共振器的設計。可調諧共振器可以改變其固有頻率以適應不同的工況或輪胎條件。調諧機制可以是機械的(如改變頸部長度或腔體容積)、電子的(如使用揚聲器主動控制)或材料的(如使用智能材料改變腔體特性)。Sainty 等人(2012)分析了多種抑制輪胎空腔共振的方案,包括改進的輪圈設計(如 Kühl 輪圈)和赫姆霍茲共振器,比較了它們的效果和實用性。研究發現,雖然理論上共振器可以提供顯著的降噪效果,但實際應用中需要平衡效果、成本、複雜度和可靠性[123]。

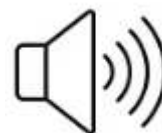
輪圈共鳴器相比胎內吸音材料的優勢在於不增加輪胎質量,不影響輪胎修補,且可以模組化應用於不同輪胎。然而,其效果通常局限於空腔共振頻率附近的窄頻段,對其他噪音源效果有限。因此,在某些應用中,結合使用胎內吸音材料和輪圈共鳴器可能提供最佳的綜合降噪效果,兩種技術互補,覆蓋不同的頻率範圍和噪音機制。

未來輪圈共鳴器技術的發展方向包括:開發集成在輪圈結構中的緊湊型共振器,不額外佔用空間;採用增材製造(3D 打印)技術製造複雜形狀的共振器,實現優化的聲學性能;開發自適應調諧系統,根據實時檢測的噪音頻譜自動調整共振器參數;探索新型聲學材料和結構(如聲學超材料、聲子晶體)在共振器設計中的應用。這些技術將推動輪圈共鳴器從實驗室走向實際應用,為輪胎降噪提供更多選擇[124]。

9.5.3 其他降噪裝置 (Other Noise Reduction Devices)

除了胎內吸音材料和輪圈共鳴器外,研究人員和輪胎製造商還探索了多種其他降噪裝置和技術,雖然其中一些尚未商業化或僅在特定應用中使用,但展現出良好的技術潛力。這些裝置包括主動噪音控制系統、胎面降噪片、空腔分割裝置、阻尼輪圈等創新方案[125]。

主動噪音控制(Active Noise Control, ANC)技術利用反相聲波抵消原理來降低噪音。系統包括傳感器(檢測噪音或振動)、控制器



(計算反相信號)和致動器(產生反相聲波或振動)。對於輪胎噪音,主動控制可以在結構傳遞路徑(在懸吊系統上安裝致動器產生反相力)或空氣傳播路徑(在車內安裝揚聲器產生反相聲波)上實施。主動輪胎噪音控制的挑戰在於噪音的寬頻和非平穩特性,需要快速的信號處理和精確的控制算法。Costin 和 Elzinga(1989)早期研究了使用主動控制降低輪胎低頻衝擊噪音的可能性,展示了技術可行性[126]。近年來,隨著傳感器、處理器和控制算法的進步,主動噪音控制在汽車中的應用日益成熟,一些豪華車型已配備主動噪音控制系統,雖然主要針對發動機和風噪,但原理上也可擴展到輪胎噪音控制。

胎面降噪片或降噪條是嵌入胎面花紋溝槽中的聲學裝置,用於阻斷或吸收溝槽內產生的噪音。這些裝置通常是條狀的多孔材料或共振器結構,安裝在主要的縱向或橫向溝槽中。其原理是減少溝槽內的空氣體積、改變聲學邊界條件或直接吸收聲能,從而降低空氣泵浦噪音和溝槽共振噪音。一些專利披露了在溝槽底部或側壁設置吸音材料、共振腔體或微結構的方案。然而,這些裝置面臨的主要挑戰是耐久性和排水性能影響:溝槽中的裝置會阻礙水流排出,可能降低濕地性能;裝置本身也可能在使用過程中磨損、脫落或失效。因此,此類技術目前主要處於研究階段,商業化應用有限[127]。

輪胎空腔分割裝置是在輪胎內部安裝隔板或分隔結構,將單一的環形空腔分割成多個較小的腔體。由於較小腔體的共振頻率與腔體尺寸成反比,分割後的腔體共振頻率會升高且分散到多個頻率,從而降低單一頻率的共振峰值。這種方法的挑

戰在於如何在輪胎內部實現有效的分割:分隔結構需要能夠承受輪胎變形和離心力,且不能過度增加輪胎質量或影響平衡性。一些研究探索了使用柔性隔板、充氣隔板或集成在輪圈上的分隔裝置,取得了一定的降噪效果,但製造複雜度和可靠性仍是需要解決的問題[128]。

阻尼輪圈是在輪圈結構中集成阻尼材料或阻尼機制,用於降低輪圈的振動響應和噪音輻射。輪圈作為連接輪胎和懸吊系統的中介,其振動特性影響結構傳遞噪音。傳統的鋁合金或鋼



輪圈具有較低的材料阻尼,容易產生共振。阻尼輪圈可以採用複合材料製造(如纖維增強聚合物),利用聚合物的高阻尼特性;或者在輪圈結構中嵌入阻尼層,類似於約束阻尼結構;或者使用摩擦阻尼機制,在輪圈的接合面或連接處利用摩擦耗散能量。雖然阻尼輪圈在理論上可以有效降低結構傳遞噪音,但需要確保輪圈的強度、剛性、耐久性和安全性滿足嚴格的標準,且成本可接受[129]。

智能輪胎系統是一個新興的技術領域,整合傳感器、通訊和控制功能於輪胎中,可以監測輪胎狀態、路面條件並提供數據支持駕駛輔助系統。在降噪應用中,智能輪胎可以實時監測輪胎產生的噪音或振動,識別噪音特徵和來源,為主動降噪系統提供參考信號,或者為輪胎維護和更換提供建議。例如,在輪胎內表面安裝加速度計可以檢測輪胎振動模態,識別空腔共振的發生;在胎面安裝壓力傳感器可以監測接地壓力分佈,評估花紋磨耗對噪音的影響。雖然智能輪胎技術目前主要關注安全和性能監測,但其在降噪應用中的潛力值得進一步探索[130]。

非傳統輪胎結構如非充氣輪胎(non-pneumatic tire, NPT)或蜂窩輪胎也在探索中。這些輪胎不使用充氣結構,而是採用彈性輻條、蜂窩結構或其他機制提供承載和緩衝功能。由於沒有封閉的空氣腔體,理論上不會產生空腔共振噪音,這是其潛在優勢之一。



然而,非充氣輪胎面臨自身的噪音挑戰,如結構振動噪音、空氣動力學噪音等。Zhou 等人(2020)研究了非充氣輪胎的空氣動力學噪音,提出採用仿生非光滑表面來降低噪音[39]。非充氣輪胎技術仍在發展中,降噪性能是其需要持續改進的方面之一。

降噪裝置的發展趨勢是向智能化、輕量化和多功能集成方向發展。未來的輪胎降噪裝置可能整合傳感、控制、能量採集等多種功能,形成智能降噪系統;採用先進材料和製造技術,在實現降噪效果的同時最小化質量和成本增加;與車輛的其他系

統(如懸吊控制、主動降噪、駕駛輔助)協同工作,實現系統層級的最優降噪效果。這些技術將為實現超靜音、智能化的未來輪胎提供重要支撐。

9.6 路面降噪技術 (Road Surface Noise Reduction)

輪胎噪音是輪胎與路面交互作用的結果,因此路面特性對噪音產生有重要影響。路面降噪技術透過優化路面材料、結構和表面特性來降低輪胎路面噪音,是交通噪音控制的系統性解決方案的重要組成部分。路面降噪技術主要包括多孔隙路面、低噪音路面和路面維護策略。這些技術不僅能降低單個車輛的噪音,更重要的是能夠降低整條道路的交通噪音水平,使大量車輛和周邊居民受益,具有良好的社會和環境效益[131][132]。



路面對輪胎噪音的影響機制是多方面的。首先,路面的宏觀紋理(macrotexture,波長0.5-50mm)和微觀紋理(microtexture,波長<0.5mm)影響輪胎與路面的接觸特性、花紋塊撞擊和空氣泵浦過程。粗糙的路面增加撞擊力和空氣擾動,產生更高的噪音;平滑的路面雖然降噪但可能影響抓地力。其次,路面的聲學特性如聲阻抗、吸音係數影響聲波在路面附近的傳播和反射。傳統的密實路面是聲波的硬反射面,會增強噪音輻射;多孔路面則可以吸收部分聲能,降低反射。再次,路面的剛性和阻尼特性影響其振動響應,較軟的路面可以吸收更多撞擊能量,降低噪音產生;但過軟的路面可能增加滾動阻力。最後,路面的耐久性和磨耗特性影響其長期的降噪性能,路面隨使用時間的性能退化是實際應用中的重要考慮因素[133]。

測量和評估路面噪音特性的標準方法包括 ISO 11819 系列標準。ISO 11819-1 規定了使用統計透過法(Statistical Pass-By, SPB)測量道路表面對交通噪音的影響,該方法測量真實交通車輛透過測量點時的噪音,統計分析得出路面的噪音特性。ISO



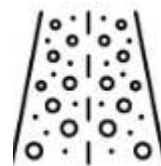
11819-2 規定了使用密接法(Close-Proximity, CPX)測量輪胎路面噪音,該方法使用標準測試輪胎在測試拖車上,在輪胎附近位置測量噪音,可以連續評估道路的噪音特性,排除車輛和環境因素的影響。CPX 方法已成為評估路面降噪效果的標準工具,被廣泛應用於路面研究和工程實踐中[134][135]。

9.6.1 多孔隙路面 (Porous Road Surface)

多孔隙路面(porous asphalt pavement),也稱為多孔瀝青、透水瀝青或開級配瀝青,是一種具有大量連通孔隙的路面結構,孔隙率通常在 15-25%之間。這種路面最初是為了改善排水性能而開發的,可以使雨水迅速滲透到路面內部並排走,減少路面積

水和水滑現象,提高雨天行車安全。研究發現,多孔路面的開孔結構也具有優異的降噪性能,可以顯著降低輪胎路面噪音,成為當前最有效的路面降噪技術之一[136]。

多孔路面的降噪機制包括多個方面。首先是聲吸收效應:多孔路面的孔隙結構形成大量的聲學吸收單元,當聲波進入孔隙時,在孔壁和通道中發生摩擦和粘性損耗,將聲能轉化為熱能。多孔路面的吸



音係數可達 0.4-0.8(頻率依賴),遠高於密實路面的 0.1 左右。這種吸音效應不僅降低路面反射的噪音,還能吸收輪胎表面和路面之間產生的噪音。其次是空氣泵浦效應降低:多孔路面的開孔結構為花紋溝槽內的壓縮空氣提供了額外的逃逸通道,減少了從溝槽端部噴出的高速氣流,降低了空氣泵浦噪音。再次是喇叭效應減弱:輪胎與路面之間形成的楔形空間在多孔路面上不再是封閉的聲學喇叭,聲波可以透過路面孔隙逃逸,減弱了喇叭放大效應[137][138]。

多孔路面的降噪效果已在多項研究中得到驗證。Watts 等人(1999)研究了多孔瀝青路面與聲屏障結合對交通噪音的綜合降低效果,發現多孔路面本身可以降低噪音 3-5 dB(A),與聲屏障結合使用可以實現更大的降噪效果[139]。Sandberg 和 Mioduszewski(2012)研究了雙層多孔瀝青(double-layer porous asphalt, DPAC)中底層的重要性,這種路面結構包括上層(通常厚度 30-40mm,骨料粒徑 4-8mm)和底層(厚度 40-50mm,骨料粒徑 8-16mm)。研究發現,底層對降噪效果有顯著貢獻,雙層結構相比單層可以額外降低噪音 2-3 dB。底層的較大孔隙提供了更好的低頻吸音性能,且增加了排水能力和結構穩定性[140]。

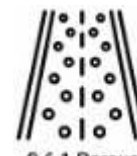
多孔路面的聲學性能依賴於其孔隙結構特性。Yamaguchi 等人(1999)研究了多孔瀝青路面的吸音機理,透過聲管測量了材料的吸音係數,並建立了理論模型。研究發現,多孔路面的吸音係數隨頻率增加而增加,在 1000-2000 Hz 達到最大值,這正好對應於輪胎噪音的主要頻率範圍。吸音性能主要取決於孔隙率、孔隙連通性和孔徑分佈。較高的孔隙率和良好的連通性提供更多的聲吸收路徑;適中的孔徑(2-5mm)在目標頻率範圍內提供最佳的聲阻抗匹配,實現最大吸音[141]。

Iwase 和 Kawabata(1999)測量了多孔瀝青路面的基本聲學特性並應用於道路交通噪音降低的預測。研究建立了包含路面吸音效應的噪音傳播模型,預測了不同路面條件下的噪音水平。結果表明,多孔路面除了降低聲源強度外,還減少了地面反射聲波的貢獻,綜合降噪效果顯著。對於距離道路較近的接收點(<50m),路面吸音的貢獻尤為明顯[142]。

雙層多孔瀝青被認為是路面降噪技術中最有潛力的方案。Iwase(2000)研究了雙層多孔路面的聲學特性及其對道路交通噪音的降低效果,發現精心設計的雙層結構可以在寬頻帶上提供高吸音係數,總體降噪效果可達 6-8 dB,相當於噪音能量降低 75-85%。這種顯著的效果使雙層多孔瀝青成為高噪音控制要求區域(如住宅區、學校、醫院附近)的首選路面方案[143]。

多孔路面的實際應用面臨一些挑戰。首先是耐久性問題:多孔結構中的瀝青黏結料暴露面積大,容易受到氧化、紫外線和水分侵蝕,導致瀝青老化和骨料剝落,縮短使用壽命。改進瀝青配方(如使用改性瀝青、添加抗老化劑)和施工工藝可以提高耐久性,但成本也相應增加。其次是孔隙堵塞問題:隨著使用時間,塵土、泥沙、橡膠顆粒等會逐漸堵塞孔隙,降低排水和降噪性能。定期的清洗維護(如高壓水沖洗、真空清掃)可以恢復部分性能,但增加了維護成本。再次是結構強度問題:高孔隙率意味著骨料間接觸點減少,路面的機械強度和承載能力降低,可能不適合重載交通。最後是氣候適應性問題:多孔路面在寒冷地區冬季可能面臨孔隙結冰、融雪劑侵蝕等問題,在炎熱地區則可能面臨高溫軟化、瀝青流淌等問題[144]。

為了克服這些挑戰,研究人員開發了多種改進技術。使用改性瀝青(如 SBS 改性瀝青、橡膠改性瀝青)可以提高瀝青的粘結性、彈性和耐老化性,延長路面使用壽命。優化骨料級配和添加纖維穩定劑可以提高路面的結構穩定性。表面處理技術如塗佈保護層、噴灑再生劑可以延緩瀝青老化。此外,發展了多種清洗設備和工藝,提高孔隙清洗的效率和效果[145]。

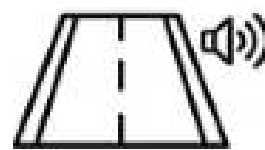


多孔路面的成本效益分析顯示,雖然初期建設成本比傳統密實路面高 20-50%,維護成本也較高,但考慮到降噪效益(降低沿線建築的隔音需求、減少噪音對居民健康和生產力的影響)、安全效益(改善雨天行車安全、減少事故)和環境效益(促進雨水入滲、減少徑流污染),多孔路面在全生命週期內仍具有良好的經濟性,特別是在高噪音敏感區域。許多國家和地區已將多孔路面作為城市道路和高速公路的標準或優選方案[146]。

未來多孔路面技術的發展方向包括:開發長壽命多孔路面材料和結構,提高耐久性和降低維護需求;探索自清潔或抗堵塞的多孔路面設計;開發多功能路面,整合降噪、排水、光催化(分解污染物)、溫度調節等多種功能;建立精確的路面降噪性能預測模型,支持路面設計優化和性能評估;發展智能維護系統,基於實時監測的路面狀態制定維護策略。這些技術將推動多孔路面的更廣泛應用,為城市噪音控制和永續交通發展作出更大貢獻。

9.6.2 低噪音路面 (Low Noise Road Surface)

低噪音路面是廣義的概念,泛指採用各種設計策略和材料技術來降低輪胎路面噪音的路面。除了多孔隙路面外,還包括優化表面紋理的密實路面、採用特殊材料的路面、以及其他



創新路面結構。低噪音路面的設計理念是在滿足安全性(抓地力)、耐久性和經濟性要求的前提下,透過精細調控路面的幾何和聲學特性來最小化噪音產生和傳播 [147]。

表面紋理優化是密實路面降噪的主要方法。路面的宏觀紋理(波長 0.5-50mm,深度 0.2-20mm)主要影響排水和抓地力,但也顯著影響輪胎噪音。過於粗糙的紋理會增加撞擊噪音和空氣擾動噪音;過於光滑的紋理則影響安全性。研究發現,存在一個最佳的紋理範圍,在此範圍內可以實現安全性和低噪音的良好平衡。常用的表面紋理指標包括平均輪廓深度(Mean Profile Depth, MPD)、紋理水平(Texture Level)等。一般而言,MPD 在 0.5-1.2mm 的範圍內可以提供良好的安全性,同時保持較低的噪音水平。超過 1.5mm 的粗糙紋理會顯著增加噪音[148]。

表面紋理的幾何特徵如各向異性(anisotropy)、空間頻率分佈、峰谷形態等也影響噪音特性。橫向紋理(與行駛方向垂直的溝槽)通常比縱向紋理產生更多噪音,因為橫向紋理對花紋塊產生更強烈的撞擊激勵。因此,低噪音路面通常避免明顯的橫向紋理,或採用斜向、隨機化的紋理模式。表面的負紋理(凹陷)比正紋理(凸起)產生較少的空氣泵浦噪音,因為負紋理不會產生額外的空氣壓縮。基於這些認識,發展了多種低噪音路面施工技術,如精細刻槽、磨光處理、噴砂表面等,用於優化密實路面的降噪性能[149]。

薄層路面(thin layer pavement)是一種特殊的低噪音路面技術,在既有路面上鋪設薄層(通常 10-30mm)的瀝青混凝土,採用特殊的骨料



級配和瀝青配方來優化表面特性。薄層路面可以是密實型或半開孔型,透過精確控制骨料粒徑、形狀和級配來實現低噪音紋理。薄層路面的優勢是施工快速、對路面高程影響小、可以在既有路面上快速改善降噪性能,特別適合於城市道路改造。研究表明,優化設計的薄層路面可以降低噪音 2-4 dB,接近多孔路面的效果,且維護需求較低[150]。

橡膠改性瀝青路面利用廢舊輪胎橡膠粉作為瀝青改性劑,不僅有助於廢輪胎回收利用,還能改善路面的彈性和阻尼特性,降低噪音。橡膠顆粒的加入使瀝青混凝土更加柔韌,可以吸收更多的撞擊能量,減少路面振動和噪音輻射。此外,橡膠顆粒的

多孔結構也提供一定的聲吸收效果。研究顯示,橡膠改性瀝青路面相比傳統路面可以降低噪音 1-3 dB,同時改善路面的耐久性和抗裂性能。一些國家和地區已將橡膠瀝青路面作為環保和降噪的雙贏解決方案加以推廣[151]。

de León 等人(2020)評估了橡膠化(rubberised)和傳統路面上的輪胎路面噪音與紋理交互作用,使用 CPX 方法和表面輪廓測量進行分析。研究發現,橡膠瀝青路面的降噪效果與其紋理特性密切相關,細粒徑的橡膠瀝青(骨料最大粒徑<10mm)表現出最好的降噪性能。紋理分析顯示,橡膠瀝青路面具有更圓潤的峰部和更開放的谷部,有利於降低撞擊噪音和改善空氣流動。該研究為橡膠瀝青路面的優化設計提供了定量指導[152]。

特殊骨料的使用也是低噪音路面研究的方向。使用低彈性模量的骨料(如多孔骨料、輕質骨料)可以降低路面剛性,減少撞擊回彈和噪音產生。使用特殊形狀的骨料(如球形、扁平骨料)可以優



化表面紋理和接觸特性。使用有色骨料不僅可以改善路面美觀性,還可能透過降低路面溫度(淺色路面反射更多熱輻射)間接影響輪胎溫度和噪音特性。然而,特殊骨料通常成本較高且來源有限,需要評估其技術經濟可行性[153]。

低噪音路面的設計需要權衡多個性能目標。Licitra 等人(2017)研究了輪胎類型對 CPX 方法評估低噪音路面降噪效果的影響,發現不同輪胎在相同路面上測得的噪音水平可能有顯著差異(可達 3-5 dB),這給路面降噪性能評估帶來挑戰。研究強調了標準化測試輪胎和測試程序的重要性,以確保路面降噪性能評估的一致性和可比性。ISO 11819-2 標準規定了 CPX 測試的標準輪胎和程序,為路面評估提供了統一基準[154]。

低噪音路面技術的實際應用需要考慮當地的交通、氣候和經濟條件。在交通流量大、車速高的道路上,路面磨耗快,需要選擇耐久性好的路面方案;在降雨量大的地區,排水性能是重要考慮因素;在寒冷地區,路面的抗凍性能和除冰鹽耐受性很重要;在經濟發展水平較低的地區,成本可能是決定性因素。因此,沒有一種萬能的低噪音路面方案,需要根據具體情況選擇或定製設計[155]。

未來低噪音路面技術的發展方向包括:發展智能路面,嵌入傳感器實時監測路面狀態和性能,為維護決策提供數據支持;探索自修復路面材料,延長使用壽命和保持性能;開發多功能路面,整合發電(太陽能路面)、融雪除冰、空氣淨化等功能;建立路面-輪胎系統優化設計方法,協同優化路面和輪胎設計以實現最佳的系統性能。

這些技術將推動低噪音路面從單一功能向多功能、智能化方向發展,為未來的智慧交通基礎設施提供支撐。

9.6.3 路面維護 (Road Surface Maintenance)



路面的降噪性能不是一成不變的,會隨著使用時間和交通載荷而逐漸退化。路面維護對於保持降噪性能至關重要,是路面降噪技術實際效果的關鍵保障。路面性能退化的主要原因包括:表面紋理的磨光和磨損,使路面變得更光滑或更粗糙;瀝青老化和骨料剝落,改變路面的材料特性和結構完整性;多孔路面的孔隙堵塞,降低吸音和排水性能;路面裂縫和坑洞的發展,產生額外的噪音源和影響行車舒適性。有效的維護策略可以延緩性能退化,延長路面使用壽命,保持降噪效益[156]。

多孔路面的孔隙堵塞是降噪性能退化的主要原因。研究發現,新建的多孔路面初始降噪效果可達 5-8 dB,但隨著使用時間,塵土、泥沙、輪胎磨損顆粒等逐漸堵塞孔隙,孔隙率下降,吸音性能和降噪效果顯著降低。在交通流量大、環境粉塵多的地區,孔隙堵塞速度更快。研究表明,未維護的多孔路面在使用 2-3 年後,降噪效果可能降低 50%以上,到 5-8 年時可能完全喪失降噪優勢。因此,定期清洗是保持多孔路面降噪性能的關鍵維護措施[157]。

多孔路面的清洗方法主要包括高壓水沖洗和真空清掃兩種。高壓水沖洗使用高壓水流(通常 10-30 MPa)沖刷路面,將孔隙中的堵塞物沖出;真空清掃則使用強力吸塵設備,透過負壓將孔隙中的細小顆粒吸出。兩種方法通常結合使用以達到最佳效果。研究表明,適當的清洗可以恢復多孔路面 80-90%的初始降噪性能。然而,清洗頻率和時機的確定需要平衡效果和成本:過於頻繁的清洗增加成本且可能對路面造成損傷;清洗不足則性能退化過快。一般建議在交通量大的道路上每年清洗 1-2 次,在交通量較小的道路上每 2-3 年清洗一次[158]。

表面再生處理是恢復瀝青路面性能的另一種維護方法。隨著使用時間,路面瀝青由於氧化和揮發分流失而變硬變脆,導致黏結力下降和骨料剝落。表面再生處理透過噴灑再生劑(rejuvenator)或霧封層(fog seal)來補充瀝青中的油分,恢復其粘結性和柔韌性,延緩老化過程。對於降噪性能,再生處理可以穩定路面結構,防止骨料脫落和紋理劣化,間接保持降噪效果。一些研究還探索了在再生劑中添加聲學功能材料(如微孔材料、阻尼材料)以增強降噪性能[159]。

表面紋理管理是密實路面維護的重點。隨著交通載荷和氣候作用,路面紋理會發生變化:在交通量大的區域,骨料表面被磨光,紋理深度減小,可能降低抓地力但也

可能降低噪音;在某些情況下,路面磨損會產生不均勻的紋理,反而增加噪音。定期的表面紋理監測(使用雷射掃描或攝影測量技術)可以評估路面狀態,指導維護決策。對於過度磨光的路面,可以採用表面刻槽或微表處理來恢復紋理;對於過度粗糙的路面,可以採用磨光或薄層罩面來改善[160]。

裂縫和坑洞修補是基本的路面維護工作,對降噪性能也有影響。

裂縫和坑洞不僅影響行車安全和舒適性,還會產生額外的噪音(輪胎滾過時的衝擊噪音)。及時的修補可以防止損壞擴大,保持路面



平整性。然而,修補材料和方法的選擇很重要:修補區域的材料特性和紋理應與周圍路面盡可能一致,避免產生不連續性和噪音異常。一些研究探索了低噪音修補材料和技術,如使用改性瀝青修補料、多孔瀝青修補料等,以保持修補區域的降噪性能[161]。

路面性能監測是科學維護的基礎。傳統的路面監測主要關注結構性能(裂縫、車轍、平整度等),近年來逐漸將功能性能(摩擦係數、排水能力、噪音水平)納入監測範圍。CPX 連續測量技術使大規模、高效率的路面噪音監測成為可能,可以繪製整條道路的噪音地圖,識別高噪音路段,指導維護資源的優先分配。一些先進的道路管理系統整合了多種性能指標的監測數據,利用性能預測模型和優化算法制定維護策略,實現路網層級的性能管理和成本最小化[162]。



路面維護的經濟分析表明,雖然維護需要投入成本,但相比於路面性能退化導致的降噪效益損失、提前重建的成本、

以及對交通和社會的影響,適當的維護投資具有良好的經濟性。生命週期成本分析(Life Cycle Cost Analysis, LCCA)是評估路面方案(包括維護策略)的常用方法,綜合考慮初期建設成本、維護成本、使用者成本(延誤、車輛運行成本)和環境成本(噪音、排放),計算全壽命週期的總成本。研究表明,對於多孔路面,適當的維護可以將使用壽命從 10-12 年延長到 15-20 年,總生命週期成本降低 20-30%,顯著提高經濟效益[163]。

未來路面維護技術的發展方向包括:發展自動化維護設備,提高維護效率和效果;建立基於實時監測數據的預測性維護系統,在性能顯著退化之前進行干預;探索自修復路面材料,減少維護需求;開發環境友好的維護材料和方法,減少維護對交通和環境的影響;建立路面資產管理系統,優化路網層級的維護決策和資源分配。這

些技術將推動路面維護從被動響應向主動預防、從經驗驅動向數據驅動、從單一路段向系統優化轉變,為保持路面降噪性能和延長路面使用壽命提供有力支撐。

結論 (Conclusions)

本章的整體分析清楚顯示,輪胎噪音降低技術已由過去以經驗為導向的局部改良,演進為高度科學化、系統化與多目標整合的工程領域。輪胎噪音的生成涉及結構振動、接觸力學與氣動聲學等多重物理機制,任何單一技術手段皆難以在不影響其他性能的情況下,達成顯著且穩定的降噪效果。因此,現代低噪音輪胎設計必須建立在整體系統觀點之上,透過多項降噪策略的協同作用,才能在噪音、抓地力、滾動阻力、耐久性與成本之間取得最佳平衡。

研究顯示,胎面花紋設計仍是影響輪胎噪音最直接且最具成本效益的技術路徑,其中變節距設計在降低噪音峰值與改善主觀聲品質方面具有高度成熟度。然而,其降噪潛力亦存在物理極限,必須與溝槽優化、胎肩設計及結構調諧等技術相互搭配,才能因應日益嚴格的法規要求。結構層級的降噪設計,特別是胎體層與帶束層的剛性與阻尼配置,對抑制低頻結構傳遞噪音與輪胎空腔共振具有關鍵影響,對電動車車內靜肅性尤為重要。

本章亦指出,輪胎噪音降低技術面臨的核心挑戰,在於多性能目標之間的衝突與取捨。降低噪音往往與濕地抓地力、操控性能或滾動阻力存在潛在矛盾,使輪胎設計成為典型的多目標最佳化問題。隨著法規持續收緊,每降低一至兩分貝噪音,皆需付出顯著的技術與成本代價,顯示未來降噪成果將更多仰賴跨領域創新,而非單一技術突破。

展望未來,輪胎噪音降低技術將朝向系統化、數位化與智能化方向發展。多物理場數值模擬與資料驅動方法,將使降噪設計得以前移至研發初期;人工智慧與最佳化演算法,將協助工程師在龐大設計空間中快速尋找最優解;而新型材料、超材料與智慧輪胎概念,則可能為輪胎降噪開啟全新的技術路徑。整體而言,本章所建構的輪胎噪音降低技術框架,不僅為低噪音輪胎設計提供實務指引,也為交通噪音治理與永續運輸發展奠定了堅實而前瞻的技術基礎。

參考文獻

- [1] UNECE. (2022). Regulation No. 117: Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces. United Nations Economic Commission for Europe. <https://unece.org/transport/standards/transport/vehicle-regulations-wp29/regulation-no-117>
- [2] ISO. (2019). ISO 13325:2019 Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/71034.html>
- [3] Mohammadi, S., & Ohadi, A. (2021). A novel approach to design quiet tires, based on multi-objective minimization of generated noise. *Applied Acoustics*, 173, 107823. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107823>
- [4] Eisenblaetter, J., Walsh, S. J., & Krylov, V. V. (2010). Air-related mechanisms of noise generation by solid rubber tyres with cavities. *Applied Acoustics*, 71(9), 854-860. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.05.002>
- [5] Li, T. (2018). Influencing parameters on tire-pavement interaction noise: Review, experiments, and design considerations. *Designs*, 2(4), 38. <https://doi.org/10.3390/designs2040038>
- [6] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2013.055811>
- [7] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. INFORMEX.
- [8] Graham, W. R. (2013). Modelling the vibration of tyre sidewalls. *Journal of Sound and Vibration*, 332(21), 5468-5481. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.05.009>
- [9] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). Numerical investigation of the air pumping noise generation mechanism in tire grooves. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(5), 051002. <https://doi.org/10.1115/1.4033339>
- [10] ISO. (2017). ISO 11819-2:2017 Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method.

International Organization for Standardization.
<https://www.iso.org/standard/59868.html>

- [11] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [12] Uddin, G. M., Niazi, S. G., Arafat, S. M., Abas, M., & Veza, I. (2020). Neural networks assisted computational aero-acoustic analysis of an isolated tire. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3097-3112. <https://doi.org/10.1177/0954407020915104>
- [13] Daniel, J. O. (2020). Automotive wheel and tyre design for suppression of acoustic cavity noise through the incorporation of passive resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 473, 115235. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115235>
- [14] Becker, M., Brandenburg, G., Hansen, H., Lier, S., & Müller, P. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4, 3291-3296. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384590>
- [15] Dewesoft. (2023). Measurement of tire noise according to ECE R117. Dewesoft Blog. <https://dewesoft.com/blog/tire-noise-measurement>
- [16] Continental. (2024). Tire noise: Causes, effects and solutions. Continental Tires. <https://www.continental-tires.com/about/sustainability/activities-and-initiatives/product-use/tire-related-use-phase-emissions/tire-noise/>
- [17] Pinay, J., Saito, Y., Mignot, C., & Gauterin, F. (2020). Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise on different surfaces under various operating conditions. *Acta Acustica*, 4(2), 4. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020003>
- [18] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Qu, S. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 12-27. <https://doi.org/10.3397/1/376353>
- [19] Anfosso-Ledee, F., Klein, P., Fadavi, A., & Duhamel, D. (2000). Tire/road noise: Comparison of 2D and 3D models for horn effect. *Proceedings of Inter-Noise*

2000, Nice, France.
<http://www.conforg.fr/internoise2000/cdrom/data/articles/000647.pdf>

- [20] Bekke, D., Wijnant, Y. H., Weegerink, T., & de Boer, A. (2013). Tire-road noise: An experimental study of tire and road design parameters. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 1(1), 62-74. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1979>
- [21] Heckl, M., & Müller, H. A. (1994). *Taschenbuch der Technischen Akustik* (2nd ed.). Springer-Verlag.
- [22] Brinkmeier, M., Nackenhorst, U., Petersen, S., & von Estorff, O. (2008). A finite element approach for the simulation of tire rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 309(1-2), 20-39. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.11.040>
- [23] Zwicker, E., & Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics: Facts and models* (2nd ed.). Springer-Verlag.
- [24] Becker, M. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384590>
- [25] Kropp, W., Becot, F. X., & Barrelet, S. (2000). On the sound radiation from tyres. *Acta Acustica United with Acustica*, 86(5), 769-779.
- [26] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). A three-dimensional numerical investigation of air pumping noise generation in tires. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(6), 061005. <https://doi.org/10.1115/1.4034489>
- [27] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). A computational fluid dynamics model for investigating air-pumping mechanisms in air-borne tire noise. *Tire Science and Technology*, 44(3), 191-210. <https://doi.org/10.2346/tire.16.440305>
- [28] Pinay, J., Saito, Y., Mignot, C., & Gauterin, F. (2020). Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise on different surfaces under various operating conditions. *Acta Acustica*, 4(2), 4. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020003>
- [29] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Qu, S. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 12-27.

- [30] Yokoyama, N., & Yamauchi, K. (1996). Study on mechanism and reduction of tire noise. *Tire Science and Technology*, 24(4), 288-312.
- [31] Dare, S., & Bolton, J. S. (2012). Sound absorption by porous materials. In F. Fahy & J. Walker (Eds.), *Advanced applications in acoustics, noise and vibration* (pp. 163-209). CRC Press.
- [32] Zhou, H., Jiang, Z., Yang, J., Zhai, H., & Zhao, Q. (2020). Numerical investigation of aerodynamic noise reduction of nonpneumatic tire using nonsmooth riblet surface. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2020, 4345723. <https://doi.org/10.1155/2020/4345723>
- [33] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690.
- [34] Chaitanya, K., Shenoy, S., & Jayakrishnan, R. (2021). A review on vehicle tyre aerodynamics. *AIP Conference Proceedings*, 2317(1), 050004. <https://doi.org/10.1063/5.0036145>
- [35] Bridgestone. (2019). Bridgestone launches new touring tire engineered for long-lasting comfort, wet performance and QuietTrack technology. Bridgestone Americas Press Release. <https://www.bridgestoneamericas.com/en/press-release-details>
- [36] Bridgestone. (2019). Turanza QuietTrack technology. Bridgestone Tires. <https://tires.bridgestone.com/en-us/automotive/tire-brand/turanza>
- [37] Tire Rack. (2023). What is noise reducing tire technology? Tire Rack Garage. <https://www.tirerack.com/upgrade-garage/what-is-noise-reducing-tire-technology>
- [38] Molisani, L. R., Burdisso, R. A., & Tsihlas, D. (2003). A coupled tire structure/acoustic cavity model. *International Journal of Solids and Structures*, 40(20), 5125-5138. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(03\)00259-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00259-2)
- [39] Zhou, H., Jiang, Z., Yang, J., Zhai, H., & Zhao, Q. (2020). Numerical investigation of aerodynamic noise reduction of nonpneumatic tire using nonsmooth riblet surface. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2020, 4345723.

- [40] Mao, R., Sun, P., Zhou, S., Chen, L., & Liu, Y. (2024). Optimization of tire-ground performance through meshed belt layer structure. *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241275137. <https://doi.org/10.1177/15280837241275137>
- [41] Achanta, Y. (2023). Structure-borne vehicle interior noise estimation using accelerometer based intelligent tires in passenger vehicles. [Doctoral dissertation, Virginia Tech]. VTech Works. <https://vtechworks.lib.vt.edu/items/64ba1229-dc8c-4815-b2f8-f808ff1d0e1a>
- [42] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 11(4), 269-286. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>
- [43] Choi, W. H. (2011). Influence of the cavity mode on tire surface vibration. [Doctoral dissertation]. ProQuest Dissertations Publishing.
- [44] Sams, T. A. (2019). A new analytical tire model for determining the effect of damping foam on tire/vehicle vibration. [Master's thesis, University of Akron]. OhioLINK. https://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=akron1552062613909176
- [45] Wang, B., & Duhamel, D. (2018). Horn effect of tyre/road noise: Modelling and experiments of acoustic network resonators in horn-like structures. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 14(2), 89-112. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2018.095183>
- [46] Clark, S. K. (1981). *Mechanics of pneumatic tires* (2nd ed.). U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- [47] Molisani, L. R., Burdisso, R. A., & Tsihlas, D. (2003). A coupled tire structure/acoustic cavity model. *International Journal of Solids and Structures*, 40(20), 5125-5138.
- [48] Schuring, D. J. (1990). The rolling loss of pneumatic tires. *Rubber Chemistry and Technology*, 53(3), 600-727. <https://doi.org/10.5254/1.3535061>
- [49] Gent, A. N., & Walter, J. D. (Eds.). (2005). *The pneumatic tire*. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.

- [50] Dick, J. S., & Pawlowski, H. (2001). Applications of rubber testing and its impact on compound performance. *Rubber World*, 224(3), 26-35.
- [51] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 11(4), 269-286.
- [52] Zegelaar, P. W. A. (1998). The dynamic response of tyres to brake torque variations and road unevenness. [Doctoral dissertation, Delft University of Technology]. TU Delft Repository.
- [53] Gent, A. N. (Ed.). (2012). *Engineering with rubber: How to design rubber components* (3rd ed.). Hanser Publishers.
- [54] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C*, 46(2), 683-690.
- [55] Rafei, M., Ghoreishy, M. H. R., & Naderi, G. (2018). Computer simulation of tire rolling resistance using finite element method: Effect of belt angle. *Tire Science and Technology*, 46(3), 202-221. <https://doi.org/10.2346/tire.18.460305>
- [56] Kim, Y. K., Kim, K. W., & Jeong, H. Y. (2002). An aramid/steel hybrid belt system for high performance tires. *Tire Science and Technology*, 30(4), 238-254.
- [57] Mao, R., Sun, P., Zhou, S., Chen, L., & Liu, Y. (2024). Optimization of tire-ground performance through meshed belt layer structure. *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241275137.
- [58] Futamura, S., & Goldstein, A. (2004). A simple model of pneumatic tire performance. *Tire Science and Technology*, 32(1), 2-18.
- [59] Yamauchi, H., & Akiyoshi, Y. (2002). Theoretical analysis of tire acoustic cavity noise and proposal of improvement technique. *JSAE Review*, 23(1), 89-94. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(01\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(01)00149-7)
- [60] Graham, W. R. (2013). Modelling the vibration of tyre sidewalls. *Journal of Sound and Vibration*, 332(21), 5468-5481.
- [61] Bakar, A. R. A., Razak, I. H. A., & Haris, S. M. (2010). Prediction of road friction coefficient and slippage of tire using intelligent tire with fuzzy logic approach. *Applied Mechanics and Materials*, 36, 139-146.

- [62] Ghoreishy, M. H. R. (2012). Review of the finite element method applications to tire modeling. *Iranian Polymer Journal*, 21(8), 545-560.
<https://doi.org/10.1007/s13726-012-0059-1>
- [63] Graham, W. R. (2013). Modelling the vibration of tyre sidewalls. *Journal of Sound and Vibration*, 332(21), 5468-5481.
- [64] Korunović, N., Trajanović, M., & Stojković, M. (2007). Finite element model for steady-state rolling tire analysis. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 1(1), 63-79.
- [65] Sams, T. A. (2019). A new analytical tire model for determining the effect of damping foam on tire/vehicle vibration. [Master's thesis, University of Akron]. OhioLINK.
- [66] Wei, Y. T., & Oertel, C. (1997). Influence of the belt on tire rolling resistance. *Tire Science and Technology*, 25(1), 3-21.
- [67] Choi, W. H. (2011). Influence of the cavity mode on tire surface vibration. [Doctoral dissertation]. ProQuest Dissertations Publishing.
- [68] Sainty, S., Tawaf, A., Richard, J., & Wang, X. (2012). Analysis of potential solutions to audible tire cavity and rim coupling resonance noise. *Proceedings of ASME 2012 Noise Control and Acoustics Division Conference*.
<https://doi.org/10.1115/NCAD2012-0839>
- [69] Brinkmeier, M., Nackenhorst, U., Petersen, S., & von Estorff, O. (2008). A finite element approach for the simulation of tire rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 309(1-2), 20-39.
- [70] Neethirajan, J., Parathodika, A. R., Hu, G. H., Kalaitzidou, K., & Bose, S. (2022). Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: The state of the art. *Functional Composite Materials*, 3(1), 7.
<https://doi.org/10.1186/s42252-022-00035-7>
- [71] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. [Doctoral dissertation, University of Twente]. University of Twente Research Repository.

- [72] Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [73] Maghami, S. (2016). *Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance*. [Doctoral dissertation, University of Twente].
- [74] Mark, J. E., Erman, B., & Roland, M. (Eds.). (2013). *The science and technology of rubber* (4th ed.). Academic Press.
- [75] Rodgers, B., & Waddell, W. (2013). *The science of rubber compounding*. In J. E. Mark, B. Erman, & M. Roland (Eds.), *The science and technology of rubber* (4th ed., pp. 417-471). Academic Press.
- [76] Sarkawi, S. S., Kaewsakul, W., Sahakaro, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. M. (2015). A review on reinforcement of natural rubber by silica fillers for use in low-rolling resistance tires. *Journal of Rubber Research*, 18(4), 203-233.
- [77] Cichomski, E. M. (2015). *Silica-silane reinforced passenger car tire treads: Effect of silica morphology, silica-polymer interface structure and rubber matrix network on tire-performance related properties*. [Doctoral dissertation, University of Twente]. University of Twente Research Repository.
- [78] Bhattacharyya, S., Lodha, V., Dasgupta, S., & Mukhopadhyay, R. (2019). Influence of highly dispersible silica filler on the physical properties, tearing energy, and abrasion resistance of tire tread compound. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(29), 47560. <https://doi.org/10.1002/app.47560>
- [79] Kaewsakul, W. (2013). *Silica-reinforced natural rubber for low rolling resistance, energy-saving tires: Aspects of mixing, formulation and compatibilization*. [Doctoral dissertation, University of Twente]. University of Twente Research Repository.
- [80] Reuvekamp, L. A. E. M. (2003). *Reactive mixing of silica and rubber for tyres and engine mounts*. [Doctoral dissertation, University of Twente]. University of Twente Research Repository.
- [81] Sattayanurak, S., Noordermeer, J. W. M., Sahakaro, K., Kaewsakul, W., Dierkes, W. K., & Blume, A. (2019). Silica-reinforced natural rubber: Synergistic effects by addition of small amounts of secondary fillers to silica-reinforced natural

- rubber tire tread compounds. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 5891051. <https://doi.org/10.1155/2019/5891051>
- [82] Hamed, G. R. (2007). Molecular aspects of the fatigue and fracture of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 67(3), 529-536. <https://doi.org/10.5254/1.3538692>
- [83] Ghofrani, M., Ashori, A., Rezvani, M. H., & Ghamsari, F. A. (2016). Acoustical properties of plywood/waste tire rubber composite panels. *Measurement*, 91, 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.084>
- [84] Jones, D. I. G. (2001). *Handbook of viscoelastic vibration damping*. John Wiley & Sons.
- [85] Nashif, A. D., Jones, D. I. G., & Henderson, J. P. (1985). *Vibration damping*. John Wiley & Sons.
- [86] Rao, M. D. (2003). Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. *Journal of Sound and Vibration*, 262(3), 457-474. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00106-8)
- [87] Fan, S., Wang, Y., & Li, H. (2024). Research on vibration and noise reduction performance of magnetic damping material based on recycling of waste rubber. *Proceedings of SPIE*, 13279, 132793M. <https://doi.org/10.1117/12.3044558>
- [88] Behl, M., & Lendlein, A. (2007). Shape-memory polymers. *Materials Today*, 10(4), 20-28. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70047-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70047-0)
- [89] Fuller, C. R., Elliott, S. J., & Nelson, P. A. (1996). *Active control of vibration*. Academic Press.
- [90] Menard, K. P. (2008). *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction* (2nd ed.). CRC Press.
- [91] Nakra, B. C. (1998). Vibration control in machines and structures using viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*, 211(3), 449-465. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1317>
- [92] Donnet, J. B., Bansal, R. C., & Wang, M. J. (1993). *Carbon black: Science and technology* (2nd ed.). Marcel Dekker.

- [93] Payne, A. R. (1962). The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. Part I. *Journal of Applied Polymer Science*, 6(19), 57-63. <https://doi.org/10.1002/app.1962.070061906>
- [94] Neethirajan, J., Parathodika, A. R., Hu, G. H., Kalaitzidou, K., & Bose, S. (2022). Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: The state of the art. *Functional Composite Materials*, 3(1), 7.
- [95] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties. [Doctoral dissertation, University of Twente].
- [96] Bhattacharyya, S., Lodha, V., Dasgupta, S., & Mukhopadhyay, R. (2019). Influence of highly dispersible silica filler on the physical properties, tearing energy, and abrasion resistance of tire tread compound. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(29), 47560.
- [97] Cichomski, E. M. (2015). Silica-silane reinforced passenger car tire treads. [Doctoral dissertation, University of Twente].
- [98] Kim, J. T., & Oh, T. S. (2007). Tire reinforcement with nanocomposites. In A. K. Bhowmick (Ed.), *Current topics in elastomers research* (pp. 887-903). CRC Press.
- [99] Rothon, R. N. (Ed.). (2003). *Particulate-filled polymer composites* (2nd ed.). Rapra Technology Limited.
- [100] Wypych, G. (Ed.). (2016). *Handbook of fillers* (4th ed.). ChemTec Publishing.
- [101] Heinrich, G., & Klüppel, M. (2002). Recent advances in the theory of filler networking in elastomers. *Filled Elastomers Drug Delivery Systems*, 160, 1-44. https://doi.org/10.1007/3-540-45362-8_1
- [102] Wang, M. J. (1998). Effect of polymer-filler and filler-filler interactions on dynamic properties of filled vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*, 71(3), 520-589. <https://doi.org/10.5254/1.3538492>
- [103] Periyathamby, H. (2004). Helmholtz resonator for reducing tire cavity resonance and in-vehicle noise. *Canadian Acoustics*, 32(3), 166-167. <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/1702>
- [104] Sainty, S., Tawaf, A., Richard, J., & Wang, X. (2012). Analysis of potential solutions to audible tire cavity and rim coupling resonance noise. *Proceedings of ASME 2012 Noise Control and Acoustics Division Conference*, 15, 269454.

- [105] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293.
- [106] Yamauchi, H., & Akiyoshi, Y. (2002). Theoretical analysis of tire acoustic cavity noise and proposal of improvement technique. *JSAE Review*, 23(1), 89-94.
- [107] Continental. (2024). ContiSilent technology. Continental Tires. <https://www.continental-tires.com/products/b2c/car/continental-tire-technologies/contisilent/>
- [108] Michelin. (2024). Acoustic technology. Michelin Tires. <https://www.michelinman.com/auto/why-michelin/technological-innovations/acoustic-technology>
- [109] Continental. (2024). ContiSilent: Reduce noise in your car. Continental Tires. <https://www.continental-tires.com/products/b2c/car/continental-tire-technologies/contisilent/>
- [110] Michelin. (2024). Reduce noise in your car with Michelin Acoustic Technology. Michelin Tires. <https://www.michelinman.com/auto/why-michelin/technological-innovations/acoustic-technology>
- [111] Pirelli. (2024). PNCS: Pirelli Noise Cancelling System technology. Pirelli Tyres. <https://www.pirelli.com/tyres/en-ww/car/tech-and-knowledge/pncs>
- [112] Goodyear. (2024). Reduce noise in your car with SoundComfort. Goodyear Tyres. https://www.goodyear.eu/en_gb/consumer/why-goodyear/soundcomfort-technology.html
- [113] Allard, J. F., & Atalla, N. (2009). *Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [114] SimpleTire. (2024). Noise reducing tire technology: Driving in silence. SimpleTire Blog. <https://simpletire.com/learn/tire-news-information/noise-reduction-technology>
- [115] Rema Tip Top. (2024). Technical bulletin: Sound suppression tires. Rema Tip Top North America. https://www.rematiptop.com/assets/tech/trm/technical_bulletins/

- [116] Car and Driver. (2017). Tested: Do acoustically insulated tires really hush road noise? Car and Driver. <https://www.caranddriver.com/news/a15345724/tested-do-acoustically-insulated-tires-really-hush-road-noise/>
- [117] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). Fundamentals of acoustics (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [118] Zhao, W., Liu, X., Shan, Y., & He, T. (2021). Design and simulation of Helmholtz resonator assembly used to attenuate tire acoustic cavity resonance noise. INTER-NOISE 2021, 263(6), 2330-2338. <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2160>
- [119] Periyathamby, H. (2004). Helmholtz resonator for reducing tire cavity resonance and in-vehicle noise. Canadian Acoustics, 32(3), 166-167.
- [120] Daniel, J. O. (2020). Automotive wheel and tyre design for suppression of acoustic cavity noise through the incorporation of passive resonators. Journal of Sound and Vibration, 473, 115235.
- [121] Zhao, W., Liu, X., Shan, Y., & He, T. (2021). Design and simulation of Helmholtz resonator assembly used to attenuate tire acoustic cavity resonance noise. INTER-NOISE 2021, 263(6), 2330-2338.
- [122] Sainty, S., Tawaf, A., Richard, J., & Wang, X. (2012). Analysis of potential solutions to audible tire cavity and rim coupling resonance noise. Proceedings of ASME 2012 Noise Control and Acoustics Division Conference, 15, 269454.
- [123] Sainty, S., Tawaf, A., Richard, J., & Wang, X. (2012). Analysis of potential solutions to audible tire cavity and rim coupling resonance noise. Proceedings of ASME 2012 Noise Control and Acoustics Division Conference.
- [124] Cummer, S. A., Christensen, J., & Alù, A. (2016). Controlling sound with acoustic metamaterials. Nature Reviews Materials, 1(3), 16001. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.1>
- [125] Elliott, S. J., & Nelson, P. A. (1993). Active noise control. IEEE Signal Processing Magazine, 10(4), 12-35. <https://doi.org/10.1109/79.248551>
- [126] Costin, M. H., & Elzinga, D. R. (1989). Active reduction of low-frequency tire impact noise using digital feedback control. IEEE Control Systems Magazine, 9(5), 59-64. <https://doi.org/10.1109/37.29579>

- [127] Bolton, J. S., & Kim, N. H. (1997). Use of CFD to calculate the dynamic resistive end correction for microperforated materials. *Acta Acustica United with Acustica*, 83(4), 559-565.
- [128] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293.
- [129] Zheng, Y., Li, L., Li, Y., & Ren, G. (2012). Dynamic characteristics of aluminum wheels with constrained layer damping treatment. *Advances in Mechanical Engineering*, 4, 762439. <https://doi.org/10.1155/2012/762439>
- [130] Pohl, A., Steindl, R., & Reindl, L. (1999). The “intelligent tire” utilizing passive SAW sensors-measurement of tire friction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(6), 1041-1046. <https://doi.org/10.1109/19.816111>
- [131] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. INFORMEX.
- [132] Watts, G. R., Chandler-Wilde, S. N., & Morgan, P. A. (1999). The combined effects of porous asphalt surfacing and barriers on traffic noise. *Applied Acoustics*, 58(3), 351-377. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00045-0)
- [133] Sandberg, U. (2001). Tyre/road noise-myths and realities. Proceedings of the 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. The Hague, Netherlands.
- [134] Licitra, G., Teti, L., Cerchiai, M., & Bianco, F. (2017). The influence of tyres on the use of the CPX method for evaluating the effectiveness of a noise mitigation action based on low-noise road surfaces. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.002>
- [135] Sandberg, U. (1998). Noise trailers of the world: Tools for tire/road noise measurements with the close-proximity method. NTERAC 98-06, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:672828/FULLTEXT01.pdf>

- [136] Bendtsen, H., Skov, R. D., & Andersen, B. (2008). Rolling resistance and fuel consumption—A correlation based on measurements in the laboratory and on the road. Proceedings of 10th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Paris, France.
- [137] Beckenbauer, T. (2003). Optimization of porous pavements for noise reduction. Proceedings of the Eighth International Congress on Sound and Vibration. Honolulu, Hawaii.
- [138] Donovan, P. R. (2006). Comparative measurements of tire/pavement noise in Europe and the United States. Proceedings of NOISE-CON 2006. Honolulu, Hawaii.
- [139] Watts, G. R., Chandler-Wilde, S. N., & Morgan, P. A. (1999). The combined effects of porous asphalt surfacing and barriers on traffic noise. *Applied Acoustics*, 58(3), 351-377.
- [140] Sandberg, U., & Mioduszewski, P. (2012). The importance for noise reduction of the bottom layer in double-layer porous asphalt. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 3277. <https://doi.org/10.1121/1.4708215>
- [141] Yamaguchi, M., Nakagawa, H., & Mizuno, T. (1999). Sound absorption mechanism of porous asphalt pavement. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 20(1), 29-36. <https://doi.org/10.1250/ast.20.29>
- [142] Iwase, T., & Kawabata, R. (1999). Measurements of basic acoustical properties of the porous pavement and their applications to the estimation of road traffic noise reduction. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 20(1), 63-74. <https://doi.org/10.1250/ast.20.63>
- [143] Iwase, T. (2000). Acoustic properties of porous pavement with double layers and its reduction effects for road traffic noise. Proceedings of Inter-Noise 2000, Nice, France. <http://www.conforg.fr/internoise2000/cdrom/data/articles/000548.pdf>
- [144] Vázquez, V. F., Luong, J., Bueno, M., Terán, F., & Paje, S. E. (2016). Assessment of an action against environmental noise: Acoustic durability of a pavement surface with crumb rubber. *Science of the Total Environment*, 542, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.102>

- [145] Nielsen, E., Andersen, B., & Bendtsen, H. (2016). Optimization of thin asphalt layers. *Road and Transport Research*, 25(2), 38-52.
- [146] Li, T. (2016). A state-of-the-art review of measurement techniques on tire-pavement interaction noise. *Measurement*, 128, 325-351. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.056>
- [147] Kuijpers, A., & van Blokland, G. (2001). Tyre/road noise models in the last two decades: A critical evaluation. *Proceedings of Inter-Noise 2001*. The Hague, Netherlands.
- [148] Rasmussen, R. O., Bernhard, R. J., Sandberg, U., & Mun, E. P. (2007). The little book of quieter pavements. Federal Highway Administration Report FHWA-IF-08-004.
- [149] Li, T. (2018). A literature review of the tire-pavement interaction noise and reduction approaches. *Journal of Vibroengineering*, 20(6), 2325-2345. <https://doi.org/10.21595/jve.2018.19935>
- [150] Bendtsen, H., Lu, Q., & Kohler, E. (2010). Acoustic aging of asphalt pavements: A Californian/Danish comparison. *Road Materials and Pavement Design*, 11(sup1), 151-177. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690330>
- [151] Sousa, J. B., Pais, J. C., Saim, R., Way, G. B., & Stubstad, R. N. (2012). Asphalt-rubber gap graded mixture design: A performance-based approach. *Proceedings of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Istanbul, Turkey.
- [152] de León, G., Del Pizzo, L. G., Teti, L., Moro, A., Bianco, F., Fredianelli, L., & Licitra, G. (2020). Evaluation of tyre/road noise and texture interaction on rubberised and conventional pavements using CPX and profiling measurements. *Road Materials and Pavement Design*, 21(sup1), S91-S102. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1735493>
- [153] Sirin, O., Paul, D. K., & Kassem, E. (2013). State of the art study on aging of asphalt mixtures and use of antioxidant additives. *Advances in Civil Engineering*, 2013, 481284. <https://doi.org/10.1155/2013/481284>
- [154] Licitra, G., Teti, L., Cerchiai, M., & Bianco, F. (2017). The influence of tyres on the use of the CPX method for evaluating the effectiveness of a noise mitigation

- action based on low-noise road surfaces. *Transportation Research Part D*, 55, 217-226.
- [155] Descornet, G. (2005). Low-noise road surfaces: European state of the art. Proceedings of the 34th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Rio de Janeiro, Brazil.
- [156] Sandberg, U. (2003). The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. Proceedings of EuroNoise 2003. Naples, Italy.
- [157] Haider, M., Conter, M., Sandberg, U., Bergmann, I., Hecht, M., Stanek, B., & Reichel, C. (2004). Development of a cost effective and sustainable way of maintaining and renewing the noise reducing properties of porous asphalt pavements. SILENCE Project Report. European Commission.
- [158] McDaniel, R. S., & Coree, B. J. (2003). Identification of laboratory techniques to optimize superpave HMA surface friction characteristics. National Cooperative Highway Research Program Project 1-37A. Transportation Research Board.
- [159] Yu, X., Zaumanis, M., dos Santos, S., & Poulidakos, L. D. (2014). Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, 135, 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>
- [160] Flintsch, G. W., de León Izeppi, E., McGhee, K. K., & Rado, Z. (2003). Field evaluation of high-speed profilers for rut depth measurement. *Journal of Testing and Evaluation*, 31(3), 237-245. <https://doi.org/10.1520/JTE12304J>
- [161] Prowell, B. D., & Franklin, A. G. (1996). Evaluation of cold-mix patching materials. *Transportation Research Record*, 1545(1), 78-84. <https://doi.org/10.1177/0361198196154500110>
- [162] Ferreira, A., Antunes, A., & Picado-Santos, L. (2002). Probabilistic segment-linked pavement management optimization model. *Journal of Transportation Engineering*, 128(6), 568-577. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:6\(568\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:6(568))
- [163] Walls III, J., & Smith, M. R. (1998). Life-cycle cost analysis in pavement design—Interim technical bulletin. Federal Highway Administration Report FHWA-SA-98-079.