

城市轨道交通阻尼环车轮的降噪研究

国新春 刘 智 黄孝卿 宁 坤 刘海波 张意哲

(宝武集团马钢轨交材料科技有限公司, 243003, 马鞍山//第一作者, 工程师)

摘 要 目的:在城市轨道交通的发展普及和列车及环境振动噪声备受关注的背景下,为了提升乘客的乘车体验及舒适性,需对车轮降噪进行研究。方法:基于轮轨噪声的产生机理分析,从车轮设计角度出发,提出了低噪声车轮选型。通过阻尼环降噪车轮的阻尼比分析,降噪车轮的材料及热处理工艺研究,从而掌握低噪声车轮研发的关键技术。结果及结论:研究结果表明:在 ER9 材质的基础上通过 Cr、Al 元素合金成分优化以达到降噪车轮的高塑韧性要求,从而保证 ER9 材质的降噪车轮具有较好的机加工性能,保证阻尼槽的加工精度;同时,通过制定相匹配的新型热处理工艺,保证了车轮强硬度水平,进而达到车轮使用寿命要求。阻尼环降噪车轮的降噪性能检测表明:在车轮自由状态下,由单环增加到双环,降噪量有所提高,但阻尼环的直径对车轮振动声辐射影响不显著;双环全预紧阻尼环车轮较单环全预紧阻尼环车轮,在径向激励下降噪效果增加了 5.7 dB(A);在轴向激励下降噪效果增加了 7.1 dB(A)。

关键词 城市轨道交通; 车轮; 阻尼环; 降噪

中图分类号 TB533+.2:U270.331+1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.026

noise reduction wheel, ensuring that ER9 material noise reduction wheels have good machining performance for the machining accuracy of damping grooves. At the same time, a matching new heat treatment process is developed to ensure the strength and hardness level of the wheel, thereby meeting the wheel service life requirement. The measurement of noise reduction performance of damping ring noise-reduction wheel shows that in the free state of wheels, the noise reduction amount increases from single ring to double ring, but the impact of damping ring diameter on wheel vibration and sound radiation is not significant; under radial excitation, the noise reduction effect of double ring fully pre-tensioned damping wheel increases by 5.7 dB (A) compared to single ring fully pre-tensioned damping wheel; while under axial excitation, the noise reduction effect increases by 7.1 dB (A).

Key words urban rail transit; wheel; damping ring; noise reduction

Author's address Baowu Group Masteel Rail Transit Materials Technology Co., Ltd., 243003, Maanshan, China

Noise Reduction of Urban Rail Transit Damping Ring Wheel

GUO Xinchun, LIU Zhi, HUANG Xiaoqing, NING Shen, LIU Haibo, ZHANG Yizhe

Abstract **Objective:** In the context of urban rail transit development popularization and prevailing attention on train and environment vibration noise, in order to improve passengers' riding experience and comfort, it is necessary to conduct research on wheels noise reduction. **Method:** Based on wheel-rail noise generation mechanism analysis, from the perspective of wheel design, the selection of low-noise wheel type is proposed. Through the analysis of damping ratio of damping ring wheels noise reduction and the research on noise reduction wheel materials and heat treatment processes, key technologies for the development of low-noise wheel can be mastered. **Result & Conclusion:** Research results show that based on ER9 material, the alloy composition of Cr and Al elements is optimized to meet the high plasticity and toughness requirements of

随着城市轨道交通的普及,轨道交通噪声对人口密集区的影响已成为急需解决的问题。开发降噪车轮,满足国内市场需要,不仅符合国家高技术产业化发展战略的要求,而且能给企业和地方带来巨大的经济效益。我国降噪车轮的研制正处于起步阶段,加快城市轨道交通用降噪车轮的研制步伐,实现城市轨道交通用降噪车轮产业化,对我国未来车轮产业的发展有重要作用,同时能大幅提高我国车轮在高端产品的竞争力。

1 轮轨噪声的产生机理

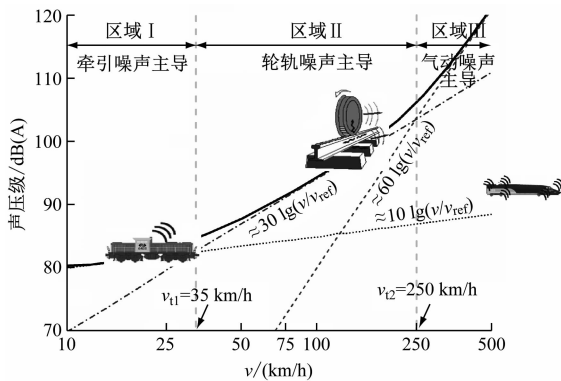
铁路噪声主要由轮轨噪声、牵引噪声和空气动力噪声等组成^[1]。它们随列车运行速度变化的关系如图1所示。由图1可见,按照牵引噪声、轮轨噪声和空气动力噪声占主导所对应的列车运行速度范围,可以将其分为3个区段,在2个不同区段间转变的列车运行速度称为声学转变速度,如图第一声

学转变速度 v_{u1} 和第二声学转变速度 v_{u2} 所示:

1) 当列车低于 v_{u1} ($v_{u1} = 35 \text{ km/h}$) 时,铁路噪声主导成分为铁道车辆的牵引噪声,对应的是低速运行的城市轨道交通;

2) 当列车速度在 v_{u1} 和 v_{u2} 之间 ($35 \sim 250 \text{ km/h}$) 时,铁路噪声主导成分为轮轨噪声,对应的是较高速度城市轨道交通、常规铁路运营和快速轨道交通等情况;

3) 当列车速度大于 v_{u2} ($v_{u2} = 250 \text{ km/h}$) 时,空气动力噪声随速度急剧增大,将超过轮轨噪声,逐渐成为铁路噪声主导成分,对应的是高速列车运营情况。



注: v 为列车运行速度; v_{ref} 为基准速度。

图1 铁路噪声随列车运行速度变化的关系

Fig. 1 Relationship between railway noise and train running speed

轮轨噪声包括轮轨滚动噪声、冲击噪声和曲线啸叫。轮轨滚动噪声是由于轮轨表面粗糙度激发车轮、钢轨和轨枕结构振动,并通过周围空气向外传播而产生的,其产生机理如图2所示,轮轨噪声频谱特性如图3所示。低于 500 Hz ,轮轨滚动噪声主要来自轨枕的贡献;在 $500 \sim 1\,600 \text{ Hz}$ 频率范围,轮

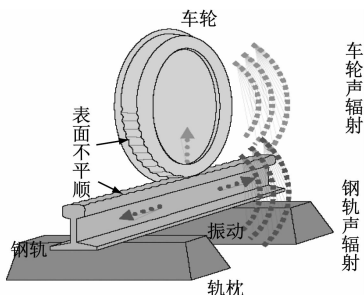


图2 轮轨噪声产生机理及其传播途径

Fig. 2 Generation mechanism and propagation path of wheel/rail noise

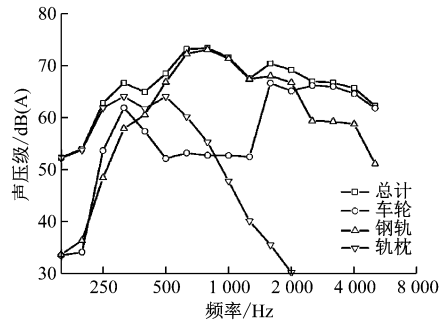


图3 轮轨噪声频谱特性

Fig. 3 Spectrum characteristics of wheel-rail noise

轨滚动噪声主要来自钢轨的贡献;大于 $1\,600 \text{ Hz}$ 频率范围,轮轨滚动噪声主要来自车轮的贡献^[2]。

冲击噪声是由车轮或钢轨表面的局部不连续性激励而产生的。这种局部不连续性主要表现为钢轨的轨缝、不平坦的钢轨接头、车轮和钢轨表面较大的剥离掉块、局部擦伤等。车轮一旦遇到以上情况时,其竖向加速度将发生改变,轮轨接触面产生很大的作用力,这一作用力使得车轮和钢轨振动并引起轮轨声辐射。其与滚动噪声相似之处在于,两者都由竖向振动引起。随着我国铁路无缝线路的大面积推广和使用以及对车轮扁疤进行及时镟修,冲击噪声已经有了很大改善。

啸叫是非常恼人的高频纯音,其频率通常是人耳所特别敏感的,当列车通过小曲线半径时,轮轨接触面产生的粘滑力使得车轮振动而产生啸叫^[3]。许多已有的模型对啸叫噪声进行了解释和预测。其中,影响啸叫的主要因素有:曲线半径、轮轨力和车轮的损耗因子及声辐射效率等。啸叫为车轮不稳定振动产生的负损耗因子所致。而使振动稳定的就是提供足够的阻尼。因此,通常认为,抑制啸叫的办法是增加车轮的阻尼^[4]。

2 阻尼环降噪车轮设计

2.1 阻尼环降噪车轮的阻尼比分析

阻尼环车轮的降噪原理是利用阻尼环与车轮凹槽接触界面之间的干摩擦阻尼以达到减振降噪的目的。摩擦使振动的机械能转化为热能而发散于介质中,从而产生阻尼效应。其中,材料阻尼属于内摩擦阻尼,而摩擦阻尼属于外摩擦阻尼,对结构而言,它们之和为结构的阻尼特性。为了表征结构的阻尼特性,一般采用模态阻尼比^[5]。

表1分别给出了自由状态下标准车轮和阻尼车轮在 $6\,500 \text{ Hz}$ 范围内的模态阻尼比测试结果,同时

也给出了相对应的模态阻尼比增量的相对百分比。由表 1 可见,阻尼环可显著提高自由状态下车轮的模态阻尼比,增设阻尼环后,最大的阻尼比增量相对百分比可达 613. 77%,即其在原有模态阻尼比的基础上增加 6 倍。

在 800 ~2 500 Hz 轮轨噪声显著频率区段,阻

尼环对车轮的模态阻尼比提高作用也较显著,由此可预测阻尼环对该频率区段的轮轨噪声抑制作用将会比较显著。总体而言,高频区段的模态阻尼比增量要比中低频高,这与国际报道的阻尼环车轮高频噪声抑制效果显著的已有研究结论是相吻合的。

表 1 自由状态车轮模态阻尼比测试结果
Tab.1 Test results of wheel modal damping ratio in free state

标准车轮		阻尼车轮		阻尼车轮的 阻尼增幅 百分比/%	标准车轮		阻尼车轮		阻尼车轮的 阻尼增幅 百分比/%
频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比		频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	
472	0. 347	464	0. 670	93. 29	3 564	0. 076	3 540	0. 481	530. 82
680	0. 348	676	0. 315	-9. 69	4 176	0. 085	4 176	0. 281	229. 30
1 064	0. 296	1 040	0. 418	41. 37	4 324	0. 075	4 276	0. 191	153. 16
1 216	0. 140	1 200	0. 439	213. 21	4 400	0. 042	4 316	0. 180	332. 53
2 056	0. 132	2 064	0. 246	87. 07	4 552	0. 085	4 536	0. 175	106. 49
2 160	0. 066	2 148	0. 379	471. 57	4 936	0. 111	5 196	0. 193	74. 96
2 428	0. 084	2 392	0. 268	218. 50	5 340	0. 047	5 332	0. 090	90. 78
2 464	0. 074	2 440	0. 486	558. 98	5 436	0. 031	5 448	0. 133	332. 88
2 792	0. 106	2 796	0. 178	67. 92	5 468	0. 059	5 580	0. 400	575. 11
2 900	0. 108	2 920	0. 745	591. 49	5 584	0. 112	6 188	0. 228	102. 74
3 129	0. 076	3 204	0. 145	90. 16	6 336	0. 025	6 372	0. 174	589. 11
3 500	0. 046	3 404	0. 328	613. 77					

表 2 分别给出了装备车轴轮轨接触状态下标准车轮和阻尼车轮在 6 500 Hz 范围内的模态阻尼比测试结果,同时也给出了相对应的模态阻尼比增量的相对百分比。由表 2 可见,阻尼环可显著提高装

备车轴轮轨接触状态下车轮的模态阻尼比,增设阻尼环后,最大的阻尼比增量相对百分比可达 865. 61%,即其在原有模态阻尼比的基础上增加 8 倍多。

表 2 装备车轴轮轨接触状态车轮模态阻尼比测试结果
Tab.2 Test results of wheel modal damping ratio under wheel-rail contact condition equipped with axles

标准车轮		阻尼车轮		阻尼车轮的 阻尼增幅 百分比/%	标准车轮		阻尼车轮		阻尼车轮的 阻尼增幅 百分比/%
频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比		频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	
444	1. 535	452	1. 690	10. 10	2 896	0. 079	2 908	0. 477	504. 22
740	3. 165	688	3. 556	12. 35	3 216	0. 061	3 240	0. 322	428. 49
960	1. 002	976	1. 060	5. 82	3 500	0. 083	3 540	0. 451	444. 67
1 064	0. 567	1 036	0. 768	35. 45	4 176	0. 067	4 164	0. 238	257. 14
1 212	0. 334	1 200	0. 530	58. 80	4 324	0. 037	4 336	0. 356	865. 61
1 264	0. 705	1 288	0. 869	23. 20	4 612	0. 066	4 960	0. 206	212. 91
1 892	0. 108	1 872	0. 902	733. 26	5 336	0. 066	5 196	0. 229	246. 97
2 160	0. 070	2 108	0. 546	684. 21	5 436	0. 052	5 472	0. 228	340. 51
2 472	0. 093	2 400	0. 338	262. 47	5 596	0. 049	5 604	0. 422	765. 57
2 792	0. 084	2 752	0. 435	418. 06	6 336	0. 058	6 188	0. 200	243. 54

在 800 ~ 2 500 Hz 轮轨噪声显著的频率区段, 阻尼环对装备车轴轮轨接触状态下车轮模态阻尼比的提高作用也较显著, 且比自由状态下的还要大, 这与轮轨接触阻尼有关。

2.2 降噪车轮材料研究

阻尼环车轮由阻尼环和整体辗钢车轮组成, 根据阻尼环降噪原理, 需在轮辋内侧加工阻尼槽, 因此要求车轮在具备较好使用性能的基础上必须具有优良的机加工性能, 即具备较高强度、硬度水平的同时, 具有较好的塑性和韧性。

根据目前地铁车轮使用情况, 地铁车轮材质以 EN 13262:2020《铁路应用-轮对和转向架-车轮-产品要求》标准中的 ER9 材质为主。因此, 本项目在 ER9 材质的基础上进行合金成分优化, 以达到降噪车轮的高塑韧性要求, 从而保证 ER9 材质的降噪车轮具有较好的机加工性能。

Cr 是车轮钢中的次要固溶强化元素, 一般一部分作为置换原子发挥固溶强化作用, 一部分形成碳化物。Cr 不仅能增加钢的淬透性, 而且能在提高高碳钢硬度和耐磨性的同时而不使钢变脆, 并能提高钢的高温机械性能。

在扫描电镜下以 1 万 ~ 2 万的倍数定量分析了含 Cr 和无 Cr 车轮钢的珠光体片层间距, 统计分析结果见图 4。含 Cr 钢出现概率峰的片层间距值为 270 ~ 300 nm, 概率峰值约为 40%; 而无 Cr 钢出现概率峰的片层间距值为 330 ~ 380 nm, 概率峰值约为 30%。由此可见, 加 Cr 使车轮钢珠光体组织细化, 片层间距减小, 这对于提高车轮材料的强-韧配合是有利的。

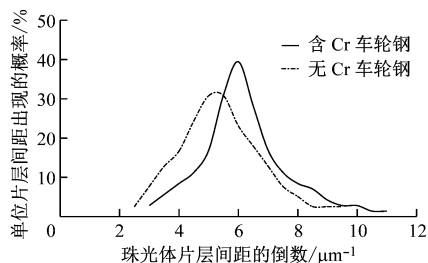


图 4 Cr 元素对珠光体片层间距的作用

Fig. 4 Effect of Cr element on pearlite lamellar spacing

Al 是钢中常用的脱氧剂, 用作炼钢时的脱氧定氢剂, 炼钢完成时钢中的 Al 除在钢中形成极少量的 Al_2O_3 外, 其余是固溶在钢中的酸溶铝, 这部分 Al 在钢中通过影响奥氏体晶粒长大行为而对力学性能产生影响, 细化奥氏体晶粒可在不影响强度的同

时明显提高韧性。图 5 为酸溶铝 Als 和车轮钢奥氏体晶粒尺寸的关系。由图 5 可知: 当 Als 的质量分数超过 0.010% 后, 会产生明显的晶粒细化作用, 这对提高综合性能是有利的。

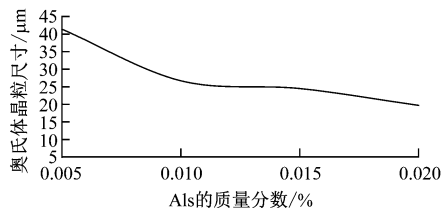


图 5 Als 和车轮钢奥氏体晶粒尺寸的关系

Fig. 5 Relationship between Als and austenitic grain size of wheel steel

2.3 降噪车轮热处理工艺研究

ER9 材质车轮含碳量较高, 从实物质量角度讲易于获得高强度、高硬度, 但同时获得较高塑性和韧性的难度较大; 从机加工角度讲, 需在车轮轮辋内侧加工阻尼槽, 而高含碳量钢强度高、裂纹敏感性大。因此, 应在轮辋具有足够强度和硬度的基础上, 增加其塑韧性, 使之具有足够余量以保证降噪车轮具有较好的机加工性能。

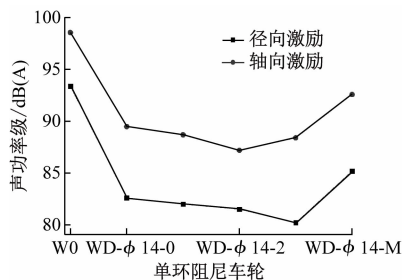
研究 ER9 材质车轮不同回火温度下的力学性能变化可知, 随着回火温度的升高车轮钢的强度逐渐下降。在 580 °C 以下, 回火温度的提高对车轮钢低温冲击韧性的改善作用不是很明显, 而在 630 °C 回火, 虽然可以提高车轮钢的韧性, 但强度也下降得很快。其主要原因为: 车轮钢的组织为珠光体 + 少量铁素体, 虽然经过轮辋淬火处理, 但仍属于高温转变组织, 其淬火应力在 500 °C 左右即可消除, 因此在不改变珠光体组织形态时提高回火温度并不能明显提高钢的韧性。而 630 °C 回火, 钢中的渗碳体已经具备了部分球化的动力学条件, 因而韧性会有一定的提高, 但此时车轮钢强度的下降已经非常显著, 很难满足车轮钢对强韧性的要求。总之, 630 °C 以上温度回火对强度损失作用较大, 不易作为车轮钢回火温度, 而 500 °C ~ 600 °C 之间回火, 回火温度越高, 强度降低越明显, 而韧性却几乎没有改善。因此, 在满足强韧性要求的前提下, 选择 500 °C 左右的回火对于车轮钢来说是比较合适的。

3 阻尼环降噪车轮降噪性能检测

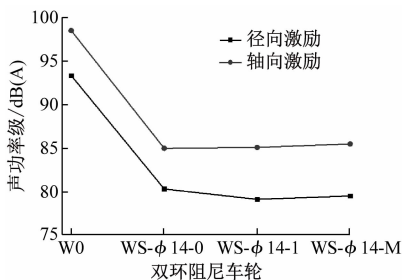
为了研究预紧力对降噪效果的影响, 找出组装参数与降噪效果的量化关系, 试验了 3 种阻尼环车

轮,其对应编号分别为阻尼环直径为 14 mm 的单环车轮 WD- ϕ 14,阻尼环直径为 14 mm 的双环阻尼车轮 WS- ϕ 14,阻尼环直径为 12 mm 的双环阻尼车轮

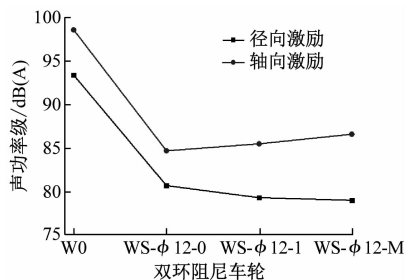
WS- ϕ 12。标准车轮 W0 为卸掉单环阻尼的 WD- ϕ 14 车轮。自由悬挂状态下阻尼车轮辐射声功率级如图 6 所示。



a) 自由悬挂状态下单环阻尼车轮 WD- ϕ 14 辐射声功率级



b) 自由悬挂状态下双环阻尼车轮 WS- ϕ 14 辐射声功率级



c) 自由悬挂状态下双环阻尼车轮 WS- ϕ 12 辐射声功率级

注:W—车轮;D—单环;S—双环;-0、-1、-2、-M—阻尼环预紧力所处状态。

图6 自由悬挂状态下阻尼车轮辐射声功率级

Fig.6 Radiated sound power level of damped wheels in free suspension state

通过试验数据,由图6可以得出结论:①在车轮自由状态下, ϕ 14 mm 单环阻尼车轮降噪效果最好的工况中,径向激励降低了 13.2 dB(A),轴向激励降低了 10.2 dB(A); ϕ 12 mm 双环阻尼车轮降噪效果最好的工况中,径向激励降低了 14.4 dB(A),轴向激励降低了 12.0 dB(A); ϕ 14 mm 双环阻尼车轮降噪效果最好的工况中,径向激励降低了 13.9 dB(A),轴向激励降低了 13.1 dB(A)。②在车轮自由状态下,车轮由单环增加到双环,降噪量有所提高; ϕ 14 mm 双环全预紧阻尼车轮较 ϕ 14 mm 单环全预紧阻尼车轮,径向激励降噪效果增加了 5.7 dB(A),轴向激励降噪效果增加增加了 7.1 dB(A)。③在车轮自由状态下,阻尼环直径对车轮振动声辐射影响不显著,阻尼环直径由 12 mm 增加至 14 mm,降噪量增加约为 1 dB(A)。

4 结语

1) 研究开发了以提高 ER9 材质降噪车轮实物综合性能和机加工性能为目标的合金优化方法和新型热处理工艺。

2) 本文从轮轨噪声产生机理及其控制原理着手,开展了阻尼车轮钢的材料成分设计研究,从合金优化和热处理工艺方面为后续车轮试制提供技术依据。通过阻尼环降噪车轮降噪性能检测的结

果综合分析评估可知,装载了阻尼环车轮对车轮噪声有显著的抑制作用。

参考文献

- [1] 刘玉霞. 阻尼环车轮振动声辐射特性试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LIU Yuxia. Experimental study on vibration and sound radiation characteristics of damping ring wheel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [2] 薛弼一, 王谛, 肖新标, 等. 辐板屏蔽式阻尼车轮振动声辐射特性试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 1.
XUE Biyi, WANG Di, XIAO Xinbiao, et al. Experimental study on vibration and sound radiation characteristics of new type of damped wheel with web-mounted noise shielded[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 1.
- [3] 邹强, 江波, 刘友存, 等. 阻尼车轮的降噪结构设计与应用[J]. 铁道车辆, 2016, 54(4): 6.
ZOU Qiang, JIANG Bo, LIU Youcun, et al. Design and application of the noise reduction structure design of damping wheels[J]. Rolling Stock, 2016, 54(4): 6.
- [4] CHRISTELLER R. Redefining the European freight wagon[J]. Railway Gazette International, 2013, 169(9): 60.
- [5] 王谛. 低噪声车轮振动声辐射特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
WANG Di. Study on acoustic radiation characteristics of low noise wheel vibration [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

(收稿日期:2021-01-29)