

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.02.012

聚氨酯合成轨枕国内研究及应用进展

席雷¹, 吕锐¹, 张金龙², 黄承², 曾飞², 张用兵³

(1. 广州地铁集团有限公司运营事业总部, 广州 510030; 2. 洛阳双瑞橡塑科技有限公司, 河南洛阳 471003;
3. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所(洛阳船舶材料研究所), 河南洛阳 471023)

摘要: 聚氨酯泡沫合成轨枕最早配合直线电机牵引系统应用于城市轨道交通, 因其良好的综合性能, 在国内获得广泛研究和应用。对比分析国内合成轨枕的技术发展历程和国外、国际相关合成轨枕技术标准, 并调研合成轨枕在国内的应用进展及使用过程中出现的问题和解决措施, 主要表现在: 横向阻力偏低, 部分道钉孔失效或涂层破损; 这些问题可通过产品结构改进及安装维护方案优化进行解决。结合国内轨道交通领域的发展需要, 及聚氨酯合成轨枕产品性能特点和市场现状, 提出聚氨酯合成轨枕产品在我国未来发展建议。

关键词: 铁路路基; 聚氨酯泡沫合成轨枕; 城市轨道交通; 标准; 应用进展

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)02-0077-07

Domestic Research and Application Progress of Polyurethane Synthetic Sleepers

XI Lei¹, LYU Rui¹, ZHANG Jinlong², HUANG Cheng², ZENG Fei², ZHANG Yongbing³

(1. Operational Business Headquarters of Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510030;
2. Luoyang Sunrui Rubber & Plastic Science and Technology Co., Ltd., Luoyang, Henan 471003;
3. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang, Henan 471023)

Abstract: Synthetic sleepers of fiber-reinforced polyurethane foam were initially applied in urban railway traffic to adapt to the linear induction motor system, and they have been developed into national and heavy-haul railways in recent years. Synthetic sleepers have been widely researched and applied nationwide owing to their excellent overall performance. The technological development history and standards of synthetic sleepers in China were analyzed and compared with foreign and ISO standards. In addition, the application progress, application problems, and solutions were investigated. Suggestions for the development and prospects of polyurethane synthetic sleepers in China were proposed by combining the requirements of domestic rail traffic with the application problems of synthetic sleepers.

Keywords: railway subgrade; foam polyurethane sleeper; railway traffic; standard; application progress

轨枕是轨道路基中承垫于钢轨下, 通过连接零件保持两股或多股钢轨之间的轨距、水平和轨向等几何形位, 并将钢轨所承受的各种荷载均匀传递于道床基

础上的构件, 是轨道的重要组成部分。传统轨道多用木轨枕或混凝土轨枕, 全球范围内应用比例超过 90%。但是木轨枕易老化腐朽、稳定性差, 使用寿命短。混

收稿日期: 2023-09-21 修回日期: 2023-12-27

第一作者: 席雷, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通轨道工程维护管理, xilei@qzmt.com

通信作者: 张金龙, 男, 硕士, 工程师, 主要从事聚氨酯复合材料研发及工程应用, 18237917521@163.com

基金项目: 国家新材料生产应用示范平台建设项目(TC180A6MR)

引用格式: 席雷, 吕锐, 张金龙, 等. 聚氨酯合成轨枕国内研究及应用进展[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(2): 77-83.

XI Lei, LYU Rui, ZHANG Jinlong, et al. Domestic research and application progress of polyurethane synthetic sleepers[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 77-83.

凝土轨枕质量大、刚度大,环境振动噪声大。因此,各类新型轨枕受到越来越多的关注,其中聚氨酯泡沫合成轨枕由于轻质高强、防腐绝缘、加工安装便捷、使用寿命长等综合优势,应用最广泛^[1-2]。

聚氨酯泡沫合成轨枕是连续玻璃纤维增强硬质聚氨酯泡沫成型的复合材料轨枕,简称合成轨枕。合成轨枕最早于1980年由日本积水化学研制成功并开始试用,随后在日本铁路建设中获得广泛应用,21世纪以来,积水化学开始向全球各地推广。2004年,广州地铁4号线在国内首次使用了合成轨枕^[2-3],一经使用,便受到国内广泛关注。2006年,中国船舶重工集团第七二五研究所洛阳双瑞橡塑科技有限公司(以下简称“洛阳双瑞”)在国内最早开始研制合成轨枕,2008年研制成功,并在广州地铁5号线批量应用^[4-5]。

合成轨枕国产化以来,已经从城市轨道交通逐渐拓展到国铁线路及重载线路桥梁、隧道、道岔等领域,获得广泛应用。本文调研了合成轨枕在国内的研究及应用进展,对比了国内外合成轨枕标准,分析了应用过程中出现的问题及解决措施,并对进一步推广应用进行展望。

1 合成轨枕技术发展历程

合成轨枕自引入国内以来,受到研制单位、设计院、施工方和运营方的广泛关注和研究,现从产品生产制造、线上应用技术和施工方案分别进行讨论。

1.1 合成轨枕制造技术进展

国内合成轨枕研制初期,因产品截面尺寸大,成型时玻璃纤维数量多,加上聚氨酯树脂配方、成型设备和工艺的限制,一次仅可成型70 mm厚的合成轨枕半成品,然后黏接成型。日本积水化学同时期也是采用黏接成型^[6]。

早期关于合成轨枕成型技术的研究鲜有报道,随着应用领域的拓展,国内多家单位开始从事合成轨枕的研制。乔冬平等^[7]通过理论模型和实测结果分析了合成轨枕中纤维体积分数的极小值和理论极大值,对合成轨枕配方设计具有指导意义;荆蓉等^[8]对合成轨枕与木轨枕的力学、动态疲劳等进行了对比测试分析,论证了合成轨枕能够满足我国国铁线路的使用要求;魏建国等^[9]研究了成型工艺对合成轨枕的性能影响;刘彦光等^[10]研究了在酸、碱、盐溶液中的浸泡时长和荧光紫外灯照射时长对合成轨枕力学性能的影响,分析了各种老化因素对合成轨枕性能的影响;杨海等^[11]探索了合成轨枕密度与弯曲性能的关系,并拟合了数

学模型,对于合成轨枕质量控制具有重要实践意义。

此外,针对合成轨枕一体成型工艺的玻璃纤维浸渍难题,各生产厂家经过多年的不断探索和研究,通过自动揉搓、高频剪切、超声辅助浸渍、高压注胶盒等装置,逐步实现大量玻纤的自动浸渍^[5]。结合聚氨酯树脂配方和成型工艺的优化,实现了合成轨枕的一体成型,显著推动了合成轨枕产品的降本增效,进一步扩大了其应用领域。据了解,目前国内多个厂家可以一次成型厚度240 mm以上的合成轨枕,成型技术达到国际领先水平。

1.2 合成轨枕线上应用技术进展

由于合成轨枕具有可现场加工、强度高、耐腐蚀等优势,2004年,广州地铁4号线在国内首次引入日本的合成轨枕,以确保直线电机感应板的安装精度^[12]。崔幼飞^[13]研究了合成轨枕的测试与应用,对合成轨枕的检测方法、质量控制标准、修补和钉固工艺等具有指导意义;何燕平等^[14]通过有限元计算模型分析扣件刚度、树脂砂浆刚度等对合成轨枕式无砟轨道的垂向受力特性的影响,为合成轨枕式无砟轨道的设计提供理论依据;常征等^[15]基于有限单元法与多体动力学理论,研究合成轨枕密度变化对有砟轨道结构力学特性的影响规律,研究结果表明:合成轨枕密度增大,车体的垂向加速度增大,横向加速度减小,脱轨系数和轮重减载率显著减小;对于钢桥梁明桥面,西南交通大学开展了广泛的研究,初步掌握明桥面合成轨枕的技术要求、设计规范和施工方案等^[16-18];2014年,西南交通大学联合成都铁路局、洛阳双瑞等单位,开展了合成轨枕在国铁桥梁明桥面的研究和应用,并在沪昆线水花大桥进行了试用^[18]。

合成轨枕技术在国内应用以来,研究者^[18-20]针对合成轨枕在有砟道床/无砟道床的道岔、小半径曲线、钢桥梁明桥面等不同路基的实用性和施工技术开展了广泛研究和试验,掌握了一套行之有效的施工方案,道床结构稳定,应用状态良好。

2 合成轨枕标准对比

推动轨道交通行业产品标准化,是引领行业发展,走向国际化的必经之路^[21]。2012年,经过国内多年应用,由中国住房和城乡建设部提出,广州地铁作为负责起草单位,编制了《聚氨酯泡沫合成轨枕》(CJ/T 399—2012)行业标准^[22],明确了城市轨道交通合成轨枕技术标准和试验方法等,推动了合成轨枕在国内的发展。2019年,中国铁路总公司颁发了《铁

路钢梁用 HFFP 复合材料桥枕暂行技术条件》(TJ/GW 161—2019)^[23], 明确了列车轴重 270 kN 的客货共线铁路钢梁用合成轨枕的技术条件。

将上述两项国内现行的合成轨枕标准/技术条件与国际相关合成轨枕标准—日本标准 JIS E 1203^[6]、国际标准 ISO 12856^[24]进行对比, 主要性能对比如表 1 所示。

表 1 不同合成轨枕标准对比

Table 1 Comparison of different synthetic sleeper standards

序号	项目	CJ/T 399—2012	HFFP 桥枕暂行条件	JIS E 1203	ISO12856		
					A 型	B 型	C 型
1	密度/(g/cm ³)	0.74±0.1	1.2±0.006	0.74±0.1	≥0.64	≥0.8	≥0.8
2	弯曲强度/MPa	≥70	≥200	≥70	≥28	≥18	≥13.8
3	弯曲弹性模量/MPa	≥6 000	≥12 000	≥6 000	≥6 000	≥2 500	≥1 170
4	竖向压缩强度/MPa	≥40	≥120	≥40	≥40	≥8	—
5	剪切强度/MPa	≥7	≥18	≥7	≥7	≥8	≥6.2
6	黏接剪切强度/MPa	≥7(母材破坏)	≥18(母材破坏)	≥7(母材破坏)	≥7(母材破坏)	—	—
7	螺纹道钉抗拔强度/kN	≥40	≥60	≥30	—	—	—
8	成品抗弯荷载/kN	≥170	≥1 000	≥170	—	—	—
9	吸水量/吸水率	≤10 mg/cm ²	≤6 mg/cm ²	≤10 mg/cm ²	≤2%	≤2%	—
10	线性热膨胀系数/℃	—	≤1×10 ⁻⁵	—	≤5×10 ⁻⁵	≤4×10 ⁻⁵	≤13.5×10 ⁻⁵
11	适用线路领域	城市轨道交通	轴重 270 kN 的客货共线铁路钢梁	—	轴重 20 t, 时速 130 km/h 或轴重 14 t, 时速 300 km/h 线路	轴重 22.5 t, 时速 160 km/h 的线路	轴重 35 t, 时速 80 km/h 的重载线路

注: 1. CJ/T 399 及 JIS E 1203 标准对线膨胀系数未作要求, 实测数据为: $1 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$;

2. JIS E 1203 标准未明确适用线路, 但根据其业绩介绍, 该产品在城市轨道交通、高速铁路、重载线路均有应用^[25]。

由表 1 可见, CJ/T 399—2012 与 JIS E 1203 标准、ISO 12856 中的 A 型轨枕要求基本一致, 产品结构均为连续玻璃纤维增强树脂基复合材料, 仅 CJ/T 399—2012 标准中的道钉抗拔要求略有提高。ISO 12856 标准的 B 型轨枕对应为短玻纤增强塑料型合成轨枕; C 型轨枕对应为回收塑料/橡胶共混模压成型的橡塑轨枕。根据 ISO 12856 标准, 轴重 35 t, 时速 80 km/h 的重载线路, 使用轨枕性能参照 ISO 12856 中的 C 型轨枕。此外, 日本积水化学用于欧洲的轴重 25 t(约 250 kN), 时速 160 km/h 的轨道交通线路, 使用密度为 0.74 g/cm³ 的合成轨枕^[25]。相比而言, HFFP 桥枕要求远高于其他各类轨枕, 用于轴重 270 kN 的客货共线铁路, 预计具有较大的安全余量。

3 合成轨枕国内应用现状

合成轨枕产品自国产化以来, 在有砟道床/无砟道床的道岔、小半径曲线、钢桥梁明桥面、隧道等各种地段获得广泛研究及应用, 运行状态良好, 解决多项技术难题。据了解, 近些年来, 国内合成轨枕每年用量约 4 万根, 累计用量超过 40 万根。现结合应用线路

概况进行简要介绍。

3.1 有砟道床岔枕

轨道交通线路停车场道岔区域维护工作量较大, 普遍使用有砟道床。合成轨枕由于安装便捷、可现场加工、后期维护工作量小等优势, 在有砟道床道岔区域获得较多应用^[2]。此外, 近些年来, 部分停车场原先使用的木轨枕逐渐腐朽破坏, 需要进行更换改造, 选择合成轨枕替代木轨枕, 轨道原先使用的扣件系统无需更换, 可大幅降低改造成本。

3.2 无砟道床岔枕

轨道交通正线普遍使用无砟整体道床, 与直线线路相比, 道岔区和曲线地段轨道易出现超高, 产生较大的轮轨横向荷载, 使轨道产生横向振动, 导致环境振动病害^[26]。合成轨枕由于轻质高强、加工便捷、韧性良好, 刚度较小, 且具有一定的减振效果^[21], 在整体道床道岔获得广泛应用。

3.3 正线整体道床

对于正线线路, 普遍使用混凝土轨枕, 合成轨枕由于造价较高, 极少使用。但是对于部分线路, 特别是跨海隧道, 轨道回路产生的杂散电流容易造成沿线

金属管路发生电化学腐蚀,因此选择绝缘性好的合成轨枕^[12],具有良好的杂散电流防治效果。2019年,在厦门地铁3号线翔安跨海隧道段,为避免海水渗透造成杂散电流过大问题,使用了合成轨枕。目前应用多年,效果良好,如图1所示。



图1 合成轨枕在厦门地铁3号线整体道床的应用
Figure 1 Application of synthetic sleepers in the ballastless track of Xiamen Metro Line 3

3.4 明桥面钢梁桥枕

对于明桥面钢桁梁轨道,传统多使用木轨枕,但木轨枕容易腐朽开裂,使用寿命短,需要每年进行防腐维护,维护工作量大^[2]。因此选用合成轨枕替代木轨枕成为研究热点。合成轨枕最早在国内明桥面的应用是2010年,在南京地铁S3线(原南京地铁12号线)大胜关长江大桥使用了合成轨枕^[27],并在2018年重庆轨道交通环线朝天门长江大桥的建设中,使用类似技术^[22]。2014年以来,成都铁路局最早开始探索合成轨枕在国铁线路钢桥梁明桥面的应用,通过相关测试试验和模拟计算,制定了成都局明桥面钢桁梁合成轨枕技术标准^[18],并在沪昆线、成昆线等线路近20座桥梁进行了合成轨枕替换,应用效果良好。近年来,国内大量明桥面用聚氨酯合成轨枕替换了木轨枕。

4 合成轨枕应用问题及解决措施

4.1 横向阻力不足

合成轨枕密度约为 0.74 g/cm^3 ,仅为混凝土轨枕的1/4,并低于普通木枕(约 $0.8\sim 1.0\text{ g/cm}^3$),在使用初期,特别是有砟道床道岔和小半径曲线路段,曾出现道床横向阻力不足的问题。但结合现场使用工况,轨道设计师和合成轨枕研制人员通过增加防滑块、地锚拉杆、底部防滑、侧面防滑、预弯钢轨等措施,有效解决了合成轨枕道床横向阻力不足的问题^[8,13,28],如图2所示。底面或侧面增加防滑结构,可提升横向阻力近20%^[28]。



图2 高横向阻力的合成轨枕结构
Figure 2 Structure of synthetic sleepers with high lateral resistance

4.2 道钉孔失效

截至目前,合成轨枕在国内应用近20年,累计用量超40万根,整体使用良好,道钉失效情况鲜有发生。这主要得益于合成轨枕具有吸水率低、抗菌、抗腐蚀、抗老化等优势。经过调研分析,合成轨枕应用过程中曾经发生的道钉孔失效情况,主要由以下原因导致:

1) 横向受力过大。合成轨枕纵向(平行纤维方向)压缩强度高,超过 60 MPa ,但横向压缩强度不佳,实测仅为 8 MPa 左右^[29]。部分应用工况合成轨枕道钉孔横向力过大,经过长期应用,道钉孔发生破损。

2) 道钉孔偏斜。施工过程中打孔偏斜,运营过程中合成轨枕受到道钉传递的力有所偏斜,导致道钉孔逐渐扩大,直至失效。

3) 安装维护过程破损。合成轨枕线路轨道维护过程中,可能多次拆卸道钉。拆卸后复拧道钉时,若未按照原螺纹拧紧,多次拆卸复拧后,会造成原道钉孔的螺纹破坏,最终逐渐失效。

4) 轨枕高度不平顺。桥梁合成轨枕应用初期,发现个别道钉孔容易破损。经过现场检查发现,合成轨枕底部刻槽平整度不佳,导致局部轨枕表面高度不平顺。列车经过时,局部道钉会受到较大的上拔力,长期作用后发生破坏。经过安装调高垫板调平,并对道钉孔修补后更换新螺纹道钉,后期应用效果良好。

4.3 涂层破损

合成轨枕是一种玻璃纤维增强聚氨酯泡沫产品,表面会有一些气孔,若成型工艺控制不佳,个别气孔可能会较大^[9-11]。为改善外观状态,多采用腻子或底漆将表面处理平整。但在室外长期使用后,表面容易发生龟裂(见图3(a)),时间继续延长,龟裂的涂层逐渐脱落,造成局部玻纤裸露(见图3(b))。虽然应用状态良好,未见产品失效,但裸露的玻纤会造成环境污染,并对维保工人皮肤产生伤害或引起不适。因此,应对表面涂层破损的合成轨枕及时修补处理,避免进一步

破损,造成环境污染或运维人员慢性伤害。

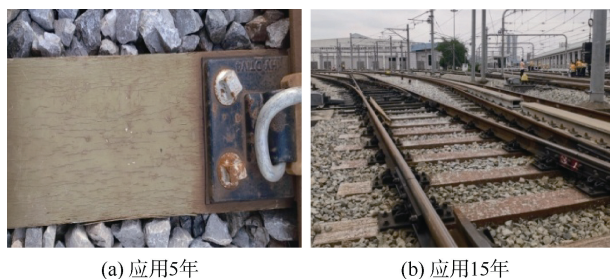


图3 合成轨枕户外应用

Figure 3 Synthetic sleepers for outdoor application

5 不同轨枕综合对比

经过对合成轨枕研究进展及应用情况调研,将合成轨枕与目前市场上常用的混凝土轨枕、木轨枕进行综合对比,如表2所示。合成轨枕初期投入成本相对较高,但是由于其力学性能良好、防腐绝缘性好、抗疲劳性好、使用寿命长等综合优势,全寿命周期成本适中,且远低于木轨枕。随着人工成本的逐渐升高,合成轨枕未来将是木轨枕的理想替代品。此外,对于绝缘效果、减振效果要求较高的特殊轨道领域,合成轨枕也可替代混凝土轨枕,具有良好的应用前景。

表2 不同类型轨枕综合对比

Table 2 Comprehensive comparison of different kinds of sleepers

序号	项目	木轨枕	混凝土轨枕	合成轨枕
1	密度/(g/cm ³)	0.8	2.4	0.74
2	质量/(kg/根)	80	300	70
3	基本力学性能	竖向压缩强度/MPa	40~50	≥50
4		横向压缩强度/MPa	5~8	≥50
5		道钉抗拔强度/kN	20~30	>60
6		弹性模量/GPa	6~8	≥40
7	抗疲劳性	1 000次出现裂纹	300万次无异常	300万次无异常
8	绝缘性	一般,吸水后变差	一般,吸水后变差	吸水率极低,绝缘性佳
9	使用寿命/年	8~12	50	预计50
10	生产效率	优质木材短缺,防腐处理繁琐,交货期长	标准轨枕效率高;岔枕模具多,生产效率较低	连续模具生产,效率高,质量稳定,交货期短
11	施工效率	质量轻,施工便捷	质量大,需大型机械配合施工	质量轻,施工便捷
12	维护	每年需防腐维护	无需维护	每10~15年表面刷漆维护
13	环境保护	防腐处理污染环境	良好	良好
14	经济性	初期投入/(元/根)	500	250
15	对比	全寿命周期成本/(元/根)	约4 900	250

注:1.表中质量、价格均以普通2 500 mm长的标准轨枕为例计算;

2.全寿命周期成本是以50年为1个周期计算,木轨枕平均需更换4次,每次施工费平均600元/根;混凝土枕无需维护,合成轨枕仅需刷漆维护3~4次;

3.上述力学性能对比中,合成轨枕性能是以《聚氨酯泡沫合成轨枕》(CJ/T399—2012)标准要求的产品为例。

6 发展展望

合成轨枕在国内经过近20年的应用和发展,目前生产技术成熟,生产成本大幅下降,且测试、设计、施工等配套技术日趋完善,已完全实现国产化,进口合成轨枕逐渐淡出国内市场。截至目前,合成轨枕广泛应用于国内城市轨道交通、国铁线路及重载铁路的桥梁、道岔、隧道等多种工况,解决了轨道交通领域的多项难题,成果显著。

但也应当看到,目前合成轨枕在国内轨道市场占有率较低,在发展和应用过程中还存在一些问题。建议从以下几方面开展研究,以进一步拓展合成轨枕应

用领域和市场。

1)针对不同轴重、车速的明桥面桥梁、有砟道床和无砟道床线路,轨枕受力工况有所不同,应对合成轨枕产品结构、截面尺寸或产品性能进行区分,进一步系列化和标准化,提高产品性价比。

2)合成轨枕在国内应用近20年,但对于线上应用后的合成轨枕性能,未见全面测试和评估。建议开展相关研究,以探索合成轨枕耐老化、耐疲劳性能和使用寿命,并指导未来合成轨枕线上应用和维护。

3)合成轨枕综合性能优良,但由于成本较高,大规模普及应用受限。建议从合成轨枕的减振降噪效果、防腐性、绝缘性等方面展开深入研究,利用其特殊

的功能性, 拓展细分应用市场。

参考文献

- [1] FERDOUS W, MANALO A, VAN ERP G, et al. Composite railway sleepers—Recent developments, challenges and future prospects[J]. Composite structures, 2015, 134: 158-168.
- [2] 曾志斌. 既有铁路木枕替代材料的研究现状及发展趋势[J]. 铁道建筑, 2016, 56(8): 1-9.
ZENG Zhibin. Research status and development trend of alternative materials of exiting wooden sleepers[J]. Railway engineering, 2016, 56(8): 1-9.
- [3] 杨新民, 张立国, 张庆. 合成树脂轨枕的应用研究[J]. 铁道标准设计, 2009, 53(6): 15-17.
YANG Xinmin, ZHANG Liguang, ZHANG Qing. Discussion on application of compound resin sleepers[J]. Railway standard design, 2009, 53(6): 15-17.
- [4] 张用兵, 陈韶章, 苏贤锋, 等. 一种合成枕木的配方及连续成型工艺: CN101328311B[P]. 2010-09-22.
ZHANG Yongbing, CHEN Shaoshang, SU Xianfeng, et al. Formula for synthesizing crosstie and continuous forming process: CN101328311B[P]. 2010-09-22.
- [5] 张勇, 刘志, 张彬, 等. 聚氨酯泡沫合成轨枕的应用及发展[J]. 聚氨酯工业, 2020, 35(4): 39-41.
ZHANG Yong, LIU Zhi, ZHANG Bin, et al. Application and development of polyurethane foam composite sleeper[J]. Polyurethane industry, 2020, 35(4): 39-41.
- [6] 日本规格协会. JIS E 1203—2007 合成まくらぎ Synthetic sleepers—Made from fiber reinforced foamed urethane[S]. 东京: 日本规格协会, 2007.
- [7] 乔冬平, 张兴刚, 张福承. 合成枕木纤维体积分含量的理论分析[J]. 材料开发与应用, 2009, 24(6): 59-61.
QIAO Dongping, ZHANG Xinggang, ZHANG Fucheng. Theoretical analysis of fiber volume fraction in synthetical sleepers[J]. Development and application of materials, 2009, 24(6): 59-61.
- [8] 荆蓉, 黄承, 张兴刚, 等. 玻纤增强聚氨酯泡沫轨枕性能及其在国铁线路中的应用[J]. 聚氨酯工业, 2020, 35(5): 3-6.
JING Rong, HUANG Cheng, ZHANG Xinggang, et al. Properties of glass fiber reinforce polyurethane foam sleeper and its application in national railway[J]. Polyurethane industry, 2020, 35(5): 3-6.
- [9] 魏建国, 李帅旗, 马端人, 等. 成型工艺对聚氨酯合成轨枕性能影响的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2020(11): 111-115.
WEI Jianguo, LI Shuaiqi, MA Duanren, et al. Study on the influence of molding technology on the performance of polyurethane sleeper[J]. Composites science and engineering, 2020(11), 35(5): 111-115.
- [10] 刘彦光, 杨富民, 周尧, 等. 玻纤增强聚氨酯合成轨枕耐腐蚀和耐老化性能研究[J]. 聚氨酯工业, 2021, 36(2): 42-44.
LIU Yanguang, YANG Fumin, ZHOU Yao, et al. Study on corrosion and aging resistance of glass fiber reinforced polyurethane composite sleeper[J]. Polyurethane industry, 2021, 36(2): 42-44.
- [11] 杨海, 卢瑞林, 王明星, 等. 聚氨酯泡沫合成轨枕产品均匀性评价研究[J]. 聚氨酯工业, 2022, 37(4): 35-37.
YANG Hai, LU Ruilin, WANG Mingxing, et al. Study on uniformity evaluation of polyurethane synthetic sleeper[J]. Polyurethane industry, 2022, 37(4): 35-37.
- [12] 魏军. 广州地铁4号线直线电机轨道工程施工技术研究[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(7): 46-48.
WEI Jun. Research on construction technology for linear motor driven transit system engineering in Guangzhou subway #4 line[J]. Railway standard design, 2007, 51(7): 46-48.
- [13] 崔幼飞. 树脂合成轨枕的测试与应用[J]. 铁道建筑技术, 2008(1): 39-42.
CUI Youfei. Testing and application of resin composite sleeper[J]. Railway construction technology, 2008(1): 39-42.
- [14] 何燕平, 周毅, 杨荣山. 合成轨枕式无砟轨道垂向受力影响参数分析[J]. 铁道建筑, 2011, 51(2): 94-97.
HE Yanping, ZHOU Yi, YANG Rongshan. Influential parameters analysis of synthetic sleeper-type ballastless track under vertical loading[J]. Railway engineering, 2011, 51(2): 94-97.
- [15] 常征. 路基上合成轨枕有砟轨道动力学特性研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(15): 97-99.
CHANG Zheng. Research on the mechanical characteristics of composite sleeper ballast track on subgrade[J]. Shanxi architecture, 2019, 45(15): 97-99.
- [16] 蔡敦锦. 客货混运线路钢桁梁明桥面桥上合成树脂轨枕轨道结构研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
CAI Dunjin. Research on resin sleeper track structure on steel truss deck of the passenger and freight line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [17] 李健, 赵坪锐, 刘观. 大跨钢桥上合成树脂轨枕轨道受力特性及参数研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(7): 41-44.
LI Jian, ZHAO Pingrui, LIU Guan. Stress state and parameter study of track with synthetic resin sleepers on long-span steel bridge[J]. Railway standard design, 2014, 58(7): 41-44.
- [18] 成都铁路局工务处, 成都铁路工务有限公司, 西南交通大学, 等. 铁路桥梁明桥面合成轨枕研究[R]. 成都: 成都铁路局工务处, 2014.
- [19] 任金锋. 地铁整体道床合成树脂轨枕道岔施工方案[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(18): 1076.
- [20] 禹威. 大跨度钢梁桥明桥面合成轨枕轨道施工技术探

- 讨[J]. 智能城市, 2021, 7(12): 157-158.
- YU Wei. Discussion on construction technology of composite sleeper track on open deck of long-span steel beam bridge[J]. Intelligent city, 2021, 7(12): 157-158.
- [21] 李文英, 鲁放. 城市轨道交通标准体系建设研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 155-159.
- LI Wenyong, LU Fang. Establishment of standards systems for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 155-159.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 聚氨酯泡沫合成轨枕: CJ/T 399—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Synthetic sleepers of fiber reinforced polyurethane foam: CJ/T 399—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [23] 中国铁道科学研究院集团有限公司. 铁路钢梁用 HFFP 复合材料桥枕及配套 MQ-1 型扣件暂行技术条件: TJ/GW 161—2019[S]. 北京: 中国铁路总公司, 2019.
- [24] International Organization of Standardization. ISO 12856.1—2014 Plastics—Plastic railway sleepers for railway applications (railroad ties)[S]. Switzerland: International Organization of Standardization, 2014.
- [25] KOLLER G. FFU synthetic sleeper—Projects in Europe[J]. Construction and building materials, 2015, 92: 43-50.
- [26] 夏赞鸥, 时瑾, 张琪. 小半径曲线地段地铁列车运行对建筑物的振动影响分析[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(2): 183-189.
- XIA Zanou, SHI Jin, ZHANG Qi. Analysis of the vibration influence of subway trains on buildings in a small radius curve section[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(2): 183-189.
- [27] 郑强. 南京地铁 12 号线搭载大胜关大桥过江段轨道结构设计[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(26): 220-221.
- [28] JING Guoqing, ZONG Lu, JI Yameng, et al. Optimization of FFU synthetic sleeper shape in terms of ballast lateral resistance[J]. Scientia iranica, 2021.
- [29] 余新光, 魏凯耀, 张兴刚, 等. 聚氨酯合成枕木横向压缩性能研究[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(5): 12-15.
- SHE Xinguang, WEI Kaiyao, ZHANG Xinggang, et al. Study on transverse compression properties of polyurethane synthetic sleepers[J]. Development and application of materials, 2019, 34(5): 12-15.

(编辑: 傅依萱)

(上接第 76 页)

参考文献

- [1] 彭赛. 市域铁路客流预测研究: 以宁象线为例[J]. 铁道建筑技术, 2022(6): 117-120.
- PENG Sai. Exploring passenger volume forecast method for suburban railway: a case study of Ningbo-Xiangshan line[J]. Railway construction technology, 2022(6): 117-120.
- [2] 张钊, 王伟, 石竹, 等. 市域(郊)铁路快慢车运行停站策略优化[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 99-105.
- ZHANG Zhao, WANG Wei, SHI Zhu, et al. Optimization of stop strategy suitable for operation of express-local train of suburban railway[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 99-105.
- [3] 许琳琪. 上海市域(郊)铁路嘉闵线的大站快车停站方案[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(8): 74-78.
- XU Linqi. Stop scheme of express train of Shanghai suburban railway Jiemin line[J]. Urban mass transit, 2021, 24(8): 74-78.
- [4] 蔡涵哲, 孙元广, 王芳玲. 市域快速轨道交通规划实施分析: 以广州都市圈为例[J]. 城市交通, 2022, 20(2): 53-58.
- CAI Hanzhe, SUN Yuanguang, WANG Fangling. Implementation of urban rapid rail transit planning: case study of Guangzhou metropolitan area[J]. Urban transport of China, 2022, 20(2): 53-58.
- [5] 郭镛. 市域(郊)铁路规划建设标准探讨[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 155-158.
- GUO Kai. Planning and construction standard of suburban railway[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 155-158.
- [6] 国家铁路局. 铁路轨道设计规范: TB 10082—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [7] 国家铁路局. 市域(郊)铁路设计规范: TB 10624—2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.
- [8] 国家铁路局. 城际铁路设计规范: TB 10623—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁快线设计标准: CJJ/T 298—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 市域快速轨道交通设计标准: CJJ/T 314—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [11] 胡江民. 郑焦城际铁路开行普速列车曲线超高研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(1): 4-9.
- HU Jiangmin. Study on curve superelevation of general speed passenger train on Zhengzhou-Jiaozuo intercity railway[J]. Railway standard design, 2019, 63(1): 4-9.
- [12] 国家铁路局. 高速铁路线路维修规则: 国铁设备监规[2023]15号[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.

(编辑: 傅依萱)