



Delft University of Technology

铁路道砟材质选型分析与建议

Jing, Guoqing; Xie, Jiale; Duan, Shuqi; Guo, Yunlong

DOI

[10.13238/j.issn.1004-2954.202208070001](https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202208070001)

Publication date

2024

Document Version

Final published version

Published in

Railway Standard Design

Citation (APA)

Jing, G., Xie, J., Duan, S., & Guo, Y. (2024). 铁路道砟材质选型分析与建议. *Railway Standard Design*, 68(1), 37-43. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202208070001>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**Green Open Access added to [TU Delft Institutional Repository](#)
as part of the Taverne amendment.**

More information about this copyright law amendment
can be found at <https://www.openaccess.nl>.

Otherwise as indicated in the copyright section:
the publisher is the copyright holder of this work and the
author uses the Dutch legislation to make this work public.

文章编号: 1004-2954(2024)01-0037-07

铁路道砟材质选型分析与建议

井国庆¹, 谢家乐¹, 段姝琪^{2,3}, 郭云龙⁴

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 包头铁道职业技术学院, 包头 014060;
3. 大连交通大学土木工程学院, 大连 116021; 4. 代尔夫特理工大学土木学院, 荷兰代尔夫特 2628CN)

摘 要:我国铁路覆盖范围广, 沿线所处地质环境复杂、气候多变, 铁路运维面临巨大挑战。有砟道床作为铁路重要组成部分, 其养护维修一直以来倍受关注, 然而, 岩石材料具有多样性和分布不均衡性, 且我国道砟材质标准及选型较为单一, 并未考虑地质及气候环境等因素, 给铁路建设及运维带来一系列问题。针对此, 总结世界各国道砟选型方式及方法, 对比复杂环境道砟材质选型标准, 归纳新型道砟材料, 并且解释了标准中用于道砟性能量化的指标及其试验方法。对比各国所道砟材质及其配套的选型标准, 得到以下主要结论: (1) 针对我国现有道砟规范问题, 可以考虑根据铁路沿线地质和气候等因素选择道砟材质; (2) 目前仍没有方法可以快速、准确并且不破坏道床的方式来得到道床堆积密度; (3) 为实现双碳目标, 在有条件的新建或改建线路上可考虑选用建筑固废、工业固废等新型道砟材料。

关键词: 铁路道砟; 母岩; 地质条件; 气候条件; 有砟道床; 道砟规范

中图分类号: U213.772 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.202208070001

Analysis and Proposal to Railway Ballast Material Selection

JING Guoqing¹, XIE Jiale¹, DUAN Shuqi^{2,3}, GUO Yunlong⁴

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Baotou Railway Vocational & Technical College, Baotou 014060, China; 3. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021, China; 4. Civil Engineering and Geoscience, Delft University of Technology, Delft 2628CN, Netherlands)

Abstract: China's railway covers a broad area, the geological environment and climate along the line are complex and variable, the operation and maintenance of railway are facing tremendous challenges. As an integral part of railway, the maintenance of ballast bed has always attracted considerable attention, nevertheless, the variety and uneven distribution of rock materials, as well as the single ballast material standard and selection in China, which don't take into consideration factors such as geological conditions and climatic environment, bring a host of issues to railway construction and operation and maintenance. To deal with this problem, this paper summarizes railway ballast selection methods and methodology around the world, compares the ballast material selection criteria for complex environments, summarizes novel ballast materials, and explains the indicators and test approaches used to quantify ballast performance in the standards. Comparing the ballast materials and their matching selection standards in various countries, the main conclusions of this paper are as follows: (1) For the existing ballast specification problems in China, the ballast materials can be considered to be selected according to the geological and climatic factors along the railway line; (2) There is still no method to accurately and rapidly measure the density of ballast bed without damaging it. (3) To achieve the goal of double carbon, novel ballast materials such as construction solid waste and industrial solid waste can be

considered on new or modified lines where conditions are favorable.

Key words: railway ballast; parent rock; geological conditions; climatic conditions; ballast bed; ballast standard

收稿日期: 2022-08-07; 修回日期: 2022-10-04; 网络首发日期: 2023-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(5207813)

作者简介: 井国庆(1979—), 男, 教授, 2009年毕业于法国国家应用技术学院, 工学博士, 主要从事轨道结构、智能运维技术等研究工作, E-mail: gqjing@bjtu.edu.cn.

引言

道砟(道碴)一词起初来源于压舱石,即英国运煤船舶返航时用于配重的各类碎石和砾石,使用过后废弃在港口附近,因其承载效果良好而开始被铺设在铁路路基上,并于 20 世纪 30 年代逐渐普及,道砟也成为有砟轨道重要组成部分。在国内学术界及规范中,道砟被定义为级配碎石,同时这些级配碎石有着特定的物理特性,包括:硬度、强度及复杂形状等^[1]。

道砟作为铁路有砟轨道的主要组成部分,对轨道结构的稳定性、耐久度及韧性有决定性影响。为满足道砟服役性能,道砟材质本身需符合一定的特性,包括:颗粒尺寸、道砟形状、颗粒级配、表面粗糙度、颗粒密度、堆积密度、强度、硬度、冲击韧性、耐磨性和耐候性等^[2]。

本文归纳总结了各国所采用的道砟技术标准、实际线路中道砟材质等测试方法及测试内容,得出了不同条件下道砟选型方法。提出了根据地质和气候等因素来制定道砟选型标准,对现有方法中仅根据线路类型和线路分级的不足进行补充,为我国地质环境复杂、气候多变的铁路沿线道砟选型提供参考。

1 道砟材质

1.1 道砟发展趋势

道砟层也称为有砟道床,通常是由道砟颗粒组成的散体颗粒层,厚度在 250~350 mm 之间。我国铁路建设用道砟一般是由高质量的火成岩或变质岩经过爆破而得到的级配碎石,虽然传统意义上对道砟要求规定为级配均一、无规则形状、坚硬且表面粗糙,然而,母

岩来源、种类、质量、适用性、经济性和当地环境法规不同,世界各国所采用的道砟材料及规范也有着一定区别。例如,在 19 世纪 70 年代之前,有砟轨道铺设过程中道砟材质的选取并未重点考虑道砟类型和其物理特性,往往优先考虑原材料价格及运输成本^[3]。

目前,关于道砟物理及力学特性,如颗粒尺寸、形状、硬度、摩擦力、耐磨性和矿物成分等,在国际上并没有统一的标准要求。不同国家及地区在设计选取道砟时,会考虑荷载条件、运营环境和地基条件,选择不同类型的母岩材料,如玄武岩、花岗岩、石灰岩、白云岩、流纹岩、片麻岩和石英岩等^[1]。

道砟成为铁路有砟道床重要组成部分以来,对于道砟材质的要求逐渐趋向于强稳定性及复杂环境适用性。早期道砟采用简单的砂石、矿石或者卵石,有易破碎粉化、承载能力差等明显缺点。而随着列车速度提升及重载列车轴重增加,对道砟提出了级配变窄、高强度、高密度等要求,级配碎石开始成为当前道砟的主要材料。城轨、高架等线路对道床承载能力要求较低,且出于环境保护原因当前级配碎石资源匮乏,因此国内外研究学者相继提出了采用建筑固废和工业固废作为道砟材料^[2]。除此之外,级配碎石用于道砟还会增大人工养护维修的难度,目前我国铁路养护维修机械化程度较高,但一体化、智能化方面还需要进一步加强,将周期性养护维修转变为精准的“点维修”。

1.2 道砟特性及测试方法

国内外学者^[1, 3-6]总结出道砟层的力学性能、物理性能、环境性能和几何形态与道砟选型之间的关系,并总结出道砟各项性能的测试方法,如表 1 所示。

表 1 道砟选型分类及测试方法^[1,3]

Table 1 Ballast selection classification and test methodology

道砟选型分类	道砟特性	测试方法	测试内容
力学性质	硬度、强度	洛杉矶磨耗试验(Los Angeles Abrasion test) 德瓦尔磨耗试验(Deval attrition test);干磨、湿磨 微德瓦尔磨耗试验(micro-Deval attrition test)	磨耗,磨损及破碎 表层磨损 表层磨损
	硬度	Dorry 磨耗试验(Dorry abrasion test) 划痕硬度(scratch hardness) Mill 磨耗试验(Mill abrasion test)	表层抗粉化性能 表层抗粉化性能 表层抗粉化性能
	强度	单体道砟压碎试验(single particle crush test) 点荷载强度试验(point load strength test)	抗破碎性能 破碎为多个小块
	冲击韧性	落锤试验(drop weight test)	抗冲击荷载及破碎
	分级	级配测量 小颗粒/粉尘测量	排水、密实度 排水性能
	物理稳定性	颗粒密度测量 堆积密度测量	抗位移、间接强度 孔隙率、排水、轨道稳定性(横向、纵向、垂向)
物理性质	形状特征	颗粒外形测量(针片状规准仪) 潮湿-干燥抵抗能力测试 冻融测试	破碎为多个小块、排水 耐久性、耐候性 耐久性、耐候性
	化学稳定性	颗粒多孔结构检测 颗粒吸水性 钠镁硫酸盐溶解试验	耐久性和耐候性 耐久性和耐候性 耐久性和耐候性
	环境特性	黏土块及易碎颗粒含量检测	耐久性和耐候性
道砟层性质	断面尺寸 分层	道床厚度、砟肩、边坡测量 几何形位检测	耐久性和初始磨损程度 轨道稳定性、弹性、阻尼 轨道稳定性、舒适性

从表 1 中可以看出,部分道砟特征有着明确的测试方法。例如,道砟强度或硬度可以采用洛杉矶磨耗

试验定量分析,且此类试验在文献中也有着较深入的研究^[6]。近些年业内学者针对各类道砟特性测试方法进行了深入研究,例如单体道砟压碎试验^[7]和落锤试验^[8]。然而仍有很多道砟性能测试方法未进行详细解释说明或深入研究其可行性,多数试验测试方法为其他学科中骨料方法。因此,有必要研究并提出复

杂运营条件下,满足铁路服役需求的道砟性能评估、测试及测量方法。

1.3 国外道砟材质规范

各国规范中也针对不同的道砟性质采用不同的测试、测量标准。本文总结了澳大利亚、美国、欧盟规范中关于道砟特性评估的推荐分类,如表 2 所示。

表 2 道砟选型各国标准汇总^[1-3]
Table 2 Overview of standards for ballast selection in different countries

选型分类	要求名称	澳大利亚	欧盟(EN13450)	美国(AREMA)
物理性质	颗粒级配	AS 1141. 11. 1	EN933—1	ASTM-C136
	粉尘比例(No. 200 孔径筛)	≤1%	0. 5%~1. 5%(0. 063 mm)	≤1%
	黏土块及易碎颗粒含量	—	—	≤0. 5%
	颗粒密度/(kg/m ³)	≥2 500(干燥)	EN 1097—2	≥2 600
	堆积密度/(kg/m ³)	≥1 400(AS1141. 4) ≥1 200(NSW TN 061: 2015)	CEN 17892—2	≥1120
	针状颗粒(Elongated particles)	长细比 2:1 低于 30%	EN 933—3	长细比 3:1 低于 5%
	片状颗粒(Flaky particles)	≤30%	EN 933—3	≤5%
	新鲜断裂面(Fresh fractured surface)	75%以上有两个新鲜断裂面	—	—
	排水(Drainage)	—	CEN 17892—11	—
	吸水率	—	EN 1097—6	≤2%
耐久性和 耐候性	冻融循环	—	EN 1367—1	—
	硫酸盐溶剂	—	EN 1367—2	≤5%
	微型狄法尔磨耗试验 (Micro-Deval abrasion test)	—	≤5%~15%	—
	滚筒磨耗试验(Abrasion tests)	—	—	AN 在 25%和 65%之间*
力学性质	湿磨试验(Wet wear test)	小于 6%,8%,12%针对不同铁路分级	—	—
	洛杉矶磨耗率(Los Angeles Abrasion rate)	小于 25%,30%,40%针对不同铁路分级	12%~24%	≤30%
	颗粒破碎比例(Particle breakage ratio)	小于 25%,30%,40%针对不同铁路分级	—	—
	冲击指数(Impact value)	—	14%~22%	—
道床断面尺寸	强度测试(Strength test)	潮湿:175,150,110 kN 针对不同铁路分级	—	点荷载强度试验 干燥大于 1 200 kg 潮湿大于 800 kg
	道床厚度	325,275,225 mm 针对不同铁路分级	—	大于 12 英寸(正线铁路)
	砟肩宽度	400~700 mm 无缝线路、300~700 mm 其他	—	大于 12 英寸(正线铁路)
	边坡坡度	1:1.5	—	1:2
	枕心高度	至轨枕顶面	—	—

注: * AN=洛杉矶磨耗率+5×磨耗率。

从表 2 中可知,欧盟标准没有明确规定道砟密度,而是给出了密度的测量方法,此外澳大利亚和美国给出了道砟颗粒密度和堆积密度的最低要求。然而,目前现场对于堆积密度的测量方法仍然非常模糊,没有明确的测量方法。虽然在各种室内试验中可以通过计算试验仪器的容积估算出堆积密度,然而在现实铁路线上并没有较好方法可以快速准确并且不破坏道床的方式来得到道床堆积密度^[9]。欧盟标准因国家较多没有统一明确标明具体要求的数值,仅给出了测试的具体要求。表中标注的标号为标准使用的标号,可以在标准网站查询。

表 2 中还可以看出,澳大利亚针对道砟要求较为全面细致,而欧盟标准中较少给出具体数值,美国标准较为陈旧。而我国标准采用道砟选型较为保守,尤其

是高速铁路用道砟,一般选取诸多规范中的最高标准。固化技术标准容易造成额外工作量甚至工程成本,因此,欧盟标准中仅给出了标准的测试方法,世界其他国家多参照欧盟标准,而各个国家根据不同的自身情况使用不同品质等级道砟。参考上述情况,铁路建设及养护时可以根据线路等级要求,根据当地材料供应情况,适当提高道砟某项标准,必要时也可降低不必要的标准^[3]。

2 新型道砟材质

2.1 传统道砟材质

传统有砟轨道占世界范围内铁路线路约 90%^[2],而目前低碳环保、碳中和及循环经济等全球性战略部署,标志着有砟轨道绿色发展已成为当前主流研究方向。

例如,文献[10]中对铁路基础设施的整个生命周期进行生命周期评估,并遵循标准(ISO14040)系列对西班牙高速铁路的特定特征进行了分析,选取了传统有砟轨道、嵌入式无砟轨道进行对比,结果显示,在50~60年的使用寿命时,传统碎石道床对环境产生的影响最小,无论是经济性、碳排放还是维修量都具有明显优势。

然而,目前针对碳中和及循环经济方面的关注点基本围绕着如何在铁路系统中利用新能源,针对道砟材质使用的低碳环保研究较少。例如,传统木枕有着价格低廉、力学性能良好及减振性强等优势,但随着木材过度砍伐及环境保护等原因,传统木枕逐渐被混凝土轨枕所取代。而铁路道砟作为有砟轨道的重要组成部分,属于非可再生资源且消耗量庞大,为使铁路系统走向可持续发展,开发替代品来取代道砟这类自然资源已迫在眉睫。

2.2 新型道砟材质

如今环境问题引发了社会各界对工业废物处理的担忧,以欧盟为代表的群体建议尽可能将工业废物作为一种新的副产品重复利用^[11]。

而挤压性火成岩(火山岩等)、变质岩和沉积岩,作为传统铁路道砟材料来源的母岩,属于自然原材料,其不可再生性对铁路可持续发展有很大影响。以工业矿渣、钢渣等为代表的新型材料逐渐在铁路系统中得到利用。工业矿渣强度一般较低,这类矿渣可作为非正线铁路道砟材料。

近年来,世界范围内钢产量逐年递增,而因此产生的钢渣在美国、中国、澳大利亚以及部分欧洲国家是十分丰富的材料^[12-13]。诸多文献提出对钢渣材料物理性能的总结,提出了将其应用于铁路道砟^[14]。然而,

考虑铁路信号及导电问题,工业钢渣一般在研究中或实际应用中大部分当作底砟^[13]。同时,也有研究将废旧橡胶、炉渣混合来改善其作为底砟的力学性能^[15]。例如,通过等比例尺缩小建立的试验比较钢渣与传统碎石道砟的力学性能,结果显示,在重载铁路上,钢渣骨料具有更高的弹性模量,高应力状态下的永久变形相对更小,其抗剪强度也具有显著优势^[16]。这与YILDIRIM^[17]、KOH^[18]得出的结论相近,钢渣在力学性能上能够替代传统碎石道砟。

既有研究也表明,高密度钢渣可以提升道床稳定性,提高道床横向阻力27%^[19],增加垂向弹性模量64%^[20]。这也可以极大地降低高速铁路中飞砟概率^[21]。需要注意的是,钢渣具有一定导电性,在降雨量较多、排水不畅地区或者线路,不宜应用在线路表层道床。

除此之外,再生砖渣、再生混凝土骨料^[22-23]也能用于碎石道床的填充,相关研究人员对此进行了大量的现场试验。诸多学者利用废旧轮胎制作出符合铁路运输需求的轨枕垫,并且提出将橡胶颗粒作为道床结构的部分填充物,改善了道床的力学性能,可以减缓道砟粉化及破碎^[24]。

近10年来,国内外学者研究利用沥青将散体道床粘接成为整体轨道,包括底砟层或道砟层。沥青作为石油炼制后的废料,过去主要用于公路领域。目前,国内外诸多学校或研究机构已经开始了探索性研究^[25]。

表3针对不同新型道砟,主要是应用废旧材料作为道砟材料进行概括总结。目前废旧建筑材料已经用于许多其他基础设施中,但仍未用于道床中,在此列举了建筑固废用于路基填料以及混凝土中的例子,可为后续废料循环使用于铁路系统中提供了一定新思路。

表 3 新型道砟材料^[14-15,22-24]

Table 3 Novel ballast materials

材料	用途	效果
钢渣轨道	充当道砟层	钢渣道砟的轨道横向阻力相对于石灰石道砟物横阻力增加27%;钢渣道砟段试验轨道的轨道垂向弹性模量是石灰石道砟的1.64倍,石灰石道砟中轨枕和道砟的接触压力几乎比钢渣道床大1倍
钢渣-道砟	钢渣-道砟混合轨道	将钢渣混合比例定在50%及以下,可保证钢渣-道砟混合物在抗磨耗性能上符合特级道砟标准,且相比于纯钢渣道床抗剪强度有大幅度提升
橡胶颗粒	弹性骨料填充道床	吹砟车吹入碎石和橡胶颗粒,混合的方式提高了吹砟的有效性,减少了道砟沉降和劣化,同时提高道砟层的力学特性,延长铁路轨道的使用寿命;废旧轮胎颗粒与道砟混合的最佳比为10%(质量或体积比);废旧橡胶颗粒改善风沙线路道床刚度过高,道床弹性差的情况;有效延缓道砟劣化,且橡胶颗粒最优粒径为5~10mm,最优橡胶颗粒体积比为30%
	与道砟颗粒粘接	道砟的抗磨耗性能提升60%左右,效果更显著。0~0.25mm橡胶颗粒胶粘道砟较2.5~5mm橡胶颗粒-胶粘道砟抗劣化特性、抗剪性能更优
硅锰钢渣	公路路面	抗压强度、分裂拉伸强度和指数属性符合IRC和PWD以及铁路规范
建筑固废	路基填料	当砖渣粒径级配为0~31.5mm时,再生路基材料稳定性最佳
	混凝土粗骨料	掺入20%、25%再生砖渣粉的C40混凝土,其性能相较普通混凝土更优
沥青道床	道砟层或底砟层	采用沥青道床可以更好地提高道床刚度,粘结后道床处于无砟轨道和有砟轨道之间的一种轨道形式;沥青加热后可以回收分解,便于养护维修;只有很少部分国家在铁路线上应用沥青道床,例如奥地利铁路利用沥青底砟层。大规模应用仍需解决很多实际问题,例如沥青底砟层破坏修复

3 道砟母岩种类

3.1 道砟母岩

在工程中使用的道砟一般来源于机械破碎的天然岩石,母岩按形成条件可分为火成岩、沉积岩和变质岩三大类,如表 4 所示。澳大利亚学者 INDRARATNA^[1]指出,用于制作道砟的主要母岩材料为火成岩或变质岩,道砟通常由以下矿物组成:流纹岩、白云岩、玄武

岩、片麻岩、石英岩和花岗岩。岩石的内在微观属性,如微裂缝、矿物粒度和软矿物的含量,都会影响道砟的宏观机械及力学性能^[6]。

母岩开采自矿山,然而这对于缺乏岩石资源的地区而言,道砟材料相应极度匮乏,推进废旧道砟循环利用也是当前研究热点。室内试验表明:废旧道砟混入新道砟不超过 30%,仍具备较好的服役性能^[27]。

表 4 自然界常见岩石分类^[26]
Table 4 Classification of common rocks in nature

母岩种类	岩石成因	岩石种类
火成岩	由地壳内部熔融岩浆上升冷却而成,又称岩浆岩。根据冷却条件不同又分为深成岩、喷出岩及火山岩三类	工程中常见的有花岗岩(深成岩)、玄武岩、安山岩、辉绿岩(喷出岩)。火山岩主要为玄武岩、安山岩、方晶石,流纹岩,流纹岩,而深成岩为花岗岩,花岗闪长岩,正长岩,辉绿岩,闪长岩,辉长岩,斑脱石,方钠石,辉长岩和斑岩
沉积岩	由原来的母岩风化后,经过搬运、沉积和再造岩作用而形成的岩石,又称水成岩,根据沉积方式,沉积岩可分为机械沉积岩、化学沉积岩、生物沉积岩	工程中常见的有石灰岩、白云质石灰岩、白云岩、石灰华和砂岩等
变质岩	原生的火成岩或沉积岩经过地质上的变质作用而形成	工程中常见的有片麻岩、石英岩等。大理石、角铁、片麻岩、花岗岩片麻岩、片岩、角闪石片岩、云母片岩、辉石岩、蛇纹岩、变质岩和菱锰矿

3.2 国内道砟标准研究

根据既有文献研究及我国标准中对各类工程岩石通过汇总现场试验标准集料压碎率 CA 和道砟集料压碎率 CB 两项指标判断其是否符合成为道砟的条件,岩性判断如表 5 所示。从表 5 中可以看出,石灰岩的抗压碎性能不能满足中国现行规范 TB/T 2140.2—2018^[28]中关于一级或特级道砟的要求,不具备成为铁路碎石道砟母岩的条件。而玄武岩、安山石母岩的合格率相对较高,花岗岩的合格率较低,但也能满足 CA 、 CB 指标。

表 5 岩石特性判断
Table 5 Rock property evaluation

岩石种类	CA 指标范围	CB 指标范围	特级道砟、一级道砟合格率/%
花岗岩	$5\% < CA < 20\%$	$12\% < CB < 26\%$	28.15
玄武岩	$3.5\% < CA < 9\%$	$8\% < CB < 22\%$	76.3
安山岩	$3\% < CA < 9\%$	$8\% < CB < 18\%$	100
石灰岩	$6\% < CA < 18\%$	$18\% < CB < 28\%$	0

3.3 国内外道砟材质对比

不同道砟母岩对道床服役性能影响非常大,且在不同地区的适用性存在巨大差异。上节中谈到的石灰岩在我国被禁止使用作为道砟,除其力学性能不满足要求外,还考虑雨水冲刷会对石灰岩造成破坏,难以保证道床稳定性和耐久性。然而对于利用石灰石作为铁路道砟,国外却有许多案例,例如在美国、中东等气候较为干燥少雨(沙漠)地区,当地铁路使用石灰石作为道砟,也可以满足线路对于适用性、耐久性、经济性的需求。

此外,在葡萄牙里斯本—阿尔加威区段的新建铁路线路建设时^[29],考虑当地原材料匮乏问题,将原设计方案中 30 mm 厚花岗岩底砟改为两部分:15 mm 厚花岗岩和 15 mm 厚石灰岩组合。在解决材料问题的同时,对于工程造价也是十分有利的。如表 6 所示,案例中的石灰岩最大洛杉矶磨耗率为 27%,micro-Deval 磨耗率为 12%,不满足于 IT. GEO. 006 标准,但根据 UIC 和部分欧洲国家的相关铁路道砟标准,石灰岩可以满足洛杉矶磨耗率和 Micro-Deval 磨耗率的要求。

无论是 2008 年实施的 TB/T 2140—2008《铁路碎石道砟》还是已经弃用 TB/T2140—1990《铁路碎石道砟》,两者对道砟原料作出了明确规定,即碎石道砟应选择开山块石破碎、筛选加工生产得到,而美国的黑梅萨和鲍威尔湖(BMLP)铁路在后期修复过程中,由于当地缺乏采石场,未按照规范规定使用新破裂的级配碎石,并进行了如下处理:允许老化的道砟占比总道砟的 5%,并从附近的科罗拉多河获得圆形粗粒河砾石作为道砟来源^[30]。

我国道砟规范中没有明确道砟岩性,而是将道砟划分为特级道砟和一级道砟,并根据洛杉矶磨耗率 LAA 、标准集料冲击韧度 IP 、石料耐磨硬度系数等指标进行限制;美国 AREMA 铁路工程手册则主要通过洛杉矶磨耗率 LAA 及抗冲击性能等参数指标对道砟材料进行限制,并在此基础上规定了不同母岩材质的标准细则,如表 7 所示;UIC 及包括英国在内的 CEN 成员各国普遍采用洛杉矶磨耗 LAA 、micro-Deval 磨耗率等指标。

表 6 道砟颗粒材料特性标准
Table 6 Ballast particle material characteristics standards

规范	洛杉矶磨耗率/%	Micro-Deval 磨耗率/%	洛杉矶磨耗率+Micro-Deval 磨耗率/%	遵循条件
葡萄牙 IT. GEO. 006 ^[29]	≤25	≤18	<40	全部
国际铁路联盟 UIC Code 719R ^[29]	≤20 或者 ≤25 (部分区域的道床采用 28)	≤15 或者 ≤20 (部分区域的道床采用 22)	<40(列车运行速度≥160 km/h); <50(列车运行速度<160 km/h)	任意一条即可
法国 NF F53695 ^[31]	—	—	≤40(列车运行速度≥160 km/h)	
西班牙 FOM (2006) ^[29]	≤28	≤22	—	均满足
中国 TB/T 2140—2008 ^[32]	≤18(特级道砟); ≤27(一级道砟)	—	—	
欧盟 EN 13450 ^[33]	≤20	≤7	—	

表 7 美国 AREMA 铁路工程手册道砟物理参数指标及试验指标^[34]
Table 7 Physical parameters and test indicators of ballast (Manual for railway engineering of AREMA)

性能	参数	花岗岩	暗色岩	石英岩	石灰岩	白云石灰岩
抗磨耗、抗冲击性能	洛杉矶磨耗率 LAA/%	<35	<25	<30	<30	<30
抗大气腐蚀性	硫酸钠溶液浸泡损失率(L) %	<5	<5	<5	<5	<5
渗水性	吸水率/%	<1	<1	<1	<2	<2
稳定性能	毛体积相对密度	>2.6	>2.6	>2.6	>2.6	>2.65
	针状指数、片状指数/%	<5	<5	<5	<5	<5
道砟颗粒形状和清洁度	黏土团及其杂质含量质量百分率/%	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	粒径 0.075 mm 以下粉末含量的质量百分率%	<1	<1	<1	<1	<1

3.4 地质、气候条件制约

我国幅员辽阔,铁路建设沿线地质条件复杂,而道砟母岩开采遵循就近原则,新建铁路附近采石场开采的同类道砟材料各项指标表现不同。按照工程地质岩性分布将我国地域划分成 5 种岩石类型分布区域,明显看到华中、东北平原、黄河流域等地区匮乏坚硬、次坚硬岩石,因此在这些区域进行新建铁路设计时,尤其是受到运输、经济等条件制约,就近开采的岩石可能难以满足道砟材质要求^[35]。

在道砟原材料匮乏的情况下,有石灰岩被用于铁路建设的案例,但这并不是绝对的,也会受到其他方面的制约。例如,在高寒霜冻地区线路或高运量线路,石灰岩受到冻胀后,在列车高频荷载作用下,其破碎量远高于花岗岩或玄武岩等^[36]。道砟材质在不同气候地区表现出不同适用性,因此,在进行线路道砟材质选型时,应该合理考虑降雨、温度等气候条件,有针对性地合理选择道砟材质。

4 结论

本文归纳总结并对比了各国道砟材质选型方法,以及道砟性能试验方法,得到以下主要结论。

(1) 诸多道砟性能测试方法未进行具体详细解释说明或者深入研究其具体可行性,多采用其他学科中试验方法。因此,有必要完善复杂条件下,道砟性能评估、测试及量化方法。实现在多尺度、多物理场中模拟道砟受到的综合环境影响。目前道砟材质试验方法不能真实反映道床受力状态,如众多研究表明,洛杉矶磨耗率与道床寿命没有直接关系,而使用洛杉矶磨耗率

和 Mill 磨耗率(LAA+5MA)最为有效。

(2) 目前我国道砟标准未明确道砟母岩岩性,淘汰了潜在能够用于线路铺设的道砟资源,而对于实际线路设计时,考虑沿线地理和气候,可以采用新旧道砟结合、开发潜在道砟资源及降低设计标准等方法选择道砟材质。

(3) 我国规范及维修手册中规定了道床密度具体指标,但是道床密度的测量方法主要采用道床开挖取样等破坏性手段,目前仍然缺乏非破坏、高效测量道床堆积密度的方法。

(4) 为实现双碳目标,我国目前铁路道砟规范并不包括工业或者建筑固废道砟和废旧道砟,与欧盟道砟规范包容度有一定差异。

参考文献:

[1] INDRARATNA B, SALIM W, RUJIKIATKAMJORN C. Advanced Rail Geotechnology-ballasted Track[M]. CRC Press, 2011:10-30.

[2] 井国庆,付豪,贾文利,等. 高速铁路有砟轨道横向阻力宏观分析[J]. 铁道工程学报,2018,35(9):21-25.

JING Guoqing, FU Hao, JIA Wenli, et al. Macro-micro Analysis of Lateral Resistance for High Speed Railway Ballasted Track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018,35(9):21-25.

[3] SADEGHI J M, ALI ZAKERI J, NAJAR M E M. Developing Track Ballast Characteristic Guideline in Order to Evaluate Its Performance [J]. International Journal of Railway, 2016,9(2):27-35.

[4] SCHMIDT S, SHAH S, MOAVENI M, et al. Railway Ballast Permeability and Cleaning Considerations [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017,2607(1):24-32.

[5] SELIG E T, WATERS J M, AYERS M E, et al. Track geotechnology and substructure management[J]. Life, 1994,8:16-26.

[6] NÅLSUND R. Railway Ballast Characteristics, Selection Criteria and Performance[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2017:259.

- [7] 张徐,赵春发,翟婉明. 铁路碎石道砟静态压碎行为数值模拟[J]. 西南交通大学学报,2015,50(1):137-143.
ZHANG Xu, ZHAO Chunfa, ZHAI Wanming. Numerical Analysis of Static Crushed Behavior of Railway Ballast[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015,50(1):137-143.
- [8] KOOHMISHI M, PALASSI M. Degradation of Railway Ballast under Impact Loading Considering the Morphological Properties of Aggregate[J]. Transportation Geotechnics,2020,25:100398.
- [9] LIU J X, WANG P, LIU G Z, et al. Influence of a Tamping Operation on the Vibrational Characteristics and Resistance-evolution Law of a Ballast Bed[J]. Construction and Building Materials, 2020,239:117879-117879.
- [10] JOAQUÍN J, IGNACIO V, RICARDO I, et al. Life Cycle Assessment of a Railway Tracks Substructures: Comparison of Ballast and Ballast-less Rail Tracks[J]. Environ Impact Assess Rev,2020,85:106444.
- [11] Delgado B G, Viana da F A, Fortunato E, et al. Geomechial Assessment of an Inert Steel Slag Aggregate as an Alternative Ballast Material for Heavy Haul Rail Tracks[J]. Construction and Building Materials, 2021,279:122438.
- [12] JING G Q, WANG J R, WANG H Y, et al. Numerical Investigation of the Behavior of Stone Ballast Mixed by Steel Slag in Ballasted Railway Track[J]. Construction and Building Materials, 2020,262:120015.
- [13] JIA W L, MARKINE V L, JING G Q. Analysis of Furnace Slag in Railway Sub-ballast Based on Experimental Tests and DEM Simulations[J]. Construction and Building Materials, 2021,288(1):123114.
- [14] 周强. 循环再生材料铁路道砟及底砟力学特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
ZHOU Qiang. Study on Mechanical Properties of Recycled Materials as Railway Ballast and Subballast. [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [15] QI Y J, INDRARATNA B, HEITOR A, et al. Effect of rubber crumbs on the cyclic behavior of steel furnace slag and coal wash mixtures[J]. Journal of Geo technical and Geoenvironmental Engineering, 2018,144(2):04017107.
- [16] DELGADO B G, VIANA DA FONSECA A, FORTUNATO E, et al. Mechanical Behavior of Inert Steel Slag Ballast for Heavy Haul Rail Track: Laboratory Evaluation[J]. Transportation Geotechnics, 2019,20:100243.
- [17] YILDIRIM I Z, PREZZI M. Compaction and Shear Strength Behavior of Fresh and Aged Basic Oxygen Furnace (BOF) Steel Slag[C]//Geo-Chicago 2016. Chicago, Illinois. American Society of Civil Engineers, 2016:939-948.
- [18] TAEHOON K, SUNG-WOO M, HYUKSANG J, et al. A feasibility study on the application of basic oxygen furnace (bof) steel slag for railway ballast material[J]. Sustainability, 2018,10(2):284-287.
- [19] ESMAEILI M, NOURI R, YOUSEFIAN K. Experimental Comparison of the Lateral Resistance of Tracks with Steel Slag Ballast and Limestone Ballast Materials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017,231(2):175-184.
- [20] ESMAEILI M, YOUSEFIAN K, NOURI R. Vertical Load Distribution in Ballasted Railway Tracks with Steel Slag and Limestone Ballasts[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019,20(9):1065-1072.
- [21] JING G Q, DING D, LIU X. High-speed Railway Ballast Flight Mechanism Analysis and Risk Management - A literature Review[J]. Construction and Building Materials, 2019,223:629-642.
- [22] ANDREAS L, DIENER S, LAGERKVIST A. Steel Slags in a Land-fill Top Cover-experiences from a Full-scale Experiment[J]. Waste Management, 2014,34(3):692-701.
- [23] 庞吉莲. 建筑砖渣再生路基回填料应用研究[J]. 中国公路, 2016(15):138-139.
PANG Jilian. Study on Application of Backfill Material for Recycled Sub-grade with Building Brick Slag[J]. China Highway, 2016(15):138-139.
- [24] SOL-SÁNCHEZ M, MORENO-NAVARRO F, RUBIO-GÁMEZ C M. Analysis of Ballast Tamping and Stone-blowing Processes on Railway Track Behaviour: The Influence of Using USPs[J]. Géotechnique, 2016,66(6):481-489.
- [25] FANG M J, HU T, ROSE J G. Geometric Composition, Structural Behavior and Material Design for Asphalt Trackbed: A Review[J]. Construction and Building Materials,2020,262:120755.
- [26] MOHAMMAD K E, MOJTABA K, RASSOUL A. An Investigation of the General Relationships between Abrasion Resistance of Aggregates and Rock Aggregate Properties[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2019,78(6):3959-3968.
- [27] JIA W L, MARKINE V, GUO Y L, et al. Experimental and Numerical Investigations on the Shear Behaviour of Recycled Railway Ballast[J]. Construction and Building Materials, 2019,217:310-320.
- [28] 国家铁路局. 铁路碎石道砟 第2部分:试验方法:TB/T 2140.2—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2018.
- [29] ANDRÉ P, FORTUNATO E, FONTUL S, et al. A Case Study in Construction Optimisation for Sub-ballast Layer[C]//11th International Conference on Railway Engineering, London, 2011.
- [30] GERALD P R. Track and support Rehabilitation for a Mine Company Railroad[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000,37(2):318-332.
- [31] GUO Y L, XIE J L, FAN Z, et al. Railway Ballast Material Selection and Evaluation: A Review[J]. Construction and Building Materials, 2022,344:128218.
- [32] 中华人民共和国铁道部. 铁路碎石道砟:TB/T 2140—2008 [S]. 北京:中国铁道出版社, 2008.
- [33] Institution B S. En 13450 Aggregates For Railway Ballast[S]. Brussels: The European Committee Standardization, 2021.
- [34] The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). Manual for railway engineering[S]. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2012.
- [35] 王福恒,李家春,马保成,等. 公路岩土区划中岩石分类体系与类型分布[J]. 公路交通科技,2010,27(6):102-106.
WANG Fuheng, LI Jiachun, MA Baocheng, et al. Classification System and Type Distribution of Rock in Highway Rock and Soil Zoning[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010,27(6):102-106.
- [36] BRESSI S, D'ANGELO G, SANTOS J, et al. Environmental performance analysis of bitumen stabilized ballast for railway track-bed using life-cycle assessment[J]. Construction and Building Materials, 2018,188:1050-1064.

(编辑:王婷)