

文章编号:1671-1637(2020)02-0015-19

钢渣沥青混合料应用现状

何亮¹, 詹程阳¹, 吕松涛², GRENFELL James³, 高杰¹, KOWALSKI Karol J.⁴,
VALENTIN Jan⁵, 谢君⁶, RŽEK Lidija⁷, 凌天清¹

(1. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室, 重庆 400074; 2. 长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. ARRB 集团有限公司, 维多利亚 墨尔本 VIC3207; 4. 华沙理工大学 土木工程学院, 马佐夫舍 华沙 00-637; 5. 捷克理工大学 土木工程学院, 布拉格 16629; 6. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070; 7. 斯洛文尼亚国家建筑和土木工程研究院 沥青与沥青基产物实验室, 卢布尔雅那 SI1000)

摘要:总结了钢渣的物理性质、化学成分及矿物相组成;分析了影响钢渣体积安定性的因素及其改善措施;探讨了钢渣沥青混合料的配合比设计方法;分析了钢渣沥青混合料的路用性能(高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗疲劳性、体积安定性、抗滑性)及其功能特性(导电性与微波加热);研究了钢渣沥青混合料的生态、社会及经济效益;介绍了国内外的工程应用。研究表明:钢渣可用于沥青混合料,且应为陈化半年以上的转炉钢渣或电炉钢渣;钢渣的物理力学性能优良,而化学成分及矿物相组成受炼钢工艺影响有所区别;钢渣体积安定性的不足可通过预处理或陈化处理得到较好的改善;钢渣沥青混合料的配合比设计要点包括钢渣替代传统集料的方式和比例、沥青混合料级配修正、有效相对密度测定以及最佳油石比的确定;钢渣沥青混合料的路用性能及功能特性优于天然集料沥青混合料,具有较好的环境影响性且综合经济效益更高;关于钢渣沥青混合料路用性能的研究较多,而作用机理方面相对缺乏,关键性的限制因素如密度较高、体积安定性不良、混合料沥青用量增加等仍未得到根本性解决;未来应重点研究钢渣沥青路面的长期性能及质量控制体系,并开展全寿命周期研究,以加快钢渣沥青路面的应用与推广。

关键词:路面工程;钢渣;沥青混合料;特征参数;配合比设计;路用性能;环境效益

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.02.002

Application status of steel slag asphalt mixture

HE Liang¹, ZHAN Cheng-yang¹, LYU Song-tao², GRENFELL James³, GAO Jie¹,
KOWALSKI Karol J.⁴, VALENTIN Jan⁵, XIE Jun⁶, RŽEK Lidija⁷, LING Tian-qing¹

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Traffic Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. The Australian Road Research Board, Melbourne VIC3207, Victoria, Australia; 4. Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw 00-637, Mazowieckie, Poland; 5. Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague 16629, Czech; 6. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 7. The Laboratory for Asphalts and Bitumen-Based Products, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Ljubljana SI1000, Slovenia)

收稿日期:2019-10-23

基金项目:中国-波兰政府间科技合作项目(37-13);中国-捷克政府间科技合作项目(43-9);国家自然科学基金项目(51611130189);重庆市研究生科研创新项目(CYS19238);特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金项目(kfj170501)

作者简介:何亮(1983-),男,重庆人,重庆交通大学副教授,工学博士,从事路面材料与养护技术研究。

引用格式:何亮,詹程阳,吕松涛,等.钢渣沥青混合料应用现状[J].交通运输工程学报,2020,20(2):15-33.

Citation: HE Liang, ZHAN Cheng-yang, LYU Song-tao, et al. Application status of steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 15-33.

Abstract: The physical properties, chemical composition and mineral phases of different steel slags were summarized. The factors that affect the volume stability and improvement measures were analysed. The mix design method for steel slag asphalt mixtures was discussed. The road performance (high temperature stability, low temperature crack resistance, moisture susceptibility, fatigue resistance, volume stability, and skid resistance) and functional characteristics (conductivity and microwave heating ability) of steel slag asphalt mixture were all investigated. The benefits of steel slag asphalt mixtures in ecology, society and economy were studied, and the engineering applications at home and abroad were introduced. Research result indicates that certain steel slag can be used for asphalt mixtures, and the steel slag for asphalt mixtures should be the basic oxygen furnace and electric arc furnace aged for more than half a year. The steel slag has excellent physical and mechanical properties, whilst the chemical composition and mineral phase composition are different for each slag type and affected by the steel making process. The lack of volume stability of steel slag can be improved with a pre-treatment or aging treatment. The key points of mix design of steel slag asphalt mixture include the mode and proportion of steel slag that can replace traditional aggregates, the gradation correction of asphalt mixture, the determination of effective relative density and the optimum asphalt-aggregate ratio. The pavement performances and functional properties of steel slag asphalt mixtures are better than those of natural aggregate asphalt mixtures. The use of steel slag asphalt mixture is of benefit to the environment and saves cost. The research on the road performance of steel slag asphalt mixture is additional, but the mechanism of action is relatively lacking. The key limiting factors such as the large density, poor volume stability, and the increasing amount of asphalt mixture have not been fundamentally resolved. In the future, the long-term performance and quality control system of steel slag asphalt pavement should be researched, and the whole life cycle research should be carried out to accelerate the application and promotion of steel slag asphalt pavement. 5 tabs, 11 figs, 101 refs.

Key words: pavement engineering; steel slag; asphalt mixture; characteristic parameter; mix design; pavement performance; environmental benefit

Author resume: HE Liang(1983-), male, associate professor, PhD, heliangf1@163.com.

Foundation items: China-Poland Inter-Governmental S&T Cooperation Foundation (37-13); China-Czech Inter-Governmental S&T Cooperation Foundation (43-9); National Natural Science Foundation of China(51611130189); Chongqing Graduate Student Research Innovation Project (CYS19238); Open Fund of Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province (kfj170501)

0 引 言

中国道路建设事业迅猛发展,截至 2019 年末,高速公路里程已达 14.9 万公里,全国公路总里程达到 501.25 万公里。此外,中国公路每年养护里程达到 80 万公里,其中高速公路超过 1.4 万公里,道路建设和养护任务依旧严峻,需要大量的天然集料。而近年来,随着各地限制砂石开采条例的颁布,如《全国矿产资源规划(2016~2020 年)》《关于加强砂石土资源开发管理的通知》《云南矿产资源管理条例》等,天然集料愈发难以购得,且价格昂贵,寻找其

替代品的需求日益迫切。

钢渣作为炼钢过程中的副产品,产量占原钢的 10%~15%。国际上,欧美、日本等发达国家率先对钢渣进行了研究,目前其利用率高达 84.4%~98.4%,其中 32.4%~49.7%的钢渣用于道路建设,形成了较为成熟的产业链和质量控制体系。中国钢渣沥青路面则起步较晚,20 世纪 90 年代才开始被研究和应用。受当时钢渣处理工艺和设备的限制,中国部分钢铁厂早期生产的钢渣集料存在着体积安定性不良、含灰量较大等问题,从而导致早期修建的钢渣沥青路面试验段质量较差。

随着对钢渣研究认识的逐步深入,以及冶炼工艺与无害化处理技术的飞速发展,钢渣集料的品质得到了较大提升。同时经过多年来不同钢渣沥青路面实体工程的检验,确认钢渣可以代替部分集料修筑路面。然而,钢渣的大规模推广应用仍受到以下因素的制约:表面多孔特性提高了沥青用量,密度较高增加了摊铺用量与运输费用,体积安定性处理技术存在地域性差异等。中国目前钢渣的整体利用率仍然较低,仅为29.5%,用于道路建设的钢渣更仅有7.6%。绝大部分钢渣仍被当作工业废弃物进行简单的堆砌或填埋,造成了土地占用、环境污染以及资源浪费等问题^[1-2]。

基于以上背景,本文对国内外钢渣沥青混合料的应用现状进行了分析,总结了钢渣的特征参数以及安定性处理工艺,探讨了钢渣沥青混合料的配合比设计流程及要点,对比分析了钢渣沥青混合料与天然集料沥青混合料间的路用性能及功能特性,并对未来研究方向进行了展望。

1 钢渣的特征参数

钢渣根据炼钢工艺可以分为转炉(Basic Oxygen Furnace, BOF)钢渣、电炉(Electric Arc Furnace, EAF)钢渣和平炉钢渣,其中作为沥青混合料中集料的钢渣应为陈放半年以上的转炉或电炉钢渣。由于钢渣在成渣过程中经历了复杂的物理、化学变化,其特征参数与天然集料有所不同,主要体现在集料特性、化学成分、矿物相组成以及体积安定性。

1.1 钢渣的集料特性

首先,钢渣的形貌特征与天然石料存在区别。宏观方面,2种钢渣集料的表面均多孔隙且孔径较大,少量颗粒呈蜂窝状,边缘呈明显的凸起状,棱角性丰富;微观形貌方面,转炉钢渣多呈圆形、椭圆形结构,而电炉钢渣则多为板状、结晶结构。2种钢渣表面均可以观察到不规则形状的细小颗粒以及粗糙的纹理^[3-5],具体总结图像分别见图1、2。

其次,钢渣具有更好的物理力学性能。相比于玄武岩与石灰岩,钢渣具有更高的密度、吸水率、黏附性、磨光值、细颗粒含量(体积百分比)和浸水膨胀率,同时具有更小的压碎值、洛杉矶磨耗及针片状含量(质量百分比,下同)^[6-14],具体数据总结见表1。钢渣的表现相对密度比天然集料高19.88%~29.11%,这使得其作为集料时的表现相对密度下限需由2.6调整为2.9。此外,受造渣过程中的焖渣及热泼等冷却工艺的影响,钢渣表

面往往呈现囊泡状的多孔结构,因此,其孔隙率较高,一般可达6%左右。同时该多孔结构也使得钢渣的吸水率提高到了1.2%~2.7%,远大于天然集料的0.30%~1.03%^[15]。故钢渣作为集料时,其吸水率的技术要求可放宽为3%。钢渣的力学性能优势明显,其磨光值可达58~70,远高于石灰岩,接近玄武岩。同时其压碎值和洛杉矶磨耗分别低于天然集料4.72%~22.43%和16.46%~42.61%^[16]。由于表现出优良的坚固、耐磨特性,钢渣的压碎值和洛杉矶磨耗的技术要求均可限定为小于22%。钢渣中的扁平、细长颗粒较少,其针片状含量介于石灰岩和玄武岩之间,满足道路使用要求。此外,钢渣浸水膨胀率在1.1%左右,表现出较好的体积安定性。中国钢渣大多为高碱性材料,与微酸性的沥青的黏附性为五级,优于传统集料^[17-18]。

1.2 化学成分与矿物相

不同的炼钢工艺导致钢渣的化学成分有所差异,但主要构成相似,包括CaO、FeO、SiO₂、MgO、MnO、Al₂O₃、P₂O₅、TiO₂、SO₃,其中Mg、Fe、Si、Al、Mn、Ca为主要组成元素,具体数据总结见表2,2种钢渣中含量最高的化学成分均为CaO,合计平均占比达41.38%,其次是Fe₂O₃,合计平均占比达21.96%。较高的CaO和Fe₂O₃导致钢渣拥有更高的碱活性和更大的密度。此外,对比转炉钢渣和电炉钢渣的化学组成发现,转炉钢渣中CaO平均含量为44.49%,高于电炉钢渣的38.28%,而Fe₂O₃的平均含量为17.99%,低于电炉钢渣的25.15%^[19-29]。由此推断,转炉钢渣的碱活性优于电炉钢渣,并拥有更低的密度。较高的碱活性可以提高钢渣与沥青的黏附性,同时较低的密度可以降低钢渣的运输成本和单位体积混合料中的摊铺用量,因此,仅就黏附性和经济性角度考虑,转炉钢渣更适合作为沥青混合料的集料。

钢渣的矿物相组成则受碱度的影响较大,而与产出环节关联度较低。不同碱度钢渣的差别主要体现在C₃S和RO相(由FeO、MgO、MnO和CaO等二价金属氧化物组成的连续固溶体)的含量不同。其中转炉钢渣中的矿物主要包括Ca(OH)₂、Ca₂SiO₄、CaO、Ca₂Fe₂O₅、Ca₃Mg(SiO₄)₂、(Ca, Mn)CO₃、CaMg(CO₃)₂等。而电炉钢渣中的矿物主要为Ca(OH)₂、Ca₂SiO₄、Ca₃Cr₂(SiO₄)₃、CaO、(Ca, Fe)SiO₃、MgO、Ca₁₂Al₁₄O₃₃等,如图3所示。由于2种钢渣均为高碱度渣,因此,主要矿物相组成较为相似^[4]。

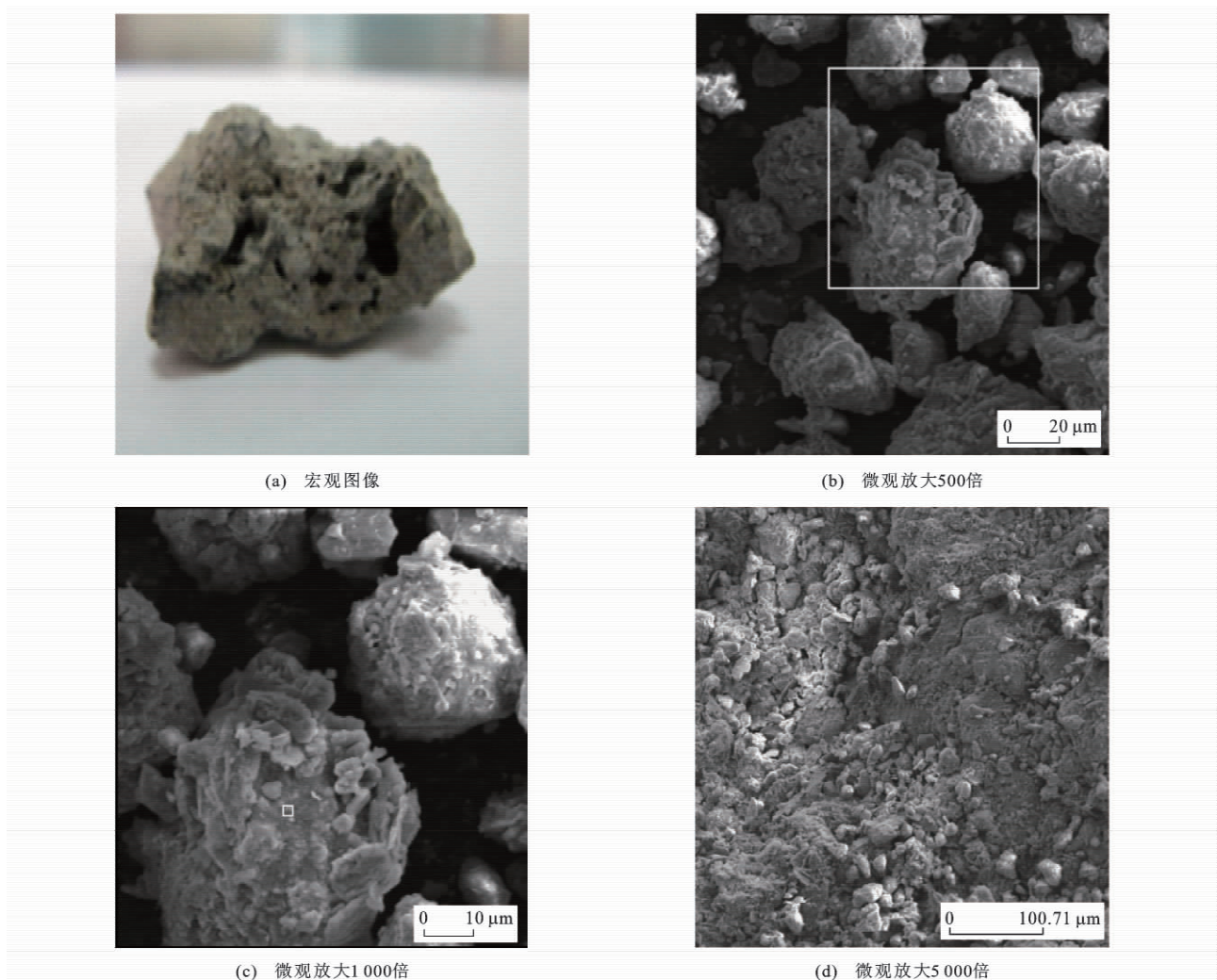


图 1 转炉钢渣形貌特征

Fig. 1 Morphology features of BOF steel slag

表 1 转炉钢渣、电炉钢渣、石灰岩及玄武岩性能指标

Tab. 1 Performance indicators of BOF steel slag, EAF steel slag, limestone and basalt

集料	粒径/ mm	密度/ %	吸水率/ %	压碎值/ %	洛杉矶 磨耗/%	针片状 含量/%	黏附性	磨光值	水洗法 0.075 mm 以下含量/%	浸水膨胀 率/%	孔隙率/ %
BOF	19.00~31.50	3.250	1.20	12.1	13.2	7.8~11.3	5	58~67	2.8	1.1	5.76
	13.20~19.00	3.250	1.90								
	4.75~13.20	3.258	2.70								
EAF		3.400~3.500	1.80~2.10	13.0~15.0	8.0	<10.0	5	58~70		>1.0	
石灰岩	4.75~16.00	2.726	0.63	15.6	23.0	16.0	4	45	1.6		4.26
	2.36~4.75	2.738	1.03								
玄武岩	4.75~13.20	2.740	0.30	12.7	15.8	16.0	4	56	1.6		0.24
	2.36~4.75	2.711	0.50								
钢渣技 术要求	>9.50	≥2.900	≤3.00	≤22.0	≤22.0	≤12.0	≥5	≥42		≤1.8	
	≤9.50					≤18.0					

值得注意的是,钢渣中的矿物相并非单质存在,而是以延伸的状态分布在其他物相之间,无规则形状,尺寸大小不一,如图 4 所示。

1.3 体积安定性

影响钢渣体积安定性的最主要因素包括游离氧化镁(f-MgO)、游离氧化钙(f-CaO)及 RO 相^[30-31]。

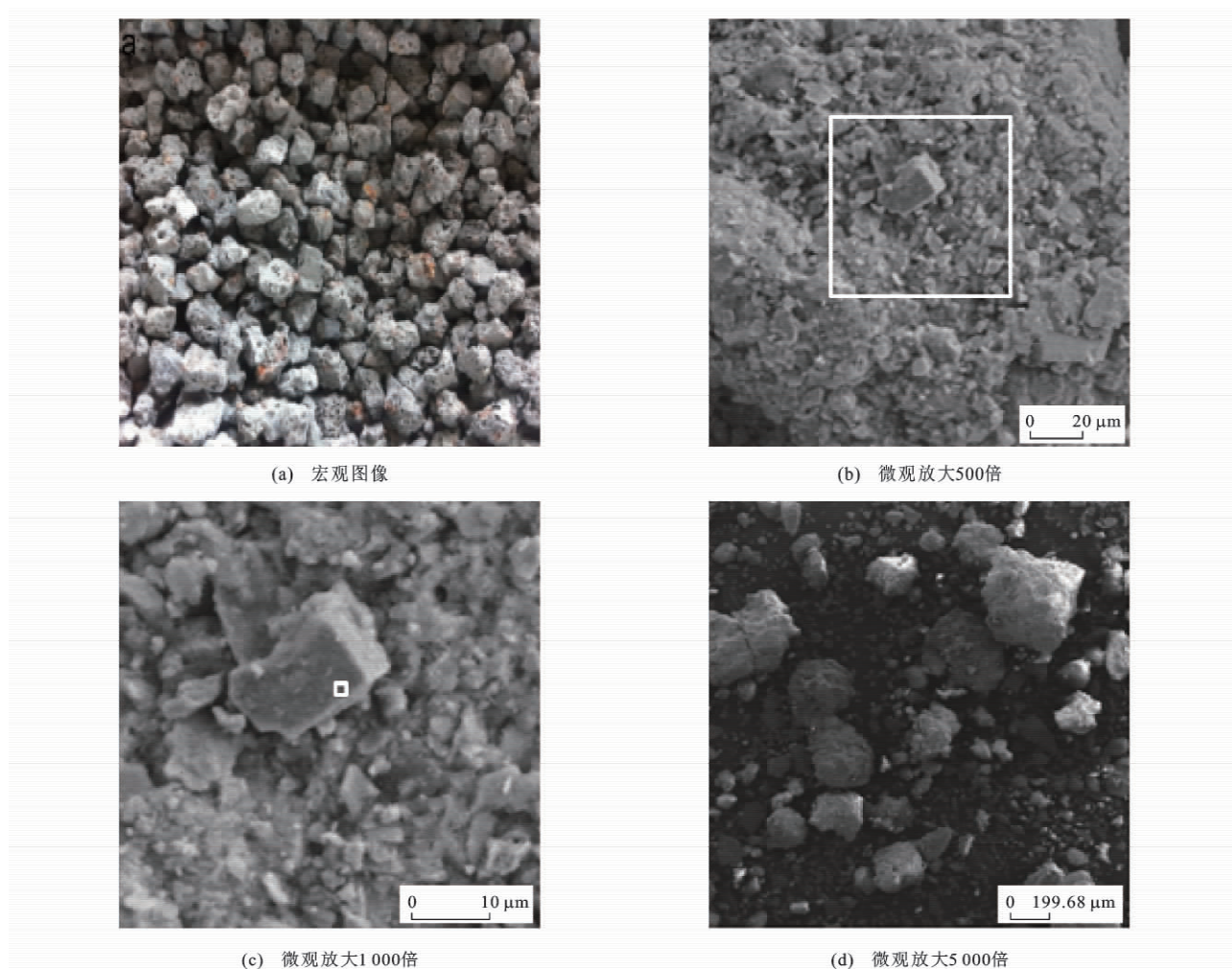


图2 电炉钢渣形貌特征

Fig. 2 Morphology features of EAF steel slag

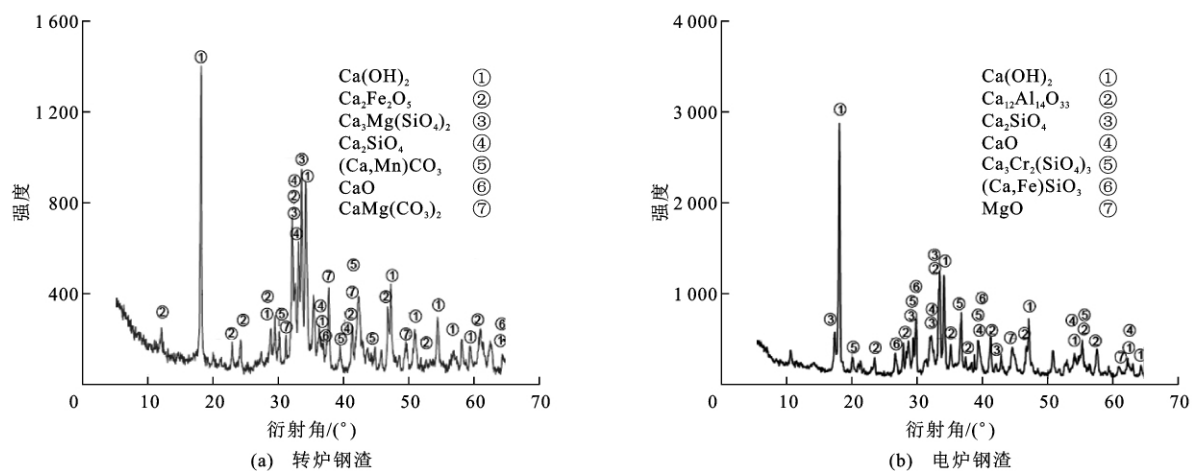


图3 钢渣矿物相X射线衍射分析结果

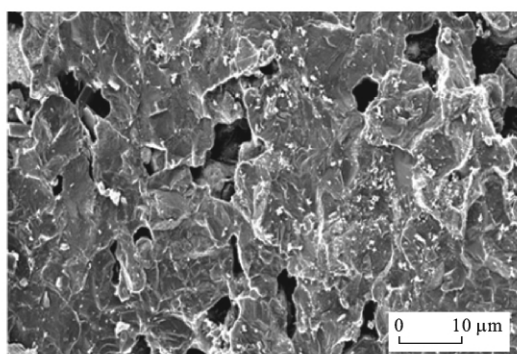
Fig. 3 XRD analysis results of steel slag mineral phases

其中 f-MgO 以及 f-CaO 发生水化反应所生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 将分别导致钢渣体积膨胀率增加 98% 和 148%。但由于目前对 f-MgO 含量缺乏快速、经济的测定方法,因此,国内采用 f-CaO 含

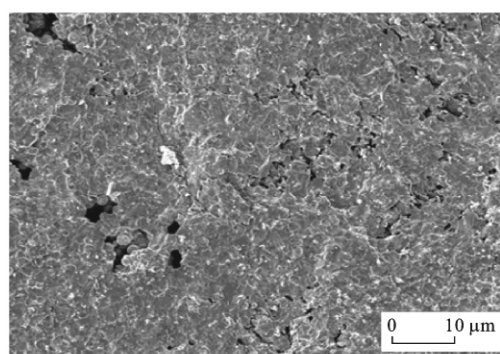
量作为判断钢渣体积安定性的指标(不大于 3%),并通过检测 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量以及浸水膨胀率等来间接表征。钢渣中的 f-CaO 主要有 3 种形成方式:造渣中未反应或未吸收的 CaO、部分吸收却弥散于固

表 2 转炉钢渣和电炉钢渣化学成分
Tab. 2 Chemical compositions of BOF steel slag and EAF steel slag

钢渣	参考文献	含量/%								
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
BOF	[20]	46.28	16.75	2.29	5.49	22.17	0.25			2.54
	[21]	46.95	10.63	3.64	4.86	9.65		2.48	0.70	1.85
	[22]	41.26	14.76	4.78	4.95			2.53		2.11
	[23]	42.77	19.24	3.25	5.19	24.55	0.30	1.77	0.61	1.41
	[24]	45.17	18.46	4.59	4.67	15.57	0.75	3.03	2.44	1.69
EAF	[25]	25.58	18.72	2.75	7.50	35.16		0.30	1.60	
	[26]	55.20	10.90	4.00	3.06	16.80	0.85	2.59		
	[24]、[27]	38.86	17.47	4.03	5.01	25.75	0.48	5.01	2.11	1.50
	[28]	32.90	20.30	12.20	3.00	22.30	0.42	5.10	0.80	0.50
	[3]、[29]	38.86	17.47	4.03	5.01	25.75	0.48	2.32	2.11	1.50



(a) 转炉钢渣



(b) 电炉钢渣

图 4 钢渣扫描电镜结果

Fig. 4 SEM results of steel slag

溶体中的 CaO 和 C₃S 分解形成的次生 CaO^[32]。为减少钢渣中 f-CaO 的含量,国内外开发了多种改善钢渣体积安定性的方法,主要可分为 2 大类:预处理及陈化处理。

预处理是指在钢渣处于熔融态时即进行处理。目前国内主要预处理方法有:冷淬法、水淬法、风淬法、热泼法、浅盘法、滚筒法、粒化轮法和热焖法等。例如,首钢、宝钢采用了热焖法,重钢采用了风淬法与热焖法相组合的工艺,均取得了较好的效果^[33]。合适的预处理技术能在保持钢渣中矿物活性的同时有效减少 f-CaO、f-MgO 含量,为后续加工和高效利用奠定良好的基础^[26]。

陈化处理又可分为天然陈化处理与高压蒸汽处理。天然陈化处理是目前大宗钢渣最主要的处理方法,通常经 6 个月陈化后,钢渣中 Ca(OH)₂ 含量已小于 3%,而 12 个月陈化后,已基本无法检测到 Ca(OH)₂^[34-35]。中国相关技术规范也规定钢渣经 6 个月天然陈化后可作为道路建设集料。尽管天然

陈化处理是一种改善钢渣体积安定性的有效方法,但仍存在一些弊端,如:处理周期长、占用土地资源等。为此,有关学者开发了蒸汽处理的新型陈化方式,将钢渣通入浓度为 350 kg·h⁻¹ 的蒸汽处理 6 d 后,其浸水膨胀率从 3.46% 降低至 0.70%,效果等同于天然陈化 6 个月^[36]。蒸汽可以快速通过渣块中的小孔渗透,从而快速均匀地提高 f-CaO 的水化速度。为进一步提高处理效率,日本住友金属公司在蒸汽处理的基础上采用加压工艺。在 0.6 MPa、158 °C 条件下,陈化速率较开放式蒸汽工艺提高了 24 倍,陈化时间仅须 2 h^[37-38]。

综上所述,热焖等预处理工艺在造渣过程中即对钢渣进行调节,从源头上提高了钢渣的安定性,最大限度避免了进一步陈化处理的需要,因此,更加经济、环保,是未来钢铁业发展的趋势。而对于已经大量堆存而尚未陈化的钢渣,建议使用高压蒸汽处理,大幅缩短其陈化时间,从而尽量减少诸如土地占用等环境问题。

2 钢渣沥青混合料配合比设计流程及要点

2.1 钢渣沥青混合料配合比设计流程

由于钢渣的集料特性,使得钢渣沥青混合料的配合比设计流程与天然集料有所区别。本文将钢渣沥青混合料的配合比设计流程分为3个阶段,如图5所示。其中第1阶段与第3阶段与传统热拌沥青混合料配合比设计相同,而第2阶段为钢渣沥青混合

料所需增加的步骤。对于第2阶段,首先应对钢渣的天然级配进行分析,根据分析结果,结合工程需要,拟确定钢渣替换天然集料的范围和比例;其次采用实测方法对钢渣的有效相对密度进行测定,为后续的体积参数计算做准备;同时由于钢渣的密度较高,还需对其实际掺配质量进行修正;最后,在预估钢渣沥青混合料的初选油石比时,应较天然集料有所提高。下文将就第2阶段的配合比设计要点进行论述。

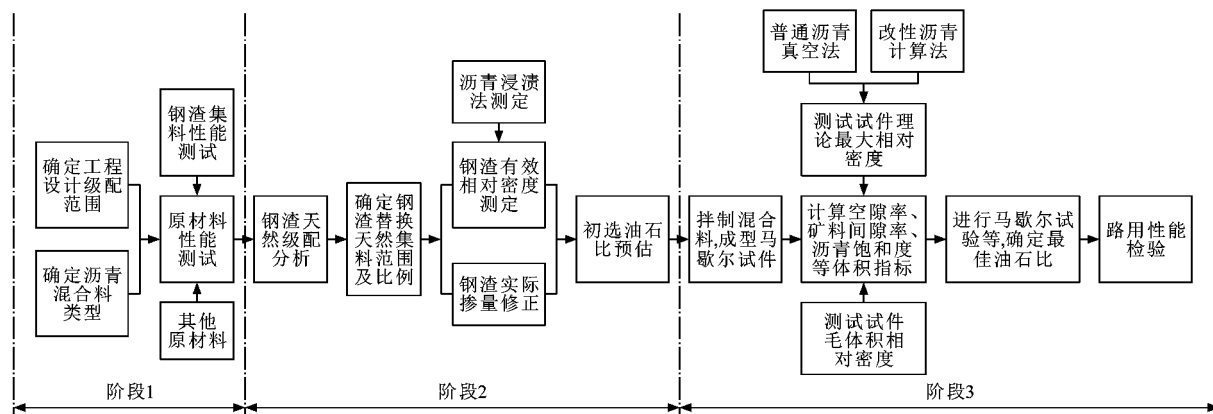


图5 钢渣沥青混合料配合比设计流程

Fig. 5 Mix design process of steel slag asphalt mixture

2.2 钢渣沥青混合料配合比设计要点

钢渣的高密度、多孔隙等特点使得钢渣沥青混合料的配合比设计需突出以下几个要点:钢渣替代传统集料的方式和比例、钢渣沥青混合料级配修正、钢渣有效相对密度测定以及最佳油石比确定。

2.2.1 钢渣替代传统集料的方式和比例

钢渣替代传统集料的方式有2种,即全部替代和部分替代。当钢渣全部替代天然集料时,其表面的多孔结构会导致沥青用量明显增加,对经济性不利,同时使混合料的体积安定性不易控制,增加路面膨胀开裂的风险,此外,钢渣的天然粒径分布不均匀,规律性较差,不宜单独进行矿质混合料的组成设计,因此,在实际使用中,一般不推荐钢渣全部代替天然集料^[39]。

当钢渣部分代替时,采用钢渣作为粗集料(大于2.36 mm)更为合理。首先,钢渣粗集料可以较细集料进一步减少沥青用量,降低制备成本;其次,钢渣粗集料表面的粉尘含量远低于细集料,粉尘在进行混合料拌和时会影响机器的正常运转,同时其所含的游离氧化钙质量超过了10%(粗集料低于1.5%),极大增加了钢渣的体积膨胀性隐患。值得注意的是,钢渣粗集料的粒径并非越大越好,当采用

公称粒径大于20 mm的钢渣时,在混合料拌和时容易出现花料现象^[40-43]。

在确定钢渣替代粗集料的比例时,首先应根据钢渣的天然级配组成特点确定替代粒径的大致范围。例如,南钢钢渣中2.36~13.2 mm粒径范围的含量超过90%,昆钢钢渣中2.36~9.5 mm粒径范围的含量超过70%。显然,上述2种钢渣更适合替换相对应粒径范围的天然集料。在确定替换粒径范围后,钢渣用量可取0~100%,以10%或20%为间隔进行钢渣沥青混合料的制备,并最终根据各项路用性能确定最佳替代量。

2.2.2 钢渣沥青混合料级配修正

在确定钢渣的掺配范围和比例后,按照贝雷法设计矿料级配,确定各档集料的体积百分比。当集料间的密度一致或相似时,可简化为质量比,通过称取质量即可得到各档集料的体积比。然而,钢渣的密度比玄武岩要高出15%~20%,若仍按质量比作为体积比,便会造成实际合成级配曲线与目标级配曲线之间的误差。并且这种误差随着钢渣与天然集料密度比的增大而增大,因此,必须将钢渣与天然集料间的质量比进行合理修正,以符合目标级配组成^[36]。具体换算方法如下。以体积比求沥青混合料平均比重 γ 为

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \gamma_i}{100}$$

其中集料 i 体积百分比 f_i 为

$$f_i = \frac{V_i}{V} 100 = \frac{M_i / \gamma_i}{M / \gamma} 100 = \frac{M_i}{M} \frac{\gamma}{\gamma_i} = \frac{F_i \gamma}{\gamma_i}$$

则集料 i 修正后的质量百分比 F_i 为

$$F_i = \frac{f_i \gamma_i}{\gamma}$$

式中: γ_i 为集料 i 的比重; M_i 为集料 i 的质量; M 为矿质混合料总质量; V_i 为集料 i 的体积; V 为矿质混合料总体积。

2.2.3 钢渣有效相对密度测定

有效相对密度的测定方法可以分为理论计算法以及实测法。对于天然集料,常用理论计算法,即按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中给出的沥青吸收系数 C 与吸水率 ω 间的 3 次回归关系式进行计算,而这一回归关系仅适用于吸水率为 0.5%~1.7% 范围内^[43]。钢渣作为多孔材料,其吸水率超过 1.7%,回归公式不再适用,应采用实测法。为此,本课题组采用改性沥青浸渍法对钢渣的有效相对密度进行了实测,具体试验方法如下:取含有玻璃棒的容器,称量两者的总质量 m_1 和水中总质量 m_2 ;对容器和玻璃棒进行烘干处理,并取 300 g 钢渣放入其中,称量三者的总质量 m_3 ;将钢渣、容器和玻璃棒放于烘箱中 2 h 去除水分,之后将沥青倒入容器中,充分搅拌排除气泡;将装有沥青、玻璃棒、钢渣的容器放入 165 °C 烘箱中,每隔 15 min 进行搅拌,1 h 后观察表面若无气泡,则取出冷却至室温;称取总质量 m_4 和水中质量 m_5 ,并计算钢渣有效相对密度 ρ_e

$$\rho_e = \frac{m_3 - m_1}{m_4 - m_5 - (m_1 - m_2) - (m_4 - m_3) / \gamma}$$

此外,根据大量试验数据,本文给出了修正后的钢渣吸水率与沥青吸收系数之间的拟合关系式^[44-46],以期今后采用理论计算法得到钢渣有效相对密度提供参考

$$C = -0.021 4\omega^5 + 0.492 2\omega^4 - 4.309 3\omega^3 + 17.75\omega^2 - 33.903\omega + 24.13$$

2.2.4 最佳油石比确定

相比于传统集料如玄武岩、石灰岩等,钢渣的多孔隙结构更易吸附沥青,增加了沥青用量,因此,在拟定混合料初始油石比时,可较天然集料沥青混合料有所提高。其中,AC 级配可提高 0.40%~1.92%,SMA 级配可提高 0.6%~0.8%,Superpave 级配可提高 1.8% 左右^[42,44-51],如图 6 所示。需要注意的

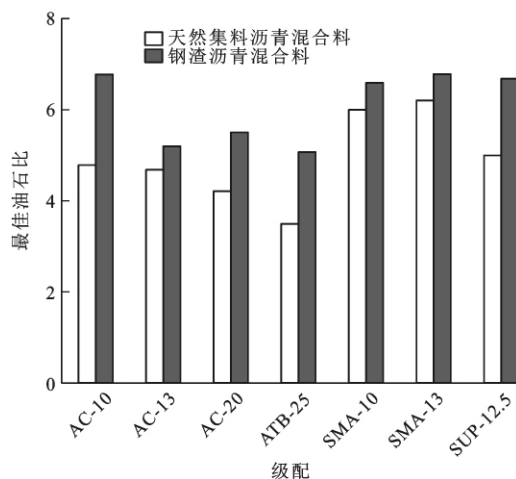


图 6 最佳油石比

Fig. 6 Optimum asphalt-aggregate ratios

是,在比较两者的最佳油石比时,由于钢渣密度较高,若按传统的油石比计算方法(质量比),则不具有可比性,因此,应定义相同体积下钢渣集料的沥青用量。

综上所述,在进行钢渣沥青混合料配合比设计时,采用粒径为 2.36~20 mm 之间的钢渣粗集料更为经济、合理,并应按照体积比而不是质量比进行掺配。钢渣的多空隙结构不仅增加了沥青用量,也使得其体积参数需要通过实测法进行确定,例如沥青浸渍法。此外,还可根据原材料特性及道路等级要求等因素进行级配设计优化。

3 钢渣沥青混合料性能

钢渣的集料特性优良,经安定化处理后可用于制备沥青混合料,同时其耐磨、抗滑、棱角性丰富以及高碱性等特点对沥青混合料的传统路用性能还具有一定提升效果。此外,钢渣中较高的铁含量使得其在功能特性方面也优于天然集料,如导电性、微波加热以及自愈合特性。

3.1 高温稳定性

钢渣沥青混合料的高温稳定性能优于天然集料沥青混合料,其动稳定度平均可提高 50%~70%。本文总结了不同级配的钢渣沥青混合料的高温性能结果,具体数据见表 3。首先,钢渣对 AC 级配的高温性能提升最为显著,AC-10、AC-13 以及 AC-20 级配的钢渣沥青混合料,其动稳定度相比天然集料分别提升了 14.67%~108.00%、61.9%~83.6% 以及 36.1%~161.0%。其次,钢渣对 SMA 级配也具有提升效果,但幅度低于 AC 级配,SMA-10 和 SMA-13 分别提高了 43.9%~90.1% 和 20.4%~34.8%。对于 SUP-13 级配的钢渣沥青混合料,其

表 3 高温稳定性
Tab. 3 High temperature stabilities

级配	混合类型	沥青种类	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	技术要求/ (次·mm ⁻¹)
AC-10 ^[45-46,52-53]	100%钢渣	SBS	6 000	≥800
	钢渣-粗	SBS	4 250~7 700	≥800
	天然集料	SBS	3 706	≥800
AC-13 ^[48,54-57]	100%钢渣	70A	2 898	≥800
	钢渣-粗	90 [#]	2 897	≥800
	天然集料	70 [#]	1 578~1 789	≥800
AC-16 ^[58]	100%钢渣	SK-70	1 763	≥800
	钢渣-粗	70A	1 231~1 594	≥800
AC-20 ^[40,47,57]	钢渣-粗	70 [#]	1 442~2 611	≥800
	天然集料	70	905~998	≥800
ATB-25 ^[43,48,56]	100%钢渣	70A	1 692	≥800
	钢渣-粗	70A	1 691~1 779	≥800
	天然集料	70A	2 300~2 301	≥800
SMA-10 ^[45,48,54]	100%钢渣	70 [#] /SBS	5 827/5 840	≥3 000
	钢渣-粗	70 [#] /SBS	5 826/6 232~7 728	≥3 000
	天然集料	70 [#] /SBS	4 050/4 065	≥3 000
SMA-13 ^[59-60]	钢渣-粗	SBS	8 236~9 219	≥3 000
	天然集料	SBS	6 839~7 825	≥3 000
OGFC-13 ^[61]	钢渣-粗	SBS(PG76-22)	5 753	≥3 000
OGFC-16 ^[23]	钢渣-粗	SBS	3 315	≥3 000
SUP-12.5 ^[51]	钢渣-粗	AH-70	6 745	≥3 000
	天然集料	AH-70	5 919	≥3 000

高温性能提升效果相对较低,仅为 13.9%。此外,AC 和 SMA 级配钢渣沥青混合料的动稳定度最大值均出现在钢渣作为粗集料时。这表明,钢渣作为粗集料对混合料的高温性能提升效果要优于使用 100%钢渣。王雅婷等分别以含量为 0、20%、40%、60%、80%、100%的钢渣制备了 AC-10、SMA-10 两种沥青混合料,研究发现,当钢渣掺量为 40%时,沥青混合料的动稳定度达到最大值^[45]。

对于 AC-16、AC-25、OGFC-13 以及 OGFC-16 级配的钢渣沥青混合料,由于文献中未设对照组,无法进行对比,但试验组钢渣沥青混合料的高温性能均满足规范要求。同时结合以往工程经验,其动稳定度应高于同级配天然集料沥青混合料。沥青使用方面,采用改性沥青制备的钢渣沥青混合料其高温性能要优于基质沥青^[45,48,54]。分析认为,钢渣由于表面粗糙、孔隙率高,使得钢渣与沥青的黏结性能要高于天然石料,同时,钢渣骨料棱角性丰富,在经过压实后颗粒与颗粒能形成较好的嵌挤结构,表现出

优异的抗剪切作用,增加了抵抗永久变形的能力,从而提高了混合料的高温稳定性^[55]。

3.2 水稳定性

钢渣沥青混合料的水稳定性优于天然集料沥青混合料,其冻融劈裂强度比(Tensile Strength Ratio, TSR)可提高 3%~13%。本文总结了不同级配的钢渣沥青混合料的水稳定性结果,具体数据见表 4,其中 AC-13、AC-20 和 SMA-13 级配钢渣沥青混合料的 TSR 提升效果最为明显,分别提升了 11.79%~13.50%、12.66%~13.40%以及 10.70%~13.37%;而 AC-10 和 SMA-10 级配的 TSR 提升幅度较小,仅为 0.71%~4.97%和 3.65%~4.00%,与天然集料沥青混合料差异不大。由此推断,对于细粒式沥青混合料,最大公称粒径越小,则钢渣对沥青混合料的水稳定性提升效果也越低。

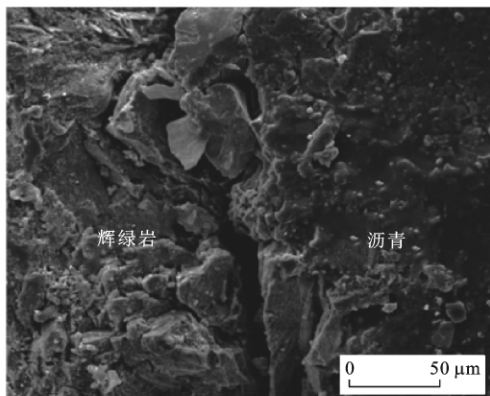
表 4 水稳定性
Tab. 4 Water stabilities

级配	混合类型	沥青种类	冻融劈裂 强度比/%	技术 要求/%
AC-10 ^[45-46,52]	钢渣-粗	SBS	85.1~88.7	≥80
	天然集料	SBS	84.5	≥80
AC-13 ^[56-57]	钢渣-粗	90 [#] /70 [#] /SBS	92.4/92.9/92.0	≥80
	天然集料	90 [#] /70 [#]	81.4/83.1	≥80
AC-14 ^[61-64]	钢渣-粗		84.0~86.0	≥80
AC-16 ^[58]	钢渣-粗	SK-70	82.8	≥80
AC-20 ^[47,57]	钢渣-粗	70 [#] /90 [#]	88.6/89.9	≥80
	天然集料	70 [#] /90 [#]	78.1/79.8	≥80
ATB-25 ^[48,54]	100%钢渣	70 [#]	77.4	≥75
	钢渣-粗	70 [#]	77.4	≥75
	天然集料	70 [#]	80.7~86.6	≥80
SMA-10 ^[48,54]	100%钢渣	70 [#]	85.3	≥80
	钢渣-粗	70 [#]	85.6	≥80
	天然集料	70 [#]	82.3	≥80
SMA-13 ^[50]	钢渣-粗	SK A-90	95.2~97.5	≥80
	天然集料	SK A-90	86.0	≥80
OGFC-13 ^[61]	钢渣-粗	SBS(PG76-22)	89.8	≥80
OGFC-16 ^[62]	钢渣-粗	SBS	83.5	≥80
SUP-12.5 ^[51]	钢渣-粗	AH-70	94.5	≥80
	天然集料	AH-70	88.0	≥80

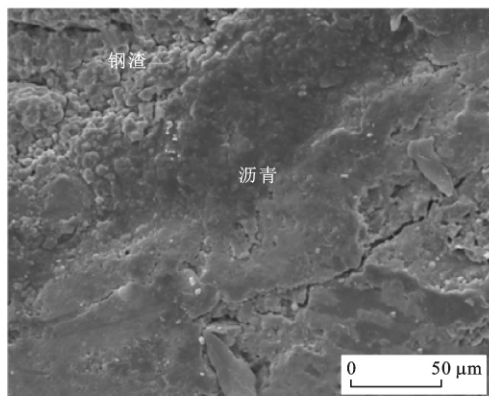
此外,沥青种类对钢渣沥青混合料的 TSR 影响较小。采用改性沥青制备的 AC-13 级配钢渣沥青混合料,其水稳定性较基质沥青并未有所提高。同样的规律在 OGFC-13 中也可以体现,采用 HVA 的钢渣沥青混合料与采用 SBS 的钢渣沥青混合料,其冻融劈

裂强度比基本相等,因此,可以考虑,钢渣作为集料对混合料的抗水损害能力贡献值要大于沥青。

研究认为,钢渣与沥青的黏结力状况要优于天然集料,其表面的结构沥青所占比例更高,增加了沥青膜的厚度,从而提高了水稳定性,如图 7 所示^[50]。当钢渣掺量达到 70% 时,沥青膜厚度可增大 13%。



(a) 辉绿岩-沥青



(b) 钢渣-沥青

图 7 黏结界面 SEM 结果

Fig. 7 SEM results of bonding interfaces

3.3 低温抗裂性

钢渣沥青混合料的低温性能研究结果差异较大,主要是由于不同钢渣原材料、沥青种类、级配类型以及拌和温度等因素均会较大程度影响钢渣沥青混合料的低温抗裂性,因此,在多因素耦合的情况下,钢渣沥青混合料的低温性能有待进一步研究。图 8 总结了钢渣沥青混合料的低温抗裂性能研究结果,其中牛哲等认为钢渣代替天然集料提升了沥青混合料的低温抗裂性能,其最大弯拉应变相比天然集料提升了 8.52%~28.32%^[42,57,60-67],然而杨永利

此外,中国钢渣多呈高碱性($\text{pH} > 2.5$),其表面碱活性成分,如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 等金属阳离子可以与沥青酸性基团发生化学反应,生成沥青酸盐,在钢渣表面构成化学吸附层。而化学作用的强度超过分子作用力许多倍,从而提高了黏附效果,有效防止了沥青混合料的松散剥离^[62,65-73]。

等的研究表明,钢渣的掺入会显著降低沥青混合料的低温抗裂性能,最大弯拉应变降幅可达 18.40%~52.57%^[65,69]。此外,对比两例 100% 钢渣含量的沥青混合料的低温抗裂性时发现,将钢渣沥青混合料中的天然细集料也替换为钢渣时,沥青混合料的最大弯拉应变得到了进一步提升,其中 AC-13 级配较仅含钢渣粗集料时提升了 101%。由此推断,钢渣细集料对沥青混合料低温性能提升的贡献值远大于粗集料。然而该规律在 AC-20 级配钢渣沥青混合料中的表现性不强,有待进一步研究。Wu 等制备了 SMA 级配的钢渣沥青混合料,并采用临界压缩应变能作为评价指标,结果表明钢渣沥青混合料的临界压缩应变能为 $73.3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,而玄武岩沥青混合料为 $46.673 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,低温抗裂性得到了明显的提升^[73-74];Ameri 等分别采用钢渣替代粗、细以及全部集料制备沥青混合料,并以间接拉伸强度作为评价指标,结果表明石灰石沥青混合料的间接拉伸强度最高,为 891 kPa,而钢渣沥青混合料仅为 657~795 kPa,低温性能显著降低^[25,75-76];谢君认为沥青种类对混合料低温抗裂性的影响要远大于集料类型,因此,钢渣替代天然集料对混合料的低温性能几乎没有影响^[6]。

3.4 抗疲劳性能

钢渣沥青混合料的抗疲劳性能优于天然集料沥青混合料,其疲劳寿命可提升 26.6%~69.6%,现

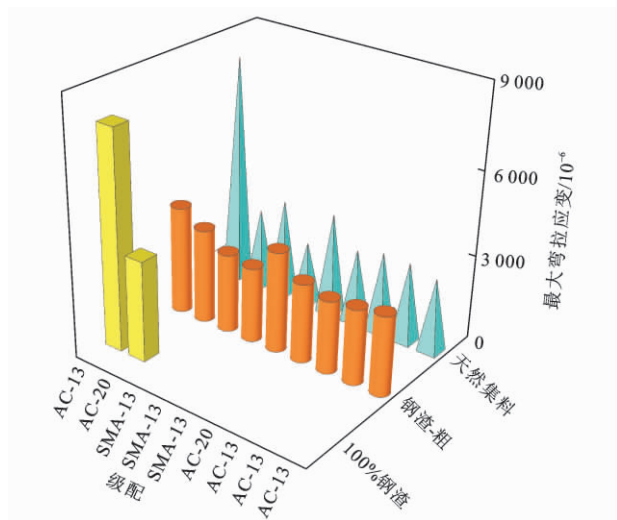


图 8 沥青混合料低温抗裂性

Fig. 8 Low temperature crack resistances of asphalt mixtures

有的研究可从多个角度进行论证。首先,钢渣表面的碱活性成分与沥青中酸性基团发生化学反应并产生能量,导致材料之间形成较好的黏附作用。同时,其较大的比表面积增加了这种化学反应的作用范围,增强了矿料与沥青胶浆的相容性。其次,钢渣的多孔隙结构为沥青胶浆提供了较大的浸润界面,使沥青胶浆在钢渣表面形成一定嵌入和锚固深度,有效提高了沥青混合料的疲劳性能^[58]。此外,还可通过表面自由能理论进行解释。材料的表面自由能越高,则黏附性越好,钢渣的表面自由能为 $130.6 \sim 132.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,高于石灰岩的 $124.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Qazizadeh等以初始劲度模量衰减至拟合参数50%的加载次数为指标,对比了钢渣与天然集料沥青混合料的抗疲劳性能,结果表明在500、700 kPa应力水平下,石灰石沥青混合料的加载次数分别为127 500、31 290,钢渣沥青混合料的加载次数分别为216 263、50 117,疲劳性能得到了明显提升^[24,76-78];申爱琴等研究了钢渣掺量(0、30%、50%、70%)和应变水平对混合料疲劳性能的影响,结果表明随着钢渣掺量的增加,沥青混合料疲劳寿命呈先增加后降低的趋势,临界掺量为30%^[77]。综上所述,钢渣自身的多孔隙结构以及和沥青间特殊的化学作用使得钢渣沥青混合料的疲劳性能优于天然集料沥青混合料。

3.5 体积安定性

钢渣沥青混合料的长期体积安定性良好。本文总结了不同级配钢渣沥青混合料的体积膨胀率,如图9所示,各级配钢渣沥青混合料的体积膨胀率均可控制在0.25%~1.30%之间,满足规范《道路用钢渣》(GB/T 25824—2010)不大于2%的要求,其中ATB-25级配的体积膨胀率最高,为1.30%,LH-15

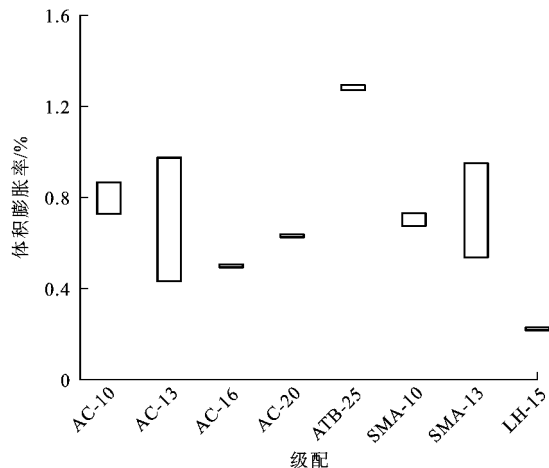


图9 不同级配钢渣沥青混合料体积膨胀率

Fig. 9 Volume expansion ratios of different grades of steel slag asphalt mixtures

的体积膨胀率最低,仅为0.25%。其余级配的钢渣沥青混合料均可控制在1%以下。此外,密级配钢渣沥青混合料的体积膨胀率并未表现出随着公称最大粒径的增大而提高。由此推断,即使沥青混合料的孔隙率变大,其内部与水接触的面积变大,但钢渣沥青混合料的体积膨胀率并未相应提高。分析认为,经过预处理和陈化处理,钢渣原材料中的f-CaO含量有效降低($\leq 3\%$),即使钢渣沥青路面受到路表水长期的浸泡,导致残留的f-CaO仍在缓慢进行水化反应,但由于含量较低,其体积变化也会被沥青混合料的内部空隙所容纳,并不足以抵消或超过混合料本身的热胀冷缩,同时,在外部约束力的制约下,如行车荷载,路面并不会出现膨胀开裂^[5,79]。Wu等利用陈化后的钢渣制备SMA-13沥青混合料,并将其放入60℃水浴中浸泡7 d,测量试件的体积变化,结果表明钢渣沥青混合料的7 d体积膨胀率小于1%,符合规范要求^[73];李超等对湖北境内的多处钢渣沥青混合料实体路段的长期性能监测显示,经过多年的服役,路面状况良好^[17]。

3.6 功能特性

冬季路面常有结冰积雪,有效保障冬季道路交通安全一直是世界各国关注的热点^[80-81]。目前,提高路面整体抗滑性能是确保行车安全的主要研究方向。此外,近年来跨学科领域的结合研究也为提高冬季路面行驶安全性提供了新思路。例如,对导电混凝土进行通电加热,以及采用微波吸收材料铺筑路面进行感应加热,从而实现路面融冰化雪的目的,更具环保和高效性。

3.6.1 提高路面抗滑性能

钢渣沥青混合料的抗滑性能优于普通沥青混合料,其各项抗滑指标均可提升10%左右。向晓东等认为,在AC和SMA级配中,钢渣沥青混合料的动态摩擦因数最大,分别为0.58和0.57,其次是玄武岩,分别为0.55和0.54,石灰岩最低,仅为0.43和0.40^[61],这符合1.1节中对集料本身物理指标的研究,钢渣拥有较高的磨光值,从而表现出较好的抗磨损性能。Karol等对比研究了不同集料(石灰石、白岩石、石英岩、钢渣)沥青混合料的抗滑性能,结果表明钢渣沥青混合料的抗滑性能最佳,相比于传统集料提高了10%~15%^[82]。此外,根据室外实体工程的长期检测显示,钢渣沥青路面在抗滑性能衰减速率方面也优于传统路面。向晓东等对试验路段进行了3年的跟踪检测,经计算钢渣沥青路面每万次轴载的摩擦因数衰减率为 2.01×10^{-2} ,远低于石灰石

沥青路面的 4.22×10^{-2} ^[52];李灿华等将观测的时间延长至 8 年,发现钢渣沥青路面的摆值仅下降了 32.3%,抗滑性能衰减缓慢^[53]。综上,钢渣沥青混合料优良的抗滑性能及衰减速率可为恶劣天气下的道路行车安全提供良好保障。

3.6.2 辅助路面除冰雪和自愈合

钢渣沥青混合料的导电性优于天然集料沥青混合料。钢渣中的单质铁和二价铁含量较高,且都是良导体,在给钢渣施加电压时,电子能在钢渣中不同价态铁之间迅速转移,从而实现了导电功能。钢渣沥青混合料的电阻率仅为石灰石沥青混合料的 4.0%~19.8%^[83-84]。但由于钢渣自身的导电性远不及石墨、钢纤维、碳纤维等优质导体,因此,钢渣常与优质导体复合,从而制备得到复相导电沥青混合料。例如,陈丰等采用钢渣、石墨制备出 Superpave-12.5 型导电沥青混合料,其电阻率均比普通沥青混合料降低 3 个数量级左右^[85]。钢渣石墨复相导电沥青混合料内部形成了固体集料和粉末复合连接的导电通路,因此,其导电效果更佳。此外,导电沥青混凝土的融雪化冰应用本质就是利用其电热特性。敖灶鑫的探究表明,在通电 15 min 之后,钢渣石墨导电沥青混合料上的雪水即开始慢慢融化,通电 43 min 之后,雪水已经完全融化^[86],由此证明了钢渣石墨导电沥青混合料应用于融雪除冰的可行性。

钢渣沥青混合料的微波加热性能优于天然集料沥青混合料。微波除冰的关键在于微波吸收材料的导热性能,当矿物质或无机化合物中铁含量越高,其热能受到微波辐射的影响越明显。钢渣中铁含量在 25%~30%,而石灰石的主要矿物成分为 CaCO_3 ,因此,钢渣具有更高的微波加热性。周朝刚等首先对钢渣的发热速率进行了研究,细度为 100~200 目的纯钢渣在 2.45 GHz 微波照射下 25 min,表面温度可超过 1 000 °C,发热速率非常理想^[87];Gao 等进一步比较研究了石灰石与 10 种不同粒径(0.075~13.2 mm)钢渣的微波加热性能,结果表明钢渣的微波加热性优于石灰石,尤以 0.6、2.36、9.5 mm 这 3 种粒径最为显著^[88-91];此外,Gao 等还制备了不同钢渣含量的沥青混合料,结果表明在 -5 °C、-20 °C 的条件下,钢渣沥青混合料的融雪化冰效率相比石灰石沥青混合料分别增加了 2.3~3.1 倍以及 2.1~2.6 倍^[88]。

钢渣沥青混合料除了具有较好的微波加热能力外,其自愈合修复特性也优于天然集料。Sun 等对比了天然集料和钢渣沥青混合料的自愈合效果,结

果表明在经历 2 次损伤-愈合循环后,天然集料沥青混合料的愈合水平已低于 88%,而钢渣沥青混合料在经历 4 次损伤-愈合循环后依旧保持 90% 以上的愈合水平^[92-93]。

综上所述,由于钢渣的棱角性丰富,集料间能形成更好的嵌挤结构,同时多孔隙以及高碱性的特点增强了与沥青间的黏结力,因此,钢渣沥青混合料的多项路用性能均优于天然集料沥青混合料,其中高温性能可提升 50%~70%,水稳定性可提升 3%~13%,抗疲劳性能可提升 26.6%~69.6%,而低温性能方面仍存在较大分歧,需进一步研究。钢渣的耐磨耗性良好,可提升路面抗滑性能 10%。此外,钢渣中的铁含量较高,可达 25%~30%,较高的铁含量使得其在路面除冰雪以及自愈合方面也优于天然集料^[94]。

4 钢渣沥青路面的生态与经济效益分析

中国道路建设每年需消耗大量天然集料,优质石灰岩只能再供给 15 年^[34]。截至 2016 年,中国累计仍有近 3.0×10^9 t 钢渣尚未有效使用,绝大部分被当作废弃物简单堆砌或填埋。若将这些钢渣用于道路建设可节约近 3.4×10^5 m² 的土地,并有效缓解天然集料的匮乏,从而产生显著的生态与经济效益^[2,34]。

4.1 生态效益分析

4.1.1 钢渣沥青路面的生态毒性评估

钢渣的矿物成分复杂,并含有多种难以降解的重金属离子,钢渣沥青路面长期暴露于自然环境中,其所含的重金属成分的生态毒性应进行严格论证。Pasett 等对钢渣中的重金属离子进行了测试,如表 5 所示,结果表明:钢渣集料本身的 Cu、Cr、Cd、Ni 等重金属离子含量与天然集料基本相同,仅 Pb 含量较高,达 3.476%,但仍低于 5% 的限定值,不存在生态毒理^[89]。同时,当钢渣用于沥青混合料时,由于受到沥青的包裹,其重金属离子浸出浓度会进一步降低。与暴露在自然环境中的钢渣集料相比,混合料中的 Cr、Pb 浸出浓度分别下降了 41.6%~50.0% 和 27.07%~49.97%,Ni 已无法检测到^[64]。

4.1.2 潜在的生态效益

在全寿命周期内,与天然集料沥青混合料相比,钢渣沥青路面可减少道路建设的碳排放,其中采用钢渣粗集料的碳排放量仅为细集料的 6.5%~8.0%。两者的差异主要来源于集料的破碎、沥青的用量以及混合料的拌和与压实^[90]。这也侧面论证了使用钢渣粗集料更加环保。此外,Ferreira 等将

表 5 钢渣沥青混合料重金属离子浸出浓度
Tab. 5 Heavy metal ion leaching concentrations of
steel slag asphalt mixtures

重金属 离子	重金属离子浸出浓度/(mg·l ⁻¹)				限定值
	天然集料	钢渣	钢渣沥青混合料 1	钢渣沥青混合料 2	
Cu	0.063	0.095	0.075	0.083	
Cr	0.017	0.024	0.014	0.012	5
Pb	1.910	3.476	1.739	2.535	5
Cd	0.307	0.365	0.377	0.402	1
Ni	0.004	0.002			

全寿命周期的研究清单进一步扩大,如图 10 所示,钢渣沥青路面的使用具有显著的深层次生态效益,与天然集料相比,其在全球暖化方面降低了 14%,水体富营养化方面降低了 12%,人体毒性方面降低了 11%,淡水生态毒性方面降低了 13%以及海洋生态毒性方面降低 10%,而钢渣沥青混合料仅在非生物耗竭、臭氧层消耗、光化学氧化这 3 个方面略有提高,总体表现出较好的环境影响性^[91]。

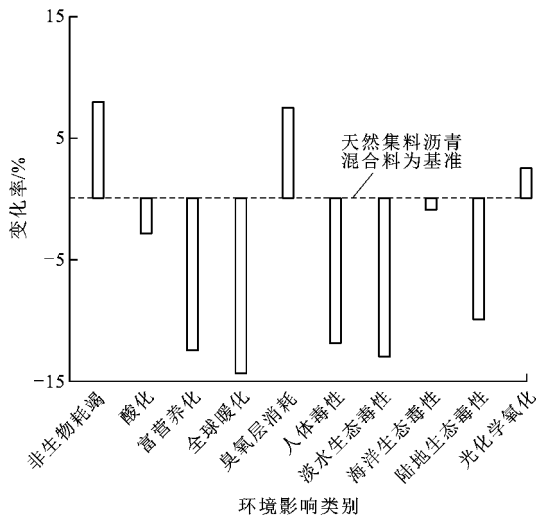


图 10 钢渣沥青混合料环境影响

Fig. 10 Environmental impacts of steel slag asphalt mixtures

4.2 经济效益分析

一方面,钢渣的价格低廉,替代天然集料进行道路建设既保护了自然资源,也省去了额外的废渣处理费用,另一方面,钢渣的多孔结构增加了沥青用量,低产钢地区需要较高的钢渣运输费用等,也从一定程度上提高了工程成本,因此,有必要对钢渣沥青混合料的综合经济效益进行评估。李保安等采用净现值法对比了普通沥青路面和钢渣沥青路面的全寿命周期费用,结果表明,钢渣沥青路面在前期材料成本费用上略有提高,如钢渣运输及处理费用,但日常养护费用和大中修费用均有大幅降低,综合经济效

益更高^[95]。然而,钢渣沥青路面初期较高的建设成本,在很大程度上也限制了其推广,因此,建议相关部门加快配套政策的发布和实施,以改善其工程经济性,从而促进钢渣沥青路面的规模化应用。

5 钢渣沥青路面工程应用

5.1 中国钢渣的产地分布及产量

钢渣在中国的分布广泛,产量巨大。东部沿海地区的环渤海区域和华北地区依然是中国最大的 2 个产钢区域,拥有超过 75% 的钢铁企业以及 66% 的钢渣产量^[2]。而西北和西南地区则长久缺乏大型钢厂,钢渣产量相对较低,如图 11 所示。这主要是由于中国钢铁工业布局是根据国内资源和靠近铁矿原料产地的原则展开的。中国每年钢渣产量前 4 名的地区分别为河北(1.97×10^7 t)、江苏(1.11×10^7 t)、山东(6.69×10^6 t)和辽宁(5.99×10^6 t)。2016 年 4 省产量占比合计近 50%,较高的产量为钢渣的利用奠定了基础。

5.2 实际工程应用

钢渣在 1970 年的“第二届矿物废料利用”国际大会上已经被确认可作为道路建设集料。加拿大于 1974 年在多伦多的 401 号快速道路铺筑了钢渣沥青路面试验段,4 年后检测发现,路面抗滑性能较其他路段更佳^[12]。日本于 1980~1985 年间在福山市、爱知县等多个地区铺筑钢渣沥青路面以提高道路抗车辙及磨损能力,钢渣利用率达 81%,并于 1988 年修订了《沥青路面铺路纲要》,为钢渣在道路工程中的应用提供了技术保障^[12]。美国有超过 16 个州使用钢渣作为道路集料,且在 1990~1995 年期间,仅纽约市就使用了超过 2.5×10^5 t 的钢渣沥青混合料^[12]。德国在 1998 年已将 97% 的钢渣用作道路建设,形成了完整的钢渣工程应用质量控制体系,并纳入其 CEN 标准中。希腊在 2009 年采用钢渣建造了抗滑磨损层,经过一年多的跟踪监测,钢渣沥青路面使用性能良好。除上述欧美等发达国家之外,在新加坡、马来西亚、澳大利亚、南非、沙特阿拉伯和意大利等气候炎热地区,钢渣沥青混合料的优越性能也已经得到认可^[96-99]。

近年来,中国也建设了多条钢渣沥青路面实体工程。1997 年 12 月,中国首条钢渣沥青路面试验段在上海市宝山区杨行镇富杨路铺筑完成。2002~2004 年期间,武钢与武汉理工大学率先在武钢环厂西路、武黄大修工程豹澥段和仙桃汉江公路大桥桥面铺设了钢渣沥青路面,在经历约 10 年的重载交通

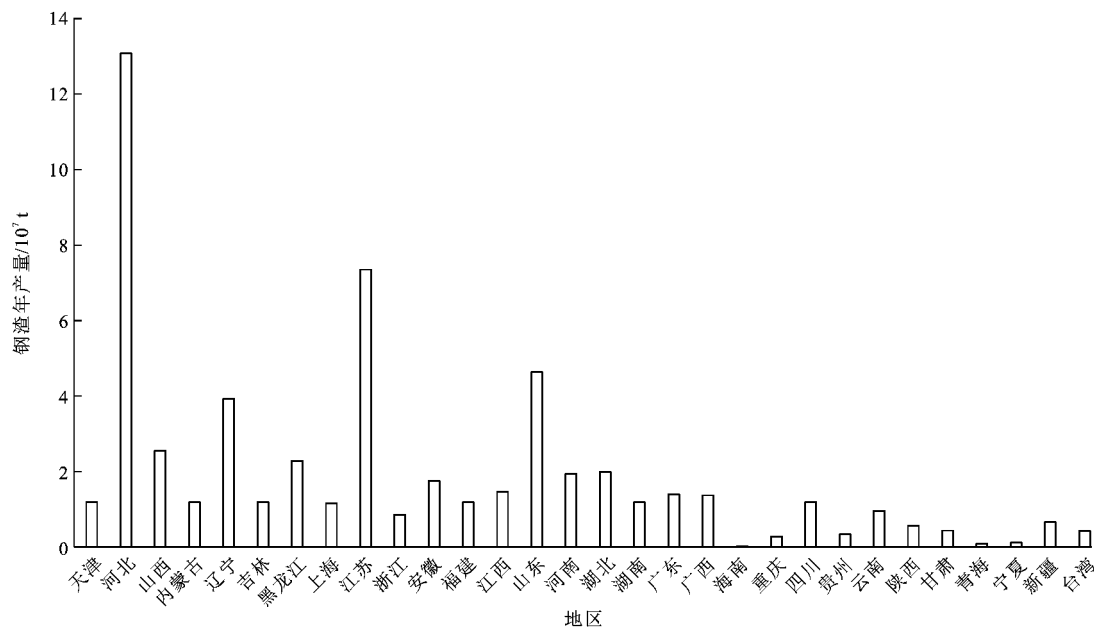


图 11 钢渣分布与产量

Fig. 11 Distribution and productions of steel slag

后,3条钢渣沥青路面均表现出优异的路用性能,其抗滑性能以及耐久性能等指标均优于普通沥青路面。2009年,在北京长安街大修工程中,采用了钢渣代替玄武岩铺筑路面表层,成为钢渣沥青路面的典范。2015年10月,中国首条全钢渣市政路在太原市建成。2015年8月底,中国首条钢渣沥青混合料高速公路试验段在宜张高速当枝段铺筑完成,为钢渣沥青混合料产业化起到了示范作用^[98]。

5.3 应用中存在的问题

相比于国外系统化、规模化的应用,中国钢渣沥青路面还处于探索、研究阶段,虽有许多实体工程,但总体规模均较小且多为试验路段,同时在进行钢渣沥青路面施工过程中仍存在许多问题,亟待解决。

5.3.1 原材料处理

钢渣的孔隙率较高,因此,需要更长的加热时间以确保水分的蒸发。此外,钢渣原材料在进行安定性处理时需注意,钢渣必须破碎至预期的级配后,才可进行洒水陈化处理,且陈化时间不可低于6个月。西弗吉尼亚运输部在其标准规范中也有相似的规定^[100]。

5.3.2 拌和与运输

钢渣在淬冷成型时各部位的收缩率不同,钢渣表面存在一些较深的孔隙,在进行混合料拌和时,沥青短时间内难以充分浸润,因此,在拌和过程中应适当延长湿拌时间,以使沥青裹复均匀,同时还可以防止早期水损害。此外,钢渣沥青混合料在运输时同样要考虑加热的问题,由于钢渣的导热性良好,钢渣

沥青混合料在运输过程中温度下降较快,可能导致运抵摊铺现场时低于摊铺温度而影响施工,因此,要保证混合料运输过程中的加热条件。

5.3.3 摊铺与压实

在铺筑钢渣沥青路面时,由于钢渣密度较高,相同总量下钢渣沥青混合料铺筑的路面比天然集料沥青混合料铺筑的路面少30%,较低的产量和昂贵的运输费用使得钢渣沥青混合料的原始铺筑成本较高,这在很大程度上限制了钢渣沥青混合料的应用,因此,从经济性角度出发,建议将钢渣应用于其产地周边的城市道路或者低交通量道路。此外,在2003年的武黄高速豹獬段匝道以及2012年的武汉市高新技术开发区进行钢渣沥青混凝土试验段铺筑时发现,钢渣沥青混合料相比普通沥青混合料更难压实,需提高压路机吨位或增加复压次数。对此,美国联邦公路管理局则建议仅使用钢渣粗集料,或者将钢渣与棱角性较低的集料混合使用,以增强压实效果^[101]。

6 结 语

(1)道路建设用钢渣多为碱性转炉钢渣,不同类型钢渣的物理力学性能优良,而化学成分和矿物相组成则受炼钢工艺影响有所区别。钢渣的体积安定性经处理后能得到较好的改善,可作为道路建设用集料,其中预处理相比陈化处理更加高效与环保。

(2)在进行钢渣沥青混合料配合比设计时,采用钢渣作为粗集料更为经济、合理,并应按照体积比进

行掺配。钢渣的多孔隙结构增加了混合料的沥青用量,因此,在拟定初始沥青用量时应较普通沥青混合料有所提高,同时对于其体积参数,如吸水率,也应通过实测法进行确定。

(3)钢渣的多孔隙、棱角性丰富以及高碱性等特点提升了沥青混合料的传统路用性能。同时,钢渣良好的耐磨耗性和较高的铁含量使得钢渣沥青混合料在功能特性方面也优于天然集料沥青混合料,如抗滑性能、路面除冰雪以及自愈和等方面。钢渣沥青混合料对生态环境的影响较小。

(4)钢渣沥青路面相比天然集料沥青路面具有更好的路用性能,但原材料的特殊性也使得钢渣沥青路面的施工工艺与普通路面有所区别,在实际生产中应进行适宜的调整。同时,钢渣沥青路面的工程经济性是制约其推广的重要因素。

(5)目前大宗钢渣的主要处理方式仍以陈化为主,周期较长,未来宜采用热焖等先进预处理工艺逐步替代自然陈化法,从而使钢渣尾渣在较短时间达到较好的工作性能。此外,由于预处理工艺存在地域性差异,钢原材料的规格变异性仍较大,因此,钢渣的质量控制体系亟待完善。

(6)目前关于钢渣沥青混合料的性能已有一定研究,而作用机理方面则相对缺乏,关键性的限制因素如密度较高、体积安定性不良、混合料沥青用量增加等仍未得到根本性解决。

(7)现阶段中国的钢渣沥青路面多为试验路段,实际应用水平远落后于室内研究水平,因此,在今后的研究中,应对当前众多的试验路段进行长期跟踪监测,从而掌握实体工程数据。此外,全寿命周期研究更值得开展,通过全方位剖析钢渣沥青路面的综合性能与工程经济性,建立绿色处理标准,加快配套政策的发布和实施,促进钢渣沥青路面的推广与应用。

参考文献:

References:

- [1] 王川. 钢渣表面改性工艺及改性钢渣沥青混合料性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.
WANG Chuan. Study on the surface modification technology of steel slag and the performance of modified steel slag asphalt mixture[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [2] GUO Jian-long, BAO Yan-ping, WANG Min. Steel slag in China: treatment, recycling, and management[J]. Waste Management, 2018, 78: 318-330.
- [3] KAVUSSI A, QAZIZADEH M J. Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging[J]. Construction and Building Materials, 2014, 72: 158-166.
- [4] YILDIRIM Z I, PREZZI M. Steel slag: chemistry, mineralogy, and morphology[J]. Geotechnical Special Publication, 2015, 256: 2816-2825.
- [5] WANG G. Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10): 1961-1966.
- [6] 谢君. 钢渣沥青混凝土的制备、性能与应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
XIE Jun. Research on the preparation, performance and application of basic oxygen furnace slag based asphalt concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [7] SOFILIC T, MLADENOVIC A, SOFILIC U. Characterization of the EAF steel slag as aggregate for use in road construction[J]. Chemical Engineering Transactions, 2010, 19: 117-123.
- [8] AMELIAN S, MANIAN M, ABTAHI S M, et al. Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 329-337.
- [9] PRETI F, NOTO S, ACCARDO C, et al. Effect of hyper-modified asphalt binder and steel slags on cracking and rutting behaviour of wearing course mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20: 678-694.
- [10] SKAF M, ORTEGA-LOPEZ V, FUENTE-ALONSO J A, et al. Ladle furnace slag in asphalt mixes[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 488-495.
- [11] 薛永杰, 吴少鹏. 钢渣 SMA 路用性能试验研究[J]. 公路, 2006(2): 126-129.
XUE Yong-jie, WU Shao-peng. Research on experimental of pavement performance of steel slag SMA[J]. Highway, 2006(2): 126-129. (in Chinese)
- [12] HAININ M R, AZIZ M M A, ALI Z, et al. Steel slag as a road construction material[J]. Journal Teknologi (Sciences and Engineering), 2015, 73(4): 33-38.
- [13] DÍAZ R O, FARFÁN M R, CARDENAS J, et al. Use of steel slag as a new material for roads[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 935: 11-16.
- [14] Construction Division Pavements Office. Use of steel slag aggregate in pavements[R]. Washington DC: Washington State DOT, 2015.
- [15] YILDIRIM I Z, PREZZI M. Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: mineralogical, physical and mechanical properties[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 23-33.
- [16] DHOBLE Y N, AHMED S. Review on the innovative uses of steel slag for waste minimization[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2018, 20(3): 1373-1382.
- [17] 李超, 陈宗武, 谢君, 等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(2): 86-95, 122.
LI Chao, CHEN Zong-wu, XIE Jun, et al. A technological

- and applicational review on steel slag asphalt mixture[J]. *Materials Review*, 2017, 31(2): 86-95, 122. (in Chinese)
- [18] CHEN Zong-wu, XIE Jun, XIAO Xue, et al. Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 64: 60-66.
- [19] SHI Cai-jun. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(3): 230-236.
- [20] ZHAO Ji-hui, YAN Pei-yu, WANG Dong-min. Research on mineral characteristics of converter steel slag and its comprehensive utilization of internal and external recycle[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 50-61.
- [21] 李光辉, 邹 斌, 张元波, 等. 转炉钢渣工艺矿物学及其综合利用技术[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(6): 2065-2071.
- LI Guang-hui, WU Bin, ZHANG Yuan-bo, et al. Mineralogical characteristics and comprehensive utilization of converter steel slag[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(6): 2065-2071. (in Chinese)
- [22] PRAVEEN K, SATISH K, MARUTIRAM K, et al. Pilot-scale steam aging of steel slags[J]. *Waste Management and Research*, 2017, 35(6): 602-609.
- [23] 李灿华, 向晓东, 周溪滢. 钢渣升级配透水沥青混合料及性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(1): 168-171.
- LI Can-hua, XIANG Xiao-dong, ZHOU Xi-ying. Investigation of performance of porous open graded steel slag asphalt mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(1): 168-171. (in Chinese)
- [24] QAZIZADEH M J, FARHAD H, KAVUSSI A, et al. Evaluating the fatigue behavior of asphalt mixtures containing electric arc furnace and basic oxygen furnace slags using surface free energy estimation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 355-361.
- [25] AMERI M, HESAMI S, GOLI H. Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 611-617.
- [26] OLUWASOLA E A, HAININ M R, AZIZ M M A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction[J]. *Transportation Geotechnics*, 2015, 2: 47-55.
- [27] PASETTO M, BALIELLO A, GIACOMELLO G, et al. Rheological characterization of warm-modifies asphalt mastics containing electric arc furnace steel slags[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 3: 1-11.
- [28] SANTAMARÍA A, ROJÍ E, SKAF M, et al. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106: 364-373.
- [29] ZUMRAWI M M E, KHALILL F O A. Experimental study of steel slag used as aggregate in asphalt mixture[J]. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2015, 9(6): 753-758.
- [30] MAHARAJ C, WHITE D, MAHARAJ R, et al. Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface[J]. *Cogent Engineering*, 2017, 4: 1-12.
- [31] 赵计辉, 阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(2): 477-484.
- ZHAO Ji-hui, YAN Pei-yu. Volume stability and stabilization treatment of steel slag in China[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(2): 477-484. (in Chinese)
- [32] YILDIRIM I Z, PREZZI M. Geotechnical properties of fresh and aged basic oxygen furnace steel slag[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(12): 1-11.
- [33] WEI Long-hua, QI Xian-jin, ZHU Xing, et al. Influence of pretreatment on the free CaO in steel slag[J]. *Materials Science Forum*, 2017, 904: 162-166.
- [34] XUE Yong-jie, WU Shao-peng, HOU Hai-bo, et al. Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138: 261-268.
- [35] YILDIRIM I Z. Use of steel slag in subgrade applications[D]. West Lafayette: Purdue University, 2009.
- [36] FERREIRA V J, VILAPLANA A S D G, GARCIA-ARMINGOL T, et al. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 130: 175-186.
- [37] KANDA K, MORISITA S, HAMASAKI T. Pressurized steam aging process for steel slag[J]. *SEAI Quarterly*, 2011, 40(1): 25-28.
- [38] ZHAO Qing-lin, STARK J, FREYBURG E, et al. Steam and autoclave treatments on structure characteristics of steel slag[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 356-360: 1919-1927.
- [39] DAYIOGLU A Y, AYDILEK A H. Evaluation of mitigation techniques for the expansive behavior of steel slag[J]. *Geotechnical Frontiers*, 2017, 276: 360-368.
- [40] 卢发亮, 李 晋. 钢渣沥青混合料级配特征研究[J]. *公路*, 2013(7): 222-227.
- LU Fa-liang, LI Jin. Study on gradation characteristics of steel slag asphalt mixture[J]. *Highway*, 2013(7): 222-227. (in Chinese)
- [41] 刘 思, 华洲连, 焦立新, 等. 水洗洁净处理对钢渣 SMA 性能影响的研究[J]. *武钢技术*, 2014, 52(5): 36-39.
- LIU Si, HUA Zhou-lian, JIAO Li-xin, et al. Study on the effects of water-washed steel slag SMA performance[J]. *WISCO Technology*, 2014, 52(5): 36-39. (in Chinese)
- [42] 牛 哲. 钢渣沥青混合料的制备与性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- NIU Zhe. Research on preparation and performance of steel slag asphalt pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [43] 许丁斌. 钢渣沥青混合料的材料及性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- XU Ding-bing. The material and performance research of steel slag asphalt mixtures[D]. Nanjing: Southeast University,

2018. (in Chinese)
- [44] 廖玉春,王元元,季正军. 确定多孔性钢渣有效相对密度新方法的研究[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 216-218.
LIAO Yu-chun, WANG Yuan-yuan, JI Zheng-jun. Study on a new method for determining the effective relative density of porous steel slag[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33(3): 216-218. (in Chinese)
- [45] 王雅婷. 钢渣集料在沥青路面超薄抗滑磨耗层中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
WANG Ya-ting. Study on application of steel slag aggregate in ultra-thin against sliding wear layer[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [46] WEN Hai-fang, WU Sheng-hua, BHUSAL S. Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 1-7.
- [47] 杨俊霖,罗蓉,樊向阳,等. 基于多孔钢渣的沥青混合料设计与路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1): 68-71.
YANG Jun-lin, LUO Rong, FAN Xiang-yang, et al. Research on design and road performance of asphalt mixture with porous steel slag[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2018, 42(1): 68-71. (in Chinese)
- [48] 周启伟. 公路钢渣基层与钢渣沥青混合料路用性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2011.
ZHOU Qi-wei. Study on the steel slag base and the performance of steel slag-asphalt mixtures in highway[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [49] 吴启帆,包燕平,林路,等. 不同工艺钢渣物相组成及其显微形貌研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(8): 86-89.
WU Qi-fan, BAO Yan-ping, LIN Lu, et al. Study on phase compositions and microstructure of slag in different processes[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(8): 86-89. (in Chinese)
- [50] 高振鑫,申爱琴,翟超伟,等. 钢渣沥青混合料体积参数测定与水稳定性影响机理[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 1-10.
GAO Zhen-xin, SHEN Ai-qin, ZHAI Chao-wei, et al. Determination of volumetric parameters and impacting mechanism of water stability for steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transporting Engineering, 2018, 18(2): 1-10. (in Chinese)
- [51] 陈丰,吴少鹏,陈美祝,等. 钢渣沥青混凝土的制备与应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(9): 19-23.
CHEN Feng, WU Shao-peng, CHEN Mei-zhu, et al. Manufacture and application of steel slag asphalt concrete[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2010, 27(9): 19-23. (in Chinese)
- [52] 向晓东,习嘉晨,李灿华. 钢渣 AC-10C 型改性沥青混合料配合比设计及性能[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(6): 142-146.
XIANG Xiao-dong, XI Jia-chen, LI Can-hua. Mixture ratio and performance of mixture of steel slag with AC-10C-type modified asphalt[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(6): 142-146. (in Chinese)
- [53] 李灿华,刘思,陈琳. 武钢钢渣用作 AC-10I 型细粒沥青砼集料的研究[J]. 武钢技术, 2011, 49(3): 34-36.
LI Can-hua, LIU Si, CHEN Lin. Study on application of WISCO steel slag as AC-10I fine-grained asphalt concrete aggregates[J]. WISCO Technology, 2011, 49(3): 34-36. (in Chinese)
- [54] 谢勇,张逸圣,辛顺超. 基于钢渣骨料的沥青混合料路用性能研究[J]. 公路, 2014(12): 186-190.
XIE Yong, ZHANG Yi-sheng, XIN Shun-chao. Research on performance of asphalt mixtures for pavement with steel slag aggregates[J]. Highway, 2014(12): 186-190. (in Chinese)
- [55] 袁峻,钱野. 粗集料形态特征及其对沥青混合料高温抗剪强度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4): 17-22.
YUAN Jun, QIAN Ye. Morphological character of coarse aggregate and its influence on high-temperature shear strength of asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 17-22. (in Chinese)
- [56] 虞峻玮. 钢渣碎石沥青混合料路用性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012.
TUO Jun-wei. Study on pavement performance of steel slag and gravel asphalt mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [57] 齐广和. 钢渣沥青混合料在乌鲁木齐市市政道路工程中的应用[J]. 公路交通科技, 2014, 31(3): 122-124.
QI Guang-he. Application of steel slag asphalt mixture in Urumqi municipal road engineering[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(3): 122-124. (in Chinese)
- [58] PASETTO M, BALDO N. Fatigue performance and stiffness properties of stone mastic asphalts with steel slag and coal ash[J]. Asphalt Pavements, 2014, 1: 881-889.
- [59] 李永生,石效民,杨丽英,等. 钢渣沥青混合料在沥青面层中的应用研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(4): 70-72.
LI Yong-sheng, SHI Xiao-min, YANG Li-ying, et al. Study on application of steel slag asphalt mixture in asphalt surface layer[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(4): 70-72. (in Chinese)
- [60] 秦仁杰,孙超,孙明,等. 钢渣在 SMA-13 沥青混合料中的应用研究[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 272-274.
QIN Ren-jie, SUN Chao, SUN Ming, et al. Study on application of steel slag in SMA-13 asphalt mixture[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(1): 272-274. (in Chinese)
- [61] 向晓东,周溪滢,李灿华,等. 钢渣 OGFC-13 型排水沥青混合料的配合比设计与性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(6): 424-427.
XIANG Xiao-dong, ZHOU Xi-ying, LI Can-hua, et al. Design and performance of OGFC-13 steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2013, 36(6): 424-427. (in Chinese)

- [62] PASETTO M, BALIELLO A, GIACOMELLO G, et al. Rheological characterization of warm-modified asphalt mastics containing electric arc furnace steel slags[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 3: 1-11.
- [63] SKAF M, MANSO J M, ARAGON A, et al. EAF slag in asphalt mixes: a brief review of its possible re-use[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 120: 176-185.
- [64] ARABANI M, AZARBOOSH A R. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 1-7.
- [65] 杨永利, 武建明, 张建强. 钢渣 SMA-13 型沥青混合料配合比设计及路用性能研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2016, 33(7): 36-40.
YANG Yong-li, WU Jian-ming, ZHANG Jian-qiang. Research on mix design and pavement performance of SMA-13 asphalt mixture with steel slag[J]. *Road Machinery and Construction Mechanization*, 2016, 33(7): 36-40. (in Chinese)
- [66] 丁庆军, 李 春, 彭 波, 等. 钢渣作沥青混凝土集料的研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2001, 23(6): 9-13.
DING Qing-jun, LI Chun, PENG Bo, et al. Study of the practicability of asphalt concrete conected by steel slag[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2001, 23(6): 9-13. (in Chinese)
- [67] 卢发亮, 李 晋. 济钢转炉钢渣沥青混合料路用性能研究[J]. *中外公路*, 2013, 33(4): 259-263.
LU Fa-liang, LI Jin. Study on road performance of Jigang steel slag asphalt mixture[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2013, 33(4): 259-263. (in Chinese)
- [68] 薛永杰. 钢渣沥青玛蹄脂混合料制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
XUE Yong-jie. Study on the preparation and performance of steel slag mastic asphalt mixture[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [69] 胡金龙, 孙大权. 钢渣在沥青混凝土中的应用研究[J]. *华东公路*, 2014(6): 54-57.
HU Jin-long, SUN Da-quan. Application research of steel slag in asphalt concrete[J]. *East China Highway*, 2014(6): 54-57. (in Chinese)
- [70] CHEN J S, WEI S H. Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 128: 148-153.
- [71] SENGOZ B, AGAR E. Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(10): 3621-3628.
- [72] LI Xin-jun, WILLIAMS R C, MARASTEANU M O, et al. Investigation of in-place asphalt film thickness and performance of hot-mix asphalt mixtures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(6): 262-270.
- [73] WU Shao-peng, XUE Yong-jie, YE Qun-shan, et al. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt(SMA) mixtures[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2580-2585.
- [74] GOL I H, HESAMI S, AMERI M. Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(6): 1-9.
- [75] ELLIS K. Mechanical, environmental and economic feasibility analysis of sodium carbonate activated blast furnace slag[D]. Washington DC: Kate Gleason College of Engineering, 2015.
- [76] TIWARI M K, BAJPAI S, DEWANGAN U K. Steel slag utilization—overview in Indian perspective[J]. *International Journal of Advanced Research*, 2016, 4(8): 2232-2246.
- [77] 申爱琴, 喻沐阳, 郭寅川, 等. 钢渣沥青混合料疲劳性能及改善机理[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(2): 327-334.
SHEN Ai-qin, YU Mu-yang, GUO Yin-chuan, et al. Fatigue properties and improvement mechanism of steel slag asphalt mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(2): 327-334. (in Chinese)
- [78] 李 婷, 杨 刚, 陈 华, 等. 不同产出环节和处理工艺钢渣的基本性质及其利用[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(9): 2619-2623.
LI Ting, YANG Gang, CHEN Hua, et al. Basic properties and utilization of steel slags produced in different processes and prepared by different treatment process[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(9): 2619-2623. (in Chinese)
- [79] TEIXEIRA J E S L, SCHUMACHER A G, PIRES P M, et al. Expansion level of steel slag aggregate effects on both material properties and asphalt mixture performance[J]. *Transportation Research Record*, 2019(2673): 506-515.
- [80] 姚仕仕, 陈团结, 向 豪, 等. 环保型长效自融冰雪路面涂层试验[J]. *交通运输工程学报*, 2013, 13(4): 8-15.
YAO Yun-shi, CHEN Tuan-jie, XIANG Hao, et al. Experiment of active deicing and snow melting pavement coating with environmental friendly and long-term action[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(4): 8-15. (in Chinese)
- [81] KEHAGIA F. Skid resistance performance of asphalt weearing course with electric arc furnace slag aggregates[J]. *Waste Management and Research*, 2009, 27(3): 288-294.
- [82] KAROL J K, REBECCA S, MCDANIEL J O. Development of a laboratory procedure to evaluate the influence type and mixture proportions on the frictional characteristics of flexible pavements[J]. *Asphalt Paving Technology*, 2008, 77: 35-69.
- [83] ALINEZHAD M, SAHAF A. Investigation of the fatigue characteristics of warm stone matrix asphalt (WSMA) containing electric arc furnace (EAF) steel slag as coarse aggregate and sasobit as warm mix additive[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 11: 1-11.
- [84] AHMEDZADE P, SENGOZ B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165: 300-305.
- [85] 陈 丰, 吴少鹏, 张 园. 钢渣导电沥青混凝土电学性能研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2010, 27(11): 51-54, 74.
CHEN Feng, WU Shao-peng, ZHANG Yuan. Research on

- electrical properties of conductive asphalt concrete made of steel slag[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2010, 27(11): 51-54, 74. (in Chinese)
- [86] 敖灶鑫. 钢渣石墨导电沥青混凝土的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- AO Zao-xin. Research on steel slag and graphite conductivity asphalt concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [87] 周朝刚, 艾立群, 吕岩, 等. 微波加热对钢渣升温特性的影响[J]. 河北理工大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 25-30.
- ZHOU Chao-gang, AI Li-qun, LYU Yan, et al. The influence of temperature characteristic of steel slag for microwave heating[J]. Journal of Hebei Polytechnic University (Natural Science Edition), 2011, 33(3): 25-30. (in Chinese)
- [88] GAO Jie, SHA Ai-min, WANG Zhen-jun, et al. Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 429-442.
- [89] PASETTO M, BALDO N. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3458-3468.
- [90] CHEN S H, PRAMESTHI T W, PARAMITHA P A, et al. Environmental impact assessment and total cost analysis of BOF and BSSF slag in asphalt concrete [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(4): 1-5.
- [91] FERREIRA V J, VILAPLANA A S D G, GARCÍA-ARMINGOL T, et al. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 130: 175-186.
- [92] TAM M P, DAEW P, TRI H M L. Crack healing performance of hot mix asphalt containing steel slag by microwaves heating[J]. Construction and Building Materials, 2018, 180: 503-511.
- [93] SUN Yi-han, WU Shao-peng, LIU Quan-tao, et al. Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 673-680.
- [94] 何亮, 李冠男, 熊汉江, 等. 钢砂 SBS 改性沥青混凝土裂纹的感应加热修复性能[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(3): 11-18.
- HE Liang, LI Guan-nan, XIONG Han-jiang, et al. Induction heating activated self-healing of cracks in SBS modified asphalt concrete adding steel grits[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(3): 11-18. (in Chinese)
- [95] 李保安, 李晨. 基于全寿命周期的钢渣沥青混合料经济效益分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(7): 4-7.
- LI Bao-an, LI Chen. Economic benefit analysis of steel slag asphalt mixture based on life cycle[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(7): 4-7. (in Chinese)
- [96] SUER P, LINDQVIST J E, ARM M, et al. Reproducing ten years of road ageing—accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag[J]. Science of Total Environment, 2009, 407: 5110-5118.
- [97] STROUP-GARDINER M, WATTENBERG-KOMAS T. Recycled materials and byproducts in highway applications summary report[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2013.
- [98] XIE Jun, WU Shao-peng, ZHANG Lin-li, et al. Evaluation the deleterious potential and heating characteristics of basic oxygen furnace slag based on laboratory and in-place investigation during large-scale reutilization[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 78-87.
- [99] NASCIMENTO L P D, OLIVEIRA J R M, VILARINHO C. Use of industrial waste as a substitute for conventional aggregates in asphalt pavements: a review[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2019, 505: 690-696.
- [100] HUNT L, BOYLE G E. Steel slag in hot mix asphalt concrete[R]. Salem: Oregon Department of Transportation, 2000.
- [101] OLUWASOLA E A, HAININ M R, AZIZ M M A. Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 122: 315-325.