

钢渣骨料掺配方法对其混合料性能影响研究

狄恩州¹, 安平², 徐钦升¹, 赵磊², 丁伟², 芮照诚¹

¹山东省交通科学研究院, 山东 济南

²山东交工建设集团有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2023年8月20日; 录用日期: 2023年9月21日; 发布日期: 2023年10月8日

摘要

为研究体积法和质量法掺配方法对钢渣沥青混合料服役性能的影响, 通过室内试验对基于不同掺配方法和不同钢渣掺量的SMA-13钢渣沥青混合料体积指标参数、合成级配和路用性能对比分析, 试验结果表明: 基于不同掺配方法的钢渣SMA-13沥青混合料体积指标参数、合成级配及路用性能差异较大; 综合对比分析, 体积法掺配方式更适于钢渣替换玄武岩进行SMA-13沥青混合料设计, 但在设计时应弱化对替换后合成级配的考虑。

关键词

钢渣集料, 掺配方法, 钢渣沥青混合料, 路用性能

Research on the Influence of Mixing Methods of Steel Slag Aggregate on Its Mixture Performance

Enzhou Di¹, Ping An², Qinsheng Xu¹, Lei Zhao², Wei Ding², Zhaocheng Rui¹

¹Shandong Provincial Institute of Transportation Science, Jinan Shandong

²Shandong Jiaotong Construction Group Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Aug. 20th, 2023; accepted: Sep. 21st, 2023; published: Oct. 8th, 2023

Abstract

In order to study the effects of volume and quality mixing methods on the service performance of steel slag asphalt mixture, indoor experiments were conducted to compare and analyze the volume index parameters, synthetic grading, and road performance of SMA-13 steel slag asphalt

文章引用: 狄恩州, 安平, 徐钦升, 赵磊, 丁伟, 芮照诚. 钢渣骨料掺配方法对其混合料性能影响研究[J]. 材料科学, 2023, 13(10): 843-850. DOI: 10.12677/ms.2023.1310093

mixture based on different mixing methods and steel slag content. The experimental results showed that there were significant differences in the volume index parameters, synthetic grading, and road performance of SMA-13 steel slag asphalt mixture based on different mixing methods; Based on comprehensive comparative analysis, the volume method is more suitable for replacing basalt with steel slag in the design of SMA-13 asphalt mixture, but the consideration of the synthesized gradation after replacement should be weakened in the design.

Keywords

Steel Slag Aggregate, Mixing Method, Steel Slag Asphalt Mixture, Road Performance

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢渣是炼钢过程中排出的熔渣，具有出色的物理和力学性质，在耐磨耗、粘附性、级配形状及力学性能等方面较天然岩石更具特性优势，是非常理想的二次资源，钢渣在道路工程中的高值化利用[1] [2] [3]，不仅可以缓解目前石料资源短缺与建设需求巨大的矛盾，节约工程建设成本，提升交通基础设施绿色发展水平，而且对钢厂的安全保产、地区的石料资源稳定、生态环境保护更是具有战略意义。

对于钢渣集料的资源化和高值化应用研究一直是国内外持续的研究热点[4] [5] [6] [7] [8] [9]，关于钢渣材料的研究主要集中在合理应用上，美国、日本、欧洲等多个发达国家和地区早在上世纪就开始使用钢渣制备沥青混合料[10] [11]，并于上世纪 60 年代联合建造了一条通过钢渣铺设的沥青混合料试验道路，发现其表现出良好的使用性能；国内对于钢渣在道路工程中的应用也有了相当长的时间，早在 20 世纪 50 年代就对钢渣用于路基填料进行了初步探索[12]，并进行了相应钢渣试验段的铺筑；此外，Prithvi S 等[13]将钢渣细骨料代替天然石灰石细骨料制备了混合料，与纯石灰石沥青混合料进行了对比研究；Asi M 等[14]用不同掺量的钢渣替代 4.75 mm 以上的石灰岩集料，研究了钢渣和石灰岩集料所拌和的沥青混合料性能；李伟等[15]利用转炉钢渣代替碎石，结合钢渣的理化性质，对钢渣沥青混合料进行高温稳定性试验、水稳定性试验以及层间剪切强度试验对比研究；张强等[16]将钢渣等体积替代石灰岩粗集料，研究了 5 种钢渣掺量的沥青混合料性能；对于钢渣沥青混合料路面，虽然已拥有比较完善的规范、标准，但对钢渣集料合理掺配的沥青混合料设计等问题尚未解决，目前，钢渣集料替换掺配方法主要有质量法和体积法，以上两种替换掺配方法哪种更适于道路工程应用没有进行系统性研究，本文通过对基于不同替换掺配方法的 SMA-13 钢渣沥青混合料级配、体积指标参数和路用性能对比分析，优选出钢渣替换玄武岩/石灰岩碎石较为科学合理的掺配方法，为钢渣集料在沥青路面结构的工程应用提供依据。

2. 试验方案

2.1. 材料

本文设计钢渣按一定比例替换 4.75 mm 及以上的玄武岩碎石制备钢渣 SMA-13 沥青混合料，结合钢渣和工程实际用集料规格，钢渣规格选用陈化后的 5~10 mm 和 10~15 mm 两档，选用集料技术指标均满

足相应规范[17][18]要求, 具体试验结果见表1。

Table 1. Comparison of technical indicators for road performance of different aggregates
表 1. 不同集料路用性能技术指标对比

技术指标	玄武岩碎石试验结果		钢渣试验结果	
	5~10 mm	10~15 mm	5~10 mm	10~15 mm
毛体积相对密度	2.902	2.925	3.307	3.331
表观相对密度	3.020	3.013	3.468	3.462
吸水率	1.35	1.00	1.40	1.14
压碎值	400 KN	12.98		9.60
	600 KN	18.80		17.95
洛杉矶磨耗值		15.7		11.1
磨光值		53		65.0
坚固性		5.0		/
水洗法 < 0.075 颗粒含量		0.1		/
针片状含量		5.1		/
对沥青粘附性		4		5

2.2. 配合比设计

沥青混合料级配选用 SMA-13, 参照规范推荐的级配范围值, 进行下文用 SMA-13 沥青混合料级配设计, 混合料合成级配见表 2。

Table 2. SMA-13 asphalt mixture synthetic grading composition
表 2. SMA-13 沥青混合料合成级配组成

级配名称	筛孔尺寸(mm)									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配	100.0	93.4	62.5	25.1	22.2	18.4	15.0	12.8	11.5	10.6
规范级配上限	100.0	100.0	75.0	34.0	26.0	24.0	20.0	16.0	15.0	12.0
规范级配下限	100.0	90.0	50.0	20.0	15.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0
规范级配中值	100.0	95.0	62.5	27.0	20.5	19.0	16.0	13.0	12.0	10.0

3. 结果与讨论

3.1. 掺配方式对混合料体积指标影响

按照试验规程[19], 对质量法与体积法掺配后的钢渣集料沥青混合料的马歇尔击实试验, 对比分析基于不同掺配方法 0%、25%、50%、75%、100% 掺量的钢渣 SMA-13 沥青混合料试件的体积指标参数, 具体试验结果见图 1 所示。

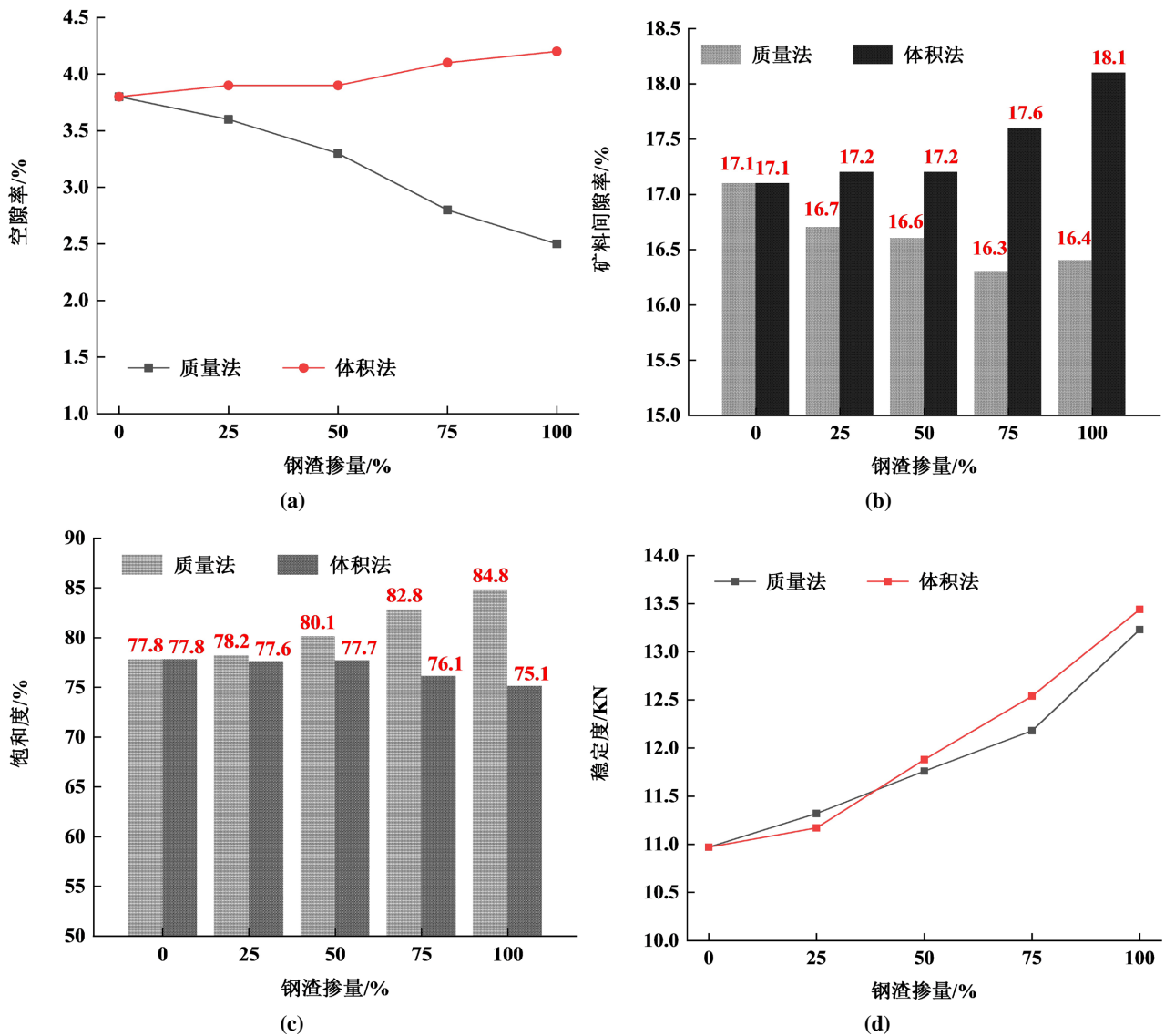


Figure 1. Comparison of volume index parameters of SMA-13 mixture Marshall specimens under different mixing methods

图 1. 不同掺配方式下 SMA-13 混合料马歇尔试件体积指标参数对比

对图 1 数据分析可知: 随着钢渣掺量增加, 基于不同掺配方法的钢渣 SMA-13 沥青混合料空隙率、矿料间隙率、饱和度和稳定度差别较大, 且变化趋势也不相同; 基于质量法掺配的混合料空隙率随着钢渣掺量增加不断减小, 矿料间隙率不断减小, 饱和度不断增大, 与基于体积法掺配的钢渣 SMA-13 沥青混合料体积指标变化趋势相反, 但两种掺配方式下的混合料稳定度变化趋势一致, 均随着钢渣掺量增大不断增大; 分析认为质量法替换相同粒径下的玄武岩碎石的钢渣体积变小了, 这一粒径的集料所占混合料的体积变小了, 而细料质量没有改变, 相对来说细料所占混合料的体积变大了, 即细料会占据一部分原有设计的空隙, 替换玄武岩集料的质量越多, 细料则占据的空隙越多, 即空隙率会下降, 而钢渣按照体积法替换相同体积状态下的玄武岩碎石, 保证了替换集料的体积一样, 空隙率大体也一样, 但由于钢渣棱角性较好, 随着钢渣含量的增加, 棱角性较好的集料比例增加, 会促使空隙率有所增加, 因而两种掺配方法导致其相应体积指标参数变化不同; 当钢渣掺量达到 50% 时, 质量法替换下的钢渣 SMA-13 沥青混合料体积指标参数刚刚满足规范指标要求, 当掺量继续增大至 75% 时, 混合料

体积指标参数不满足常规设计指标要求，而体积法换算下混合料的体积指标与玄武岩集料 SMA-13 沥青混合料体积指标相比变化相对较小，故从混合料马歇尔体积指标参数角度考虑，钢渣掺配方法基于体积法更加合理。

3.2. 掺配方式对混合料合成级配影响

钢渣与玄武岩碎石密度差值较大，在对混合料的级配进行设计时，应充分考虑两种集料的密度差值，为验证体积法和质量法换算后沥青混合料级配变化，对不同钢渣掺量下的 SMA-13 沥青混合料合成级配统计分析，结果见表 3。

Table 3. Comparison of synthetic grades of SMA-13 asphalt mixture after conversion

表 3. SMA-13 沥青混合料换算后合成级对比

级配名称	钢渣掺量(%)	筛孔尺寸(mm)									
		16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
玄武岩级配	0%	100.0	93.4	62.5	25.1	22.2	18.4	15.0	12.8	11.5	10.6
	25	100.0	94.4	63.2	25.3	22.2	18.5	15.1	12.8	11.6	10.6
	50	100.0	95.3	63.8	25.5	22.2	18.5	15.1	12.9	11.7	10.5
	75	100.0	96.3	64.4	25.7	22.2	18.6	15.2	12.9	11.7	10.5
质量法替换	100	100.0	97.2	65.1	25.9	22.2	18.6	15.2	13.0	11.8	10.5
	25	100.0	94.3	62.3	23.4	20.3	16.8	13.7	11.6	10.5	9.5
	50	100.0	95.3	62.9	23.6	20.3	16.9	13.7	11.7	10.5	9.5
	75	100.0	96.3	63.5	23.8	20.3	16.9	13.8	11.7	10.6	9.4
体积法替换	100	100.0	97.1	64.1	24.0	20.3	17.0	13.8	11.8	10.6	9.4

对表 3 数据对比分析可知，采用质量法和体积法换算后的钢渣 SMA-13 沥青混合料合成级配与玄武岩 SMA-13 沥青混合料合成级配相比差别较大，且随着钢渣掺量增加，级配变化趋势也不一致；质量法替换下的 SMA-13 沥青混合料合成级配从替换集料最小集料粒径 4.75 mm 出现变动，4.75 mm 筛孔以下，因未进行钢渣替换，其以下关键筛孔通过率变化较小，但 4.75 mm 筛孔以上关键筛孔通过率变化较大，且变化趋势一致，随着钢渣骨料掺量增加，通过率不断增大，合成级配不断变细，该级配曲线分析验证了马歇尔试件体积指标的结论；体积法替换下的 SMA-13 沥青混合料随着钢渣掺量增大，4.75 mm 筛孔以下关键筛孔通过率减小，4.75 mm 筛孔以上集料通过率增大，替换后的合成级配更趋近“S”型，级配虽有较大差别，但对换算后的混合料经马歇尔击实试验验证后，混合料体积指标参数变化较小，且均满足规范指标要求，间接说明钢渣掺配用体积法替换时，应适当弱化其对替换后混合料合成级配的关注度。

3.3. 掺配方式对混合料合性能影响

参照试验规程对不同掺配方法、不同钢渣掺量下的 SMA-13 沥青混合料进行车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔残留稳定度试验和浸水膨胀率试验，对混合料的高温稳定性、低温稳定性、水稳定性及体积安定性分析评价，具体试验结果见下图 2。

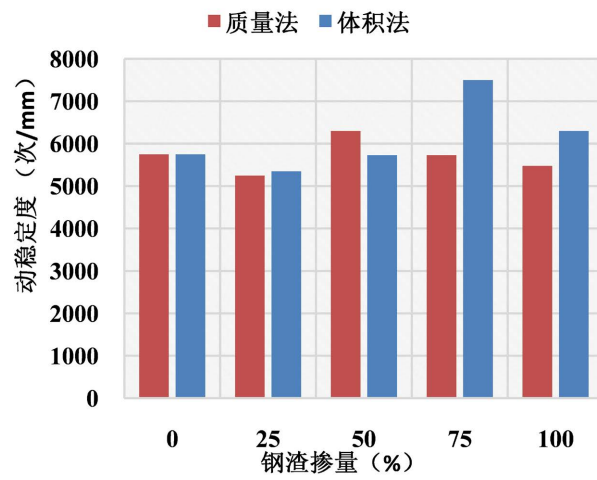


Figure 2. Comparison of high-temperature rutting test results
图2. 高温车辙试验结果对比

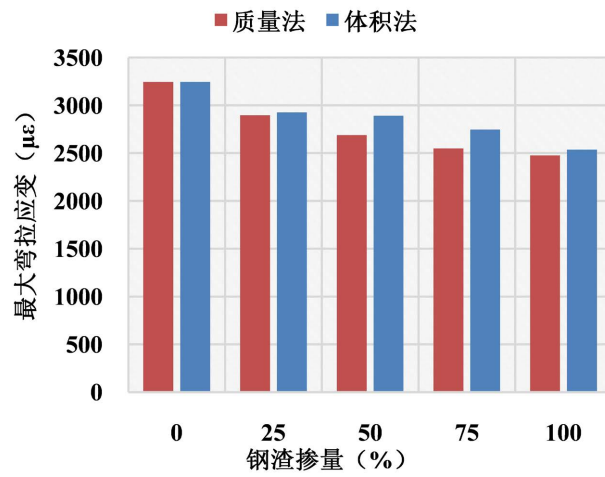


Figure 3. Comparison of low-temperature bending test results for small beams
图3. 小梁低温弯曲试验结果对比

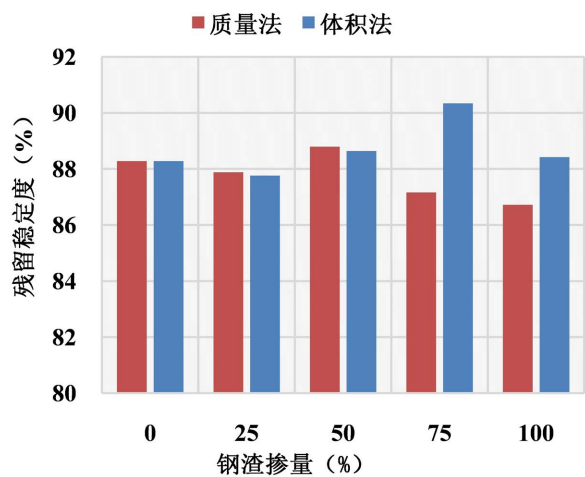


Figure 4. Comparison of immersion Marshall test results
图4. 浸水马歇尔试验结果对比

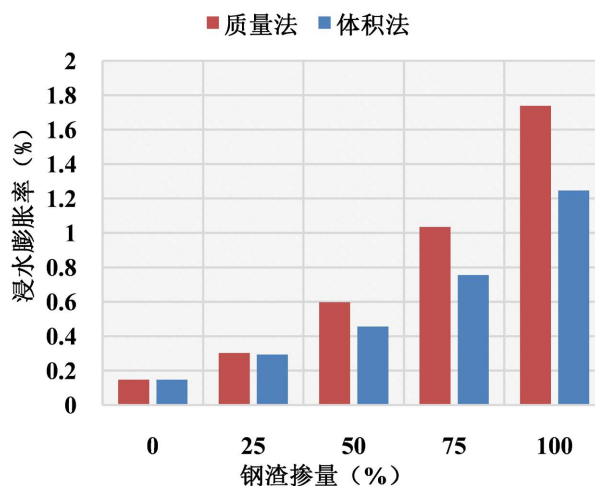


Figure 5. Comparison of immersion expansion test results

图 5. 浸水膨胀试验结果对比

对上图 2~5 数据分析可知：基于两种掺配方法的钢渣 SMA-13 沥青混合料性能随着钢渣掺量变化其变化规律一致，混合料动稳定度和残留稳定度随着钢渣掺量的增加呈现先减小后增大趋势，混合料最大弯拉应变随着钢渣掺量增加不断减小，而混合料的浸水膨胀率则随着钢渣掺量增加不断增大；钢渣不同掺配方法对混合料的性能影响不同，当钢渣掺量低于 50% 时(掺量 25%)，两种掺配方法下的钢渣 SMA-13 沥青混合料高温性能、低温性能、水稳定性和体积稳定性表现相近，性能评价指标比值分为 1:1.02、1:1.01、1:1 及 1.03:1；当钢渣掺量高于 50% 时，两种掺配方式下的混合料性能出现差异，且随着钢渣掺量增加，基于体积法掺配的混合料性能表现更加优异；两种掺配方法下的最佳钢渣掺量表现不同，质量法掺配下当钢渣掺量达到 50% 时，混合料高温、水稳定性表现最佳，低温和体积安定能满足规范要求，而基于体积法掺配时，钢渣掺量可以达到 75%，说明当钢渣掺量相对较小时，两种掺配方式下的混合料性能表现相当，当钢渣掺量较大时，体积法掺配方式更加合理。

4. 结论

本文通过对基于不同掺配方式、不同钢渣掺量下的 SMA-13 沥青混合料马歇尔体积指标参数、合成级配及混合料路用性能对比分析，得出以下主要结论：

1) 不同钢渣掺配方式对其混合料的体积指标参数、合成级配及路用性能影响规律不同，综合分析，体积法掺配方式更适于钢渣 SMA-13 沥青混合料设计；

2) 两种掺配方法替换后的 SMA-13 沥青混合料合成级配与原合成级配相比都出现较大差别，但经马歇尔击验验证，基于体积法替换的混合料体积指标参数变化较小，且满足设计指标要求，在进行体积法掺配设计时，可适当降低对替换后合成级配的变化影响；

3) 基于两种替换方法的 SMA-13 沥青混合料最佳钢渣掺量不同，质量法替换钢渣最佳掺量约为 50%，体积法替换钢渣最佳掺量约为 75%。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 赵立杰, 张芳. 钢渣资源综合利用及发展前景展望[J]. 材料导报, 2020, 34(2): 319-322.
- [4] Ibrahim, M.A., Hisham, Y.Q. and Faisal, I.S. (2007) Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes. *Cana-*

- Canadian Journal of Civil Engineering*, **34**, 902-911. <https://doi.org/10.1139/107-025>
- [5] 薛永杰, 吴少鹏. 钢渣 SMA 路用性能试验研究[J]. 公路, 2006(2): 126-129.
- [6] 谢君. 钢渣沥青混凝土的制备、性能与应用研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [7] 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.
- [8] 许丁斌. 钢渣沥青混合料的材料及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2018.
- [9] 金年生. 钢渣骨料沥青混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2019, 35(1): 18-23.
- [10] Adham, A. and Yusri, A. (2018) A Study on the Economic Using of Steel Slag Aggregate in Asphalt Mixtures Reinforced by Aramid Fiber. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, **13**, 276-292.
- [11] 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.
- [12] 左德元, 邱宗明. 钢渣作为路基填料的应用[J]. 铁道建筑技术, 2001(2): 27-28.
- [13] Kandhal, P.S. and Hoffman, G.L. (1997) Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-Mix Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record*, **1583**, 28-36. <https://doi.org/10.3141/1583-04>
- [14] Asi, I.M., Qasrawi, H.Y. and Shalabi, F.I. (2007) Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **34**, 902-911. <https://doi.org/10.1139/107-025>
- [15] 李伟, 王鹤彬, 王达, 等. 转炉钢渣沥青混合料路用性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(6): 1062-1069.
- [16] 张强, 胡力群, 刘兴成. 多掺量钢渣开级配沥青混合料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 493-500.
- [17] 中华人民共和国交通部. JTG E42-2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [18] 中华人民共和国交通部. JT/T 1086-2016 沥青混合料用钢渣[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [19] 中华人民共和国交通部. JTG E42-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.