

冀欣,盛燕萍,路再红,等. 掺加钢渣的半刚性基层材料性能[J]. 长安大学学报(自然科学版),2021,41(4):21-31.

Ji Xin, SHENG Yan-ping, LU Zai-hong, et al. Properties of semi-rigid base material with steel slag[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(4): 21-31.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.04.003

掺加钢渣的半刚性基层材料性能

冀欣^{1,2}, 盛燕萍^{1,2}, 路再红³, 辛德军⁴, 龙云飞⁵, 陈华鑫^{1,2}

(1. 长安大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710061; 2. 长安大学交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西西安 710064; 3. 内蒙古交通设计研究院, 内蒙古呼和浩特 010000; 4. 包头交通投资集团有限公司, 内蒙古包头 014030; 5. 包头市公路规划勘察设计有限公司, 内蒙古包头 014040)

摘要:为了实现固体废弃物钢渣在半刚性基层材料中的合理利用,首先选用 C-B-3 型骨架密实型级配进行击实试验,根据 7 d 无侧限抗压强度结果优选出适宜的水泥掺量和钢渣掺量组合。其次,对优选组合的混合料进行了无侧限抗压强度、间接抗拉强度、抗压回弹模量以及抗收缩和抗冲刷性能测试。最后,分析不同养护龄期下水泥掺量和钢渣掺量对基层材料性能的影响,揭示水泥和钢渣在基层材料中的强度形成机理。研究结果表明:水泥掺量一定时,钢渣基层材料无侧限抗压强度随钢渣掺量的增加呈现先增大后减小的趋势。水泥掺量(质量分数,下同)为 5% 时,与未掺钢渣基层材料相比,养护 7、14、28 d 的 45% 钢渣掺量基层材料抗压强度分别提高 6.8%、9.6%、6.0%; 65% 钢渣掺量基层材料则分别提高 11.3%、15.4%、12.1%。5% 水泥掺量下,养护 28 d 的 45% 和 65% 钢渣掺量基层混合料较未掺钢渣基层混合料冲刷质量损失率减小 0.031% 和 0.046%; 6% 水泥掺量下则分别减小 0.034% 和 0.041%。5% 水泥掺量下,65% 钢渣掺量的混合料较未掺钢渣时干缩系数减小 52.4%, 温缩系数提高 26.9%; 6% 水泥掺量下则分别减小 49.4% 和提高 31.6%。因此,在合理掺量下,钢渣基层力学性能和抗冲刷性能明显优于普通水泥稳定碎石,钢渣在一定程度上可改善基层材料的抗干燥收缩性能,但不利于抗温度收缩性能。

关键词:道路工程; 钢渣; 半刚性基层; 力学性能; 抗收缩性能; 抗冲刷性能

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8879(2021)04-0021-11

Properties of semi-rigid base material with steel slag

Ji Xin^{1,2}, SHENG Yan-ping^{1,2}, LU Zai-hong³, XIN De-jun⁴,
LONG Yun-fei⁵, CHEN Hua-xin^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Ministry of Education Engineering Center for Traffic Pavement Materials, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. Inner Mongolia Transportation Design and Research Institute, Huhhot 010000, Inner Mongolia, China;
4. Baotou Transportation Investment Group, Baotou 014030, Inner Mongolia, China;
5. Baotou Highway Planning Survey and Design Company, Baotou 014040, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to realize the rational utilization of solid waste steel slag in semi-rigid base

收稿日期: 2020-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208047); 内蒙古自治区交通运输科技项目(NJ-2019-24)

作者简介: 冀欣(1995-), 男, 山东青州人, 工学博士, E-mail: xinji@chd.edu.cn.

通讯作者: 盛燕萍(1981-), 女, 浙江临安人, 教授, 工学博士, E-mail: shengyanping2003@163.com.

material, the C-B-3 type skeleton compaction gradation was selected, firstly, the compaction test was carried out, and the appropriate combination of cement and steel slag dosage was selected based on the results of the 7 d unconfined compressive strength test. Furthermore, following the unconfined compressive strength test, other parameters such as the indirect tensile strength, compressive resilience modulus, shrinkage and water erosion resistance of the chosen mixture were tested. Finally, the influence of cement dosage and steel slag content on the properties of base material at different curing ages were analyzed for revealing the strength formation mechanism, and influence that varying the proportions of cement and steel slag had on the base material. The results show that when cement dosage is kept constant, the unconfined compressive strength of steel slag base material increases at first, but then decreases with further increase steel slag content. Compared with the base material without steel slag, when the cement dosage and steel slag dosages (mass fraction, the same below) are 5% and 45% respectively, the compressive strength of the base material after 7, 14 and 28 d curing increased by 6.8%, 9.6% and 6.0% respectively. Meanwhile, when steel slag content is increased to 65%, the compressive strength under the same conditions is increased by 11.3%, 15.4% and 12.1% respectively. In the water erosion resistance test, at 5% cement dosage, the post 28 d curing mass loss rate of the base material with 45% and 65% steel slag contents are 0.031% and 0.046% respectively, lower than that of the base mixture without steel slag content, and it is 0.034% and 0.041% respectively when cement dosage is increased to 6%. When compared with the mixture without steel slag, the dry shrinkage coefficient and temperature shrinkage coefficient of the mixture with 65% and 5% steel slag and cement contents decreased by 52.4% and 26.9% respectively, and when cement content is increased to 6%, it decreased by 49.4% and increased by 31.6% respectively. Therefore, it is obvious that at the appropriate dosage, the mechanical properties and anti-scouring properties of steel slag base are better than those of ordinary cement stabilized macadam. In conclusion, steel slag can improve the anti-drying shrinkage property of steel slag base material to some extent, even though it has no significant influence on the anti-temperature shrinkage property. 9 tabs, 10 figs, 35 refs.

Key words: road engineering; steel slag; semi-rigid base; mechanical property; shrinkage resistance; anti-erosion performance

0 引言

钢渣是一种炼钢时排放的工业废渣。目前,中国搁置的废弃钢渣已高达 19 亿 t,并以每年数百万吨的数量增长,然而废弃钢渣的利用率却不到 20%^[1]。尤其是在内蒙古自治区,新渣排放和老渣堆积等问题已困扰多年,不仅占用土地还污染环境,且给企业的环保生态发展带来很大困难,如何合理高效处理废渣成为当地政府关注的焦点^[1-2]。以水泥为代表的无机结合料稳定材料作为一种路面结构层,其功能是承受荷载和分散压力,因此具有一定的强度、刚度和承载能力。中国 90% 以上的高等级公路采用半刚性材料作为路面结构的基层或底基层,但在实际应用的过程中,还是出现了强度不足、收缩

开裂以及抗冲刷不足等问题^[3-10]。此外,近年来中国基建规范逐步扩大,天然砂石过度开采现象严重,一定程度上对自然生态系统造成了不可逆转的破坏,目前中国已经明令禁止开采天然砂石^[11]。因此,迫切需要一种强度高、产量大的集料来代替传统天然砂石。

国内外研究者发现,钢渣是解决上述问题的一种较好的筑路代替材料,钢渣中含有硅酸二钙、硅酸三钙以及铁铝酸钙等水硬性胶凝活性矿物,且在磨耗值、压碎值和坚固性等力学指标方面表现优异,理论上能够对半刚性基层的性能进行改善。Chand 等总结了钢渣的物理性质:钢渣坚硬耐磨,抗压性接近于玄武岩,密度高于天然骨料,不利于远程运输,表面多孔导致其吸水率较天然骨料高^[12]。王强研究

了钢渣水化及其胶凝性能,研究表明,钢渣水化速度较慢,磨细后的钢渣存在惰性组分和胶凝组分,惰性组分不能对浆体孔隙起到较好填充作用,而胶凝组分可改善浆体硬化效果^[13]。Mahoutan 等指出钢渣中胶凝材料由硅酸钙水化物和碳酸钙的混合物组成,硅酸钙含量决定碳酸化反应程度,更高的硅酸钙含量和更长的碳酸化反应会形成更高的抗压强度^[14]。

钢渣的集料性质和掺量对半刚性基层材料的力学性能有较大影响。潘放等研究了安徽省马鞍山钢渣应用于沥青路面基层的可行性,结果表明,钢渣中含有一定的活性游离氧化钙,其基层混合料的加州承载比值(CBR)可高达标准值的 250%~400%,同时其浸水膨胀率很小^[15]。郑武西研究了山东省日照钢铁控股集团有限公司钢渣的膨胀特性和其半刚性基层的力学性能,研究表明,60%钢渣掺量(质量分数,下同)基层的无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量均得到极大提升,且 2 组平行钢渣试样的浸水膨胀率均小于 0.7%^[16]。冯群英研究了云南省昆钢集团有限公司陈化的转炉渣在昆明绕城高速公路工程中的应用,结果表明,转炉渣碱性较高,且浸水膨胀率均值为 1.27%,现场基层试件最佳含水率为 8.3%,7 d 无侧限抗压强度值为 3.4 MPa^[17]。黄浩研究了浙江省衢州元力金属制品集团有限公司未陈化的新渣在水泥稳定碎石基层中的应用,结果表明,钢渣中掺入 0.5% 硅灰后,浸水膨胀率从 2.69%降低到 0.2%,且 75%钢渣掺量的基层混合料较普通水稳碎石基层抗冻系数提高约 5.9%^[18]。梁铎等在包茂(包头—茂名)高速公路铺筑了水稳钢渣基层的试验段,研究表明,钢渣全部替代碎石的半刚性基层材料 7 d 无侧限抗压强度超过 9 MPa,且具备较高的抗弹性变形能力,其弯沉代表值为 0.232 mm^[19]。水稳钢渣基层的级配力学性能也有较大影响,吴盛华在钢渣基层级配范围内设计了粗中细 3 种不同级配,并对这 3 种级配进行力学试验后得出中级配为最佳级配的结论^[20]。阮文研究了骨架型和悬浮型级配对二灰钢渣基层的影响,研究表明,钢渣对悬浮型级配影响效果显著,同一配比下,悬浮型级配抗拉性能和抗冻性能优于骨架型级配,骨架型级配抗裂性能和抗冲刷性能优于悬浮型级配^[21]。曾梦澜等也研究了二灰钢渣基层级配对其力学性能的影响,研究表明:悬浮型级配 7 d 无侧限抗压强度值和抗压回弹模量略高于骨架型级配;当二灰用量 16%时,增大二灰用量对悬浮型级配力学性能提高不明显,而骨架型级配则相反^[22]。在耐

久性方面,喻平对水泥稳定钢渣梁式试件进行弯拉强度和三点弯曲疲劳试验,研究表明,试件抗弯拉强度和疲劳寿命随钢渣掺量(0%、40%、60%)和水泥掺量(4%、4.5%、5%)的增加而增大,集料与基体材料间的黏结作用对水泥稳定钢渣基层疲劳性能起主导作用^[23]。黄浩还对水稳定钢渣碎石基层的抗冻性能做了研究,结果表明,水泥稳定钢渣碎石基层抗冻系数随钢渣掺量的增加而增大,75%钢渣掺量的水泥稳定钢渣基层材料抗冻性能最好,比普通水泥稳定碎石基层材料抗冻系数提高约 5.9%^[18]。总体而言,钢渣坚硬耐磨加之自身水化特性,对基层力学性能的提升起到了一定的积极作用,且钢渣掺量存在一个合理范围,掺量过大反而会导致基层性能降低。

综上所述,钢渣具备高强耐磨等特性,且经陈化后体积稳定性较好,可用作基层筑路材料。目前关于钢渣的物理力学性能、掺量和级配对半刚性基层力学性能的影响研究较多,但对钢渣半刚性基层的抗收缩和抗冲刷等性能研究较少。因此,有必要针对钢渣特性及其半刚性基层性能进行研究。本文将不同掺量的包头钢铁集团有限公司(简称包钢,下同)产的钢渣整体掺配代替碎石,设计了不同水泥掺量和不同钢渣掺量的 12 种配合比,研究水泥掺量和钢渣掺量对水稳钢渣碎石基层力学、收缩和抗冲刷性能的影响,以期更好地将包钢钢渣应用于半刚性基层中。

1 试验原材料及方案设计

1.1 原材料

1.1.1 水泥

采用陕西咸阳冀东水泥厂生产的 P·C32.5 硅酸盐水泥,密度为 3.140 g/cm³,化学组成和技术指标见表 1 和表 2。

表 1 水泥化学组成

Tab. 1 Chemical compositions of cement								%
化学组成	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
含量	0.16	1.39	5.46	21.86	0.32	0.75	66.58	3.20

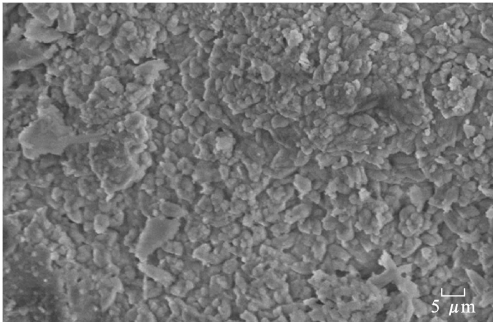
表 2 水泥技术指标

Tab. 2 Technical indexes of cement								
技术指标	抗折强度/ MPa		抗压强度/ MPa		凝结时间/ min		标准稠 度用水 量/%	安定性
	3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝		
	5.12	7.51	24.12	40.12	91	151	24.0	合格

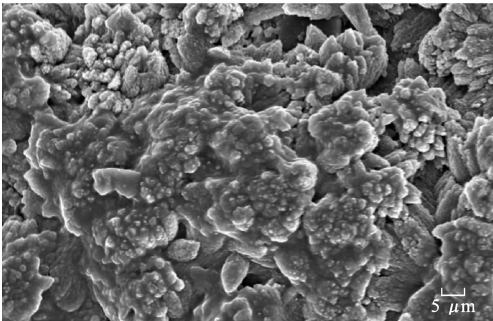
1.1.2 钢渣

钢渣选用来自包钢已陈化的热闷钢渣,经多级

破碎、滚筒及水洗等处理工艺^[22],其表面微观构造、矿物组成和化学组成分别见图 1~图 3,物理性能见表 3^[24]。物理性能指标均满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)^[25]要求。



(a) 放大7 000倍



(b) 放大10 000倍

图 1 包钢钢渣的 SEM 图
Fig. 1 SEM of Baotou steel slag

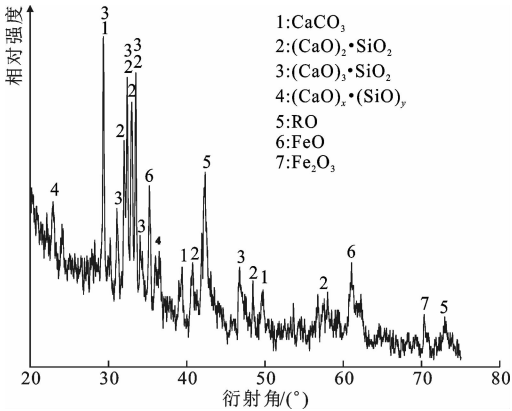


图 2 包钢钢渣矿物组成

Fig. 2 Mineral compositions of Baotou steel slag

从图 1 可以看出,钢渣为板状、结晶结构,其表面可以观察到细小的孔隙、不规则的细小颗粒以及粗糙的纹理,微观放大一定倍数后,钢渣表面粗糙,“囊状”结构明显。从图 2 可看出,钢渣中的矿物主要包括 CaCO₃、C₂S、C₃S 和 RO 相(二价金属氧化物组成的连续固溶体)。从图 3 可以看出,钢渣化学成分主要包括 CaO、SiO₂、Fe₂O₃、MgO、Al₂O₃、MnO、K₂O、Na₂O,其中 Ca、Si、Fe、Mg、Al、Mn 为主要组成元素。CaO 和 SiO₂ 含量占比例最高,分别为

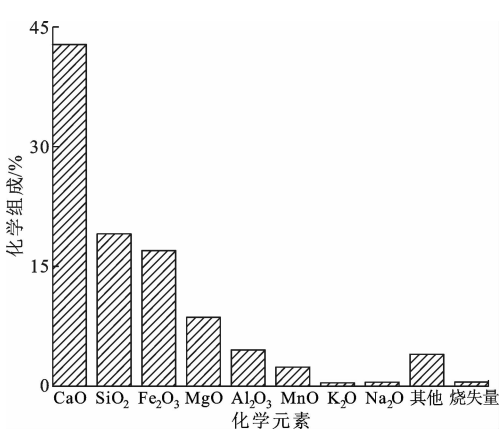


图 3 包钢钢渣化学组成

Fig. 3 Chemical compositions of Baotou steel slag

表 3 包钢钢渣物理指标

Tab. 3 Physical indexes of Baotou steel slag

测试项目	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水 率/%	压碎 值/%	洛杉矶磨 耗值/%	针片状 含量/%	浸水膨 胀率/%
测试结果	3.547	2.604	14.5	11.8	4.7	0.83
技术指标	>2.600		≤26.0	≤28.0	≤20.0	

42.9%和 19.1%,这使钢渣具有更高的碱活性,可以提高其与水泥和碎石的黏结力。

1.1.3 石灰岩碎石

石灰岩碎石性能检测见表 4,满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)要求。

表 4 石灰岩技术指标

Tab. 4 Technical indexes of limestone

粒径/mm	试验项目	测试结果	技术指标
[0,4.75)	表观密度/(g·cm ⁻³)	2.851	>2.600
	吸水率/%	1.28	
[4.75,9.5)	表观密度/(g·cm ⁻³)	2.734	>2.600
	吸水率/%	0.83	
[9.5,19)	表观密度/(g·cm ⁻³)	2.766	>2.600
	吸水率/%	0.83	
[19,31.5]	表观密度/(g·cm ⁻³)	2.794	>2.600
	吸水率/%	0.72	
	压碎值/%	15.6	≤26.0
	洛杉矶磨耗值/%	16.3	≤28.0

1.2 试验方法

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)^[26],采用静压法成型试件,力学试验和抗冲刷试验均为直径和高为 150 mm 的圆柱体试件,其中间接抗拉试验中劈裂条的弧面半径为 75 mm,宽为 18.75 mm。基层收缩试验采用 100 mm(长)×100 mm(宽)×400 mm(高)的中梁试件并分别在两端固定千分表。抗冲刷试验设置冲刷时间 30 min,冲刷荷载 0.5 MPa,冲刷频率 10 Hz^[27]。图 4 为试件成型,图 5 为间接抗拉强度和干缩性能测试。



(a) 圆柱体试件



(b) 梁式试件

图 4 试件成型

Fig. 4 Specimens forming



(a) 间接抗拉强度



(b) 干缩

图 5 性能测试

Fig. 5 Performance test

选用 4%、5%、6% 三种水泥掺量,包钢钢渣以 0%、45%、65%、85% 等比例替代石灰岩碎石组成半刚性基层材料,通过击实试验和 7 d 无侧限抗压强

度试验,确定出符合基层设计规范要求合理掺配比,并对合理掺配比下的包钢钢渣半刚性基层材料进行力学性能、收缩性能以及抗冲刷性能研究。

2 包钢钢渣基层材料配合比优选

2.1 级配设计

根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中水泥稳定碎石级配的相关要求进行级配设计,其级配类型分为骨架密实型和悬浮密实型。考虑到骨架密实型级配能发挥骨架嵌挤作用利于强度的形成,且能为钢渣微膨胀预留一定空间,故本文选用骨架密实型级配^[28]。集料选用钢渣和石灰岩碎石组成的复合骨料,各档钢渣及石灰岩的级配见表 5。1# 钢渣(0~9.5 mm),2# 钢渣(0~9.5 mm),3# 钢渣(0~13.2 mm),4# 钢渣(9.5~31.5 mm),1# 石灰岩(0~9.5 mm),2# 石灰岩(9.5~19 mm),3# 石灰岩(19~31.5 mm)。根据各集料筛分情况掺配成钢渣掺量为 0%、45%、65% 及 85% 的骨架密实型级配,级配设计见表 6。

2.2 最佳含水率

采用重型击实(大型击实桶)试验,分 3 层击实且每层击实 98 次^[26],钢渣基层混合料的最大干密度和最佳含水率结果见表 7。从表 7 可以看出,混合料最佳含水率和最大干密度随钢渣掺量 and 水泥掺量的增加而增大。

2.3 7 d 无侧限抗压强度

将最佳含水率下按 98% 压实度成型钢渣基层试件养生 7 d(最后 1 d 浸水 24 h),在试验机上以 1 mm/min 加载速度进行抗压强度试验,试验结果如表 8 所示。 R_c 为强度值, C_v 为平行试验组的变异系数。

从表 8 可以看出:随水泥掺量增加,基层混合料 7 d 无侧限抗压强度增幅较快;随钢渣掺量增加,其抗压强度增幅较慢。水泥掺量一定时,混合料抗压

表 5 集料级配

Tab. 5 Aggregates grading

集料类型	不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%											
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.15	0.075
1# 钢渣					100.0	99.7	89.1	59.5	41.4	25.9	15.7	9.5
2# 钢渣					100.0	97.9	63.2	36.9	23.7	14.0	8.3	5.1
3# 钢渣				100.0	97.2	66.8	19.4	6.8	4.0	2.5	1.8	1.3
4# 钢渣	100.0	88.7	76.0	49.2	18.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1# 石灰岩					100.0	99.8	84.9	7.4	2.8	2.2	2.0	0.3
2# 石灰岩		100.0	98.5	90.7	46.0	9.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
3# 石灰岩	100.0	57.8	5.9	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2

表 6 基层材料骨架密实型级配设计

类型	不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
级配范围	100	68~86	38~58	22~32	16~28	8~15	0~3
级配中值	100	77.00	48.00	27.00	22.00	11.50	1.50
0%钢渣,100%碎石	100	77.32	47.68	27.30	18.67	8.10	1.74
45%钢渣,55%碎石	100	78.96	49.60	28.75	18.49	8.06	1.67
65%钢渣,35%碎石	100	78.63	47.14	31.01	19.47	8.16	1.74
85%钢渣,15%碎石	100	80.87	47.56	30.35	19.24	8.09	1.73

强度随钢渣掺量先增大后减小。掺 85% 钢渣混合料的抗压强度低于掺 45% 和 65% 钢渣混合料,这是因为少量钢渣水化生成 C-S-H 等凝胶物质对基层

表 7 钢渣基层混合料的最佳含水率和最大干密度

材料配比	4%水泥掺量		5%水泥掺量		6%水泥掺量	
	最佳含水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)
0%钢渣,100%碎石	3.8	2.233	4.0	2.317	4.5	2.471
45%钢渣,55%碎石	4.3	2.406	4.6	2.431	5.0	2.599
65%钢渣,35%碎石	4.5	2.631	4.9	2.559	5.1	2.634
85%钢渣,15%碎石	4.7	2.532	5.1	2.595	5.3	2.684

表 8 7 d 无侧限抗压强度

材料配比	4%水泥掺量		5%水泥掺量		6%水泥掺量	
	R _c /MPa	C _v /%	R _c /MPa	C _v /%	R _c /MPa	C _v /%
0%钢渣,100%碎石	3.4	5.0	4.4	5.3	5.2	5.2
45%钢渣,55%碎石	3.8	7.5	4.7	5.7	5.5	6.3
65%钢渣,35%碎石	3.9	6.0	5.0	6.3	5.9	6.8
85%钢渣,15%碎石	3.8	7.8	4.5	8.1	5.4	8.6

3 包钢钢渣基层材料性能

3.1 力学特性

3.1.1 无侧限抗压强度

钢渣基层材料无侧限抗压强度与养护龄期的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,水泥掺量一定时,钢渣基层抗压强度随养护龄期的增加而增大,抗压强度后期增长率大于前期,且钢渣掺量越大,抗压强度越大。当钢渣掺量为 45% 时,养护 7、14、28 d 的 6% 水泥掺量较 5% 水泥掺量组成的钢渣基层材料抗压强度分别提高 12.2%、12.3%、7.1%;钢渣掺量 65% 时,则分别提高 18%、13.3%、8.1%。水泥掺量为 5% 时,与未掺钢渣基层材料相比,养护 7、14、28 d 的 45% 钢渣掺量基层材料抗压强度分别提高 6.8%、9.6%、6%;65% 钢渣掺量时分别提高 11.3%、15.4%、12.1%。45% 钢渣掺量基层材料

混合料强度的提高有一定作用。但钢渣表面孔隙富集,钢渣过多会吸附更多水泥阻碍水泥水化进行,即使钢渣具有潜在的水硬特性,但水泥水化在增强方面占主导作用。无论何种钢渣掺量,4% 水泥掺量的钢渣基层材料 7 d 无侧限抗压强度只满足规范中所要求的中、轻交通的高速公路和一级公路以及重、中、轻交通的二级和二级以下公路,而 5% 水泥掺量、65% 钢渣掺量,以及 6% 水泥掺量下所有的钢渣基层材料均能满足各等级公路交通需求。因此,选取 5%、6% 水泥掺量以及 45% 和 65% 包钢钢渣掺量的钢渣基层材料进一步开展力学、收缩和抗冲刷性能研究。

14、28 d 抗压强度较前一养护龄期相比,分别提高 16.3%、22.9%;65% 钢渣掺量则分别提高 20%、23.3%。由此可见,65% 钢渣掺量的混合料抗压强度均高于 45% 钢渣掺量的混合料。分析其原因主要是:钢渣初期活性较低,水化反应进行缓慢,混合料抗压强度增长缓慢;随着养护龄期的增加和水泥水化的进行,钢渣活性被激发,胶凝产物不断增加,混合料强度增长迅速。提高 20% 钢渣掺量,混合料水化胶凝产物增多,且钢渣自身也会发生化学反应,这些均利于混合料抗压强度的提高。

3.1.2 劈裂强度

劈裂强度又称为间接抗拉强度,它可反映材料内部的破坏即弯拉破坏^[29]。同抗压强度试验步骤相同,养护最后 1 d 浸泡 24 h,图 7 为养护 28、60、90 d 时钢渣基层材料的劈裂强度。

从图 7 可以看出,钢渣基层劈裂强度与养护龄期的变化规律与无侧限抗压强度变化规律相同。水泥掺量一定时,基层劈裂强度随钢渣掺量和养护龄期的增加而增大,且养护 28~60 d 的劈裂强度增长率大于养护 60~90 d 的增长率。水泥掺量为 5% 时,养护 28~60 d 和 60~90 d 的 45% 钢渣掺量混合料劈裂强度增长率分别为 8.6%、9.6%,65% 钢渣掺量混合料则分别为 13.2%、14.1%;水泥掺量

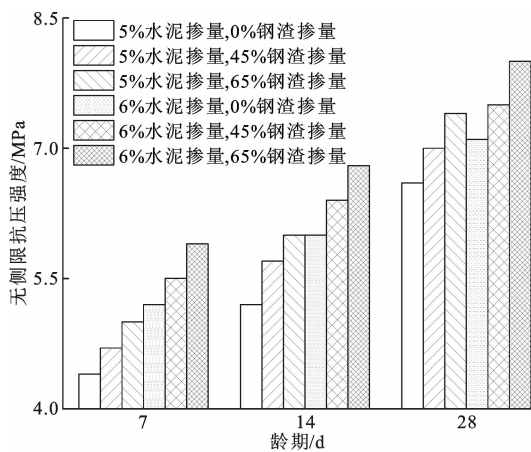


图 6 不同养护龄期下钢渣基层材料的无侧限抗压强度

Fig. 6 Unconfined compressive strengths of steel slag base at different curing ages

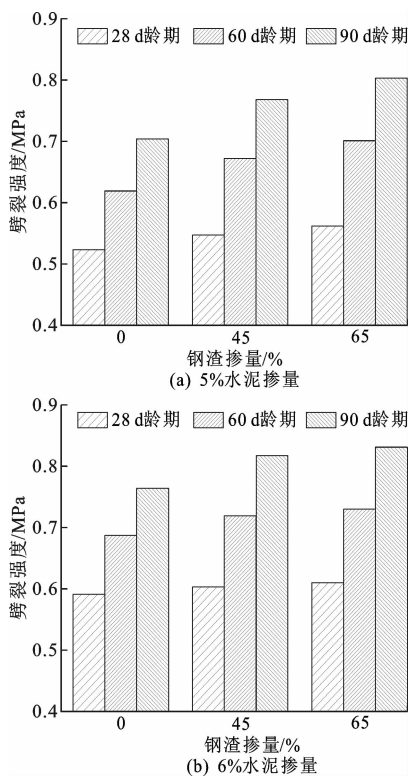


图 7 28、60、90 d 养护龄期下钢渣基层材料的劈裂强度

Fig. 7 Splitting strengths of steel slag base at curing age of 28, 60, 90 d

为 6%时,45%钢渣掺量混合料的增长率分别为 4.7%、7%,65%钢渣掺量时则分别为 6.3%、8.8%。与未掺加钢渣的基层混合料相比,掺加 45%钢渣基层混合料 28、60、90 d 的劈裂强度分别提高 4.6%、8.5%、9%,65%钢渣掺量则分别提高 7.5%、13.2%、14.1%。当增加 1%水泥掺量时,劈裂强度增加并不明显;6%水泥掺量的 45%和 65%钢渣掺量的混合料劈裂强度较 5%水泥掺量时则分

别提高 10.2%、7%、6.4%和 8.5%、4.1%、3.5%。以上说明,基层中掺入钢渣确实能够提高混合料劈裂强度。同时,后期钢渣活性才能慢慢被激发使基层劈裂强度增加迅速。但是,增加一定水泥掺量后基层混合料的强度增幅明显降低,这与水泥增多导致混合料干缩变大有关。虽然钢渣膨胀会与部分干缩抵消,但是钢渣膨胀消耗的大量水分使水泥水化不完全更易导致增强效果减少。

3.1.3 抗压回弹模量

模量可综合反映基层材料在荷载作用下的弹性变形和塑性变形,5%和 6%水泥掺量下,不同钢渣掺量的基层混合料在养护 28、60、90 d 时的抗压回弹模量结果如图 8 所示。

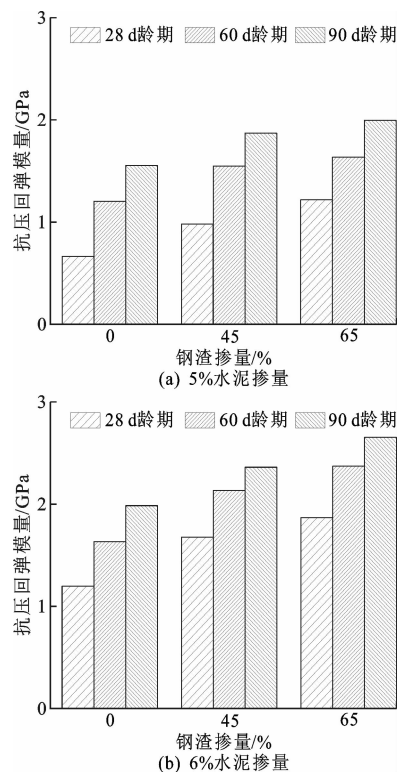


图 8 28、60、90 d 养护龄期下钢渣基层材料的抗压回弹模量

Fig. 8 Modulus of compressive resilience of steel slag base at curing age of 28, 60, 90 d

从图 8 可以看出,同一水泥掺量和养护龄期下,钢渣基层混合料的抗压回弹模量随钢渣掺量的增加而增大。同一钢渣掺量和养护龄期下,基层混合料抗压回弹模量随水泥掺量的增加而增大。当水泥掺量为 5%时,养护 28 d 龄期的未掺钢渣的基层混合料抗压回弹模量为 663 MPa,45%和 65%钢渣掺量时为 980、1 217 MPa,分别提高 47.8%和 83.6%。可见 65%钢渣掺入后其模量增加了近 1 倍,这与钢渣物化性质有很大关系。钢渣密度大、硬度高、耐磨

性好,刚度比天然碎石大,掺入基层后一定程度上增大了基层材料的刚性。同时,混合料抗压回弹模量在养护 28~60 d 时抗压回弹模量增长幅度明显高于养护 60~90 d 增长幅度。如 6% 水泥掺量下,45% 钢渣掺量混合料养护 60 d 较 28 d 时抗压回弹模量增长 27.3%,养护 90 d 较 60 d 时增长 10.6%;65% 钢渣掺量混合料时抗压回弹模量增长则分别为 30% 和 11.9%。这与抗压、劈裂强度变化规律相似。基层混合料前期强度主要由水泥水化提供,随着反应的进行,钢渣活性被激发而发生水化,胶凝物质增多,材料内部变牢固,基层刚度变大,宏观上表现出混合料模量迅速提高。

3.2 收缩特性

在温度和湿度发生变化时,半刚性基层极易因收缩而发生开裂现象,严重影响基层的稳定性^[30-32]。

3.2.1 干燥收缩

成型完的试件养护 7 d 后,置于干缩试验箱内(温度 20 ℃、湿度 60%)分别读取和称量前 29 d(7 d 后隔 1 d 记录 1 次数据)的千分表读数和试件质量并计算试件干缩系数,结果如图 9 所示。从图 9 可以看出:未掺钢渣的基层混合料干缩系数最大,钢渣基层的干缩系数随时间的增加而增大,混合料干缩主要集中在早期,1 d 后干缩缓慢;同一钢渣掺量下,混合料干缩系数随水泥掺量增大而增大;同一水泥掺量下,钢渣掺量越多,混合料干缩系数越小。5% 水泥掺量下,45% 和 65% 钢渣掺量的混合料较未掺钢渣时最终干缩系数分别减小 35.3% 和 52.4%,6% 水泥掺量下则分别减小 32.3% 和 49.4%。未掺钢渣时,5% 水泥掺量的基层材料干缩系数较 6% 掺量时减小 1.4%,可见适当减少水泥的掺量利于改善混合料因干燥而引起的收缩问题,故推荐钢渣基层选用 5% 水泥掺量。分析原因:前期混合料内部水泥仍会大量水化,水分的快速消耗导致混合料干缩加快。随着混合料内部水分的减少和水化程度趋于完全,混合料干缩趋于缓慢。另外,钢渣遇水产生体积微膨胀,刚好弥补了混合料干燥收缩这一缺陷。综上,半刚性基层中掺入钢渣可改善基层的干缩性能,一定程度上提高了基层的抗裂性能。

3.2.2 温度收缩

将养护 7 d 的梁式试件置于恒温恒湿环境箱内,在 50 ℃~-20 ℃中设置 7 个温度区间,降温速率设为 0.5 ℃/min,通过千分表读数计算各区间温缩系数的平均值,结果如图 10 所示。

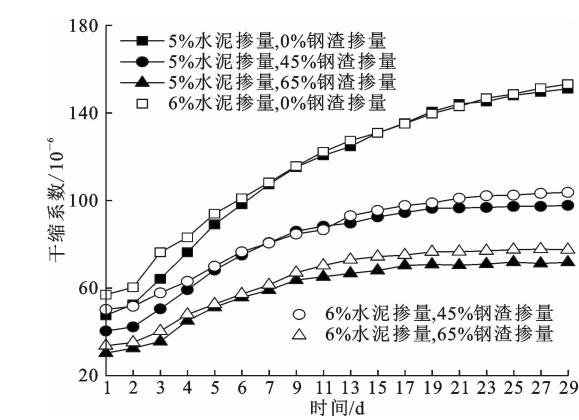


图 9 钢渣基层干缩系数与时间的关系
Fig. 9 Relationships between drying shrinkage coefficients and time of steel slag base

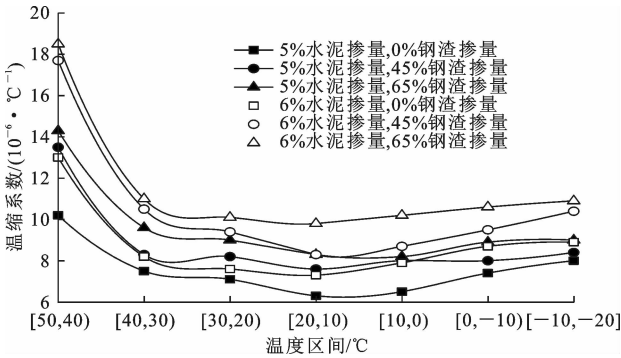


图 10 试件在不同温度区间内的温缩系数
Fig. 10 Temperature shrinkage coefficients of steel slag base at different temperature ranges

从图 10 可看出,随着温度的降低,混合料温缩系数整体呈现出先下降后上升的变化趋势。从 50 ℃~30 ℃降温过程中,混合料温缩系数急剧降低,在 20 ℃~10 ℃温度区间内,温缩系数降到最小值。随着温度继续降低,在 10 ℃~-20 ℃内,温缩系数开始缓慢增加;同一水泥掺量,温缩系数随钢渣掺量的增加而增大。5% 水泥掺量下,45% 和 65% 钢渣掺量的混合料平均温缩系数较未掺水泥时分别提高 20% 和 26.9%,6% 水泥掺量时则分别提高 20.9% 和 31.6%。钢渣水化产物和次生矿物对温度较碎石敏感,增加钢渣掺量反而不利于混合料抗温度收缩性能的改善;提高水泥掺量可以增大混合料的温缩系数。未掺钢渣时,6% 水泥掺量的混合料温缩系数比 5% 水泥掺量时提高 16.2%。水泥掺量对混合料温缩变形也有很大影响,在配合比设计时需考虑合理水泥掺量。

3.3 抗冲刷性

在潮湿多雨季地区,公路面层排水不及时导致水分下渗或被吸入基层中,在长期荷载作用下基层

不断被冲刷,出现沥青路面唧泥、水泥路面板底脱空等现象,大大降低了路面的使用寿命^[33-35]。因此,本文对钢渣基层混合料的抗冲刷性能进行了研究,养护 7、28 d 龄期的钢渣基层试件冲刷质量损失率结果见表 9。由表 9 可见:基层材料中掺入钢渣后冲刷质量损失明显减小,且水泥掺量增大和养护龄期增加均有利于基层混合料抗冲刷性能的提高;在 5%和 6%水泥掺量下,未掺钢渣的基层混合料冲刷质量损失均最大,养护 28 d 冲刷质量损失率分别达到 0.057%和 0.048%。在掺入钢渣后,混合料抗冲刷性能略微提高。5%水泥掺量下,养护 28 d 的 45%和 65%钢渣掺量较未掺钢渣基层冲刷质量损失率减小 0.031%和 0.046%;6%水泥掺量时则减小 0.034%和 0.041%。分析原因:一方面,细钢渣自身水化增加了骨料之间的黏聚力,使原本易被冲刷的细集料更牢固;另一方面,粗糙的钢渣表面增大了其与水泥水化产物间的咬合,使结构整体更加牢固。

表 9 养护 7、28 d 的冲刷质量损失

Tab. 9 Mass lose by water erosion after 7 and 28 d maintenance

材料配比	冲刷质量损失/%			
	5%水泥掺量		6%水泥掺量	
	7 d	28 d	7 d	28 d
0%钢渣,100%碎石	0.204	0.057	0.183	0.048
45%钢渣,55%碎石	0.152	0.026	0.132	0.014
65%钢渣,35%碎石	0.136	0.011	0.124	0.007

4 结 语

(1)钢渣掺量越高,混合料最大干密度越大。在 30%、45%、65%钢渣掺量下,包钢钢渣基层混合料 7 d 无侧限抗压强度随钢渣掺量的增加而增大,且在 65%钢渣掺量下达到最大值,继续增加钢渣掺量会使混合料抗压强度降低,因此选用 45%和 65%两组钢渣掺量研究其半刚性基层材料性能。

(2)45%和 65%钢渣掺量的基层材料力学性能优于普通水稳碎石。随养护龄期增加,钢渣基层的无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量增长趋势大致相同。另外,包钢钢渣水化缓慢,其基层材料早期强度不高,但随着钢渣活性被激发,后期强度增长迅速。

(3)包钢钢渣遇水发生微膨胀一定程度上可改善基层的抗干燥收缩性能,但其水化产物和次生矿物对温度较为敏感,反而对混合料抗温度收缩性能不利。5%水泥掺量和 65%钢渣掺量的基层材料抗

收缩性能表现最优,较普通水稳碎石干缩和温缩分别减少 52.4%和增加 26.9%。

(4)45%和 65%钢渣掺量的基层材料抗冲刷性能略优于普通水稳碎石。增加水泥掺量对钢渣基层抗冲刷性能的提高并不明显,钢渣水化特性及粗糙表面构造是其抗冲刷性能提高的重要原因。

(5)65%钢渣掺量的基层试件在力学、抗收缩和抗冲刷性能方面表现优异,但增加水泥掺量更易引起基层开裂。通过试验可知,5%水泥掺量的钢渣基层材料已足以满足高等级公路需求,故建议半刚性基层中水泥掺量选用 5%,包钢钢渣掺量选用 65%。

(6)本文针对掺钢渣的半刚性基层配合比进行了优选并分析了其性能,但由于缺乏钢渣水化相应的微观试验和数据支撑,钢渣影响其基层的性能分析较为粗糙,此应为进一步研究的重点。同时,为充分保证结果的准确性和参考意义,建议在级配设计时采用体积法设计。

参考文献:

References:

[1] 邓琪,王琪,黄启飞,等. 层次分析法评价钢渣资源化利用途径的研究[J]. 金属矿山, 2010, 39(1): 170-174.
DENG Qi, WANG Qi, HUANG Qi-fei, et al. Analysis on the approaches of utilization for steel slag with the analytic hierarchy process[J]. Metal Mine, 2010, 39(1): 170-174.

[2] 郑铁柱. 工业废料——钢渣的合理利用[J]. 国外公路, 2000, 20(3): 33-35.
ZHENG Tie-zhu. Industrial waste — The rational use of steel slag[J]. Foreign Highway, 2000, 20(3): 33-35.

[3] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.
SHA Ai-min. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 1-5.

[4] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
SHA Qing-lin. Semi-rigid base asphalt pavement of high-grade highway[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.

[5] 刘玉民,王兰,王玉. 钢渣混合料用作道路基层材料工程应用研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 209-212.
LIU Yu-min, WANG Lan, WANG Yu. Engineering

- application study steel slag mixture for road base materials[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(5): 209-212.
- [6] 杨 铂. 沥青路面(半刚性)基层病害检测与处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
YANG Bo. Research on disease detection and treatment technology of asphalt pavement (semi-rigid) base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [7] SHENG Y, JIA H, GUO S, et al. Effect of brucite fibers and early strength agent on cement stabilized macadam in Alpine regions[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2019, 12(3): 315-324.
- [8] 盛燕萍, 李亮亮, 关博文, 等. 高寒地区水镁石纤维早强型水泥稳定碎石的路用性能研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 355-361.
SHENG Yan-ping, LI Liang-liang, GUAN Bo-wen, et al. Study on the performance of gravel road stabilized by early strength agent and brucite fibers in Alpine regions[J]. Glacial-frozen Soil, 2018, 40(2): 355-361.
- [9] 毛志刚, 蓝天助, 张红日, 等. 钢渣特性及在道路工程中的应用研究[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 233-236.
MAO Zhi-gang, LAN Tian-zhu, ZHANG Hong-ri, et al. Characteristics of steel slag and its application in road engineering[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(5): 233-236.
- [10] 沈 凡, 庞若楠, 韦国苏, 等. 掺钢渣再生沥青混凝土的制备及路用性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 231-236.
SHEN Fan, PANG Ruo-nan, WEI Guo-su, et al. Production and road performance of recycled asphalt concrete with steel slag[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3): 231-236.
- [11] 马 睿, 王景琪, 张 宏. 钢渣材料在国内道路工程中的应用现状[J]. 焦作大学学报, 2016, 30(1): 78-80.
MA Rui, WANG Jing-qi, ZHANG Hong. The application status of steel slag materials in domestic road engineering[J]. Journal of Jiaozuo University, 2016, 30(1): 78-80.
- [12] CHAND S, PAUL B, KUMAR M. Sustainable approaches for LD slag waste management in steel industries: A review[J]. Metallurgist, 2016, 60(1/2): 116-128.
- [13] 王 强. 钢渣的胶凝性能及在复合胶凝材料水硬化过程中的作用[D]. 北京: 清华大学, 2010.
WANG Qiang. Cementitious properties of steel slag and its role in the hydration and hardening process of composite cementitious materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [14] MAHOUTAN M, SHAO Y, MUCCI A, et al. Carbonation and hydration behavior of EAF and BOF steel slag binders[J]. Material & Structures, 2015, 48: 3075-3085.
- [15] 潘 放, 李 军, 赵 平, 等. 钢渣在沥青路面基层中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(6): 1218-1221.
PAN Fang, LI Jun, ZHAO Ping, et al. Application of steel slag in asphalt pavement base course[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2002, 25(6): 1218-1221.
- [16] 郑武西. 钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
ZHENG Wu-xi. Research on the application of steel slag in cement stabilized crushed stone base course[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [17] 冯群英. 钢渣在公路路基路面工程中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
FENG Qun-ying. Research on the application of steel slag in highway subgrade and pavement engineering[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [18] 黄 浩. 未陈化钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
HUANG Hao. Application research of unaged steel slag in cement stabilized crushed stone base course[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [19] 梁 铎, 温永钢, 杨 超, 等. 钢渣在水泥稳定碎石基层中的工程应用研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(2): 250-254.
LIANG Duo, WEN Yong-gang, YANG Chao, et al. Research on engineering application of steel slag in cement stabilized macadam base[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2020, 44(2): 250-254.
- [20] 吴盛华. 水泥稳定钢渣-碎石路面基层材料试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
WU Sheng-hua. Experimental study on cement stabilized steel slag-gravel pavement base materials[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [21] 阮 文. 石灰粉煤灰稳定钢渣碎石材料的路用性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
RUAN Wen. Research on the road performance of lime and fly ash stabilized steel slag crushed stone material[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [22] 曾梦澜, 阮 文, 蒙 艺, 等. 二灰钢渣碎石路面基层材的设计与使用性能[J]. 湖南大学学报(自然科学

- 版),2012,39(10):1-6.
- ZENG Meng-lan, RUAN Wen, MENG Yi, et al. Design and performance of lime and fly-ash stabilized steel-slag and crushed-stone pavement base materials [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2012, 39(10): 1-6.
- [23] 喻平. 水泥稳定钢渣碎石基层抗疲劳性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.
- YU Ping. Research on anti-fatigue performance of cement stabilized steel slag crushed stone base course [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [24] 王敏, 沈茂森. 钢渣的矿物组成及显微结构[J]. 包钢科技, 2013, 39(1): 30-32.
- WANG Min, SHEN Mao-sen. Mineral composition and microstructure of steel slag [J]. Science & Technology of Baotou Steel(Group) Corporation, 2013, 39(1): 30-32.
- [25] JTJ 034—2000, 公路路面基层施工技术规范[S].
- JTJ 034—2000, Technical specification for highway pavement base construction[S].
- [26] JTG E51—2009, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- JTG E51—2009, Test regulations for inorganic binder stabilization materials for highway engineering[S].
- [27] 张东海. 水泥粉煤灰稳定钢渣在路面基层中的应用研究[J]. 北方交通, 2016(10): 40-43.
- ZHANG Dong-hai. Application research of cement fly ash stabilized steel slag in pavement base [J]. North Traffic, 2016(10): 40-43.
- [28] 彭波, 尹光凯, 李海宁, 等. 骨架密实型水泥稳定碎石级配设计与分形评价[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 284-288.
- PENG Bo, YIN Guang-kai, LI Hai-ning, et al. Gradation design and fractal evaluation of dense skeleton cement stabilized gravel [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(3): 284-288.
- [29] 王勇生, 刘延金. 采用二维颗粒流软件对水泥冷再生混合料间接抗拉强度模拟[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1611-1620.
- WANG Yong-sheng, LIU Yan-jin. Simulation on indirect tensile strength of cement cold recycling mixtures using particle flow code of two dimension [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(11): 1611-1620.
- [30] 杨文丁. 半刚性基层材料收缩性能研究[D]. 西安:长安大学, 2004.
- YANG Wen-ding. Research on the shrinkage properties of semi-rigid base materials [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [31] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 13-28.
- CHEN Bao-chun, LI Cong, HUANG Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 13-28.
- [32] 何锐, 王铜, 陈华鑫, 等. 青藏高原气候环境对混凝土强度和抗渗性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 29-41.
- HE Rui, WANG Tong, CHEN Hua-xin, et al. Impact of Qinghai-Tibet Plateau's climate on strength and permeability of concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 29-41.
- [33] 高伟, 崔巍, 李秀凤. 半刚性基层表面抗冲刷性能试验与分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(3): 1-7.
- GAO Wei, CUI Wei, LI Xiu-feng. Experiment and analysis of anti-erosion performance of semi-rigid base surface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(3): 1-7.
- [34] 王朝辉, 傅一, 陈谦, 等. 环氧沥青混凝土桥面铺装材料研究与应用进展[J]. 材料导报, 2018, 32(17): 2992-3009.
- WANG Chao-hui, FU Yi, CHEN Qian, et al. Application and research advances in epoxy asphalt concrete serving as deck pavement material [J]. Materials Review, 2018, 32(17): 2992-3009.
- [35] 朱唐亮, 谈至明, 周玉民. 半刚性基层材料抗冲刷性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 608-613.
- ZHU Tang-liang, TAN Zhi-ming, ZHOU Yu-min. Experimental research on erosion-resistance performances of semi-rigid base materials [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 608-613.