

文章编号:1672-9331(2021)01-0024-09

掺钢渣沥青混合料 AC-13 配合比优化设计

刘明金¹,柯 望²,李闯民²

(1. 萍乡公路勘察设计院, 江西 萍乡 337000; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为探讨萍钢钢渣在沥青路面中的应用,在对钢渣物理力学性能和化学成分进行检验和分析后,设计了用钢渣替代部分石灰岩的沥青混合料 AC-13,并对其进行了路用性能的试验研究。首先以沥青混合料体积参数为优化目标进行正交试验。优选的最佳组合为:级配 2、油石比 5.0%、钢渣掺量 25%。然后以最佳组合为基础,设计了不同钢渣掺量的沥青混合料并对其进行了路用性能试验。结果表明:与不掺钢渣沥青混合料相比,随着钢渣掺量的增大,掺钢渣沥青混合料的高温稳定性及水稳定性均得到了不同幅度的提升。当钢渣掺量为 75% 时,沥青混合料动稳定度提高了 43%,残留稳定度提高了 3.1%,残留强度比提高了 3.7%。当钢渣掺量为 50% 时,沥青混合料疲劳寿命延长了 10.1%。最后以综合路用性能最佳为优化目标,确定了设计掺钢渣沥青混合料 AC-13 的钢渣掺量为 50%~75%,级配曲线为级配 2。

关键词: 钢渣;沥青混合料 AC-13;体积参数;路用性能;体积膨胀率

中图分类号: U416

文献标志码: A

Optimization design of mixture ratio of AC-13 asphalt mixture mixed with steel slag

LIU Ming-jin¹, KE Wang², LI Chuang-min²

(1. Pingxiang Highway Survey & Design Institute, Pingxiang 337000, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to discuss the application of steel slag from Pingxiang Iron and Steel Co., Ltd. in asphalt pavement, after the inspection and analysis of the physical and mechanical properties and chemical composition of the steel slag, the asphalt mixture AC-13 was designed by replacing part of limestone with steel slag, and the pavement performance of it was studied experimentally. First, an orthogonal test was carried out to optimize the volume parameters of the asphalt mixture. The optimal combination is as follows: gradation 2, asphalt-aggregate ratio 5.0% and steel slag content 25%. Then, based on the best combination, the asphalt mixtures with different steel slag contents were designed and their pavement performances were tested. The experimental results show that compared with the asphalt mixture without steel slag, the high-temperature stability and water stability of the asphalt mixture mixed with steel slag have been improved in different ranges with the increase of steel slag content. When the steel slag content is 75%, the dynamic stability of the asphalt mixture increases by 43%, its residual stability increases by 3.1%, and its tensile strength ratio increases by 3.7%. When the steel slag content is 50%, the fatigue life

收稿日期:2020-09-06

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2020H0029)

通讯作者:刘明金(1967—),男,高级工程师,主要从事道路、桥梁设计与施工方面的研究。E-mail:13517993182@qq.com

of the asphalt mixture increases by 10.1%. Finally, optimal comprehensive pavement performance was taken as the optimization objective, and it was determined that the steel slag content of the designed asphalt mixture AC-13 mixed with steel slag is 50%~75%, and the gradation curve was gradation 2.

Key words: steel slag; asphalt mixture AC-13; volume parameter; pavement performance; volume expansion rate

钢渣作为炼钢过程中的一种副产品,其产量大约占钢铁总量的 12%~15%。据相关部门统计,我国钢渣年产量在 1 亿 t 以上,某些发达国家钢渣利用率接近 100%,而我国目前利用率仅为 30%左右^[1]。萍乡市有近千万吨钢渣,这些钢渣堆积成山,污染环境。在对萍钢钢渣属性进行研究的基础上,因地制宜,分质利用,将这些钢渣应用到沥青路面能产生较高的附加值。不同厂家的钢渣具有不同的特性,这就造成了钢渣沥青混合料设计的复杂性和特殊性。国内外学者一直在研究掺钢渣沥青混合料这个课题。Jamilla 等^[2]通过试验证实了钢渣膨胀率的大小会改变混合料的特性。赵小彦^[3]研究了 3 种不同处理工艺的钢渣沥青混合料的高温性能。研究表明,钢渣掺量存在一个综合性能最佳值。钱国平等^[4]的试验表明,与石灰石热拌沥青混合料相比,掺钢渣沥青混合料的抗老化性能较高。Mansour 等^[5]的研究表明,沥青混合料的间接拉伸强度、抗水损坏能力和抗疲劳性能都随着钢渣掺量的增加而有所提高,但沥青混合料在不同应力条件下的相位角有所减小。Martinho 等^[6]的试验表明,在沥青混合料中添加电弧炉钢渣(EAF)会提升混合料的高温稳定性。Kavyashree 等^[7]的研究表明,与传统集料的沥青混合料相比,所有掺钢渣沥青混合料的质量均符合道路运输和公路行业标准。Shen 等^[8]的试验结果表明,与传统的碎石(CS)相比,钢渣的掺入极大地降低了沥青路面产生的噪音,并建

议将碎石全部替换为转炉钢渣。申爱琴等^[9]制备了 4 种不同钢渣掺量的沥青混合料,并对其进行了四点弯曲疲劳试验。试验结果显示,当掺入 30%的钢渣时,沥青混合料疲劳寿命最长。钢渣原材料和掺钢渣沥青混合料的理论研究已经相对成熟,但由于工艺和生产厂家不同造成钢渣特性存在差异,因此钢渣在沥青面层中的使用仍然不多。钢渣的大面积使用必须建立在对钢渣特性、钢渣沥青混合料设计的试验论证上。本研究以萍钢钢渣为研究对象,进行掺钢渣沥青混合料 AC-13 的优化设计,以期得出设计掺钢渣沥青混合料的适合掺量、级配曲线和油石比。

1 原材料试验

1.1 沥青

根据萍乡的气候和交通量特点,选用国产 SBS 改性沥青,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中规定的试验方法对该沥青进行各项指标检测,结果表明其满足我国 SBS 改性沥青 I-D 技术要求^[10]。

1.2 萍钢钢渣特性试验

1.2.1 钢渣的化学组成和碱度

按照《钢渣化学分析方法》(YB/T 140-2009),对萍钢钢渣进行岩矿测试,得到其主要化学成分,如表 1 所示。

表 1 钢渣的主要化学成分
Table 1 Main chemical components of steel slag

样品编号	质量百分比/%							
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	f-CaO	铁含量
1	47.23	7.33	12.05	0.96	4.01	2.37	2.57	15.52
2	46.89	7.58	12.28	0.84	4.39	2.66	2.34	14.55
3	47.79	7.36	11.60	0.86	4.24	2.35	2.33	15.15
平均值	47.30	7.42	11.98	0.89	4.21	2.46	2.41	15.07

由表 1 可知,萍钢钢渣主要由 CaO、MgO 和 SiO₂ 组成,这 3 种成分的质量占比超过了 65%,同时铁和铁氧化物的质量占比也接近 20%。正是由于铁元素的大量存在,萍钢钢渣和天然碎石集料有着不同的特性。值得注意的是,影响钢渣体积稳定性的主要成分是游离氧化钙,钢渣中游离氧化钙含量为 2.41%,小于《沥青混合料用钢渣》(JT/T 1086-2016)中规定的 3%的限值。游离氧化钙遇水会发生体积膨胀,膨胀之后会造成体积增大 100%~300%^[11]。目前,萍钢钢渣是通过自然堆积和陈化处理方式减少钢渣中的游离氧化钙含量的。本研究试验用钢渣陈伏期均在 1 年以上。

钢渣的碱度分为 3 类,当 $M < 1.8$ 时为低碱度渣;当 $M \geq 2.5$ 时为高碱度渣;当 $1.8 \leq M < 2.5$ 时为中碱度渣。钢渣的碱度可采用下式计算:

$$M = \frac{w(\text{CaO})}{w(\text{SiO}_2) + w(\text{P}_2\text{O}_5)}$$

(1)

式中: M 为钢渣的碱度。

根据表 1 的检测结果,用式(1)计算可得出萍

钢钢渣的碱度为 3.28,属于高碱度钢渣,表明萍钢钢渣活性较高。经检测,钢渣与沥青的黏附等级为 5 级,原因在于强碱性钢渣与沥青的反应更加强烈,产生的黏附力远大于普通集料,这使得钢渣与沥青的黏附性较好。

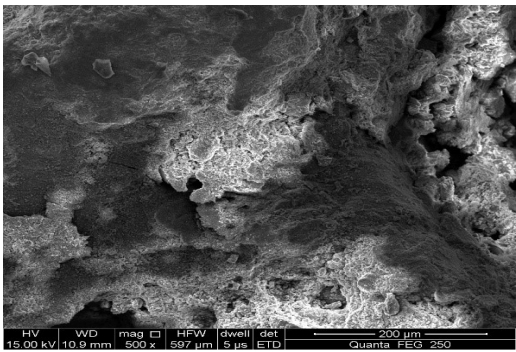
1.2.2 钢渣物理力学性能试验

将钢渣作为骨料掺配到沥青混合料中,与其相关的规范有《道路用钢渣》(GB/T 25824-2010)和《沥青混合料用钢渣》(JT/T 1086-2016),与《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)相比,其在某些技术要求上是不同的。主要体现在表观相对密度、吸水率、针片状颗粒含量和磨光值等指标上。本研究所取钢渣均为陈伏期 1 年以上的钢渣粗集料,依据《沥青混合料用钢渣》(JT/T 1086-2016),对萍钢钢渣粗集料进行物理力学检测,结果见表 2。通过扫描电子显微镜(SEM)的放大、成像技术,可以得到钢渣表面的微观形态。本研究采用的是 Quanta 250 FEG 扫描仪,图 1 为放大不同倍数的钢渣表面图片。

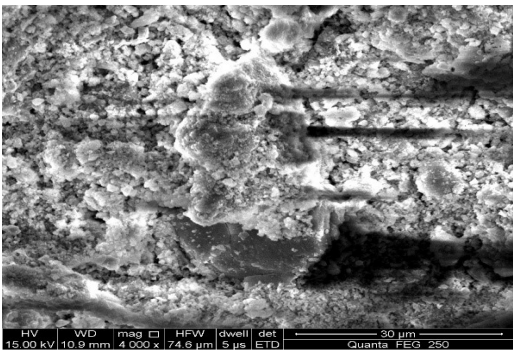
表 2 钢渣的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of steel slag

检测项目	技术要求	实测结果			试验方法
		3~5 mm	5~10 mm	10~15 mm	
压碎值/%	≤22.0	—	—	17.2	T0316-2005
洛杉矶磨耗值/%	≤22.0	17.3	15.2	14.3	T0317-2005
表观相对密度	≥2.900	3.433	3.418	3.289	T0304-2005
吸水率/%	≤3.0	2.9	2.8	2.2	T0304-2005
针片状颗粒含量/%	≤12.0	—	7.1	9.8	T0311-2005
磨光值/%	≥42	—	—	54	T0302-2005



(a) 放大 500 倍



(b) 放大 4 000 倍

图 1 钢渣的电子显微图像
Fig. 1 SEM images of steel slag

从钢渣的扫描电镜图片可以看出,钢渣表面凹凸不平,有很明显的孔洞。在通常情况下,集料表面的孔洞越多,与沥青的黏附性就越好。由于钢渣表面孔洞较多,相应地会吸附一部分沥青,同时会增大沥青混合料的设计油石比。

由表 2 可知,萍钢生产破碎的钢渣粗集料各项物理力学性能指标均满足《沥青混合料用钢渣》(JT/T 1086-2016)中规定的技术要求,可以用来

制备掺钢渣沥青混合料。

1.2.3 钢渣混合料的稳定性

钢渣中的游离氧化钙遇水会生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,并使钢渣体积膨胀。钢渣混合料的体积稳定性可采用浸水膨胀率来评价。依据《钢渣稳定性试验方法》(GB/T 24175-2009)中的钢渣浸水膨胀率测试方法得到萍钢钢渣的浸水膨胀率,结果见表 3。

表 3 钢渣混合料 10 d 膨胀量
Table 3 10 d expansion amount of steel slag mixture

样品编号	膨胀量/mm										浸水膨胀率/%
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d	9 d	10 d	
1	0.29	0.45	0.63	0.75	0.93	1.05	1.11	1.16	1.21	1.24	1.03
2	0.34	0.49	0.59	0.76	0.89	1.03	1.09	1.17	1.25	1.29	1.08
3	0.31	0.51	0.66	0.79	0.96	1.09	1.13	1.18	1.26	1.32	1.10

由表 3 可知,钢渣的 3 个样品的浸水膨胀率分别为 1.03%、1.08%和 1.10%,均值为 1.07%,符合《沥青混合料用钢渣》(JT/T 1086-2016)中规定的钢渣浸水膨胀率小于 1.8%的技术要求。

1.3 粗细集料和矿粉试验

本次配制掺钢渣沥青混合料所用粗集料、细集料、矿粉均由当地产的石灰岩加工而成。经检测,粗细集料和矿粉均满足我国沥青路面施工技术规范中规定的技术要求。

2 掺钢渣沥青混合料 AC-13 级配优选

影响掺钢渣沥青混合料 AC-13 配合比设计的因子有级配、钢渣掺量及油石比。采用正交试验对这 3 个因子进行研究。根据试验结果可以确定最佳的排列组合因子。

1) 级配 本研究构建了 3 条 S 型级配曲线,并使关键筛孔 2.36 mm 的通过率为中值、偏上限和偏下限。以各档石灰岩的筛分数据为基础,根据各档规格集料的筛分结果,得到 AC-13 合成级配设计结果,见表 4。若细集料和粗集料的比例合适,细集料可以有效填充在粗集料互相嵌挤形成的孔隙中,这样沥青混合料的内部结构更加密实,符合设计 S 型级配的初衷。此处合成级配的通过率应该被视为体积通过率。

表 4 AC-13 级配设计结果
Table 4 AC-13 gradation design results

筛孔尺寸/mm	级配范围			合成级配		
	上限	下限	中值	1	2	3
16	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
13.2	100.0	90.0	95.0	97.6	97.2	96.8
9.5	80.0	68.0	74.0	78.5	75.1	69.6
4.75	53.0	42.0	47.5	50.6	45.6	42.6
2.36	40.0	28.0	34.0	37.5	34.5	31.5
1.18	27.0	15.0	22.0	22.4	20.8	19.2
0.6	19.0	10.0	14.5	14.3	13.4	12.6
0.3	15.0	7.0	11.0	8.1	7.8	7.5
0.15	10.0	5.0	7.5	6.3	6.1	5.9
0.075	8.0	4.0	6.0	4.8	4.7	4.6

2) 钢渣掺量 根据选用的 AC-13 级配曲线,设计 3 种钢渣与碎石的比例。考虑到萍钢细钢渣中的游离氧化钙和泥的含量难以被有效控制,本研究只用钢渣替换部分粗集料,比例分别为:① 钢渣:碎石=25:75;② 钢渣:碎石=50:50;③ 钢渣:碎石=75:25。我国是按照体积设计理论来进行级配设计的。对于相对密度差在 0.2 以内的不同集料,这种设计方法不会带来太大的影响,但如果两种集料之间的相对密度差很大,会出现实际颗粒组成与设计级配严重不符的情况^[12]。因此,针对钢渣密度与普通集料密度相差较大的问

题,需要对钢渣进行等体积换算,调整各档集料的质量组成比例。钢渣等体积换算具体做法见文献[10]。这样在钢渣掺入之后可以保持级配不变,避免出现较大的级配变异。

3) 油石比 经检测,本次试验所用的国产 SBS 改性沥青满足我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)中规定的 I-D 改性沥青的技术要求。本次选取 3 个油石比,分别为 4.5%、5.0%和 5.5%。采用 $L_9(3^4)$ 正交试验对各因子各水平下的体积参数进行测定。正交因子水平表和设计表见表 5 和表 6。

表 5 正交因子水平表

Table 5 Orthogonal factor level table

水平	钢渣掺量/%	级配	油石比/%
1	25	1	4.5
2	50	2	5.0
3	75	3	5.5

表 6 正交设计表

Table 6 Orthogonal design table

序号	钢渣掺量/%	级配	油石比/%
1	25	1	4.5
2	25	2	5.0
3	25	3	5.5
4	50	1	5.0
5	50	2	5.5
6	50	3	4.5
7	75	1	5.5
8	75	2	4.5
9	75	3	5.0

根据表 6,选取孔隙率(VV)、矿料间隙率(VMA)、沥青饱和度(VFA)为优化指标进行正交试验,结果见表 7。

方差分析可以判断各个因子对试验结果的影响是否显著,因此需对试验数据进行方差分析^[13]。在本次正交试验中存在空白列,特选择空白列作为误差列进行方差分析。以 0.05 作为 F 分布的显著性水平,查表可知 $F_{0.05}=19.000$ 。若某个因子的 $F_{0.05}$ 大于 19.000,则认为该因子对结果的影响是显著的,用※表示,反之则不显著。3 种体积

参数的方差分析结果如表 8~10 所示。

表 7 3 个优化目标的正交试验结果

Table 7 Orthogonal test results of three optimization objectives

序号	孔隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
1	4.3	13.1	67.2
2	3.8	13.9	72.7
3	3.4	15.5	78.1
4	3.3	13.2	75.0
5	2.8	14.5	80.7
6	5.7	15.4	63.0
7	2.7	13.7	80.3
8	5.3	14.6	63.7
9	4.7	15.3	69.3
技术要求	3.0~5.0	最小 13.0	65.0~75.0

表 8 孔隙率方差分析结果

Table 8 Variance analysis results of VV

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
钢渣掺量	0.260	2	9.630	19.000	—
级配	2.047	2	75.815	19.000	※
油石比	6.847	2	253.593	19.000	※
误差	0.030	2	—	—	—

表 9 矿料间隙率方差分析结果

Table 9 Variance analysis results of VMA

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
钢渣掺量	0.202	2	6.966	19.000	—
级配	6.409	2	221.000	19.000	※
油石比	0.282	2	9.724	19.000	—
误差	0.030	2	—	—	—

表 10 沥青饱和度方差分析结果

Table 10 Variance analysis results of VFA

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
钢渣掺量	5.749	2	23.088	19.000	※
级配	24.496	2	98.378	19.000	※
油石比	340.562	2	1 367.719	19.000	※
误差	0.25	2	—	—	—

由方差分析可知,在本研究的试验范围内,油石比和级配对孔隙率的影响比较显著,钢渣掺量

对混合料的孔隙率有一定的影响,但并不显著,其影响程度按从大到小的顺序排列依次为:油石比、级配、钢渣掺量。级配对矿料间隙率的影响最为显著,其他两个因子并不显著,其影响程度按从大到小的顺序排列依次为:级配、油石比、钢渣掺量。钢渣掺量、油石比和级配对饱和度的影响是显著的,其影响程度按从大到小的顺序排列依次为:油石比、级配、钢渣掺量。

根据 AC-13 体积参数的要求,孔隙率为 3%~5%,矿料间隙率大于 13%,沥青饱和度为 65%~

75%。由表 7 的正交试验结果可知,最佳组合因子为级配 2,油石比为 5.0%,钢渣掺量为 25%。

3 不同掺量钢渣沥青混合料最佳油石比及体积参数

根据上述确定的最佳组合因子,选取级配 2 曲线,将 3 种钢渣掺量的沥青混合料与不掺钢渣的石灰岩沥青混合料进行对比,确定最佳油石比和各项体积参数。试验结果见表 11。

表 11 不同钢渣掺量最佳油石比条件下沥青混合料的体积参数
Table 11 Volume parameters of asphalt mixture under optimal asphalt-aggregate ratio with different steel slag contents

钢渣掺量/%	油石比/%	孔隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
0	4.7	3.8	14.1	73.0	13.89	3.01
25	4.8	3.9	14.2	72.5	15.46	3.24
50	5.0	4.0	14.4	72.2	17.76	3.39
75	5.1	4.2	14.5	71.0	19.41	3.42
技术指标	—	3.0~5.0	≥14.0	65.0~75.0	≥8.00	—

由表 11 可知,随着钢渣的掺入,掺钢渣沥青混合料 AC-13 的最佳油石比也随之增大。钢渣掺量从 0 增大到 75%,油石比则从 4.7%增大到了 5.1%,油石比增加了 0.4%。钢渣密度虽然比一般集料的大,但由于钢渣表面存在大量蜂窝结构(见图 1),增大了集料的表面积,这使得包裹钢渣所需的沥青增多,有利于提高沥青与钢渣的黏附性能。同时大量的表面结构孔隙会吸收部分沥青,这就是随着钢渣掺量的增大,虽然矿料密度增大了,但油石比不降反升的主要原因。沥青混合料的孔隙率和矿料间隙率也随着钢渣的掺入而增大,主要原因是钢渣的棱角性比被替代的石灰岩好,另外石灰岩的强度较低,在击实过程中部分石灰岩会被击碎,击碎的部分填充在孔隙中,钢渣的掺入提高了混合料的抗击碎能力。同时,稳定度也随着钢渣的掺入而不断增大,在钢渣掺量为 75%时,稳定度比不掺钢渣时提高了 39.7%。

4 掺钢渣沥青混合料性能验证试验

选择上述不掺钢渣和钢渣掺量分别为 25%、50%、75%的矿料级配,采用各自最佳油石比配制

沥青混合料进行路用性能系列试验。

4.1 高温稳定性

本次采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中的车辙试验来研究钢渣一碎石沥青混合料的高温性能。掺钢渣的 AC-13 型沥青混合料车辙试验结果见表 12。

表 12 掺钢渣沥青混合料车辙试验结果
Table 12 Rutting test results of asphalt mixture mixed with steel slag

钢渣掺量/%	车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
0	1.861	3 150
25	1.734	3 596
50	1.619	4 167
75	1.527	4 492

由表 12 可知,钢渣的掺入增大了混合料的动稳定度。对于 AC-13,当钢渣掺量为 75%时,车辙深度最小,混合料的动稳定度最大,为 4 492 次/mm,比不掺钢渣石灰岩混合料的动稳定度提高了 43%。就车辙试验而言,钢渣的掺入改善了沥青混合料的高温稳定性。改善的原因是强

碱性的钢渣与弱酸性的沥青发生了一系列化学反应,羧基与碳氢键结合产生较高的黏聚力,使混合料在高温条件下抵抗变形的能力增强。同时钢渣粗糙的表面增强了集料间的嵌挤力,进而提高了混合料的抗剪强度。

4.2 水稳定性

本次采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中的浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验研究掺钢渣沥青混合料的水稳定性。AC-13 型混合料残留稳定度的试验结果见表 13,冻融劈裂试验强度比(TSR)的试验结果见表 14。

表 13 掺钢渣沥青混合料浸水马歇尔试验结果
Table 13 Immersion Marshall test results of asphalt mixture mixed with steel slag

钢渣掺量/ %	浸水 48 h 后 的稳定度/kN	浸水 30 min 后 的稳定度/kN	残留稳定 度/%
0	11.89	13.04	91.2
25	14.05	15.29	91.9
50	16.14	17.32	93.2
75	18.52	19.64	94.3

表 14 掺钢渣沥青混合料冻融劈裂试验结果
Table 14 Freeze-thaw splitting test results of asphalt mixture mixed with steel slag

钢渣掺量/ %	劈裂抗拉强度/MPa		TSR/ %
	冻融循环组	未冻融循环组	
0	1.013	1.156	87.6
25	1.126	1.267	88.9
50	1.210	1.341	90.2
75	1.368	1.498	91.3

由表 13 和表 14 可知,对于浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,不同钢渣掺量和不掺钢渣的沥青混合料的残留稳定度、TSR 均满足施工规范技术要求。随着钢渣掺量的增加,沥青混合料的水稳定性逐渐增强。与不掺钢渣的沥青混合料相比,在钢渣掺量为 75%时,沥青混合料的残留强度增大了 3.1%,TSR 增大了 3.7%。可见钢渣的掺入提高了沥青混合料的抗水损害能力,原因在于钢渣超强的碱性与沥青中的酸性基团发生反应,钢渣对沥青的吸附力比石灰岩更强,增加了钢渣—沥青之间的黏附力。

结合浸水马歇尔和冻融劈裂试验结果可知,

相对于石灰岩,掺钢渣能提高沥青混合料的抗水损害能力。

4.3 低温抗裂性

本次采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中的弯曲试验方法来研究掺钢渣沥青混合料的低温性能。AC-13 型沥青混合料低温弯曲试验结果见表 15。

表 15 掺钢渣沥青混合料低温弯曲试验结果
Table 15 Low temperature bending test results of asphalt mixture mixed with steel slag

钢渣掺量/ %	抗弯拉强度/ MPa	最大弯拉应变/ με	弯曲劲度模量/ MPa
0	8.278	2 946	2 810
25	8.653	2 919	2 964
50	9.096	2 973	3 059
75	9.451	3 012	3 137

结合表 15 可知,随着钢渣的掺入,混合料的最大弯拉应变变化不大,钢渣的掺入并没有明显提升混合料的低温弯拉应变。这是因为低温开裂性能主要受沥青性质的影响,说明集料性质对低温性能无明显提升。在最大弯拉应变相等的情况下,劲度模量越高说明混合料的承载能力越强^[14]。在掺入钢渣后,3 种沥青混合料的劲度模量均出现增大的趋势,说明钢渣虽然没能改善混合料的低温性能,但是提高了混合料的承载能力。

4.4 体积稳定性

对于掺钢渣的沥青混合料,体积稳定性决定了钢渣是否可以应用到沥青混合料中。为了研究因为游离氧化钙的存在而引起沥青混凝土膨胀的问题,本次采用《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005)中钢渣沥青混凝土膨胀量的检测方法来检测掺钢渣沥青混合料的体积稳定性。不同钢渣掺量沥青混合料体积膨胀率试验结果见表 16。

表 16 掺钢渣沥青混合料体积膨胀率试验结果
Table 16 Volume expansion rate test results of asphalt mixture mixed with steel slag

钢渣掺 量/%	浸水前的 体积/cm ³	浸水后的 体积/cm ³	膨胀率/%	
			试验结果	规范要求
0	511.5	512.1	0.12	≤1.50
25	506.4	509.3	0.57	
50	517.9	521.7	0.73	
75	513.1	517.5	0.86	

由表 16 可知,当钢渣掺量增大至 75%时,沥青混合料膨胀率增大至 0.86%。不同钢渣掺量下沥青混合料膨胀率均小于 1.5%,没有超过规范要求的界限。随着钢渣掺量的增加,沥青混合料的膨胀率逐渐增大,原因主要是在掺入更多的钢渣后,掺钢渣沥青混合料中的游离氧化钙相应增多。萍钢钢渣在自然条件下已陈伏 1 年以上,钢渣自身的游离氧化钙已消解到限制范围以内,因此掺萍钢钢渣沥青混合料的体积膨胀率均小于 1.5%,满足施工规范对钢渣沥青混合料的技术要求。

4.5 疲劳性能分析

在我国沥青路面设计规范中,将沥青混合料层的疲劳开裂寿命作为设计指标,说明沥青混合料的疲劳性能对于沥青路面结构设计具有重要意义。目前对于疲劳性能的研究,国内外常用的方法主要有间接拉伸法、矩形梁四点弯曲法和小梁疲劳试验等。我国将小梁疲劳试验即四点弯曲疲劳试验作为检测沥青混合料疲劳性能的标准试验。我国沥青路面设计规范将层底拉应变设置为沥青混合料层疲劳开裂的控制指标,且拉应变的检测是在 20℃条件下进行的。本研究采用偏正弦、控制应变的方式对试件进行加载,加载频率为 10 Hz,同时将应变水平控制在 4×10^{-4} ,在此应变水平下,对 AC-13 型沥青混合料进行四点弯曲疲劳试验,结果如表 17 所示。

表 17 掺钢渣沥青混合料四点弯曲疲劳试验结果
Table 17 Four-point bending fatigue test results of asphalt mixture mixed with steel slag

钢渣掺量/%	初始劲度模量/MPa	疲劳寿命/次
0	3 756	44 6230
25	3 562	471 320
50	3 473	495 310
75	3 913	456 980

由表 17 可知,对于 AC-13,在钢渣掺量为 50%时掺钢渣沥青混合料疲劳寿命最大,与未掺钢渣沥青混合料相比延长了 10.1%。在钢渣掺量为 75%时出现下降。掺入部分钢渣使混合料疲劳性能有所提升的原因是沥青混合料的开裂主要集中于沥青—矿料界面处,沥青—矿料的界面强度是影响沥青混合料疲劳性能的关键因素。钢渣粗糙的表面及复杂的纹理增大了集料和沥青之间化

学交互作用的接触面积,并且钢渣集料表面的某些碱活性与沥青中的酸性基团产生反应,极大地增强了钢渣与沥青的黏附作用和相容性。钢渣的多孔特性为沥青胶浆提供了丰富的浸润界面,沥青胶浆可以在与钢渣的接触面上嵌入一定的深度,这样便增大了沥青膜厚度,使沥青—矿料的界面结构更加稳固,有效提高了混合料的疲劳寿命。但过多的钢渣会使混合料的疲劳寿命降低。主要是钢渣掺量大的沥青混合料初始劲度模量大(见表 17),因此,在相同应变水平下其所受到的疲劳应力增大,疲劳寿命缩短。

综合考虑掺钢渣沥青混合料的高温性能、水稳定性、低温性能、体积稳定性和疲劳性能,重点考虑高温性能、水稳定性和疲劳性能,对于 AC-13 沥青混合料,萍钢钢渣最佳级配推荐级配曲线 2,钢渣适宜掺量为 50%~75%,采用体积法对掺钢渣沥青混合料进行级配合成,用马歇尔方法确定最佳油石比,按此方案设计的掺钢渣沥青混合料路用性能综合最优。

5 结论

为设计综合性能最佳的掺钢渣沥青混合料,在原材料检测合格后,选取 3 条级配曲线、3 种钢渣掺量和 3 个油石比,进行正交试验制备沥青混合料。然后以优选的最佳级配曲线、不同钢渣掺量进行沥青混合料配合比设计和路用性能试验,与不掺钢渣的沥青混合料相比,得到以下结论:

- 1) 根据各因子对掺钢渣沥青混合料孔隙率的影响程度,按从大到小的顺序排列依次为:油石比、级配、钢渣掺量;根据各因子对矿料间隙率的影响程度,按从大到小的顺序排列依次为:级配、油石比、钢渣掺量;根据各因子对沥青饱和度的影响程度,按从大到小的顺序排列依次为:油石比、级配、钢渣掺量。以 AC-13 体积参数满足规范要求为目标,优选的最佳组合为级配曲线 2、钢渣掺量 25%、油石比 5%。
- 2) 与未掺钢渣的沥青混合料相比,随着钢渣掺量的增加,沥青混合料的动稳定度、残留稳定度和 TSR 均出现不同幅度的增大,当钢渣掺量增至 75%时,动稳定度提高了 43%、残留稳定度提高了 3.1%、TSR 提高了 3.7%。钢渣的掺入并没有明

显改善沥青混合料的低温性能,但弯曲应变满足规范要求。随着钢渣掺量的增加,掺钢渣沥青混合料的体积膨胀率也随之增大。当钢渣掺量增至75%时,体积膨胀率增大至0.86%,但仍然满足规范规定的体积膨胀率不大于1.5%的技术要求。掺钢渣的沥青混合料AC-13的疲劳寿命在钢渣掺量为50%时达到最长,与未掺钢渣的沥青混合料相比,疲劳寿命延长了10.1%。

3) 路用性能综合最优的掺钢渣沥青混合料AC-13的设计方案为:采用级配曲线2,钢渣掺量为50%~75%,用马歇尔方法确定最佳油石比。

〔参考文献〕

- [1] 任江涛,仇金辉,王姜维. 浅析我国钢渣综合利用及其标准化工作进展[N]. 世界金属导报,2019-07-09(A12).
REN Jiang-tao, CHOU Jin-hui, WANG Jiang-wei. A brief analysis of the comprehensive utilization and standardization of steel slag in China [N]. World Metals, 2019-07-09(A12).
- [2] Jamilla E S L T, Aecio G S, Patrício M P, et al. Expansion level of steel slag aggregate effects on both material properties and asphalt mixture performance [J]. Transportation Research Record, 2019, 2 673 (3): 506-515.
- [3] 赵小彦. 不同转炉钢渣材料性能及沥青混凝土高温稳定性研究[J]. 公路, 2019, 64(2): 220-224.
ZHAO Xiao-yan. Study on the properties of steel slag from different converter and the stability of asphalt concrete at high temperature [J]. Highway, 2019, 64(2): 220-224.
- [4] 钱国平, 朱海. 含电弧炉钢渣粗骨料的温拌沥青混合料长期老化评价[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 262-267.
QIAN Guo-ping, ZHU Hai. Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(4): 262-267.
- [5] Mansour F, Amin A. Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: a performance evaluation [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 630-638.
- [6] Martinho F C, Picado L G, Capitão S D. Influence of recycled concrete and steel slag aggregates on warm-mix asphalt properties [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 684-696.
- [7] Kavyashree L M, Anirudh N, Mallesh K M. Evaluation of bituminous concrete mixture properties with steel slag [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 17: 174-183.
- [8] Shen D H, Wu C M, Du J C. Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 453-461.
- [9] 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.
- [10] 李晓龙. 萍钢钢渣沥青表面层混合料设计及路用性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
LI Xiao-long. Study on design and road performance of Pingxiang steel slag asphalt surface layer mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [11] 王鹤迪. 钢渣沥青混凝土路面室内试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
WANG He-di. Laboratory test study on steel slag asphalt concrete pavement [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.
- [12] 彭刚. 基于多指标正交试验的温拌橡胶沥青制备工艺优化 [J]. 公路, 2016, 61(11): 179-183.
PENG Gang. Optimization of preparation technology for rubberized warm asphalt by multi-index orthogonal experiment [J]. Highway, 2016, 61(11): 179-183.
- [13] 陈宗武. 钢渣理化特性及其沥青混凝土性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
CHEN Zong-wu. Research on physical and chemical characteristics of steel slag and performances of steel slag based asphalt concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [14] 李赫. 橡胶沥青低温劲度模量的试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
LI He. Experimental study of low-temperature rubber asphalt stiffness modulus [D]. Changchun: Jilin University, 2015.