

# 钢渣 SMA-13 油石比及路用性能研究

陈晓

(河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 将普通 SMA-13 中 2.36~13.2 mm 集料全部采用钢渣替换, 制作钢渣 SMA-13 沥青混合料, 并与普通 SMA-13 沥青混合料对比, 分析钢渣 SMA-13 的最佳油石比及路用性能。结果表明, 与普通 SMA-13 相比, 钢渣 SMA-13 的最佳油石比增加 0.4%, 动稳定度增加约 12.1%, 抗弯拉强度、低温弯曲应变及断裂能分别增加约 7.6%、21.7%、27%, 劲度模量降低但降低幅度较小, 残留强度比及残留稳定度均增加约 1.5% 且残留强度比及残留稳定度均大于 80%, 构造深度及摆值增幅分别为 46.9%、4.8%, 钢渣的掺入可在很大程度上提升 SMA-13 的路用性能。

**关键词:** 公路; SMA-13 沥青混合料; 钢渣; 油石比; 路用性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0054-04

钢渣表面较粗糙、碱性较强, 可与沥青形成较强的粘结力, 且具有良好的保温隔热性能。最早将钢渣用于道路基层和沥青混合料的是美国、日本。在理论研究方面, Asi I. M. 等研究了不同钢渣掺量 AC-13 沥青混合料的抗车辙能力、疲劳寿命、间接拉伸模量及抗剥落性能等, 结果表明随着钢渣掺量的增加, 油石比呈增大趋势, 钢渣掺量为 75% 时 AC-13 具有良好的路用性能, 掺量达到 100% 时混合料孔隙率不满足要求; Bessa S. 等研究了钢渣沥青混合料的耐磨耗性能, 指出与片麻岩、花岗岩等相比, 钢渣具有较好的表面粗糙性和耐磨耗性能; Kavussi A. 等研究了钢渣沥青混合料的耐疲劳性能, 认为由于钢渣具有较强的骨架嵌挤作用, 钢渣沥青混合料具有优良的疲劳特性; 吴少鹏等对钢渣自身性质及混合料路用性能展开研究, 认为钢渣的掺入可提升混合料的水稳定性及抗滑性能等; 谢君等指出钢渣较强的碱性特征可增加其与沥青的粘结力; 薛永杰等认为与天然集料相比, 钢渣具有更好的磨光性、磨耗性及压碎值等。上述研究成果无疑推动了钢渣在沥青混合料中的推广应用, 但缺少系统性的研究成果, 且对钢渣用于 SMA-13 沥青混合料的研究较少, 对于钢渣对沥青混合料性能的提升效果较模糊。该文对钢渣的掺入对 SMA-13 沥青混合料性能的提升效果进行分析。

## 1 原材料及试验方案

### 1.1 原材料

采用天津某钢铁联合有限公司生产的钢渣, 其

外观呈灰白色, 颗粒较规整, 孔隙较多, 是典型的多孔材料。其粒径集中在 2.36~13.2 mm, 相关技术指标见表 1。

表 1 钢渣的技术指标

| 试验项目      | 下列粒径(mm)集料的检测结果 |          |           |
|-----------|-----------------|----------|-----------|
|           | 9.5~16          | 4.75~9.5 | 2.36~4.75 |
| 石料压碎值/%   | 11.56           | —        | —         |
| 洛杉矶磨耗损失/% | 11.47           | 10.85    | —         |
| 表观相对密度    | 3.346           | 3.337    | 3.276     |
| 吸水率/%     | 1.417           | 1.530    | 2.121     |
| 对沥青的粘附性/级 | 5               | —        | —         |

采用河南洛阳某公司生产的 SBS 改性沥青, 其各项技术指标(见表 2)均符合规范要求。

表 2 SBS 改性沥青的技术指标

| 试验项目                            | 规范值      | 测试值  |
|---------------------------------|----------|------|
| 针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm) | 60~80    | 74   |
| 针入度指数                           | -1.5~1.0 | 0.3  |
| 延度(5 cm/min, 10 °C)/cm          | ≥25      | >100 |
| 软化点(环球法)/°C                     | ≥46      | 46.0 |

粗集料采用河南洛阳石料厂生产的角闪岩, 其各项技术指标(见表 3)均符合规范要求。

细集料、矿粉分别采用河南洛阳石料厂生产的石灰岩碎屑和石灰岩矿粉, 其技术指标均符合规范要求。纤维采用木质纤维, 掺量为 0.3%。

表3 粗集料的技术指标

| 试验项目      | 下列粒径(mm)集料的检测结果 |          |           |
|-----------|-----------------|----------|-----------|
|           | 9.5~16          | 4.75~9.5 | 2.36~4.75 |
| 石料压碎值/%   | 13.3            | —        | —         |
| 洛杉矶磨耗损失/% | 13.7            | 15.4     | —         |
| 表观相对密度    | 2.887           | 2.876    | 2.868     |
| 吸水率/%     | 0.64            | 0.91     | 1.31      |
| 对沥青的粘附性/级 | 4               | —        | —         |

1.2 矿料级配

以 SMA-13 沥青混合料为研究对象,采用的矿料级配见表 4。

表4 SMA-13 沥青混合料的矿料级配

| 筛孔尺寸/mm | 通过率/% | 筛孔尺寸/mm | 通过率/% |
|---------|-------|---------|-------|
| 16.00   | 100.0 | 1.180   | 16.2  |
| 13.20   | 93.3  | 0.600   | 13.9  |
| 9.50    | 62.0  | 0.300   | 11.8  |
| 4.75    | 27.1  | 0.150   | 11.2  |
| 2.36    | 19.5  | 0.075   | 8.8   |

1.3 试验方案

用 2.36~13.2 mm 钢渣替换原沥青混合料中的 2.36~13.2 mm 角闪岩,分析钢渣替换后沥青混合

料的路用性能,并与普通 SMA-13 沥青混合料进行对比。两种 SMA-13 沥青混合料的矿料使用情况见表 5。

表5 两种 SMA-13 沥青混合料的矿料使用对比

| 粒径/mm      | 钢渣 SMA-13 | 普通 SMA-13 |
|------------|-----------|-----------|
| >13.2      | 角闪岩       | 角闪岩       |
| 2.36~13.2  | 钢渣        | 石灰岩       |
| 0.075~2.36 | 石灰岩       | 石灰岩       |
| <0.075     | 石灰岩       | 石灰岩       |

改变 SMA-13 的矿料组成,其最佳油石比也将发生变化,需重新确定钢渣 SMA-13 的最佳油石比,在此基础上再对两种 SMA-13 的路用性能(高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性及抗滑性能等)展开对比分析。试验均按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的要求进行。

2 最佳油石比的确定

2.1 普通 SMA-13

按照规范要求制备普通 SMA-13 沥青混合料马歇尔试件,室温下冷却后测试其技术指标,各技术指标随油石比的变化见图 2。根据马歇尔试验结果,普通 SMA-13 的最佳油石比为 5.9%。

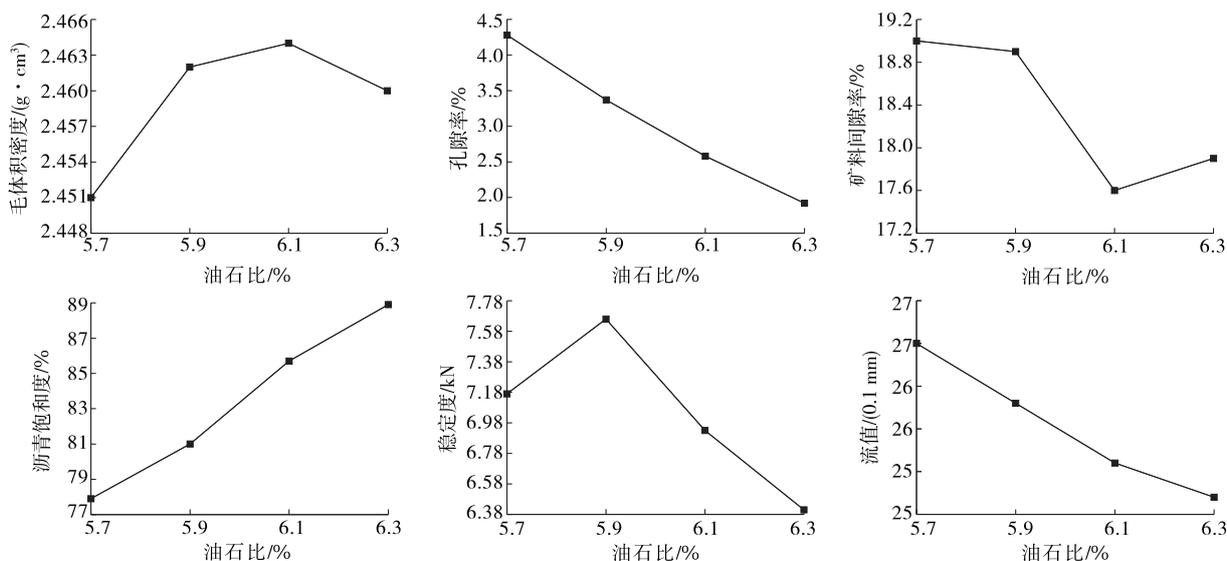


图1 普通 SMA-13 沥青混合料马歇尔技术指标随油石比的变化

2.2 钢渣 SMA-13

考虑到钢渣的多孔性,且其孔隙率及吸水率较大,2.36~13.2 mm 集料全部采用钢渣替换后必然

造成油石比增加,重新确定钢渣 SMA-13 的最佳油石比。钢渣 SMA-13 的马歇尔技术指标随油石比的变化见图 2。钢渣 SMA-13 的最佳油石比约

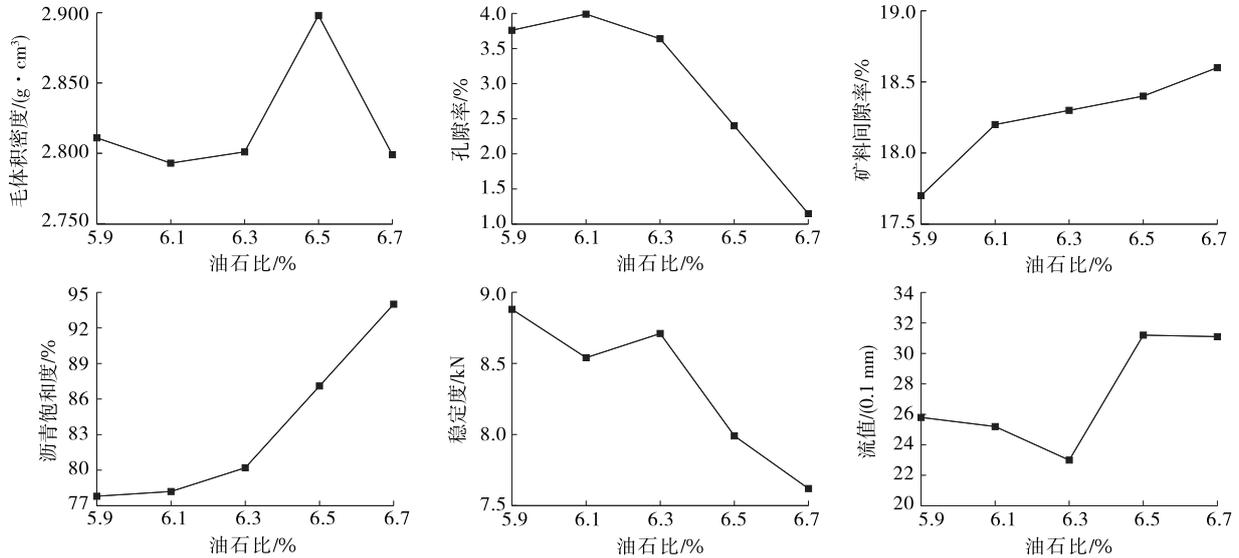


图2 钢渣 SMA-13 沥青混合料马歇尔技术指标随油石比的变化

6.3%，比普通 SMA-13 的最佳油石比增加 0.4%。

### 3 钢渣 SMA-13 的路用性能

#### 3.1 高温稳定性

根据普通 SMA-13 及钢渣 SMA-13 的最佳油石比,按规范对两种混合料进行动稳定度试验,试验结果见表 6。

表 6 SMA-13 沥青混合料高温车辙试验结果

| 混合料类型     | 动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 60 min 车辙变形量/mm |
|-----------|----------------------------|-----------------|
| 普通 SMA-13 | 5 635                      | 3.5             |
| 钢渣 SMA-13 | 4 954                      | 3.0             |

从表 6 可以看出:与普通 SMA-13 相比,钢渣 SMA-13 的动稳定度有所增加,增幅约 12.1%。SMA-13 为骨架密实结构,由于钢渣表面较粗糙,钢渣骨料之间的内摩阻力比普通角闪岩强,且各骨料之间直接接触,可形成更难以破坏的骨架结构。另一方面,钢渣的孔隙较多,散热性能较好,可在一定程度上增加沥青混合料的高温稳定性。但钢渣 SMA-13 的 60 min 车辙变形量比普通 SMA-13 的大,这是因为钢渣的压碎值及耐磨耗性能比角闪岩小,经过 60 min 碾压,车辙变形量相对增加,但增加较少。总体来讲,钢渣 SMA-13 的高温稳定性有所增强。

#### 3.2 低温抗裂性

成型钢渣 SMA-13 及普通 SMA-13 车辙板

试件,室温冷却后按照标准试验方法切割成小梁试件进行低温弯曲试验,每类混合料均测试 8 个平行试件,以增强试验结果的可靠性。试验温度为 -10℃。8 个平行试件试验结果的平均值见表 7。

表 7 SMA-13 沥青混合料低温弯曲试验结果

| 混合料类型     | 抗弯拉强度/MPa | 低温弯曲应变/ $\mu\epsilon$ | 极限劲度模量/MPa | 断裂能/(J·m <sup>-2</sup> ) |
|-----------|-----------|-----------------------|------------|--------------------------|
| 普通 SMA-13 | 10.5      | 2 197.4               | 4 993.2    | 333.1                    |
| 钢渣 SMA-13 | 11.3      | 2 675.3               | 4 398.7    | 423.1                    |

从表 7 可以看出:与普通 SMA-13 相比,钢渣 SMA-13 的抗弯拉强度、低温弯曲应变及断裂能皆有所提升,增幅分别为 7.6%、21.7%、27%;劲度模量相对降低,但降幅较小。整体来说,钢渣的掺入提升了 SMA-13 的低温抗裂性能。这是由于钢渣表面较粗糙,孔隙较多,与沥青的粘结性更好,且钢渣 SMA-13 增加了沥青用量,相对于普通 SMA-13,其保温性能更好,故其低温性能有所增强。

#### 3.3 水稳定性

通过冻融劈裂试验和浸水马歇尔稳定度试验分析钢渣 SMA-13 的水稳定性。试验采用马歇尔击实方法成型试件,正反击实次数均为 50 次,每类混合料各成型 8 个试件。冻融试验时,冰冻温度设置为 -18℃,冰冻时间为 16 h。试验结果见表 8。

从表 8 可以看出:与普通 SMA-13 相比,钢渣 SMA-13 的残留强度比及残留稳定度均有所提高,增幅均为 1.5%,且残留强度比及残留稳定度均大于

表 8 SMA-13 沥青混合料水稳定性试验结果

| 混合料类型     | 冻融劈裂强度/MPa |      | 残留强度比/% | 稳定度/kN |      | 残留稳定度/% |
|-----------|------------|------|---------|--------|------|---------|
|           | 冻融         | 未冻融  |         | 浸水     | 未浸水  |         |
| 普通 SMA-13 | 5.66       | 6.42 | 88.16   | 5.32   | 6.16 | 86.36   |
| 钢渣 SMA-13 | 6.72       | 7.51 | 89.48   | 5.59   | 6.38 | 87.62   |

80%，满足规范要求，可用于沥青路面。

### 3.4 抗滑性能

通过构造深度及摆值评价钢渣 SMA-13 的抗滑性能。构造深度测试按照 JTG E60-2008《公路路基路面现场测试规程》进行，摆值采用摆式摩擦仪测试。测试结果见表 9。

表 9 SMA-13 沥青混合料抗滑性能测试结果

| 混合料类型     | 构造深度/mm | 摆值/BPN |
|-----------|---------|--------|
| 普通 SMA-13 | 1.13    | 84     |
| 钢渣 SMA-13 | 1.66    | 88     |

从表 9 可以看出：与普通 SMA-13 相比，钢渣 SMA-13 的构造深度及摆值皆有一定程度提升，增幅分别为 46.9%、4.8%，抗滑性能得到提高。其原因是钢渣表面比角闪岩粗糙，替换后可更好地与车辆发生摩擦，增加行车安全性。

## 4 结论

(1) 普通 SMA-13 的最佳油石比为 5.9%；钢渣 SMA-13 的最佳油石比约 6.3%，比普通 SMA-13 增加 0.4%。

(2) 与普通 SMA-13 相比，钢渣 SMA-13 的动稳定度有所增加，增幅约 12.1%；抗弯拉强度、低温弯曲应变及断裂能有所提升，增幅分别为 7.6%、21.7%、27%；劲度模量相对降低，但降幅较小。钢渣的掺入可提升沥青混合料的温度稳定性。

(3) 与普通 SMA-13 相比，钢渣 SMA-13 的残留强度比及残留稳定度均有所增强，增幅均为 1.5%，且残留强度比及残留稳定度均大于 80%，满足规范要求；钢渣 SMA-13 的构造深度及摆值皆有一定程度提升，增幅分别为 46.9%、4.8%，表面抗滑性能得到提升。

综上，钢渣的掺入增加了部分沥青用量，在一定程度上增加了工程造价，但可更好地提升 SMA-13 的路用性能，减轻沥青路面病害，延长其使用寿命。还可进一步研究钢渣及不同粒径钢渣替换量对不同

类型混合料性能的影响。

### 参考文献：

- [1] 蒋长远,孙家瑛,李东.钢渣粉与消石灰对沥青混合料路用性能影响研究[D].中外公路,2016,36(1).
- [2] 牛哲.钢渣沥青混合料的制备与性能研究[D].南京:东南大学,2015.
- [3] 李伟,王鹤彬,王达.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,2016,11(6).
- [4] 胡光伟,王坤.不同混合料类型的钢渣沥青混凝土高温性能研究[J].上海公路,2015(4).
- [5] 李新宇,罗进锋,徐敬道.钢渣 SMA-13 沥青混凝土设计与路用性能研究[J].湖南交通科技,2015,41(2).
- [6] 李灿华,周溪滢,孙达.钢渣沥青级配碎石混合料的高温稳定性研究[J].矿产综合利用,2015,15(3).
- [7] 秦仁杰,孙超,孙明.钢渣在 SMA-13 沥青混合料中的应用研究[J].中外公路,2015,35(1).
- [8] Asi I M, Qasrawi H Y, Shalabi F L. Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014, 12(3).
- [9] Bessa I S. Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steel slag using the aggregate image measurement system[J]. Road Materials Pavement Design, 2014, 15(6).
- [10] Kavussi A, Qazizadeh M J, Kavussi A. Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace(EAF) steel slag subjected to long term aging [J]. Construction and Building Materials, 2014, 72.
- [11] 吴少鹏,杨文锋,薛永杰,等.钢渣沥青混凝土的研究与应用[A].中国硅酸盐学会 2003 年学术年会论文摘要集[C].2003.
- [12] 薛永杰,吴少鹏,廖卫东,等.钢渣在武黄高速公路加铺工程中的应用研究[A].湖北省公路交通科技 2004 年论文集[C].2004.
- [13] 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.
- [14] 叶勇,周新星,刘全涛.细集料对钢渣沥青混合料粘附性的影响研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2016,45(3).

收稿日期:2018-01-08