

文章编号: 0451-0712(2006)02-0126-04

中图分类号: U414.01

文献标识码: A

# 钢渣 SMA 路用性能试验研究

薛永杰<sup>1</sup>, 吴少鹏<sup>2</sup>

(1. 武汉大学资源与环境科学学院 武汉市 430072; 2. 武汉理工大学材料学院 武汉市 430070)

**摘要:** 针对沥青混合料的路用性能特点,以钢渣作为原材料,设计并制备出钢渣 SMA 沥青混合料。并在室内试验过程中,首先研究了钢渣的材料特性,并采用普通车辙试验检验混合料的高温稳定性;在 INSTRON 材料试验机进行混合料的低温性能与疲劳性能试验;通过测定钢渣与沥青之间的接触角值以及浸水车辙试验来评价钢渣 SMA 混合料的水稳稳定性。试验结果表明,钢渣可以作为沥青面层优质集料使用,设计并制备出的沥青混合料具有良好的路用性能。

**关键词:** 钢渣; SMA; 路用性能; 接触角; 集料

近些年来,我国钢铁工业发展迅猛。在钢铁生产规模不断扩大的同时,也产生了数千万 t 的工业副产品——钢渣。钢渣是冶金工业排放的第二大渣,随着钢渣产量的不断增加,堆放这些钢渣而浪费了土地资源;也由于钢渣中含有一定量的放射性物质而给环境造成潜在的污染;更由于没有有效利用,对于钢渣本身而言也是二次资源浪费。循环经济的观点认为,一种产业的废弃物可以成为另一产业的原材料,则称为资源再生利用。以此作为研究思路,本文研究了钢渣的材料特性,以及以钢渣作为道路工程优质集料的可行性及其混合料的路用性能。以工业废弃物钢渣作为道路建筑材料,既降低了公路工程造价,为钢渣的利用找到了新的途径,同时在环保方面又具有积极的意义。

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

本文所用的钢渣为武钢转炉钢渣,采用热泼法处理后,陈化存放期为 3 年,再经过破碎系统产出的级配钢渣。表 1 给出的是钢渣的化学组成与物理性指标。

### 1.2 试验方法

压汞试验采用美国的 Quantachrome 公司的 Pore-master 33-6 型压汞仪,压力范围为 140~231 kPa。

利用高温显微镜,在表明粘附沥青矿料的升温

表 1 钢渣化学组成与物理性指标

化学成分 %	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
	13.71	45.41	6.25	3.80	21.85	3.24	3.27
物理性 指标	密度 g/cm <sup>3</sup>	磨半细长 颗粒含量 %	粘附性	洛杉矶磨 耗/ %	压碎值 %	磨光值 %	吸水率 %
	3.30	8.5	5 级	13.2	12.1	58	1.2

过程中拍摄照片,反映沥青与矿料接触角的变化情况。集料及沥青混合料试验依据《公路工程集料试验规程》(JTJ 058-2000)以及《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052-2000)相关规定进行。采用国产改进 ZC 型车辙仪进行沥青混合料的浸水车辙试验。采用英国 INSTRON 公司的电液伺服材料试验机进行沥青混凝土试件的力学性能试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 压汞试验

压汞是一种通过稳定地增大仪器的压强,将汞压入到试样的孔隙当中并用来测定物质孔隙尺寸与分布情况的技术<sup>[1]</sup>。本文同时对钢渣、石灰岩与玄武岩 3 种集料进行压汞试验。试验条件如上所述,试验结果见表 2。

从表 2 中的数据可以看出,在前提条件相同的情况下,钢渣的总有效孔隙率是最大的。再观察不同

表2 碾压试验结果

集料类型	总孔隙率/%	不同尺寸的各种孔径所占总孔隙的百分比/%			
		>0.001 $\mu\text{m}$	>0.01 $\mu\text{m}$	>0.1 $\mu\text{m}$	>1 $\mu\text{m}$
钢渣	5.76	99.9	99.9	48.0	20.5
玄武岩	0.24	100	100	100	58.3
石灰岩	4.26	100	100	95.5	84.7

尺度的孔结构所占总孔隙的百分比的数值,钢渣的多孔性,主要体现在其有近50%的孔结构的尺度是小于0.1  $\mu\text{m}$ 的,这一点明显与另外两种集料有差别,另外两种集料几乎所有孔隙的孔径尺度都大于0.1  $\mu\text{m}$ ,而孔径大于1  $\mu\text{m}$ 的孔隙以石灰岩居多。造成这一差别的原因主要是两类材料(人工与天然)形成方式的不同。前者是经过高温水淬冷却凝结而成,由于各部分材料收缩性的差别,造成钢渣整体具备多孔;而后者是经过很长时间的天然矿物沉积而形成,结构致密,孔隙较少,而玄武岩的孔隙尤为少。

## 2.2 接触角

利用高温显微镜拍照,可以清楚地看出在升温过程中,沥青与矿料结合的情况。图1显示的是升温过程中各种集料与沥青之间接触角的变化情况。

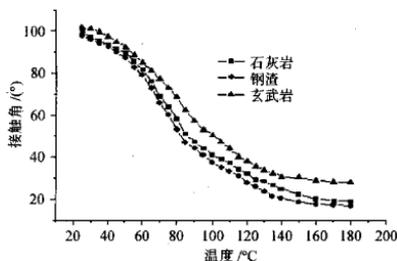


图1 接触角变化情况

沥青与矿料之间的粘附性,与沥青及矿料的性质都有关系,其中矿料的化学成分及结构的影响很大。从物理化学观点来看,沥青与矿料要发生吸附,形成牢固的粘附层,必要的先决条件是沥青能够很好地润湿矿料表面。润湿的过程通常是用接触角的大小来衡量。接触角越小,则润湿越好,粘附功越大,粘附性能越好。从图1的对比结果可以看出,在各种温度下,钢渣集料与沥青的接触角略小于石灰岩与沥青的接触角,均小于等温度下的玄武岩与沥青之间的接触角。以文献[2]的有关接触角的观点来看,

可以认为玄武岩与沥青粘附性能要比钢渣或石灰岩与沥青的粘附性能差。

## 2.3 高温稳定性

目前研究中较多采用小型车辙试验来表征沥青混合料的动稳性。图2给出的是本研究中的车辙试验结果。为了便于比较,本文选择了3种集料的沥青混合料进行车辙试验。分别是武钢钢渣、玄武岩和石灰岩。从图2中的比较结果可以看出,在3种温度下,钢渣沥青混合料的高温稳定性均比使用其他两种材料的混合料的高温稳定性要好。

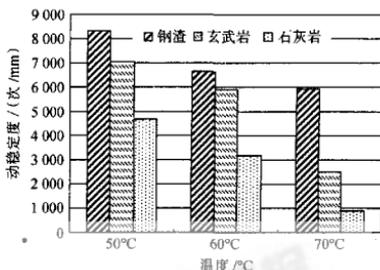


图2 不同温度下车辙试验结果

钢渣SMA 沥青混合料的高温稳定性出色主要是因为钢渣集料的粗颗粒形状非常规则,接近立方体,在松松捣实的情况下,颗粒与颗粒能形成非常好的嵌挤结构,表现出非常好的抗剪切作用;钢渣的表面纹理非常粗糙,破碎钢渣具有多孔结构,这两点保证钢渣集料能够有效地与沥青粘附,从而增大粘聚力,增加了抵抗永久变形能力的作用<sup>[3]</sup>。

## 2.4 水敏感性

浸水车辙试验是一种正在探索中的用于评价沥青混合料水稳性的试验方法,目前尚无一致的评价指标,通常以混合料出现破坏所需的时间作为衡量剥落的指标。本试验用条件试件(浸水试件)与标准试件的辙槽深度或发展趋势的对比关系作为评价指标,来表征沥青混合料的水稳性。本文利用自行改装设备进行浸水车辙试验,试验对象是使用3种纤维的钢渣SMA 沥青混凝土的车辙试件。试验条件是变化温度(60°C、70°C)与变化荷载(0.7 MPa、0.9 MPa),试验结果见图3和图4。

由图3与图4中的试验结果可知,对于钢渣SMA 沥青混凝土试件而言,无论是否经历冻融循环条件,使用聚丙烯纤维的试件的车辙深度最小,而

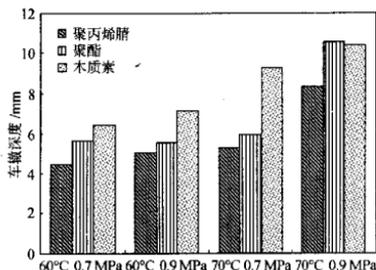


图3 未冻融条件下浸水车辙试验结果

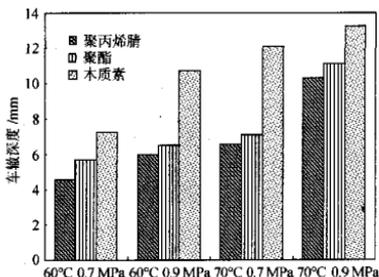


图4 冻融条件下浸水车辙试验结果

使用木质素纤维试件的车辙深度最大。另外,通过比较不难发现,经历了冻融循环或者增加饱和度的严酷预处理条件的试件,车辙深度要比未经过这些处理的试件的车辙深度要大一些,这说明预处理条件对试件的影响还是很大的。这一点与文献[4]所叙述的有差异。该文献认为试件经过冻融循环、“增加饱和度”两种较为严酷的预处理操作,其抗车辙能力并不会降低,主要是由于冻融循环作用使得混合料内部孔隙连通状况发生变化,这种变化多源于结合料从集料表面剥离后在混合料孔隙中形成分散,随着冻融循环次数的增加,这种分散状态不断扩大,并因此影响了水在试件孔隙中的流动状态,限制了水在轮载作用下的自由迁移。沥青结合料在集料表面发生卷曲、分离的现象。而在车辙试验中,试件侧端与试模紧密接触,使得在较高饱和度时,混合料孔隙中的水在轮载作用下侧向排出受阻,存在于混合料中的水间接地起到了使混合料密实的作用,并为其增加了一定的抗车辙能力。同时,该文也认为上述结论与分析引发出的问题还需进一步研究的问题。

## 2.5 低温抗裂性能

温度应力试验能够模拟实际温度变化情况,比较全面地反映出各种因素对沥青混合料低温性能的影响。本文采用临界压缩应变能密度函数来表征混合料的低温性能。材料在单轴受压时,临界应变能密度愈大,材料发生破坏所需能量也就越大,材料性能就愈好<sup>[5]</sup>。表3给出的是各种混合料的临界压缩应变能密度。

表3 临界压缩应变能密度

集料类型	$\epsilon_0/\%$	$\frac{dW}{dV}/(\text{kJ}/\text{m}^3)$
钢渣	13.5	88
玄武岩	11.0	73
石灰岩	7.5	57

从试验结果可以看出,钢渣SMA混合料的临界应变能密度最大,而使用石灰岩作为集料的沥青混合料的临界应变能密度最小,这一规律与前面的试验结果相吻合。这表明,在其他条件一致的情况下,集料的性能差异决定了混合料的低温性能。

## 2.6 疲劳性能

沥青混合料室内疲劳试验方法各异,各国都没有统一的规定。目前应用最多的主要有:简单弯曲试验(包括中点加载或三分点加载;旋转悬臂梁和梯形悬臂梁)、支承弯曲试验、单轴试验、间接拉伸试验、三轴试验、断裂力学试验和轮辙试验等。这几种主要试验方法中,又以重复弯曲试验(特别是三分点加载试验)以及间接拉伸试验(即劈裂试验)得到了广泛采用<sup>[6]</sup>。本文选用英国 INSTRON 疲劳试验机进行沥青混合料弯曲试验,试验温度为15℃,根据试验结果回归的疲劳方程如表4所示。

表4 疲劳试验结果

集料类型	$\sigma_f/\text{MPa}$	疲劳方程
钢渣	1.64	$\lg N_f = 4.34 - 3.50 \lg \sigma$
玄武岩	1.52	$\lg N_f = 3.78 - 3.28 \lg \sigma$
石灰岩	1.18	$\lg N_f = 3.42 - 3.20 \lg \sigma$

由回归所得的疲劳方程计算3种沥青集料的沥青混凝土的疲劳寿命可知,钢渣SMA的疲劳寿命即重复荷载至材料疲劳破坏时的加载次数最大,表明在此前提下,钢渣SMA的疲劳性能最好。影响疲劳性能的因素有很多。从疲劳的观点上来看,混合料的

劲度模量是一个重要的材料特性,任何影响混合料劲度的变量,诸如集料与沥青的性质、沥青用量、混合料的压实度与空隙率,以及反映车辆行驶速度的加载时间和所处的环境温度条件等都会影响这一特性。集料的性质对混合料的疲劳寿命也会产生很大的影响。由于集料表面纹理、形状和级配均会影响混合料的结构,即空隙的大小、形状以及连通状况和同沥青相互作用的情况,因此棱角尖锐、表面粗糙的开放式级配以及部分间断级配(SMA)会对混合料的疲劳寿命产生影响。粗糙有棱角但级配良好的集料(钢渣SMA)可以产生劲度值相当高的混合料,而纹理表面光滑的集料则相反。

### 3 结论

钢渣物理性指标好,洛杉矶磨耗、压碎值以及粘附性均好于普通集料;钢渣多孔,接触角小,保证了钢渣与沥青具有良好粘附性,这一优点体现在钢渣SMA的高温稳定性、低温抗裂性能以及疲劳性能出色;利用浸水车辙试验来评价沥青混合料的水敏感性是可行的,钢渣SMA在严酷的预处理条件下,浸

水车辙深度变化不大。以上试验表明,钢渣可以作为优质集料应用在沥青路面工程中,同时钢渣SMA具有出色的路面性能。以钢渣SMA的优秀抗滑耐磨特性作为突破口,实现钢渣二次资源的再利用,消除其对环境的潜在危险以及缓解自然资源天然集料的匮乏问题。

### 参考文献:

- [1] 温金保. 钢渣的机械力化学效应研究[D]. 南京工业大学, 2003.
- [2] 沈金安. 沥青及沥青混合料路面性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [3] 吴少鹏, 薛永杰. 钢渣SMA的研究[R]. 第八届国际交通新技术应用大会, 2004.
- [4] 韩海峰. 水作用下沥青混合料永久变形特性的表现形式[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4).
- [5] 郝培文, 张登良. 沥青混合料低温抗裂性能评价指标的研究[J]. 公路, 2000, (5).
- [6] 葛折圣, 黄晓明. 沥青混合料应变疲劳性能的试验研究[J]. 交通工程学报, 2002, (1).

## Research on Experiments of Pavement Performance of Steel Slag SMA

XUE Yong-jie<sup>1</sup>, WU Shao-peng<sup>2</sup>

(1. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** According to the pavement performance of SMA mixture, the steel slag is used as raw material to design and manufacture steel slag SMA mixtures. In the test process, first, steel slag material performances are discussed, then by using traditional rutting test, the high temperature stability is tested; the tests of low temperature and fatigue performance of steel slag SMA mixtures are performed on INSTRON tester; by measuring contact angle value between steel slag and asphalt binder and performing soaking wheel track test, water resistance performances of this mixture are discussed. Test results show that the steel slag has good pavement performances and may be used as superior aggregates in SMA.

**Key words:** steel slag; SMA; pavement performance; contact angle; aggregate