

# 陈化对钢渣及其沥青混凝土的体积和水稳定性能影响研究

秦林清

(山西交通控股集团有限公司 忻州北高速公路分公司, 山西 原平 034100)

**摘要:** 目前中国道路建设所需优质天然集料日渐枯竭, 迫切需要寻找可替代天然集料的筑路材料, 利用工业废弃物钢渣制备沥青混凝土是一个具有重要理论意义和应用价值的新思路。然而钢渣性能与其陈化时间息息相关, 基于此, 该文采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微成像(EPMA)、电子探针(SEM)等先进材料测试技术表征不同陈化时间钢渣的材料性能, 从而具体揭示钢渣活性成分的变化。然后利用不同陈化钢渣制备了 Superpave-13 和 AC-13 两类钢渣沥青混凝土, 并检验沥青混凝土的沥青用量、体积参数及水稳定性。研究表明: 陈化产物层以及钢渣内部复杂的金属固溶体将会阻碍钢渣内部硅酸盐矿物的进一步反应, 12 个月是比较适合的陈化时间; 陈化能够有效调控钢渣表面的活性成分, 陈化产物一定程度上起到填充钢渣表面空隙的作用, 从而达到降低钢渣对沥青吸收效应的目的; 同时陈化增强了沥青混凝土的水稳定性。

**关键词:** 陈化; 钢渣; 沥青混凝土; 孔特征; 体积稳定性; 水稳定性

## 1 前言

沥青路面是由沥青混凝土铺筑而成。沥青混凝土是用沥青胶结料与矿质混合料经过充分拌和形成的一种复合材料。其中矿质材料占到沥青混凝土总量的 90%~95%。因此沥青路面建设需要消耗大量的天然矿质原材料, 如石灰石、玄武岩等。统计表明: 2017 年中国实际使用沥青混合料约 4.5 亿 t, 到 2020 年混合料用量预计达到 5 亿 t 左右, 每年消耗砂石等材料 30 亿~40 亿 t。按照现在的消耗速度, 优质石灰岩仅能维持 15 年左右。而中国未来将建成更多的道路, 因此目前迫切需要寻找到可替代天然集料的筑路材料。

为了缓解道路建设对天然石料的消耗, 目前国内外学者主要围绕两个方面开展研究工作: ① 将低品位石料应用到沥青混凝土中, 如片麻岩、花岗岩等; ② 开展固体废弃物在沥青混凝土中的循环再生利用研究。利用工业废弃物钢渣制备沥青混凝土就是其中一个典型的代表。钢渣是炼钢过程中产生的一种固体废物, 其产量为粗钢产量的 12%~20%。主要的矿物相为硅酸二钙、硅酸三钙以及硅、镁、铁、锰、磷的氧化物形

成的固熔体。钢渣虽然是伴随炼钢产生的废渣, 但其具有优良的耐磨、抗压、抗滑等材料性能, 满足规范对沥青路面用集料提出的要求。利用钢渣制备沥青混凝土, 意义重大。一方面充分利用钢渣这种二次资源, 同时有效减少对自然资源的开采, 有利于资源的综合利用; 另一方面消除钢渣长期堆放产生的环境危害, 如水体污染、土壤硬化等, 环保效益显著。

然而中国目前钢渣总利用率不超过 20%, 将其作为路用集料使用的部分更是低于 2%。中国钢渣在道路建设领域使用率低主要有两个方面的原因: ① 因为钢渣中含有少量游离氧化钙( $f-CaO$ ), 虽然含量少, 但其活性很高,  $f-CaO$  遇水会发生反应生成氢氧化物造成体积膨胀, 当膨胀达到一定程度会导致开裂破坏, 因而钢渣存在安定性不良的问题。陈化处理是目前国际上消除钢渣体积膨胀最简单有效的方法, 陈化可以起到均化、稳定钢渣的作用。此举主要是消除钢渣表面的活性成分, 得到能够用于道路建设的体积稳定的钢渣集料。目前国内外虽然针对钢渣作为路用材料使用开展了大量的研究工作, 但存在一个很大的问题, 许多学者往往是针对原始钢渣开展材料性能评估, 而探究钢渣沥青混凝土的性能时又是基于陈化钢渣进行的, 缺乏

收稿日期: 2019-11-02(修改稿)

作者简介: 秦林清, 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: 81260671@qq.com

针对陈化钢渣材料性能开展的系统性研究工作;② 考虑到陈化是钢渣表面活性成分发生转变的过程,必然有新的物质产生,新产物需经历体积从小到大的生长过程。因此从理论上来说,陈化产物可以一定程度上填充钢渣表面的空隙,这为减弱钢渣的沥青吸收效应和改善其导热性提供了新的思路,但目前针对这方面开展的研究几乎没有。该文采用 XRD、EPMA、SEM 等先进材料测试技术对陈化钢渣的材料性能进行表征,揭示钢渣活性成分的变化,揭示不同陈化时间的钢渣对沥青混凝土性能的影响;量化陈化产物对钢渣表面空隙的填充效果;通过钢渣沥青混凝土体积稳定性和水稳定性验证陈化钢渣材料性能和孔特征的变化。

2 原材料

沥青采用 70# 基质沥青,其技术指标检测结果如表 1 所示。沥青混合料的集料采用石灰岩和钢渣复合集料,其中规格为 0~2.36、4.75~9.5 和 9.5~16 mm 的集料采用石灰岩;规格为 2.36~4.75 mm 的集料采用钢渣,钢渣集料技术指标检测结果见表 2。规格为 4.75~9.5 mm 和 9.5~16 mm 的集料技术指标是根据 Superpave-13 以及 AC-13 合成级配掺配后进行检测的,集料的技术指标检测结果见表 3。矿粉为石灰石磨细的矿粉,无潮湿结团现象。

表 1 70# 基质沥青基本技术指标

技术指标	单位	数值	技术要求	试验规程
针入度 (25 ℃, 5 s, 100 g)	0.1 mm	68.5	60.0~80.0	GB/T 0604—2011
软化点	℃	50.2	≥45.0	GB/T 0605—2011
延度 (15 ℃)	cm	137.4	≥100.0	GB/T 0606—2011

表 2 2.36~4.75 mm 钢渣的技术指标检测结果

检测参数	单位	检测结果	技术要求
石料压碎值	%	13.2	≤26
洛杉矶磨耗损失	%	12.5	≤28
吸水率	%	0.9	≤2
与沥青黏附性	级	5	≥4
磨光值 (PSV)	—	58.5	≥38

3 陈化对钢渣的性能影响

3.1 钢渣的陈化试验

结合目前中国常用集料规格,确定该文中使用的

钢渣集料粒度范围为 2.36~4.75 mm。陈化简单来说就是将钢渣置于外界环境下,在空气和水分的共同作用下,钢渣表面活性成分转化为惰性成分的过程。陈化过程中,为保证活性成分能均匀、充分地发生反应,应及时翻拌钢渣颗粒并对其洒水。每经过 3 个月取一次陈化试样进行材料表征、孔径分析和混凝土性能试验,总陈化时间为 12 个月,取样 4 次。

表 3 石灰岩集料的技术指标检测结果

集料规格/mm	检测参数	单位	检测结果	技术要求
4.75~9.5 和 9.5~16	石料压碎值	%	14.6	≤26
	洛杉矶磨耗损失	%	22.4	≤28
	吸水率	%	1.0	≤2
	与沥青黏附性	级	5	≥4
	磨光值 (PSV)	—	44.5	≥38
0~2.36	含泥量	%	0.9	≤3
	坚固性	%	12	≤12
	砂当量	%	62.5	≥60

3.2 陈化钢渣性能表征

为了充分表征陈化作用对钢渣表面活性成分的调控效果,采用转靶 X 射线衍射仪 (XRD) 对不同钢渣试样表面物相进行表征,基于表征结果,确定可有效控制钢渣表面活性成分的最短陈化时间;采用 JXA-8230 型电子探针 (EPMA) 表征活性成分可控钢渣试样的元素分布情况;采用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 对不同钢渣试样表面形貌进行观察。

原始钢渣、不同陈化时间处理的钢渣 XRD 分析结果如图 1 所示。图 1 显示:原始钢渣主要含有硅酸盐矿物 [(CaO)<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub>、(CaO)<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub>] 和复杂的 RO 固溶体,此外还含有少量的 f-CaO。陈化 6 个月的钢渣硅酸盐矿物和 f-CaO 的主要衍射峰的强度均有所减

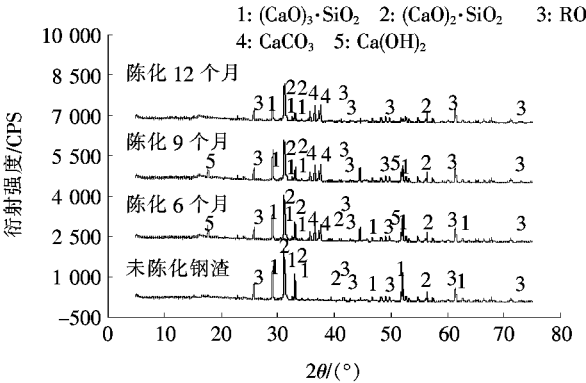


图 1 多种钢渣试样的 XRD 分析结果

弱,表明硅酸盐矿物和  $f\text{-CaO}$  发生了变化,同时可以看到产生了碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )和碳酸氢钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 两种新的物相。根据陈化反应的机制可以解释这一现象。陈化简单来说就是将钢渣置于室外自然环境下,让其与大气、水分充分作用达到调节表面活性成分的目的。钢渣中的硅酸盐矿物和  $f\text{-CaO}$  的具体转变过程为:硅酸盐矿物和  $f\text{-CaO}$  首先与空气中的水接触,形成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,随后  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  吸收空气中的二氧化碳气体转化为  $\text{CaCO}_3$ 。

由图 1 可知:陈化 9 个月钢渣试样中硅酸盐矿物的主要衍射峰强度进一步减弱,而  $f\text{-CaO}$  的衍射峰已经很难探测到。说明  $f\text{-CaO}$  反应完全,而硅酸盐矿物仍在进一步发生反应。分析原因:① 钢渣中含有的  $f\text{-CaO}$  量少,硅酸盐矿物的含量大;②  $f\text{-CaO}$  的活性比硅酸盐矿物高得多,提前完成物相的转变过程。陈化 12 个月的钢渣中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的衍射峰消失了,这说明不再有硅酸盐矿物参与反应,意味着陈化反应的完成。但从图谱可以看出硅酸盐矿物相并没有完全反应,根据峰的强度来判断,仍残留相当数量的硅酸盐矿物。这说明有物质阻碍了钢渣中硅酸盐矿物的进一步反应。下面通过表征陈化 12 个月的钢渣元素分布情况来解释这一问题。

用于元素分布测试的试件制备过程如图 2 所示,首先将陈化了 12 个月的钢渣颗粒(2.36~4.75 mm)用切割设备切开,将切割面打磨光滑;再确定用于电子探针扫描的区域,确定原则是保证扫描区同时含有陈化产物层和陈化的原始钢渣区域。

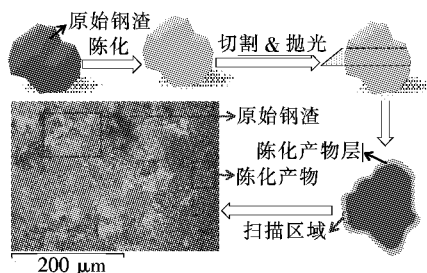


图 2 钢渣试件制备过程

扫描区域的背散射电子图像如图 3 所示,原始钢渣主要显示出两种颜色的区域:灰色和灰白色(黑色是由于样品观察面不平整引起的,并非物质本身的原因)。根据元素面扫描结果来看,灰白色区域主要是金属元素形成的复杂固溶体( $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{MnO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ),而灰色则主要是硅酸盐矿物。陈化产物层元素表征结果显示其钙元素非常密集,而硅元素浓度很

低,这与陈化反应机制是一致的,说明陈化反应在钢渣表面形成了一层  $\text{CaCO}_3$ 。紧挨陈化产物层,硅元素和金属元素的浓度都很大,因而并不能简单地认为是复杂的金属固溶体阻碍了陈化反应的进一步进行,致密的陈化产物层同时也起了贡献作用,阻隔了钢渣内部物质与水分的进一步接触。

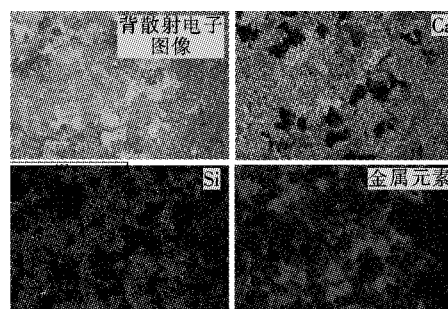


图 3 扫描区域的 EPMA 图像

为了进一步直观表现钢渣表面活性物质的变化,对钢渣表面进行了微观形貌观察。SEM 结果如图 4 所示,图 4(a)表明钢渣为多孔材料,表面纹理粗糙,理论上来说粗糙的表面形貌有利于与沥青的黏附,但出于对钢渣体积膨胀的担忧,钢渣不能直接使用。图 4(b)为陈化 10 d 的钢渣试样表面微观形貌,可以明显观察到立方晶系结构的晶体颗粒,这是  $\text{CaCO}_3$  晶体的典型特征。图 4(c)显示钢渣陈化还产生了絮状结构的 C-S-H 凝胶和棒状结构的钙矾石,这些物质的产生主要和硅酸盐矿物有关,由此也证明陈化反应并不单单是  $f\text{-CaO}$  水化和碳化的过程,硅酸盐矿物也参与了反应。图 4(b)显示生成的晶体颗粒起到了填

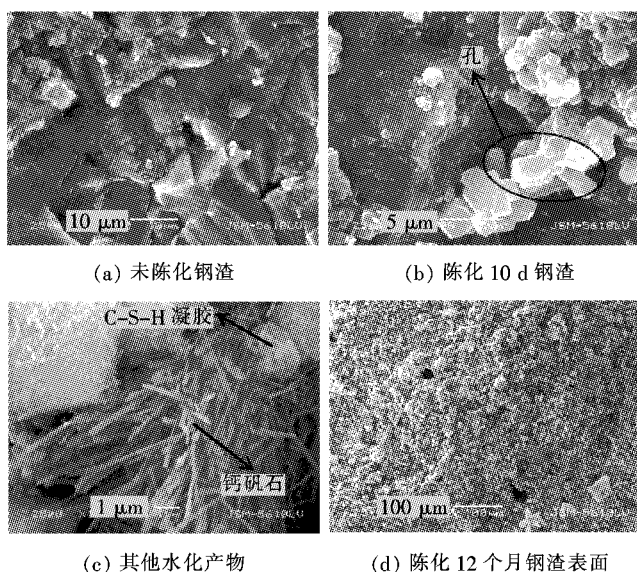


图 4 SEM 图像

充孔隙的效果,但即便是陈化 12 个月直到反应终止,钢渣表面仍残留部分孔隙[图 4(d)]。这说明生成的产物数量有限,不足以填充孔径较大的孔,另外产物颗粒间的空隙又会产生新的孔结构。因而需要进一步量化陈化作用对钢渣表面孔隙的影响。

通过对陈化钢渣材料性能的特征,可以确定以下几点:陈化产物层以及钢渣内部复杂的金属固溶体阻碍了钢渣内部硅酸盐矿物的进一步反应;陈化 12 个月的钢渣表面检测不到  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,说明陈化反应终止,12 个月是比较适合的陈化时间;陈化产物起到填充钢渣表面孔隙的作用,但陈化产物数量有限,直至陈化反应终止,仍有部分孔隙没有被填充。

## 4 沥青混凝土路用性能研究

### 4.1 沥青混凝土的设计

研究采用 Superpave 方法和 Marshall 方法分别设计 6 种类型的钢渣沥青混凝土,不同设计方法中的 6 种沥青混凝土中仅使用的钢渣不同(未陈化处理、陈化 3、6、9、12、15 个月)。Superpave-13 钢渣沥青混凝土最大公称粒径为 12.5 mm,设计当量单轴荷载系数( $\text{ESALs}$ )为 300 万~1 000 万次,设计环境温度为 41~43 °C。Superpave-13 合成级配曲线如图 5 所示,其中石灰岩集料(0~2.36、4.75~9.5 和 9.5~16 mm)的体积掺量分别为 30%、21%和 23%;钢渣的体积掺量为 22%;矿粉的体积掺量为 4%,按照 Superpave 理论确定最佳沥青用量并验证沥青混凝土的体积性能。AC-13 钢渣沥青混凝土的级配曲线如图 6 所示,结合级配优化方法,最终确定混合料中石灰岩集料(0~2.36、4.75~9.5 和 9.5~16 mm)的体积掺量分别为 25%、13%和 24%;钢渣的体积掺量为 33%,矿粉的体积掺量为 4%,选用油石比为 4.8%制备钢渣沥

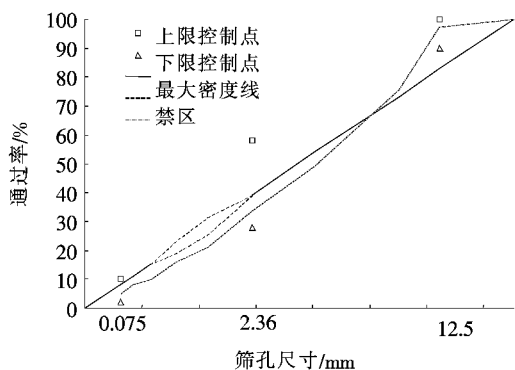


图 5 Superpave-13 钢渣沥青混合料的合成级配曲线

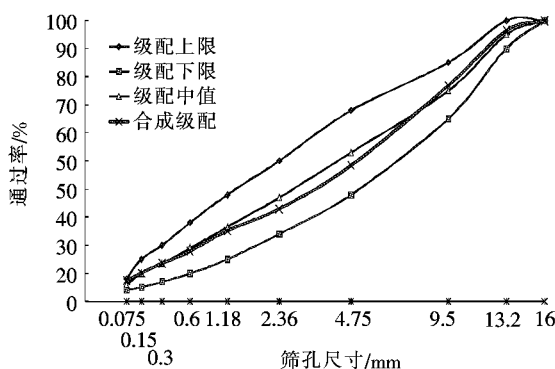


图 6 AC-13 钢渣沥青混合料的合成级配曲线

青混凝土。

### 4.2 陈化钢渣沥青混凝土体积性能研究

针对 Superpave-13 钢渣沥青混凝土的体积性能,试验提出了一种评价钢渣沥青混凝土体积稳定性的新方法:① 旋转压实仪压实的试样仍放在模具中,将模具底部、模具与试件间的缝隙加以密封,使水分只能从试件表面渗入内部,这更符合路面真实的情况;② 将测试试件置于 60 °C 水浴中,用电子图像采集装置记录试件表面每天的变化;③ 由图像软件确定开裂部分面积占表面总面积的百分比。

钢渣沥青混凝土的拌和温度控制在 165 °C。采用 TROXLER 4140-B 旋转压实仪成型试件,沥青混合料压实温度不低于 155 °C。Superpave 理论针对不同的路面设计条件,对初始旋转次数( $N_{ini}$ )、设计旋转次数( $N_{des}$ )和最大旋转次数( $N_{max}$ )制定了相应的标准。该文中设计当量单轴荷载系数( $\text{ESALs}$ )为 300 万~1 000 万次,设计环境温度为 41~43 °C,根据 Superpave 的要求, $N_{ini}$ 、 $N_{des}$ 、 $N_{max}$  分别为 8、113、181 次。考虑到 6 种沥青混凝土仅有钢渣集料的区别,因此采用钢渣类别来区分混合料类型。含钢渣集料的沥青混凝土最佳沥青用量和体积性能指标如表 4 所示。由表 4 可以看出:设计出的 6 种含有钢渣的沥青混凝土体积性能指标优良,均满足规范要求。虽然钢渣集料的体积掺量只有 20% 左右,但完全陈化的钢渣集料相比未陈化的钢渣集料对沥青的吸收效应下降,节省了 0.1% 的沥青用量。因为沥青混凝土每年的消耗量巨大,节省 0.1% 的沥青用量仍可带来显著的经济效益。经短期(3 个月)陈化处理的钢渣仍表现出明显的沥青吸收效应;当陈化时间超过 9 个月,陈化反应对减弱钢渣吸收沥青的影响不再明显,这与陈化钢渣孔特征分析结果一致。

钢渣沥青混凝土的体积稳定性试验结果如图 7 所示。

表 4 Superpave-13 钢渣沥青混凝土最佳沥青用量和体积性能指标

陈化时间/月	沥青用量/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	$Gmm@N_{ini}/\%$	$Gmm@N_{max}/\%$
未陈化	5.20	14.6	68	88.4	97.4
3	5.20	14.4	65	89.0	97.6
6	5.15	14.8	72	87.2	97.0
9	5.10	14.6	69	87.8	97.3
12	5.10	14.4	65	87.6	97.4
15	5.10	14.6	66	87.8	97.2
要求	—	$\geq 14$	65~78	$\leq 89$	$\leq 98$

注： $Gmm@N$  表示在相应旋转压实次数下，沥青混合料的压实度。

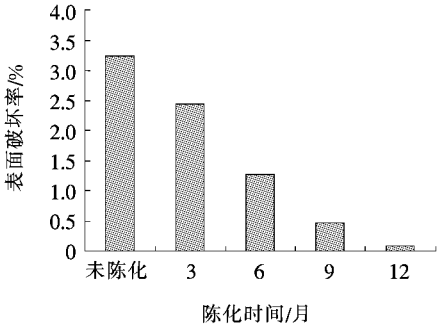


图 7 Superpave-13 钢渣沥青混凝土的体积稳定性试验结果

由图 7 可以看出：随着陈化时间的延长，钢渣沥青混凝土试件表面开裂比例逐渐降低。由此说明陈化反

应有效地消除了钢渣表面的体积活性成分。利用陈化 12 个月的钢渣集料制备的沥青混凝土试件表面开裂率为 0.1% 左右，可以忽略，且陈化 15 个月后，表面开裂率相比陈化 12 个月钢渣沥青混凝土的表面开裂率几乎没有下降，相比采用原始钢渣集料制备的沥青混凝土，稳定性提高了 30 倍以上。结果表明陈化处理 12 个月是比较合理的时间。

基于上述结果可知：通过对钢渣沥青混凝土的设计和体积稳定性的分析验证了陈化有效调控了钢渣表面的活性成分，同时陈化产物一定程度上起到了填充钢渣表面孔隙的作用，从而达到降低钢渣对沥青吸收的目的。

4.3 陈化钢渣沥青混凝土水稳定性研究

水稳定性是表征沥青混凝土中黏附于集料表面的沥青在受到水侵蚀作用后抵抗剥落的能力，该文采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验复合评价钢渣沥青混凝土的水稳定性。试验采用冻融劈裂试验和马歇尔稳定度试验复合评价 Superpave-13 和 AC-13 两种钢渣沥青混凝土的水稳定性。Superpave-13 钢渣沥青混凝土水稳定性测试样品由旋转压实仪按照 Superpave 设计法制备初始样品，然后用钻芯机钻取符合两种水稳定性测试要求的芯样。AC-13 钢渣沥青混凝土水稳定性测试样品由马歇尔试验方法制备得到。

Superpave-13 钢渣沥青混凝土水稳定性检测结果如表 5 所示。

表 5 Superpave-13 钢渣沥青混凝土水稳定性检测结果

陈化时间/月	浸水马歇尔试验				冻融劈裂试验			
	马歇尔稳定度/kN	浸水马歇尔稳定度/kN	RMS/%	RMS 提高率/%	劈裂强度/MPa	冻融后劈裂强度/MPa	TSR/%	TSR 提高率/%
未陈化钢渣	10.05	8.34	83.4	—	1.02	0.87	85.3	—
3	11.56	10.01	86.6	3.69	1.11	0.96	86.5	1.38
6	12.73	11.31	88.8	6.08	1.16	1.02	87.9	2.95
9	13.89	12.52	90.1	7.43	1.21	1.07	88.4	3.50
12	15.25	13.77	90.3	7.64	1.24	1.10	88.7	3.83
15	15.29	13.81	90.4	7.74	1.26	1.12	88.8	3.94

注：RMS 为浸水残留稳定度强度比；TSR 为劈裂抗拉强度比。下同。

从表 5 可以看出：6 种 Superpave-13 钢渣沥青混凝土浸水残留稳定度强度比(RMS)均大于 80%，劈裂抗拉强度比(TSR)均大于 75%，完全满足规范要求。随着钢渣陈化时间的增长，Superpave-13 沥青混凝土的 RMS 和 TSR 值逐渐增加。AC-13 钢渣沥

青混凝土水稳定性检测结果如表 6 所示。和 Superpave-13 钢渣沥青混凝土一样，6 种 AC-13 钢渣沥青混凝土 RMS 均大于 80%，TSR 均大于 75%，符合规范要求。陈化时间明显提高了钢渣沥青混凝土的水稳定性。

表 6 AC-13 钢渣沥青混凝土水稳定性检测结果

陈化时间/ 月	浸水马歇尔试验				冻融劈裂试验			
	马歇尔稳定度/kN	浸水马歇尔稳定度/kN	RMS/ %	RMS 提高 率/%	劈裂强度/MPa	冻融后劈裂强度/MPa	TSR/ %	TSR 提高 率/%
未陈化钢渣	11.63	10.26	88.2	—	1.23	1.06	86.0	—
3	13.08	11.71	89.5	1.45	1.35	1.18	87.4	1.60
6	14.53	13.13	90.4	2.43	1.44	1.28	88.9	3.26
9	15.92	14.51	91.2	3.29	1.55	1.38	89.6	4.02
12	16.74	15.36	91.8	3.92	1.61	1.45	90.1	4.55
15	16.89	15.55	92.1	4.23	1.64	1.48	90.3	4.76

钢渣沥青混凝土拥有良好水稳定性的主要原因是钢渣表面粗糙多孔,这种纹理构造增强了其与沥青间的黏结性能。此外钢渣中所含的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等碱金属阳离子可以与沥青中的沥青酸等物质发生反应,生成的沥青酸盐进一步增加了钢渣沥青混凝土的黏结性能。此外,钢渣沥青混凝土的水稳定性随着钢渣陈化时间的增加而增加,表明钢渣经过陈化后产生的稳定硅酸盐化合物( $\text{CaCO}_3$ ,等)提高了沥青混凝土抗水侵蚀的能力。而随着陈化时间的增长,浸水残留稳定度强度比和劈裂抗拉强度比增长逐渐变缓,表明陈化反应趋于停止,陈化物质产量趋于稳定。

5 结论

基于沥青路面应用的需求以及钢渣的性能特征,研究了不同陈化时间对钢渣材料性能的影响;量化陈化产物对钢渣表面空隙的填充效果;通过钢渣沥青混凝土相关体积指标和性能验证陈化钢渣材料性能和孔特征的变化。研究结果表明:

(1) 陈化产物层以及钢渣内部复杂的金属固溶体可以阻碍钢渣内部硅酸盐矿物的进一步反应,试验结果表明 12 个月是比较适合的陈化时间。

(2) 陈化能够有效调控钢渣表面的活性成分,同时陈化产物一定程度上起到了填充钢渣表面孔隙的作用,从而达到降低钢渣对沥青吸收效应的目的。

(3) 随着钢渣陈化时间的增长,沥青混凝土的浸水残留稳定度强度比和劈裂抗拉强度比逐渐增加,陈化产物提高了钢渣沥青混凝土的水稳定性。

参考文献:

[1] Ou XP, Ding K, Xu WL, et al. Discussion on Construc-

tion Technology of Asphalt Pavement on Expressway[J]. Civil Engineering and Urban Planning III, 2014:151.  
[2] Zhang YH, Zhao J, Fu J, et al. Research on the Mix Design of Cement Asphalt Concrete[J].Advanced Materials Research, 2014, 887: 838—841.  
[3] 徐小剑,吕冲.新型沥青路面结构在我国的应用研究[J].江西建材,2015(2).  
[4] Shi LW, Masley J, Zhang SW. Comparison Analysis of the Aggregate Contact Characteristics between Skeleton—Dense and Suspended—Dense Structure Asphalt Mixture[J].Applied Mechanics and Materials, 2014, 470: 889—892.  
[5] 黄颂昌.我国道路工程材料循环利用概况[J].建筑机械, 2018(9).  
[6] Chen ZW, Xiao Y, Pang L, et al. Experimental Assessment of Flue Gas Desulfurization Residues and Basic Oxygen Furnace Slag on Fatigue and Moisture Resistance of HMA[J].Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 37(11):1 242—1 253.  
[7] 赵福才,巨建涛,廖杰龙,等.转炉钢渣基础性能及综合利用分析[J].钢铁研究学报,2013(11).  
[8] 张同生,刘福田,王建伟,等.钢渣安定性与活性激发的研究进展[J].硅酸盐通报,2007(5).  
[9] Chen Z, Xie J, Xiao Y, et al. Characteristics of Bonding Behavior between Basic Oxygen Furnace Slag and Asphalt Binder[J].Construction and Building Materials, 2014, 64: 60—66.  
[10] 徐方,陈志超,朱婧,等.钢渣路面基层材料安定性能试验研究[J].混凝土,2012(9).  
[11] 杨文锋,吴少鹏,薛永杰,等.集料孔隙对沥青吸收和混合料体积性能影响[J].武汉理工大学学报,2003(12).  
[12] 王贤慧,朱立江,钢渣处理国内外的现状及发展趋势[C].中国金属学会 2010 年全国炼钢—连铸生产技术会议文集,2010.

# 配制条件对炭黑沥青性能影响研究

黄征<sup>1</sup>, 杨国良<sup>1\*</sup>, 陈乙轩<sup>1</sup>, 陈振誉<sup>1</sup>, 谢和春<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>, 蓝涛<sup>2</sup>

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州广大工程检测咨询有限公司)

**摘要:** 为了研究不同配制温度、炭黑掺量、炭黑细度对炭黑沥青路用性能指标的影响, 进行了相关性能试验。试验结果表明: 随着配制温度的升高, 炭黑沥青的针入度先减小后增大, 延度减小, 软化点、黏度逐渐增加, 炭黑沥青针入度、延度均小于基质沥青, 而软化点、黏度均大于基质沥青; 随炭黑掺量的增加, 炭黑沥青延度减小, 25、30℃时所测针入度逐渐减小, 而软化点、黏度逐渐增大; 4种炭黑 N220、N330、N550、N660 的氮吸附比表面积逐渐减小, 炭黑颗粒粒径逐渐增大, 炭黑沥青针入度逐渐增大; 炭黑细度对炭黑沥青延度、软化点、黏度影响较小。

**关键词:** 配制温度; 炭黑掺量; 炭黑种类; 炭黑沥青; 路用性能

## 1 前言

沥青路面由于其行车舒适、路面平坦、噪音小、施工速度快等特点, 逐渐成为道路常用的结构类型之一。随着重载交通量的增大, 普通沥青往往不能满足当前路面性能要求, 改性沥青却可弥补普通沥青这一缺陷。国内外研究表明: 炭黑可以提高沥青的高温稳定性、低温抗裂性、感温性、抗老化性能等, 但配制条件对炭黑沥青各方面性能影响研究甚少, 炭黑沥青结合料性能

与原材料及其制备方式有密切的关系, 它们对炭黑沥青性能的影响却又有所不同, 所以有必要研究各因素对炭黑沥青路用性能的影响程度, 这样有利于根据不同地区, 不同气候条件, 设计出更加合理的炭黑沥青道路施工工艺。

炭黑是按照氮表面积命名的, 炭黑氮表面积越大粒径越小。影响炭黑沥青性能的因素众多, 主要包括两方面: ① 原材料, 包含炭黑种类、炭黑掺量、炭黑细度等; ② 制备工艺, 主要包括配制温度等。该文选用炭黑作为改性剂对沥青进行改性, 制备炭黑沥青胶结

- \*\*\*\*\*
- [13] 康明. 钢渣用于混凝土的安定性评价与控制研究[J]. 粉煤灰, 2013(2).
- [14] 侯新凯, 徐德龙, 薛博, 等. 钢渣引起水泥体积安定性问题的探讨[J]. 建筑材料学报, 2012(5).
- [15] Chen Z, Xie J, Xiao Y, et al. Characteristics of Bonding Behavior between Basic Oxygen Furnace Slag and Asphalt Binder[J]. Construction and Building Materials. 2014: 60-66.
- [16] P. S. Kandhal G L H. The Use of Steel Slag as Bituminous Concrete Fine Aggregate: Research Project No. 79-26, Pennsylvania Department of Transportation[Z], 1982.
- [17] Wu S, Xue Y, Ye Q, et al. Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures

- [J]. Building & Environment, 2007, 42(7): 2 580-2 585.
- [18] 胡金龙, 孙大权. 钢渣在沥青混凝土中的应用研究[J]. 华东公路, 2014(6).
- [19] 向晓东, 周溪滢, 李灿华, 等. 钢渣 OGFC-13 型排水沥青混合料的配合比设计及性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2013(6).
- [20] 田孝武, 丁卫青, 谢君, 等. 钢渣全组分梯级利用研究[J]. 建材世界, 2015(2).
- [21] Chen Z, Wu S, Li F, et al. Recycling of Flue Gas Desulfurization Residues in Gneiss Based Hot Mix Asphalt: Materials Characterization and Performances Evaluation[J]. Construction and Building Materials. 2014: 137-144.

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 广东省大学生创新训练项目(编号: 201611078071)

作者简介: 黄征, 男, 硕士研究生, E-mail: 1097084914@qq.com

\* 通信作者: 杨国良, 男, 博士, 副教授, E-mail: yangguoL@gzhu.edu.cn