

文章编号:1001-7372(2021)10-0190-14

面向沥青混凝土矿料全替代的钢-铁渣梯级利用

陈宗武^{1,2,3}, 冷真^{*1}, 肖月⁴, 蒋继望¹, 焦玉勇²,
吴少鹏⁴, 谢君⁴, 蔡军⁵

(1. 香港理工大学 建筑与环境学院, 香港 999077; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070; 5. 长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:钢渣和铁渣是伴随炼钢产生的2种典型固废。目前部分钢渣已被再生用于替代沥青混凝土中的粗骨料。为进一步提高钢渣和铁渣的再利用效率,探讨了采用不同粒径的钢渣和铁渣100%替代沥青混凝土矿料的可行性。首先基于材料微观分析技术以及集料技术指标测试方法,揭示不同粒径钢渣和铁渣的材料特征,确定适合其100%替代沥青混凝土矿料的粒径搭配方案;然后验证方案的可行性,采用Superpave方法设计沥青混凝土,优化拌和工艺,检验沥青混凝土的主要工程性能。结果表明:钢渣细集料受自身矿物胶凝活性的影响易固结成块,铁渣粗集料的技术指标不佳,因而两者不宜直接替代沥青混凝土矿料使用。采用钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉100%替代常用的石灰石矿料,结合使用高黏度的SBS改性沥青和改进型混合料拌和工艺,可制备出性能优良的沥青混凝土,且部分性能指标优势显著:其高温下的流动次数(F_n)以及低温下的断裂能分别提高了18%和23%。可见,将不同粒径的钢渣和铁渣搭配使用可实现两者在沥青混凝土中的梯级全利用。

关键词:道路工程;钢铁渣;试验研究;材料特征;梯级利用;沥青混凝土;工程性能

中图分类号:U414.1 **文献标志码:**A

Complete Replacement of Mineral Raw Materials in Asphalt Concrete by Steel & Iron Slags Based on Cascade Utilization Strategy

CHEN Zong-wu^{1,2,3}, LENG Zhen^{*1}, XIAO Yue⁴, JIANG Ji-wang¹, JIAO Yu-yong²,
WU Shao-peng⁴, XIE Jun⁴, CAI Jun⁵

(1. Faculty of Construction and Environment, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 4. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 5. Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of

收稿日期:2021-01-12

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51808517,52008042);“香江学者”国际交流计划项目(XJ2019041);
湖北省青年科技“晨光计划”项目;硅酸盐建筑材料国家重点实验室开放基金项目(SYSJJ2019-19);
道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙)开放基金项目(kfj190302)

作者简介:陈宗武(1988-),男,湖北五峰人,副教授,工学博士,E-mail:chenzw@cug.edu.cn。

*通讯作者:冷真(1978-),男,江苏武进人,副教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhen.leng@polyu.edu.hk。

Hunan Province, Changsha University of Science & Technology,
(Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: Steel slag and iron slag, generating during steelmaking process, are two typical solid wastes. Currently, only partial steel slag is used to replace coarse aggregates in asphalt concrete. To further increase the reuse efficiency of steel and iron slag, this study evaluated the feasibility of using steel slag and iron slag with different sizes to completely replace the mineral raw materials in asphalt concrete. Two main studies were conducted. First, the material characteristics of steel slag and iron slag were analyzed using some microscopic analysis techniques of materials and test methods of the basic technical indexes of the aggregate. A suitable size combination scheme of steel slag and iron slag to completely replace mineral raw materials in asphalt concrete was proposed. Second, the feasibility of the proposed scheme was verified. All asphalt concretes were designed using the Superpave method. The mixing procedure of the asphalt mixture was modified, and the main engineering performances of the asphalt concrete were checked. The results suggest that the cementitious activity of the steel slag makes steel slag fine aggregate (SSFA) consolidated, and some technical indexes of the iron slag coarse aggregate (ISCA) are not good. Hence, SSFA and ISCA cannot be used to directly replace mineral raw materials in asphalt concrete. Asphalt concrete, with mineral raw materials completely replaced by steel slag coarse aggregate (SSCA), iron slag fine aggregate (ISFA), and steel slag powder (SSP) filler, mixed with SBS-modified asphalt under a modified mixing procedure, shows satisfactory engineering performances. Some performances are significantly better than those of limestone-based asphalt concrete. The high-temperature flow number (F_n) and low-temperature fracture energy are 18% and 23% higher, respectively. This work has proved that the cascade utilization of steel slag and iron slag in asphalt concrete can be done based on their size combination.

Keywords: road engineering; steel slag and iron slag; experimental research; material characteristics; cascade utilization; asphalt concrete; engineering performance

Received 12 Jan. 2021

Funding: National Natural Science Foundation of China (51808517, 52008042); Hong Kong Scholars Schedule (XJ2019041); Hubei Chenguang Talented Youth Development Foundation; Open Fund of State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures (SYSJJ2019-19); Open Fund of Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport (Changsha) (kfj190302)

*Corresponding author. *E-mail address*: zhen.leng@polyu.edu.hk.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.10.015>

0 引言

沥青混凝土作为一种典型的建筑材料^[1],被广泛应用于中国等级公路的建设中。其主要由粗集料、细集料、填料等矿料和沥青胶结料构成,矿料占到沥青混凝土总体积的90%以上^[2]。中国道路建设飞速发展,仅2015~2019年,中国四级及以上等级公路里程就增长了约16%,公路养护总里程也增长了约11%。繁重的公路建养任务有赖于巨量天然矿质材料的支撑,优质天然材料短缺的现象已愈

加显著。采用一些典型废弃物取代天然矿质材料制备沥青混凝土是实现道路建设可持续发展的有效途径之一^[3-10],同时可解决废弃物堆积造成的环境污染及资源浪费问题。

铁渣和钢渣是伴随炼钢产生的2种典型固废。高炉炼铁—转炉炼钢是目前钢铁厂普遍采用的两阶段炼钢工序。铁矿石、石灰石等原材料首先在高炉中形成铁水,这一阶段产生铁渣;铁水在转炉中经过除杂和降低碳含量处理形成钢水,这一阶段产生钢渣。铁渣产生量约为生铁产量的30%,钢渣产生量

约为生钢产量的13%^[11]。中国是钢铁生产大国,每年产生以亿吨计的铁渣和钢渣。考虑到沥青路面建设对矿料的高消耗,将铁渣和钢渣用于替代沥青混凝土矿料被认为是高效处置冶炼固废的重要途径之一,但其在沥青混凝土中的应用依然存在不少问题。

水淬法和干渣法是常见的处理熔融液态铁渣的2种方法^[12]。前者通过水流的冲制迫使液态渣快速冷却、粒化,这一过程不利于析晶,产物多以玻璃体存在,稳定性较差。水淬铁渣因其潜在的活性被广泛应用于水泥及混凝土行业^[13-14]。后者主要是将熔融液态铁渣置于渣坑或者渣场经过自然冷却形成渣块。然而,由于此类铁渣几乎没有活性,其高效利用一直是个难题,目前很多钢铁企业仍有大量的铁渣块堆积成山。块状铁渣为其加工成沥青混凝土用碎石提供了可能,但目前针对铁渣在沥青混凝土中的应用开展的研究很少。孙长新等^[15]的研究表明,采用铁渣取代普通石灰石粗集料并没有明显提高沥青混凝土的稳定度、残留稳定度等力学性能及抗水损害性能指标,但铁渣细集料对沥青混凝土性能的改善效果则比较显著。可见不同粒径的铁渣在沥青混凝土中的表现差异很大,这必然与铁渣的材料特征相关。

目前针对钢渣粗集料在沥青混凝土中的应用已开展了大量的工作。研究表明,采用钢渣粗集料制备的沥青混凝土具有优异的抗滑性能、抗高温变形性能、抗低温开裂性能以及抗疲劳开裂性能^[16-19]。但针对钢渣粗集料对沥青混凝土抗水损害性能的影响,学者们的观点则不统一。Xie等^[20]的研究结果表明,采用钢渣粗集料制备的沥青混凝土,其水稳定性指标要明显优于采用普通天然粗集料制备的沥青混凝土。Shen等^[11]针对多孔沥青混凝土开展的研究同样获得了相似的结论。而Coomarasamy等^[21]的研究则表明,当钢渣沥青路面处于潮湿服役环境下时,钢渣集料表面有新物质产生,破坏钢渣与沥青间的有效黏附,使得路面出现严重的水损害。Chen等^[22]的研究也证实钢渣集料表面产生的新物质使钢渣与沥青间的黏附界面对冻融损伤比较敏感。目前将钢渣细集料用于制备沥青混凝土的案例很少,这主要受其质量的影响:颗粒棱角性差,且颗粒与粉料易固结成块状^[19-23]。粗集料表面新物质的产生以及细集料的固结也必然与钢渣自身的材料特征紧密相关。

综上,为提高钢渣和铁渣的再利用效率,本文从材料特征方面探讨了采用不同粒径钢渣和铁渣

100%替代沥青混凝土矿料的可行性。以期通过钢渣和铁渣在粒径上的搭配实现其在沥青混凝土中的梯级利用。首先,基于钢渣和铁渣的材料特征,确定其在沥青混凝土中的适用粒径以及可100%替代沥青混凝土矿料的粒径搭配方案;其次,从沥青混凝土工程性能方面验证方案的可行性。采用Superpave方法设计沥青混凝土,优化混合料拌和工艺,检验沥青混凝土的体积稳定性、抗水损害性能、抗高温变形性能以及抗低温开裂性能等主要工程性能。

在以往针对钢渣或者铁渣沥青混凝土开展的研究中,往往将其直接类比于普通石料使用,虽然对其材料特征也有所涉及,但未能从本质上揭示出材料特征与钢渣集料、铁渣集料及其沥青混凝土性能间的关联。且大多数研究也仅采用钢渣部分替代天然集料使用,严重削弱了钢渣和铁渣的再利用效率。本文在充分认识钢渣和铁渣材料特征的基础上,通过钢渣和铁渣的粒径搭配完全替代沥青混凝土矿料,实现钢渣和铁渣在沥青混凝土中的梯级全利用。研究结果可为今后固体废弃物在沥青混凝土中的利用方式提供新的启示,具有较好的现实意义。

1 原材料

本研究中共涉及8种拟作为沥青混凝土矿料及其替代材料使用的原材料,按照粒径的不同分为3类:①粗集料(4.75~19 mm),包括钢渣、铁渣、石灰石;②细集料(0~4.75 mm),钢渣、铁渣、石灰石;③填料包括钢渣粉、石灰石矿粉。其中钢渣和铁渣集料全部来自于内蒙古包头钢铁(集团)有限责任公司。钢渣粉通过在实验室内研磨钢渣细集料获取。石灰石集料和石灰石矿粉均产自湖北宜昌某碎石场。此外还使用到湖北国创高新材料股份有限公司生产的SBS改性沥青。由于钢渣粉是在实验室内通过人工制备,不同于稳定的工业化生产,为了控制变量,使研究结果具有代表性和参考价值,本研究通过逐步调整钢渣细集料的研磨程度使钢渣粉和常用的石灰石矿粉粒度组成基本一致。

2 研究方法

2.1 钢渣及铁渣的材料特征

采用D8 X射线衍射仪(XRD)、JSM-5610LV扫描电子显微镜(SEM)和Axios X射线荧光光谱仪(XRF)分别表征钢渣和铁渣的矿物相、微观形貌以及平均化学成分;按照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)测试铁渣集料的压碎值、针片状

含量、洛杉矶磨耗等常规技术性能指标。

2.2 沥青混凝土的性能

按照 Superpave 方法设计最大公称粒径为 12.5 mm 的沥青混凝土,进而分析沥青混凝土的主要性能。以沥青混凝土试件浸水前后的体积变化反映其体积稳定性;采用残留稳定度(RMS)和劈裂抗拉强度比(TSR)试验评价沥青混凝土的水稳定性;采用动态蠕变试验评价沥青混凝土的抗高温变形性能;采用小梁三点弯曲试验评价沥青混凝土的抗低温开裂性能。试验按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)和《Superpave 沥青混合料简单性能试验规范》(NCHRP 9-29)里的标准方法进行。各试验所用试件尺寸及主要试验条件如表 1 所示。

表 1 试件尺寸及主要试验条件

Table 1 Sizes of Samples and Main Test Conditions

性能	试件尺寸	主要试验条件
体积稳定性	直径 150 mm、厚 150 mm (旋转压实试件)	60℃水浴
抗水损害性能	直径 100 mm、厚 63.5 mm (钻芯、切割旋转压实试件)	60℃水浴、-18℃冷冻箱
抗高温变形性能	直径 100 mm、厚 100 mm (钻芯、切割旋转压实试件)	60℃环境箱、试验荷载 100 kPa、加载频率 1 Hz
抗低温开裂性能	长 250 mm、宽 30 mm、高 35 mm(切割沥青混凝土板)	-10℃环境箱、试件变形速率 50 mm·min ⁻¹

3 结果与讨论

3.1 钢渣材料特征

3.1.1 钢渣粗集料

钢渣的 X 射线衍射图谱(图 1)显示,图 1 中 2θ 为衍射角,大大小小的衍射峰不仅繁多,而且众多峰相互重叠在一起,说明钢渣的矿物组成极其复杂。对图谱的进一步分析表明,硅酸盐矿物和铁的氧化物是包钢钢渣的主要矿物相。硅酸盐矿物主要包括硅酸二钙(2CaO·SiO₂, C₂S)和硅酸三钙(3CaO·SiO₂, C₃S)。铁的氧化物则主要以 2 种方式存在:①以氧化物形式独立存在,如氧化亚铁(FeO)和氧化铁(Fe₂O₃);②和氧化镁(MgO)、氧化锰(MnO)等其他氧化物形成复杂的 RO 固溶体。此外,根据特征峰的匹配情况,还可判断出游离氧化钙(f-CaO)的存在,但相应衍射峰的强度弱,说明 f-CaO 在钢渣中的含量相对较低。但正是这含量不高的 f-CaO 给钢渣的循环利用造成极大困难。f-CaO 极易吸收水分而转变为氢氧化钙(Ca(OH)₂),这一过程伴随产生约 1 倍以上的体积膨胀,因而钢渣的体积稳定性不佳。

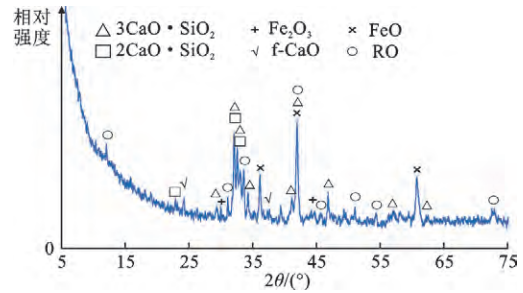


图 1 钢渣 XRD 分析结果

Fig. 1 XRD Analysis Results of Steel Slag

早在 20 世纪 70 年代,国外研究者就已经证实将钢渣用于沥青路面会对路面的安全服役产生不利影响^[24]。因此,尽管沥青路面建设对矿质材料高消耗的特点可满足钢渣高效处置的需求,但目前仍受制于钢渣潜在的体积膨胀问题。

因此,控制钢渣的体积膨胀问题是实现钢渣高效应用的前提。陈化处置是目前改善钢渣体积稳定性最常用的方法^[25]:将钢渣置于自然环境中,使 f-CaO 与水分充分反应转变为 Ca(OH)₂。即在钢渣被使用之前将其所含体积活性物质消除。但除了 f-CaO,钢渣还含有丰富的硅酸盐矿物(图 1),在钢渣的长期陈化过程中,其同样可以与水分反应产生 Ca(OH)₂。在自然环境下,Ca(OH)₂ 会进一步吸收二氧化碳气体(CO₂)转变为稳定的碳酸钙(CaCO₃)。因此,钢渣陈化本质上是 f-CaO 和硅酸盐矿物共同碳化的过程,如式(1)~(3)所示。同时,钢渣因含有硅酸盐等类似于水泥熟料的矿物而具有胶凝活性。受其胶凝活性的影响,对于钢渣粗集料而言,f-CaO 和硅酸盐矿物共同碳化产生的 CaCO₃ 产物在集料颗粒表面固结,作为钢渣粗集料颗粒的新表面存在。如图 2 所示,钢渣粗集料经过陈化处理,表面由灰黑色转变为灰白色,这主要归结于 CaCO₃ 产物层的贡献。

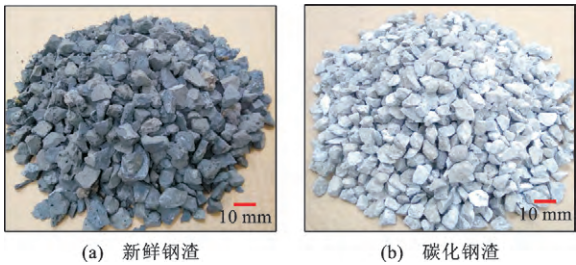
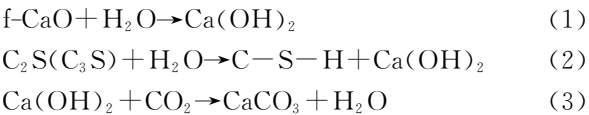


图 2 钢渣粗集料外观

Fig. 2 Appearance of Steel Slag Coarse Aggregate

基于 SEM 表征技术进一步分析了 CaCO₃ 产物

层对钢渣粗集料表面形貌的改变。钢渣粗集料碳化前后的表面微观形貌特征如图3所示。由图3可见:对于未碳化的新鲜原渣集料,颗粒表面同时存在密实构造和蜂窝状构造等多种不同的形态区[图3(a)];密实区还可观察到椭圆形及裂缝状孔隙的存在,表明钢渣是一种组成复杂的多孔材料。经过长时间的陈化处理,钢渣粗集料表面充分碳化,微观形貌发生了显著的变化。如图3(b)、(c)所示,密实区

表面被 CaCO_3 产物颗粒完全覆盖,而蜂窝状区域仅有少许 CaCO_3 晶体镶嵌于其表面,且产物颗粒尺寸相比密实区要小得多。由此也进一步说明了钢渣成分复杂, f-CaO 和硅酸盐矿物在钢渣粗集料颗粒表面呈不均匀分布,致使陈化后的钢渣粗集料颗粒表面没有形成稳定、均一的 CaCO_3 产物层。因此,将钢渣粗集料应用于沥青混凝土中时,其与沥青间的黏附行为要比普通石料更加复杂。

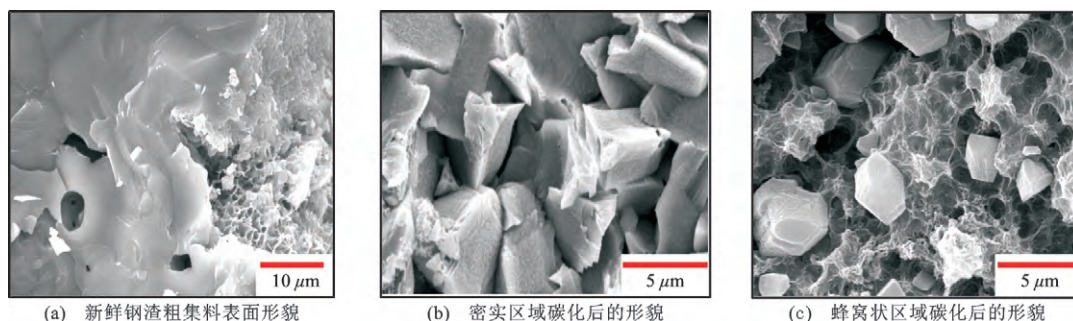
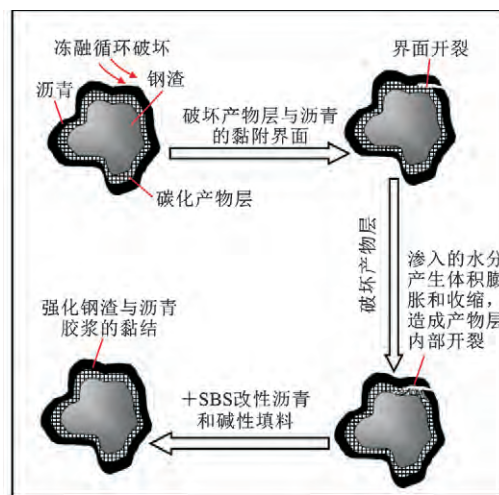


图3 SEM图像

Fig. 3 SEM Images

前期完成的部分研究工作已经证实,在冻融循环损伤下,碳化钢渣粗集料颗粒与基质沥青间难以保持有效黏结^[22]。冻融循环对碳化钢渣-沥青黏附界面的破坏过程如图4(a)所示:在持续的冻融循环损伤下, CaCO_3 产物层与沥青黏结的薄弱区域首先遭到破坏;水分得以进入到产物层内部,在冻融循环损伤过程中,反复的膨胀和收缩效应造成 CaCO_3 产物层内部结构的破坏,进而加速了碳化钢渣表面沥青胶浆的剥离。因此,冻融循环对碳化钢渣粗集料颗粒与基质沥青间的黏结造成的破坏包含了2个方面:① CaCO_3 产物层与沥青黏附界面的破坏;② 进入 CaCO_3 产物层内部的水分导致产物层结构的破坏。因此,采用碳化钢渣粗集料和基质沥青拌和的沥青混凝土对冻融循环破坏比较敏感。研究表明,经历3次冻融循环破坏后,含碳化钢渣粗集料的沥青混凝土,TSR下降了约29%,而对于含新鲜未碳化钢渣粗集料的沥青混凝土,这一值则为24%,如图4(b)所示。

为了更直观地证实图4(a)所示 CaCO_3 产物层在冻融循环损伤下易发生开裂,将表面润湿后的碳化钢渣粗集料颗粒用塑料袋密封,进行冻融循环损伤。仅经过2次冻融循环破坏,即可观察到有白色物质从钢渣粗颗粒表面脱落;经过5次冻融循环破坏,脱落现象变得非常明显。脱落物质的XRD分析结果如图5所示。由图5可见,其主要含 CaCO_3 矿物。而对于未碳化的原渣,本身几乎检测不到



(a) 碳化钢渣粗颗粒-基质沥青黏附界面的冻融破坏

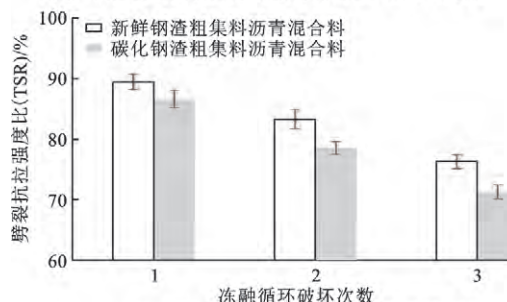
(b) 钢渣粗集料沥青混凝土的TSR结果^[22]

图4 冻融破坏

Fig. 4 Freeze-thaw Damage

CaCO_3 的存在(图1)。虽然冻融过程为钢渣继续碳化创造了条件(提供了水环境),但相比陈化过程,冻融循环损伤试验持续的时间很短,短时间内难以产

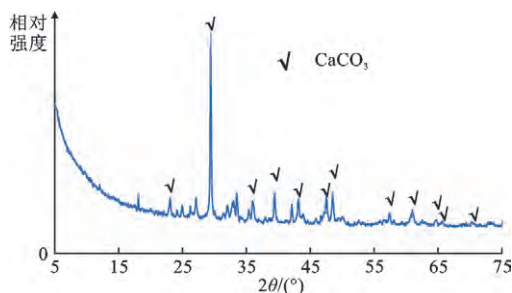


图 5 碳化钢渣粗颗粒表面剥落物质的 XRD 分析结果

Fig. 5 XRD Analysis Results of Peeling Parts from Surface of Carbonized SSCA

生如此多的 CaCO_3 产物。因此, CaCO_3 只可能来自于碳化钢渣表面的产物层。说明产物层在冻融循环损伤过程中发生了破坏。此外, XRD 图谱还显示有一些其他矿物的衍射峰, 这些衍射峰的位置与图 1 有很好的对应, 说明冻融循环损伤也同样对产物层下未碳化的原渣造成了破坏。

综上, 钢渣粗集料沥青混凝土对冻融循环损伤比较敏感, 其原因主要归结于渗入碳化钢渣粗颗粒表面的水分造成 CaCO_3 产物层结构的破坏。因此, 陈化处置虽然改善了钢渣的体积稳定性, 但使钢渣粗集料产生了新的性能缺陷。为改善碳化钢渣粗集料沥青混凝土在冻融循环损伤下的耐久性, 避免水分进入 CaCO_3 产物层是关键。水分欲进入 CaCO_3 产物层, 必须先破坏产物层与沥青胶浆间的黏附界面。基于此, 本研究拟通过对碳化钢渣-沥青胶浆黏附界面的增强来阻隔水分进入 CaCO_3 产物层。如图 4(a) 所示, 可采用高黏度的 SBS 改性沥青和碱性填料强化碳化钢渣与沥青胶浆间的黏结。

3.1.2 钢渣细集料

钢渣细集料在陈化过程中, 细颗粒表面也逐渐由灰黑色转变为灰白色, 说明同样产生了 CaCO_3 产物。钢渣细集料同时还含有大量的粉料, 同样受钢渣胶凝活性的影响, 细集料中的粉料和细颗粒相互胶结在一起, 最终固结为钢渣块, 如图 6 所示。因此, 钢渣细集料的颗粒级配在陈化过程中发生了显著的改变, 致使其难以直接作为细集料用于沥青混凝土中。同时, 由于钢渣细集料中的颗粒与粉料团聚、固结在一起, 使得部分 f-CaO 可能未充分完成碳化反应, 将钢渣细集料与粗集料一起用于沥青混凝土中, 有可能会进一步加剧沥青混凝土潜在的体积膨胀问题, 因而不建议将钢渣细集料用于制备沥青混凝土。而在制备钢渣集料时, 钢渣细集料占 40%~60%, 实现此部分钢渣的再利用是 100% 循

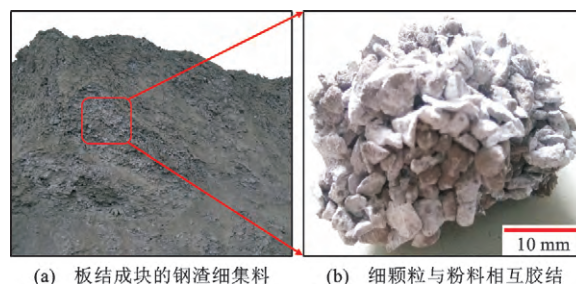


图 6 钢渣细集料外观

Fig. 6 Appearance of Steel Slag Fine Aggregate

环处置钢渣的必然需求。

采用 XRF 对碳化后固结成块的钢渣细集料进行化学组成分析(图 7)。结果表明, 碳化钢渣细集料的主要化学组成为 CaO 、 Fe_2O_3 和 SiO_2 , 这和钢渣富含硅酸盐矿物和复杂的 RO 固溶体一致。XRF 提供的元素氧化物含量是通过计算加以确定的, 不能完全反映出多价态元素在钢渣中的所有氧化物形式。例如, 钢渣中铁元素以单质铁和 FeO 、 Fe_2O_3 等多种形式存在, 而 XRF 提供的结果未加以区分, 全部按 Fe_2O_3 对待。此外, 钢渣还含有少量的 MgO 、 Al_2O_3 和极少量的 P_2O_5 。一直以来, 游离氧化镁(f-MgO)也被认为是引起钢渣体积不稳定的矿物之一。但本研究中, 在未碳化的原渣中没有检测到 f-MgO (图 1), 且在碳化钢渣表面剥落物质中也未发现氢氧化镁($\text{Mg}(\text{OH})_2$)或者碳酸镁(MgCO_3)的存在(图 5)。由此说明, 包钢钢渣中的 MgO 主要以 f-MgO 以外的形式存在。Mason^[26] 基于钢渣中 CaO 、 SiO_2 和 P_2O_5 的含量提出了碱度 M 计算公式, 如式(4)所示。根据碱度的不同, 钢渣通常被分为低碱度渣($M < 1.8$)、中碱度渣($1.8 < M < 2.5$)和高碱度渣($M > 2.5$)^[27]。按照式(4)确定本研究中所用碳化钢渣细集料的碱度为 2.78, 因此为高碱度渣。

$$M = \frac{W_{\text{CaO}}}{W_{\text{SiO}_2} + W_{\text{P}_2\text{O}_5}} \quad (4)$$

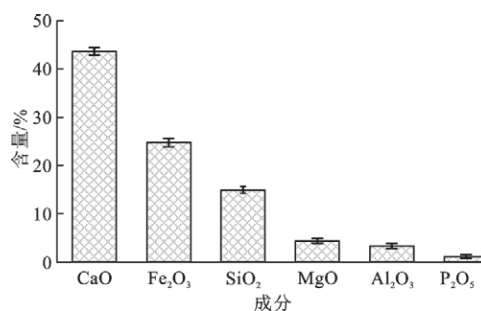


图 7 碳化钢渣细集料的 XRF 分析结果

Fig. 7 XRF Analysis Results of Carbonized SSFA

在中国沥青路面建设中, 填料主要采用石灰石磨制而成的矿粉。石灰石矿粉所含矿物成分比较单

一,主要为 CaCO_3 ,如图 8(a)所示。正因为含有丰富的 CaCO_3 ,XRF 分析结果显示,按照元素的氧化物形式来看, CaO 和 CO_2 的含量也非常高。由图 8(b)可知, CaO 和 CO_2 的含量比值为 56:42,这与 CaO 和 CO_2 分子量的比值 56:44 非常接近,说明 XRD 与 XRF 的分析结果形成较好的对应。在沥青混凝土中,填料和细集料的粉料部分与沥青形成胶浆。而为了改善沥青胶浆与集料骨架间的黏附性能,在实际工程中往往会采用碱性填料部分或者全部替代石灰石矿粉,如水泥、熟石灰等。钢渣所含 f- CaO 和硅酸盐等矿物的自发碳酸化过程可产生 CaCO_3 ,而石灰石矿粉主要含 CaCO_3 ,说明钢渣的碱性比石灰石矿粉更强。对于碳化钢渣细集料,虽然表面发生了碳化,但内部可碳化矿物含量依然丰富,同时碳化钢渣细集料也属于高碱度渣。因此,考虑到碳化钢渣细集料具有很好的碱性,为克服其板结硬化而不能以细集料形态继续使用的问题,本研究中将板结硬化的碳化钢渣细集料进一步加工成为钢渣粉,将其与 SBS 改性沥青复合利用到含碳化钢渣粗集料的沥青混凝土体系中,从而提高碳化钢渣粗集料表面 CaCO_3 产物层在冻融循环损伤下的耐久性[图 4(a)]。

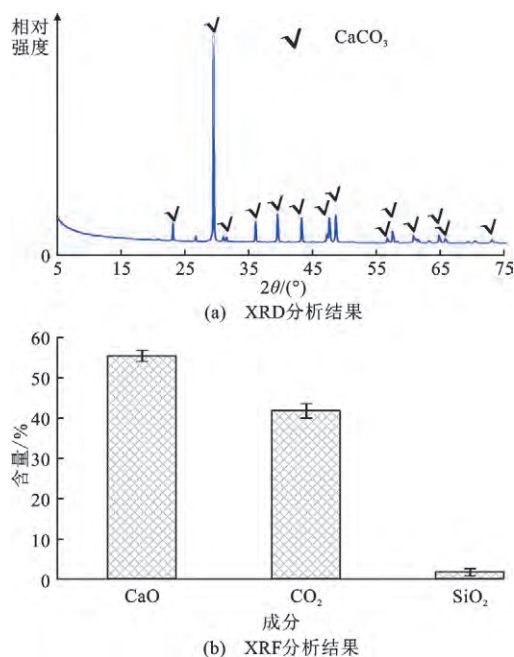


图 8 石灰石矿粉的物相及化学成分

Fig. 8 Mineral Phases and Chemical Compositions Analysis Results of Limestone Powder

3.2 铁渣材料特征

铁渣的 XRD 分析结果如图 9 所示,从衍射峰分布来看,铁渣的矿物组成较为简洁,不像钢渣那样

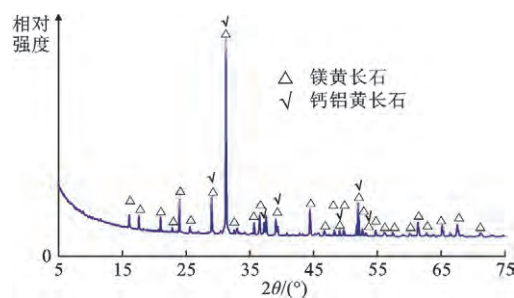


图 9 铁渣的 XRD 分析结果

Fig. 9 XRD Analysis Results of Iron Slag

复杂。铁渣主要含有镁黄长石和钙铝黄长石,但这 2 类矿物同时以多种不同分子量的结构形式存在,前者主要为 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$,后者主要为 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 。铁渣中未检测到 f- CaO 等对铁渣体积稳定性有害的矿物,因而就体积稳定性而言,相较于钢渣,将铁渣应用到沥青混凝土中更具有优势。

然而仅从铁渣粗集料的外观即可判定其不适宜用于沥青混凝土中,如图 10 所示,铁渣粗集料存在大量的针片状颗粒。这一方面不利于拌和时沥青对集料颗粒的充分润湿,另一方面,粗集料中针片状颗粒过多会对沥青混凝土的压实及强度等产生极其不利的影响。此外,图 10 还显示,部分铁渣粗集料颗粒的表面形貌粗糙、质地疏松,且存在大量的宏观孔隙及腔道结构。这些特征势必会影响到铁渣粗集料的耐磨性能及承载能力。因此,进一步对比分析了铁渣粗集料和普通石灰石粗集料的针片状含量、洛杉矶磨耗以及压碎值这 3 类粗集料技术性能指标。结果如图 11 所示,铁渣粗集料的针片状含量、洛杉矶磨耗以及压碎值分别达到 19.2%、26.3% 和 28.6%。相较于常用的石灰石粗集料,铁渣粗集料的这 3 类指标分别高出 113%、23% 和 53%,因此铁渣并不适合作为粗集料使用到沥青混凝土中。将铁渣粗集料进一步破碎为细集料,不仅可以消除针片状颗粒,还可以减少大量的宏观孔隙及腔道结构。因此,本研究中将铁渣全部加工为细集料使用,以此克服铁渣粗集料存在的性能缺陷问题。

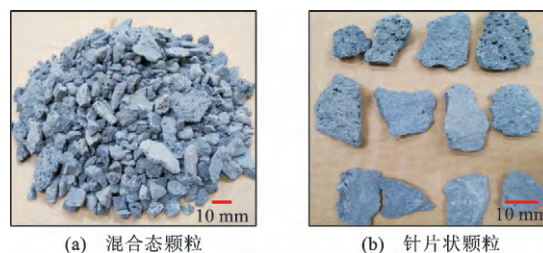


图 10 铁渣粗集料外观形貌

Fig. 10 Appearance of Iron Slag Coarse Aggregate

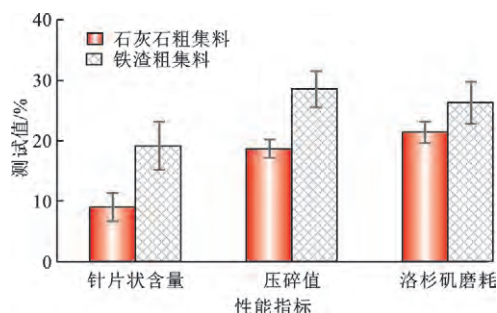


图 11 粗集料技术性能指标测试结果

Fig. 11 Test Results of Some Technical Property Indexes of Coarse Aggregates

综上,通过分析钢渣和铁渣的材料特征,为促进钢渣和铁渣在沥青混凝土中的梯级利用,可将钢渣加工为粗集料和填料以规避钢渣细集料团聚、固化成块的问题,同时可将铁渣全部加工为细集料以规避铁渣粗集料部分技术指标不佳的问题。基于钢渣粗集料(粒径 $>4.75\text{ mm}$)、铁渣细集料(粒径 $<4.75\text{ mm}$)以及钢渣粉填料($<0.6\text{ mm}$)的粒径搭配,理论上可以实现对沥青混凝土矿料的100%替代。

3.3 设计沥青混凝土

本研究的最终目的是实现钢渣和铁渣在沥青混凝土中的梯级利用,考虑到石灰石是在沥青混凝土中最常用的矿料,因而考察了采用不同粒径钢渣和铁渣逐级替代石灰石矿料时的沥青混凝土性能特征。因此,共涉及到4种沥青混凝土,如表2所示。所有原材料的基本技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求。其中钢渣粗集料经历了足够长时间的陈化处置,表面发生了碳化。

表 2 沥青混凝土的原材料组成

Table 2 Raw Materials Types in Asphalt Concretes

混凝土编号	粗集料	细集料	填料	沥青
G1	石灰石	石灰石	矿粉	SBS 改性 沥青
G2	钢渣	石灰石	矿粉	
G3	钢渣	铁渣	矿粉	
G4	钢渣	铁渣	钢渣粉	

在设计沥青混凝土时,通常按照质量比将粗集料、细集料和填料进行掺配。但对于原材料种类不同的沥青混凝土,因不同原材料的密度存在差别,按照相同的质量比进行掺配会造成不同沥青混凝土的体积组成不一致。例如表2中的G1和G2沥青混凝土,假设粗集料、细集料和填料的质量掺配比为 $a:b:c$,在G1的矿料中,粗集料、细集料和填料的体积比为 $[a/\rho_1]:[b/\rho_2]:[c/\rho_3]$,其中 ρ_1, ρ_2, ρ_3 分别为

石灰岩粗集料、石灰石细集料、石灰石矿粉的密度;而对于G2,这一比例则为 $[a/\rho_1]:[b/\rho_2]:[c/\rho_3]$,其中 ρ_4 为碳化钢渣粗集料的密度。石灰石粗集料的密度一般在 $2.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右,而碳化钢渣粗集料的密度则往往高于 $3.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,密度的显著差别致使G1和G2的体积构成不同。因此对比研究G1和G2时,难以确定沥青混凝土性能上的差别是否仅因粗集料类型不同而引起。

为了消除变量,对于原材料种类不同的沥青混凝土,本研究中按照相同的体积比将粗集料、细集料和填料进行掺配。而集料的密度又分为毛体积密度、表观密度等多个类型,因此按照体积比反算集料的掺配质量时,应考虑集料不同类型密度的适用性。集料的密度与其体积构成直接相关。对于单个集料颗粒,其体积构成包括3个部分:矿物实体体积(V_s)、内部闭口孔隙体积(V_b)和表面开口孔隙体积(V_k),如图12(a)所示。在沥青混凝土中,集料颗粒以被沥青胶浆包裹的状态存在,虽然其表面的开口孔隙可能部分被沥青胶浆填充,但并未改变集料颗粒的总体积,沥青胶浆包裹的集料颗粒同时包含了 V_s, V_b 和 V_k ,而毛体积密度正是基于这3者体积之和加以确定的

$$\rho_m = \frac{m}{V_s + V_b + V_k} \quad (5)$$

式中: ρ_m 为毛体积密度; m 为集料的干质量。

对于不同类型的集料,集料颗粒的开口孔隙和闭口孔隙在数量及体积上均存在很大区别,例如钢渣和天然石灰石,前者被证明是一种多孔材料^[5,22],富含开口孔隙和闭口孔隙。为了便于研究,本研究中将碳化钢渣粗集料、铁渣细集料的粒度组成提前调整到与普通天然石灰石集料相一致。对于粒径相当的不同类型集料颗粒,虽然其开口孔隙和闭口孔隙在数量及体积上均存在较大区别,但沥青胶浆层围住的集料颗粒体积仍然比较接近,同时包含了集料实体部分、开口孔隙和闭口孔隙三部分的体积,如图12(b)所示。

综上,本研究中采用毛体积密度反算不同类型集料的掺配质量。粗集料、细集料和填料的体积掺配比分别为46%、50%和4%。集料占到沥青混凝土矿料总体积的96%,主要因不同类型集料的毛体积密度存在较大区别,如本研究中所用石灰石粗集料和碳化钢渣粗集料的毛体积密度分别为 $2.688\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $3.335\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,在以质量通过率为纵坐标的坐标系下,不同沥青混凝土的合成级配曲线会存在差异,如图13所示。

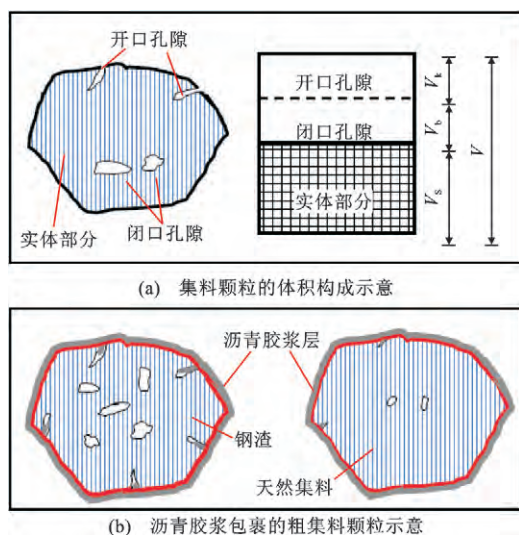


图 12 体积构成示意

Fig. 12 Schematic Diagram of Volume Compositions

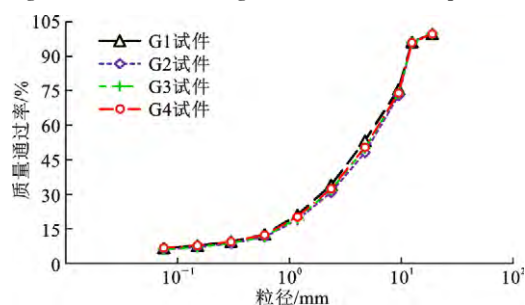


图 13 合成级配曲线

Fig. 13 Hybrid Gradation Curves

按照 Superpave 方法确定 G1, G2, G3 和 G4 试件的体积参数均满足设计要求时的最佳沥青用量分别为 4.8%、4.9%、5.1% 和 5.1%。这说明碳化钢渣粗集料和铁渣细集料均增加了沥青用量,且铁渣细集料引起的沥青增加更显著。这与铁渣细集料的表面形态有很大关系,一方面,铁渣细集料颗粒的表面非常粗糙,且存在宏观孔隙及腔道结构;另一方面,SEM 分析结果[图 14(a)、(b)]显示,铁渣细集料的微观表面颗粒感明显,且存在大量孔径介于几微米到几十微米之间的孔隙。正是因为铁渣细集料粗糙及多孔腔的宏微观表面构造增加了其对沥青的吸附和吸收。采用钢渣粉替代常用的石灰石矿粉并没有改变沥青混凝土的最佳沥青用量,这一方面得益于填料在沥青混凝土中的低占比;另一方面,钢渣粉颗粒和石灰石矿粉颗粒微观特征较为一致[图 14(c)、(d)],不同于钢渣集料,钢渣粉颗粒表面呈现极少的孔隙。

3.4 体积稳定性

在沥青混凝土试件的浸水过程中,发现部分含碳化钢渣粗集料的试件并非发生均匀的膨胀,局部

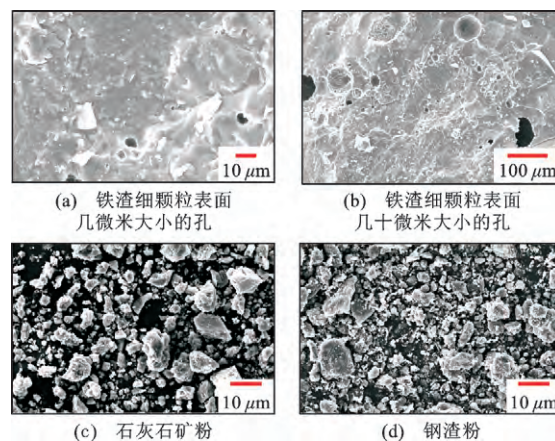


图 14 SEM 图像

Fig. 14 SEM Images

区域出现鼓包现象,如图 15(a)所示。这主要是受钢渣粗集料颗粒不规则形态的影响,不同于石灰石等天然粗集料,钢渣粗集料颗粒表面存在诸多内陷结构(图 2)。在沥青混凝土拌和过程中,沥青主要与粉料形成胶浆。粉体来源于填料和细集料的粉料部分,因而粉体的数量可观,这使得沥青胶浆的黏度大、流动性差,因而难以实现对钢渣粗颗粒内陷结构区域的快速润湿,造成钢渣粗集料颗粒表面未被沥青胶浆充分包裹[图 15(b)]。粗颗粒表面裸露区域接触到水分继续发生碳化反应,造成沥青混凝土试件局部区域出现膨胀、鼓包现象,由此也说明钢渣的陈化处置效率低、可靠性差。

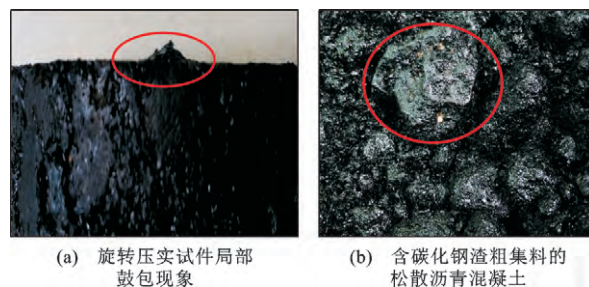


图 15 钢渣沥青混凝土的膨胀破坏及其诱因

Fig. 15 Expansive Destruction of Steel

Slag Asphalt Concrete and Its Cause

为使沥青混凝土拌和过程中碳化钢渣粗集料颗粒表面能被沥青胶浆完全包裹,本研究设计了一种室内拌制沥青混凝土的改进型拌和工艺。如图 16 所示,按照预设或设计确定的沥青用量,先将碳化钢渣粗集料与半份 SBS 改性沥青拌和,再掺入细集料、填料和剩下的半份 SBS 改性沥青继续拌和。采用该方法拌制的沥青混凝土,压实成型后,未在浸水过程中出现局部膨胀、鼓包的现象,说明碳化钢渣粗颗粒表面与沥青的接触状态得到了显著改善。

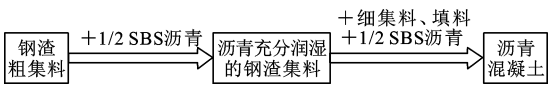


图 16 改进型拌和工艺
Fig. 16 Modified Mixing Procedure

沥青混凝土试件的体积膨胀率结果如图 17 所示。由图 17 可见,4 种沥青混凝土试件在 60℃ 水浴中连续浸泡 3 d 后的体积就已经趋于稳定。虽然沥青混凝土的体积膨胀率未随钢渣和铁渣对石灰石矿料的逐级替代表现出明显的规律,但 4 种沥青混凝土试件的浸水膨胀率均很低,在 1.0%~1.5% 范围内波动。同时,完全以石灰石为矿料的沥青混凝土试件(G1),体积膨胀率也达到 1.2%,与其他含钢渣或铁渣的沥青混凝土试件体积膨胀率相当。由此说明沥青混凝土试件的体积膨胀是长期热水作用下的自然变化,而不是碳化钢渣粗集料与热水进一步反应的结果。这也间接证实采用 SBS 改性沥青和改进型拌和工艺实现了沥青胶浆对碳化钢渣粗集料表面的充分包裹。

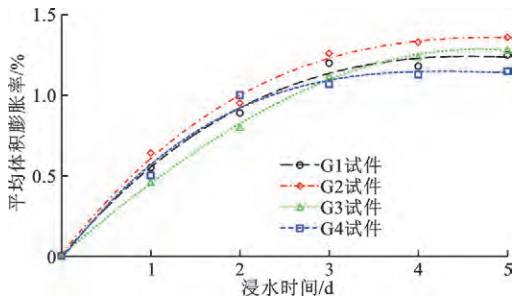


图 17 沥青混凝土试件的体积膨胀率
Fig. 17 Volume Expansion Ratio of Asphalt Concrete Specimens

3.5 抗水损害性能

RMS 试验结果(图 18)显示,沥青混凝土对热水损伤较敏感。随着浸水时间的延长,采用碳化钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉填料逐级替代石灰石矿料制备的沥青混凝土试件,其 RMS 均呈现不同程度的下降;且 4 种沥青混凝土 RMS 之间的差别也逐渐被放大。这说明对于不同组成的沥青混凝土,其 RMS 随热水损伤时间的延长表现出不一致的衰减特征。具体来看,经过 24 h 的热水损伤,G1,G2,G3 和 G4 的 RMS 值分别下降了 5.9%、5.7%、6.3%和 5.3%;而当热水损伤时间达到 72 h 时,4 种沥青混凝土试件的 RMS 值则分别累积下降了 12.6%、11.4%、13.5%和 10.8%。这表明碳化钢渣粗集料和钢渣粉填料可提高沥青混凝土抵抗热水破坏的能力,尤其当沥青混凝土面临长时间的热水

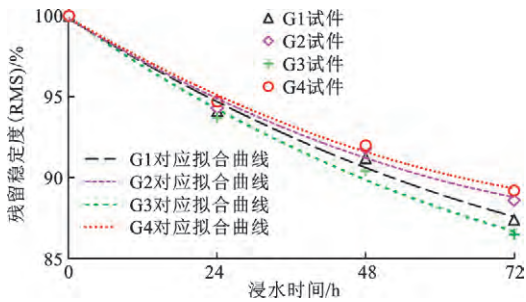


图 18 沥青混凝土的 RMS 试验结果
Fig. 18 RMS Results of Asphalt Concretes

损伤时,而铁渣细集料则起负面影响。经过 72 h 的热水损伤,G4 的 RMS 值仍比 G1 高出 1.8%,这表明钢渣粉有效弥补了铁渣细集料对沥青混凝土抗热水损伤性能造成的负面影响。

由于不同类型沥青混凝土在同一浸水时间下的 RMS 差别不显著,为增加结果的可信度,进一步通过对 RMS 的拟合分析直观揭示碳化钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉对沥青混凝土抗热水损害性能的影响。研究表明,采用二阶方程可以很好地反映出不同沥青混凝土试件的 RMS 随浸水时间的变化关系(判定系数 $R^2 > 0.98$),拟合结果如表 3 所示。方程的一阶导数 z' 对应拟合曲线(图 18)的斜率,其绝对值 $|z'|$ 反映沥青混凝土 RMS 的下降速率。分析发现,当浸水时间 $t \in [0 \text{ h}, 72 \text{ h}]$,G1,G2,G3 和 G4 对应的 $|z'|$ 恒满足 $|z'_3| > |z'_1| > |z'_2| > |z'_4|$ 。这说明 G3 对热水损伤最为敏感,随浸水时间的延长,其 RMS 下降最迅速,由此可见,铁渣削弱了沥青混凝土在热水损伤下的耐久性; $|z'_2|$ 和 $|z'_4|$ 均小于 $|z'_1|$,说明碳化钢渣粗集料以及钢渣粉均提高了沥青混凝土抵抗热水损害的能力。拟合结果进一步证实矿料全部被碳化钢渣粗集料、铁渣细集料以及钢渣粉替代后的沥青混凝土具有比普通石灰石沥青混凝土更优越的抗热水损害性能。

表 3 沥青混凝土 RMS 的拟合方程

Table 3 Fitting Equations of RMS of Asphalt Concretes			
混凝土编号	拟合方程	一阶导数	R^2
G1	$y=0.000\ 9t^2-0.235\ 2t+99.805$	$z'=0.001\ 8t-0.235\ 2$	0.991
G2	$y=0.001\ 1t^2-0.231t+99.805$	$z'=0.002\ 2t-0.231$	0.989
G3	$y=0.001t^2-0.257\ 5t+99.82$	$z'=0.002t-0.257\ 5$	0.993
G4	$y=0.001\ 1t^2-0.224\ 4t+99.865$	$z'=0.002\ 2t-0.224\ 4$	0.994

图 19 为 4 种沥青混凝土的 TSR 试验结果。由

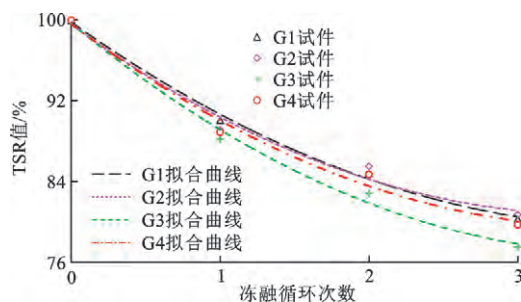


图 19 沥青混凝土的 TSR 试验结果

Fig. 19 TSR Results of Asphalt Concretes

图 19 可知: TSR 的总体变化与 RMS 类似, 4 种沥青混凝土的 TSR 均随冻融循环次数的增加而显著下降; 不同粒径的钢渣和铁渣对沥青混凝土 TSR 的影响随冻融循环次数的增加而逐渐被放大。但相较于 RMS 试验, 碳化钢渣粗集料在 TSR 试验中扮演的角色又有所不同。当冻融循环次数增加到 3 次时, G1, G2, G3 和 G4 的 TSR 衰减量分别达到 19.7%、19.3%、22.5% 和 20.3%。这说明碳化钢渣粗集料并没有明显改善沥青混凝土抵抗冻融循环破坏的能力。这一点与以往研究结论相符, 在冻融循环破坏下, 进入碳化钢渣粗集料表面 CaCO_3 产物层的水分极易造成产物层开裂, 采用基质沥青包裹碳化钢渣粗集料亦不能有效避免水分对 CaCO_3 产物层的破坏^[22]。G1 和 G2 的 TSR 衰减程度相当, 这说明相比基质沥青, SBS 改性沥青对碳化钢渣粗集料表面 CaCO_3 产物层的保护是有效的。在 TSR 试验中, 铁渣细集料同样明显削弱了沥青混凝土的抗冻融破坏能力。随着钢渣粉的引入, 沥青混凝土试件的 TSR 值又得到很大程度的恢复, 但 G4 的 TSR 数值上仍然略低于 G1, 这说明铁渣细集料对沥青混凝土 TSR 的影响比对 RMS 的影响更显著。G4 和 G1 的 TSR 相差不大, 表明矿料全部被碳化钢渣粗集料、铁渣细集料以及钢渣粉替换后的沥青混凝土也具有和普通石灰石沥青混凝土水平相当的抗冻融破坏性能。

同样, 考虑到由于不同类型沥青混凝土在同一冻融循环破坏次数下的 TSR 差别不大, 为增加结果的可信度, 对 TSR 进一步进行了拟合分析, 结果如表 4 所示, 拟合结果也进一步支撑了前述结论。对于 G1, G2, G3 和 G4, 当冻融循环次数 $x \in [0, 3]$ 时, 虽然四者 TSR 拟合方程对应一阶导数的绝对值 $|y'|$ 未表现出单一的大小顺序关系, 但始终满足 G3 的该值最大。由此也说明铁渣细集料使沥青混凝土对冻融循环破坏变得敏感。

表 4 沥青混凝土 TSR 的拟合方程

Table 4 Fitting Equations of TSR of Asphalt Concretes

混凝土编号	拟合方程	一阶导数	R^2
G1	$y = 1.35x^2 - 10.49x + 99.81$	$y' = 2.7x - 10.49$	0.997
G2	$y = 1.525x^2 - 10.745x + 99.605$	$y' = 3.05x - 10.745$	0.985
G3	$y = 1.625x^2 - 12.185x + 99.715$	$y' = 3.25x - 12.185$	0.994
G4	$y = 1.525x^2 - 11.085x + 99.615$	$y' = 3.05x - 11.085$	0.987

3.6 抗高温变形性能

沥青混凝土试件的蠕变主要包括 3 个阶段^[28], 如图 20 所示。第 1 阶段, 试件的变形速率快速下降, 直至趋近于一个恒定值; 第 2 阶段, 试件的变形速率则基本保持在这一恒定值, 试件的累积应变稳步上升; 而进入到第 3 阶段, 试件的变形情况则大为不同, 变形速率快速增加, 累积应变短时间内就达到试件的承受极限, 致使试件发生失稳破坏。因此可采用第 3 阶段起点(第 2 阶段终点)对应的荷载作用次数(流动次数, F_n)来反映沥青混凝土抗高温变形的能力极限。

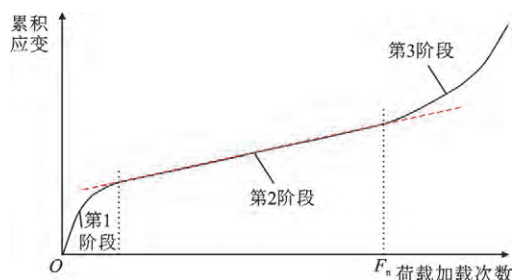


图 20 三阶段变形曲线

Fig. 20 Three-stage Deformation Curve

4 种沥青混凝土的动态蠕变试验结果如图 21 所示, 随着碳化钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉填料对石灰石矿料的逐级替代, 沥青混凝土的流动次数 F_n 从 17 850 逐渐升高至 21 000 左右。这说明碳化钢渣粗集料、铁渣细集料以及钢渣粉均不同程度地改善了沥青混凝土的高温抗变形能力。具体来看, G2, G3 和 G4 的 F_n 分别为 G1 的 113%、117% 和 118%, 表明碳化钢渣粗集料对沥青混凝土的高温抗变形性能改善效果最佳, 铁渣细集料次之, 而钢渣粉的贡献则比较微弱。这得益于碳化钢渣粗集料和铁渣细集料颗粒丰富的棱角以及粗糙的表面构造, 通过集料颗粒间的接触形成了稳定的嵌挤结构。在 4 种沥青混凝土中, 采用钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉制备的沥青混凝土高温稳定性最佳。

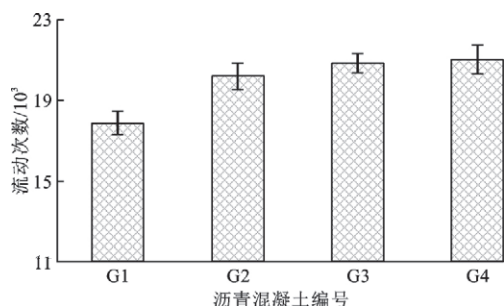


图 21 沥青混凝土的动态蠕变试验结果

Fig. 21 Dynamic Creep Test Results of Asphalt Concretes

3.7 抗低温开裂性能

弯拉应变常用于评价沥青混凝土路面的低温性能,但单一指标难以综合反映沥青混凝土的低温性能。例如,对于承载力高而弯拉应变低的沥青混凝土路面,可能同样具有非常好的低温抗裂性能。因此,除了低温下的弯拉应变,本研究中还引入了断裂能指标,断裂能同时涉及到沥青混凝土的低温弯拉应变和强度,科学性更强,这一指标也在其他研究中得到广泛采用^[29-30]。基于数据采集系统实时记录的荷载及试件变形情况确定小梁试件在受弯破坏过程中的实时应力和应变,按照式(6)和图 22 确定小梁试件的断裂能。采用小梁试件断裂时的最大弯拉应变以及断裂能来反映沥青混凝土的低温抗裂性能。

$$f_e = 10^{-3} \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (6)$$

式中: f_e 为小梁试件的断裂能; ϵ_f 为小梁试件断裂时的最大弯拉应变; σ 和 ϵ 分别为小梁试件受弯破坏过程中的实时弯拉应力和应变。

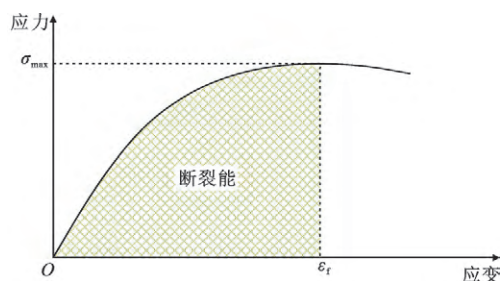


图 22 断裂能示意

Fig. 22 Schematic Diagram of Fracture Energy

最大弯拉应变和断裂能结果(图 23)显示,碳化钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉对沥青混凝土的最大弯拉应变和断裂能产生的影响正好相反。G2, G3 和 G4 的最大弯拉应变比 G1 分别低了 1%、5% 和 9%,可见碳化钢渣粗集料对沥青混凝土低温弯拉应变的影响微弱,而铁渣细集料和钢渣粉对其产

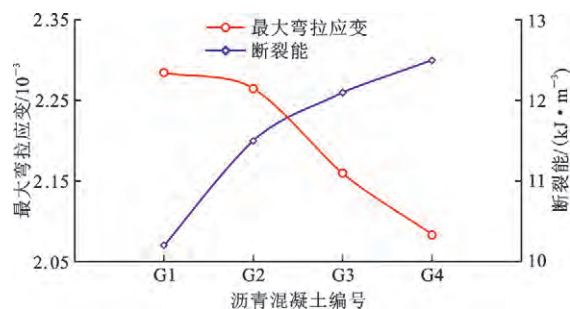


图 23 沥青混凝土的低温弯曲试验结果

Fig. 23 Low-temperature Bending Test Results of Asphalt Concretes

生的不利影响则较为显著。这主要是因为沥青混凝土的低温弯拉应变很大程度上受沥青胶浆的支配,而铁渣细集料中的粉料和钢渣粉是沥青胶浆的主成分。弯拉应变结果表明在沥青胶浆中引入铁渣粉或者钢渣粉使沥青混凝土在低温下变得更硬。不同于最大弯拉应变的变化规律,G2, G3 和 G4 的断裂能则比 G1 分别提高了 13%、19% 和 23%。这说明虽然碳化钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉的加入不同程度地减小了沥青混凝土的最大弯拉应变,但却显著提高了沥青混凝土的开裂能,尤其将三者复合使用时,开裂能达到最大。因此,从断裂能角度分析,矿质混合料完全由碳化钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉组成的沥青混凝土仍具有较好的低温抗裂性能。

4 结 语

为实现钢渣和铁渣 2 类冶炼固废在沥青混凝土中的梯级利用,本文从材料特征方面探讨了采用不同粒径的钢渣和铁渣 100% 代替沥青混凝土矿料的可行性。主要得到以下结论:

(1) 钢渣粗集料表面碳化产物层在冻融循环损伤下易发生膨胀开裂;受钢渣自身胶凝活性的影响,碳化钢渣细集料易团聚、固化成块,使得集料级配发生显著改变而无法使用。因其具有高碱性,适合被进一步加工成钢渣粉,作为沥青混凝土填料使用。

(2) 铁渣粗集料技术性能不佳,其针片状含量、洛杉矶磨耗以及压碎值分别比常用的石灰石粗集料高出 113%、23% 和 53%,因而其不适合作为粗集料用于沥青混凝土中。建议将铁渣粗集料进一步加工为细集料使用。

(3) 因部分钢渣粗集料颗粒表面存在许多内陷构造区,使得拌和过程中沥青胶浆难以快速润湿这些区域。采用碳化钢渣粗集料与部分沥青预先拌

和,再与余下的细集料、填料以及沥青二次拌和的改性工艺可实现沥青胶浆对碳化钢渣集料表面的完全包裹。

(4) 采用钢渣粗集料、铁渣细集料和钢渣粉 100% 替代常用的石灰石矿料,结合使用高黏度的 SBS 改性沥青和改进型混合料拌和工艺,可制备出性能优良的沥青混凝土。且其部分性能指标优势显著:钢渣和铁渣的引入可将沥青混凝土高温下的流动次数(F_n)以及低温下的断裂能分别提高 18% 和 23%。

(5) 本文结论主要基于室内试验获得,矿料 100% 被不同粒径钢渣和铁渣替代的沥青混凝土在服役环境下的实际耐久性表现,还有待于未来通过铺筑沥青混凝土试验路段来进一步验证。

参考文献:

References:

- [1] CHANG X W, ZHANG R H, XIAO Y, et al. Mapping of Publications on Asphalt Pavement and Bitumen Materials: A Bibliometric Review [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117370.
- [2] CHEN Z W, JIAO Y Y, WU S P, et al. Moisture-induced Damage Resistance of Asphalt Mixture Entirely Composed of Gneiss and Steel Slag [J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 332-341.
- [3] 于华洋,马涛,王大为,等.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.
YU Hua-yang, MA Tao, WANG Da-wei, et al. Review on China's Pavement Engineering Research · 2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (10): 1-66.
- [4] LENG Z, PADHAN R K, SREERAM A. Production of a Sustainable Paving Material Through Chemical Recycling of Waste PET into Crumb Rubber Modified Asphalt [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180: 682-688.
- [5] 李超,陈宗武,谢君,等.钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J].材料导报,2017,31(3):86-95, 122.
LI Chao, CHEN Zong-wu, XIE Jun, et al. A Technological and Applicational Review on Steel Slag Asphalt Mixture [J]. Materials Reports, 2017, 31 (3): 86-95, 122.
- [6] 何亮,詹程阳,吕松涛,等.钢渣沥青混凝土应用现状[J].交通运输工程学报,2020,20(2):15-33.
HE Liang, ZHAN Cheng-yang, LV Song-tao, et al. Application Status of Steel Slag Asphalt Mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20 (2): 15-33.
- [7] 肖飞鹏,王涛,王嘉宇,等.橡胶沥青路面降噪技术原理与研究进展[J].中国公路学报,2019,32(4):73-91.
XIAO Fei-peng, WANG Tao, WANG Jia-yu, et al. Mechanism and Research Development of Noise Reduction Technology of Rubberized Asphalt Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4): 73-91.
- [8] LENG Z, SREERAM A, PADHAN R K, et al. Value-added Application of Waste PET Based Additives in Bituminous Mixtures Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 615-625.
- [9] ZHAO Z, XIAO F P, AMIRKHANIA S. Recent Applications of Waste Solid Materials in Pavement Engineering [J]. Waste Management, 2020, 108: 78-105.
- [10] 姚爱玲,徐德龙,孙治军.矿渣粉作为填料的沥青混凝土性能试验[J].中国公路学报,2006,19(6):25-29.
YAO Ai-ling, XU De-long, SUN Zhi-jun. Performance Test on Asphalt Mixture of Slag Powder as Filling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (6): 25-29.
- [11] SHEN D, WU C, DU J. 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.
- [12] 董诗婕.风冷高炉渣水化特性研究[D].北京:北京工业大学,2014.
DONG Shi-jie. The Research on The Hydration Characteristics of Air Cooling Slag [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [13] LI Y, QIAO C Y, NI W. Green Concrete with Ground Granulated Blast-furnace Slag Activated by Desulfurization Gypsum and Electric Arc Furnace Reducing Slag [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122212.
- [14] GAO D Y, MENG Y, YANG L, et al. Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Properties of Calcium Sulfoaluminate Cement [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116665.
- [15] 孙长新,王秉纲.高炉重矿渣在沥青混凝土路面中的应用研究[J].中国公路学报,1994,7(2):9-14,26.
SUN Chang-xin, WANG Bing-gang. Application of

- the Blast Furnace Heavy Slag in Asphalt Concrete Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 1994, 7 (2): 9-14, 26.
- [16] KAMBOLE C, PAIGE-GREEN P, KUPOLATI W K, et al. Basic Oxygen Furnace Slag for Road Pavements: A Review of Material Characteristics and Performance for Effective Utilization in Southern Africa [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 618-631.
- [17] CHEN Z W, 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): 1242-1253.
- [18] AHMEDZADE P, SENGÖZ B. Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165 (1): 300-305.
- [19] XUE Y J, WU S P, HOU H B, et al. Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138 (2): 261-268.
- [20] XIE J, WU S P, LIN J T, et al. Recycling of Basic Oxygen Furnace Slag in Asphalt Mixture: Material Characterization & Moisture Damage Investigation [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 467-474.
- [21] COOMARASAMY A, WALZAK T. Effects of Moisture on Surface Chemistry of Steel Slags and Steel Slag-asphalt Paving Mixes [J]. Transportation Research Record, 1995 (1492): 85-95.
- [22] CHEN Z W, WU S P, XIAO Y, et al. Effect of Hydration and Silicone Resin on Basic Oxygen Furnace Slag and Its Asphalt Mixture [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 392-400.
- [23] CHEN Z W, WU S P, WEN J, et al. Utilization of Gneiss Coarse Aggregate and Steel Slag Fine Aggregate in Asphalt Mixture [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 911-918.
- [24] KANDHAL P, HOFFMAN G. Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-mix Asphalt Mixtures [J]. Transportation Research Record, 1997 (1583): 28-36.
- [25] JUCKES L M. The Volume Stability of Modern Steelmaking Slags [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2003, 112 (3): 177-197.
- [26] MASON B. The Constitution of Some Open-hearth Slag [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 1994, 11: 69-80.
- [27] WANG Q, YAN P, HAN S. The Influence of Steel Slag on the Hydration of Cement During the Hydration Process of Complex Binder [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54 (2): 388-394.
- [28] CHEN Z W, WU S P, LI F Z, 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, 73: 137-144.
- [29] ZHANG J P, TAN H Q, PEI J Z, et al. Evaluating Crack Resistance of Asphalt Mixture Based on Essential Fracture Energy and Fracture Toughness [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19 (4): 06019005.
- [30] WANG X Y, ZHANG J H, LI K, et al. Cracking Analysis of Asphalt Mixture Using Semi-circle Bending Method [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 45 (1): 269-279.