

基于差异磨光的沥青路面抗滑性能研究进展

李松¹, 翟嘉辉², 熊锐^{2*}, 李闯², 李科宏², 蒋汶玉²

(1. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2. 长安大学 材料科学与工程学院)

摘要:为保证道路行车安全,沥青路面上面层一般要求采用具有优异抗磨光和抗磨耗性能的集料。但随着中国公路建设速度的提升及优质石料资源的不断消耗,利用优劣集料间的差异磨光特点铺筑高抗滑沥青路面表层的理念逐渐引发关注。该文概述了路表常用粗集料的材料特性及复配沥青混合料的组成设计,介绍了不同天然集料、固体废物、人造集料复配沥青混合料的抗滑性能,分析了差异磨光的原理与磨光检测设备,剖析了现有研究存在的问题,并进行了展望。

关键词:道路工程; 沥青路面; 抗滑性能; 差异磨光

路面抗滑性能是道路行车安全和快速行驶的重要保证,亦是沥青路面长期使用性能与使用品质的基本要求之一。粗集料作为沥青混合料的主要组成部分,其在轮胎作用下的磨光性能对沥青路面的抗滑性能起决定性作用。但随着中国公路建设速度的加快,石料资源日益趋紧,优质集料匮乏;与此同时,传统观念中的低品位集料则较为富足,如能将磨光性能差别较大的两种集料进行掺配,形成差异磨光,不但能利用低品位集料,缓解集料短缺状况,更可以改善路面的长期抗滑性能,具有优异的经济效益。

一般认为集料主要有两种磨光机制:偏向于整体材料消耗的普通磨光和由集料本身矿物差异导致矿物形貌改变的差异磨光。差异磨光即利用不同集料间硬度、矿物组成的差异,在行车荷载作用下,可以在集料表面形成新的次生纹理来保证路面的抗滑性能。

石灰岩作为常见的低品位集料,储量丰富,易与优质集料形成差异磨光,国内外学者在此方面进行了大量的研究。李鑫针对广西地区特殊气候条件,就地取材将石灰岩与辉绿岩进行掺配,在保证抗滑性能的基础上探索资源的有效利用;迟坤东认为玄武岩的掺入使石灰岩/玄武岩复配粗集料的耐磨性提高,且玄武岩掺量越多,复配粗集料的耐磨性越好;Senga Y等利用英氏磨光机对不同比例复配集料的磨光值进行测试,并提出了混合律来预测复配粗集料的磨光值;李菁若

等将石灰岩沥青混合料的5~10、10~20 mm两档集料用玄武岩取代后发现:石灰岩/玄武岩沥青混合料的抗滑性能较石灰岩沥青混合料提高了201.3%,为纯玄武岩抗滑性能的95.8%,抗滑寿命为石灰岩沥青混合料的1.4倍;胡超研究发现:在满足抗滑性能要求的前提下,沥青路面抗滑表层采用混合粗集料结构较采用玄武岩结构可节约30%的成本。上述研究表明,集料差异磨光特性在改善沥青路面抗滑性能、节约优质石料资源等方面具有重要工程意义。

基于此,该文先对路面常用粗集料物理力学性能进行分析,而后研究不同复配混合料的抗滑性能,在介绍差异磨光原理的基础上,对现有集料/混合料磨光测试指标与方法进行归纳梳理,剖析现有研究存在的问题,以为后续研究提供有益借鉴。

1 原材料性能

路用集料按来源可分为天然集料、工业废物、人造集料等,不同集料性能如表1所示,集料性能对沥青路面抗滑性能有重要影响,具体而言由集料的耐磨性决定即集料的磨光、磨耗值,除此之外,沥青混合料的组成特性也要求集料与沥青具有较好的黏附。下面以3类集料的典型代表——玄武岩、钢渣、陶粒为例作简单介绍。

收稿日期:2019-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51608046);云南省交通运输厅2019年科技创新管理咨询研究项目(编号:2019304)

作者简介:李松,男,硕士研究生。E-mail:1547768098@qq.com

* 通信作者:熊锐,男,博士,副教授。E-mail:xiongr61@126.com

1.1 物理力学性能

由表 1 可知:① 仅就磨光值而言,玄武岩、钢渣、陶粒均>50%,性能较优,是抗滑表层的首选选择,但陶粒的磨耗值为 36%,不满足规范要求,不可单独用作抗滑表层,这是由它们的矿物组成及硬度决定的;② 陶粒虽然矿物组成复杂,但硬度较低,导致其虽具有优异的抗磨光性能,但磨耗性能较差。而玄武岩和钢渣同时满足矿物成分多且硬度大两个条件,因而耐磨性能好。考虑到玄武岩、钢渣与陶粒之间磨光和磨耗性能的差异,选取陶粒和石灰岩替代部分玄武岩粗集料,

有利于形成集料间的差异磨光。

1.2 黏附性

沥青与集料的黏附性与沥青混凝土路用性能直接相关,由表 1 可知:玄武岩、钢渣与沥青的黏附性能较好。

综上,从单个集料考虑,当集料磨光值>50%,磨耗值满足规范要求,且与沥青间的黏附性能较好,方可用作抗滑表层。但并不意味其他集料不可用作抗滑表层。就差异磨光而言,两种复配集料中,前者应具有优异的磨光、磨耗以及黏附性能,后者应与前者有所差异,在合适范围内差异越大,差异磨光效果越好。

表 1 常用粗集料技术指标

种类	维式 硬度	磨光值/ %	磨耗值/ %	黏附等 级/级	主要化学 组成	主要矿物成分
玄武岩	5.5	51~56	12.5~17.1	4	SiO ₂	斜长石、石英
石灰岩	4.5	33~45	13.8~18.0	4~5	CaO	钠长石、石英
钢渣	6.0	53~67	11.0~13.2	5	CaO	橄榄石、默硅镁
废旧陶瓷	6.0	40	15.5	2	SiO ₂	石英、长石
废旧玻璃	5.0	40	25.0~40.0	2	CaO	石英砂、长石
陶粒	3.0	50	36.0	2	SiO ₂	石英、块磷铝矿
铝矾土	6.0	>70	15.0	4	Al ₂ O ₃	石英、块磷铝矿

2 复配集料沥青混合料组成设计

路用集料按来源可分为天然集料、工业废物、人造集料等,由于不同来源集料间基本物理性能差异巨大,为最大程度发挥差异磨光的作用,应在粒径、掺入方式等方面有所考虑。谢君等认为由于钢渣与石灰岩的密度差距较大,在两者复配时应控制钢渣的掺量,以防止级配改变影响沥青混合料的路用性能;许丁斌认为当钢渣粒径小于 4.75 mm 时,易携带粉尘,会增加建设成本;吴少鹏等认为采用钢渣粗集料(>4.75 mm 或 2.36 mm)与天然细集料复配的方案更具经济效益。

等质量掺配、等体积掺配、体积质量转化法为当前常用的 3 种掺配方式(表 2),等质量掺配法以相同质量的掺配集料替换原有集料,等体积法保证了掺配前后沥青混合料体积参数基本不变,体积质量转化法是将集料按比例混合后看作一个整体依照原有马歇尔设计流程进行配合比设计。上述方法各有特点,适用于不同情况。当天然集料间互相掺配时,密度较为接近,混合料体积参数变化较小,能发挥等质量掺配法迅捷的优势;但钢渣与天然集料的密度差距较大,此时采用等体积掺配法较为合适。体积质量转化法则容易被理解。钢渣等集料具有较多孔隙,与沥青吸附行为复杂,在掺配过程中应充分考虑。

表 2 常见掺配方式

集料类型	密度差异/%	最大粒径/mm	级配类型	掺入方式
钢渣*与麻岩	18	4.75	Surperpave—12.5	等体积掺配
陶粒*与玄武岩	50	13.20	SMA—13	体积质量转化
钢渣*与玄武岩	20	>4.75	AC—13、AC—25	体积质量转化
钢渣*与玄武岩	15~20	13.20	AC—13、SMA—13	体积质量转化
石灰石与玄武岩*	5	16.00	AC—13、SMA—13	等质量掺配
石灰石与玄武岩*	3	16.00	AC—13、SMA—13	等质量掺配

注:* 为掺入集料。

3 不同复配集料沥青混合料抗滑性能

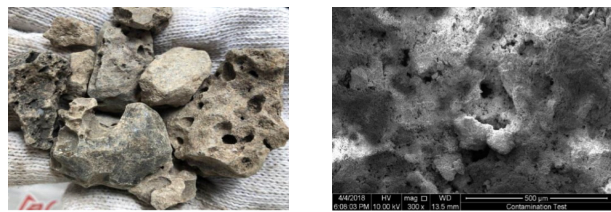
3.1 天然集料间相互掺和

石灰岩与玄武岩集料因其优异性能一直被广泛应用于沥青路面表层铺筑,而两者恰好分属于普通磨光与差异磨光,具有重要研究价值。通常,来源于不同地区的同种集料性能亦存在差异,因此混掺集料抗滑指标的快速检验是不同集料掺配技术在工程中大量应用的前提。谭巍等基于自主研发的“集料/沥青混合料摩擦特性测试仪”对不同比例掺配的复合集料抗滑指标进行研究发现:在已知单一集料的压碎值、磨耗值与磨光值的前提下,能够预测出不同比例下不同岩性互掺集料的压碎值、磨耗值与磨光值。其利用此技术对龙瑞高速公路沿线的石灰岩集料进行优选,而后与玄武岩互掺用作路面抗滑表层,玄、石互掺抗滑表层较玄武岩抗滑表层综合材料费用节约了 $18.7\%\sim 22.4\%$,经济效益显著。

艾长发等认为玄武岩的掺入使石灰岩与玄武岩混合粗集料在压碎过程中存在显著的“弃弱保强”作用以及楔体效应,有利于混合粗集料嵌挤结构的形成和结构稳定性的提高。陈贺、李菁若、王丹等对不同级配下石灰石/玄武岩复合集料沥青混合料进行研究发现:玄武岩以任何比例进行掺配的复配混合料抗滑性能均有提高,且具有较好的经济效益。

3.2 钢渣

钢渣是炼钢过程产生的一种副产物,其宏微观形貌如图 1 所示。



(a) 宏观形貌

(b) 微观形貌($\times 300$)

图 1 钢渣的宏观形貌

由图 1 可知,钢渣表面粗糙,存在较多孔隙适用于沥青混合料粗集料,国内外研究人员在此方面进行了大量研究。谢君发现钢渣的磨光值、磨耗值等主要抗滑参数都优于玄武岩及石灰石,说明钢渣具有更优异的力学性能。究其原因,姜从盛认为这与钢渣中的铁、锰离子有关,这两种离子具有较强的极化能力,有助于打破原有的正硅酸盐结构,形成新的巨大的复杂的硅

氧团,从而使其具有优良的耐磨、抗压、抗滑等性能。但钢渣中存在 $f-CaO$, 遇水会膨胀,严重影响沥青混合料的路用性能。

为消除钢渣的体积膨胀性对沥青混合料性能的影响,陈宗武等研究了原始陈化钢渣细集料对沥青混凝土性能的影响。结果表明:陈化钢渣细集料沥青混合料具有良好的路用性能和体积稳定性;吴少鹏等先对钢渣进行陈化处理,而后制备了 AK-13A 与 SMA-13 两种钢渣沥青混合料,发现其不仅抗滑性能强于玄武岩沥青混合料,且其他各项路用性能指标也很优异。但陈化方法所需时间较长,且占地面积较大,实用性较差。由于钢渣中的危险成分遇水才会膨胀,部分研究人员从阻隔水的角度出发,引入具有凝胶功能的物质对钢渣表面进行改性,形成隔水层来抑制膨胀,取得了不错的效果。其原理大都为改性剂与水、Cao 发生反应生成 C-S-H 凝胶,渗透进空隙,从而达到阻隔水分进入的目的;王声乐等对水泥浆、硅酮防水剂、硅烷偶联剂 3 种改性钢渣沥青混合料的路用性能进行研究,结果表明,硅酮防水剂的防水效果最好,硅酮防水剂改性钢渣的吸水率、膨胀率和破碎值分别降低了 72%、34% 和 43%。研究认为这得益于硅酮防水剂在钢渣表面形成致密疏水涂层。但此方面的研究并没有对改性后钢渣的抗滑性能进行评价。

沥青混合料耐久性表征了沥青混合料在使用过程中承受各种不利环境荷载、车辆荷载而保持原有性能的能力,是评价沥青路面使用寿命的重要指标;钢渣具有膨胀特性,因而钢渣混凝土的耐久性显得尤为重要,武汉理工大学在此方面做了大量研究。李灿华等对服役 7 年的 SMA-13 沥青混凝土路面的构造深度、摩擦系数、平整度等指标进行检测,结果显示:与服役初期相比,平整度降低了 1.23 mm,摩擦因子从 60 变为 53,构造深度从 1.1 mm 降到了 0.56 mm,衰减速度明显慢于 AC 路面,表现出更好的耐久性。这得益于钢渣高碱度和比表面积大的特性,增加了其与沥青的黏附性,改善了混合料水稳定性;钢渣陈化处理也保证了沥青混凝土的体积稳定性。

钢渣沥青混合料的抗滑性能由钢渣本身及钢渣与沥青间的黏附性能共同决定。钢渣表面呈粗糙、多孔状态,且碱性较强,非常适用于沥青混合料。沥青与集料间的黏附力由物理吸附和化学吸附两部分构成。钢渣表面粗糙、多孔,与沥青之间存在更大的接触面积,表面裹覆的沥青膜也更厚,所形成的混合料也保留了钢渣的纹理特征。另一方面,钢渣也可以与沥青发生

化学发应,形成新物质,因而黏附性较强。但同时,多孔结构也导致钢渣的沥青吸附量较大,影响经济效益。

为此,薛永杰针对钢渣的孔隙开展了深入的研究,通过压汞法对比分析了钢渣和玄武岩的孔隙分布,发现钢渣的总孔隙率最大,石灰岩次之,玄武岩最小;申爱琴等则进一步指出钢渣的孔隙分布更为均匀,且随着钢渣粒径的增大,大孔隙所占的比例也显著提高,并利用分形维数对孔隙的复杂程度进行了量化。但压汞法可能会导致部分孔隙的破坏,在此基础上陈宗武等利用氮吸附法研究钢渣的孔隙特征,弥补了压汞法的不足。

大量研究表明:钢渣沥青混合料具有优异的抗滑性能,但对其衰减规律的研究较少。申爱琴等借助 SEM、傅里叶光谱等手段对钢渣与橡胶沥青间的黏附机理进行探究发现:钢渣表面有很多孔隙结构和珊瑚颗粒,沥青可以进入其中,且钢渣与沥青间存在化学反应,因而橡胶沥青和钢渣集料之间的黏附性较强。而后,以橡胶沥青、钢渣为原料制备了 SSMA(钢渣沥青混合料),并对其抗滑衰减规律及抗滑机理进行分析。结论如下:SSMA 的抗滑性能衰减过程主要分为 2 个时期(衰减期和稳定期)和 5 个阶段;钢渣沥青混合料在衰减稳定期的抗滑性能更具优势,在 50% 的最佳掺量下,摆值较原沥青混合料提升了 15%。其认为有如下原因:① 裹覆在集料表面的沥青膜被磨损或重新分布,使集料暴露出来,集料表面的摩擦阻力大于沥青膜表面;② 粗集料破裂形成的新破裂面表面的纹理构造,与辉绿岩形成差异磨光提高路面的抗滑性能。

3.3 天然集料与人工集料

陶粒为一种典型的轻质集料,磨光值较高,且具有蜂窝状的构造;但同时硬度、强度较低,易与天然集料形成差异磨光改善沥青混合料的抗滑能力。解晓光等在回转窑中将高强度页岩加热至约 1 200 ℃ 制合成了一种具有硬度差异和多孔蜂窝结构的页岩陶粒(HSSC)集料,并对其抗滑性能进行研究。结果显示:HSSC 混合料的抗滑性能与级配有关,在 SMA 中,HSSC 含量为 60% 的混合料其抗滑性能最好,完全可以用来改善路面抗滑性能;刘东旭利用自主开发的轮式磨光机对不同掺量的陶粒/安山岩复配沥青混合料的长期抗滑性能进行研究。结果表明:复配沥青混合料的稳定节点、稳定摆值、衰减速率 3 个指标均优于安山岩沥青混合料,验证了差异磨光原理。具体而言,陶粒掺量为 20%、40%、50%、60%、100% 的沥青混合料的稳定摆值较 0 掺量的混合料提高幅度分别为

4.4%、6.3%、7.5%、8.3% 及 14.5%,但同时陶粒质量的损失也逐渐增加;60% 为陶粒在安山岩沥青混合料中的最佳掺量。

4 差异磨光机理与评价指标

4.1 磨光机制

沥青路面使用过程中,在车辆因素的作用下,路面磨光会导致抗滑性能下降。路面磨损可分为两步:一是集料表面的沥青胶浆被除去;二是集料表面纹理的改变。Tourenq 等认为,集料主要有 2 种磨光机制:偏向于整体材料消耗的普通磨光和由集料本身矿物差异导致矿物形貌改变的差异磨光。

4.1.1 普通磨光

普通磨光一般存在于单矿物集料中,在此情况下,矿物衰减情况基本一致,难以形成层次,因而对行车安全极为不利。

4.1.2 差异磨光

集料的矿物成分对其性能有重要影响,当集料含有多种矿物成分,且各成分间硬度相差较大时,各矿物成分在行车荷载作用下的磨光速度不同,可以在集料表面形成新的次生纹理来保证路面的抗滑性能,即差异磨光。差异磨光可根据集料数目分为两类,单集料自身的差异磨光与复配集料中不同集料间的差异磨光。单集料的差异磨光主要依靠自身的矿物组成,矿物组成越复杂,硬度差异越大,差异磨光效果越好,磨光值越高。对多种集料而言,除单集料微观纹理的改变外,不同集料表面纹理层次分明,有利于构造深度的形成,从而提供优异的抗滑性能。

4.2 集料磨光性能评价指标与方法

当前常用的集料磨光设备有英氏磨光机、亚琛磨光机、维纳/舒尔茨磨光机等,其特点如表 3 所示,原理均为橡胶轮胎对试样进行磨光,以模拟沥青路面的真实使用情况,但结果都不尽如人意。英式磨光机难以有效模拟滚动的充气橡胶轮胎对路面的作用;亚琛磨光机难以对温度的变换情况进行模拟,W/S 磨光机结果与实际道路磨光磨损规律基本保持一致,王大为等利用上述仪器对集料磨光性能进行了系统性的研究,取得了大量创新性成果,但鲜有涉及到差异磨光。

低品位集料的优选及测试程序的开发为当前差异磨光研究的热点。李菁若等对复配集料的磨光值进行了深入研究,采用内插法预测了不同比例下复配集料的磨光值,认为不同岩性集料板的长期抗滑性能与各

表3 路面磨光性能测试方法

设备名称	指标	优点	缺点
维纳/舒尔茨磨光机	PSV	可模拟轮胎与路面的相互作用	仅在特定条件下测量
亚琛磨光机	PSV	较接近实际路面条件	难以模拟不同温度
英氏磨光机	PSV	效率高、可模拟湿滑条件	误差较大

集料磨光值具有较好的线性相关,但并未给出定量结果;Y Senga 等利用英氏磨光机对不同比例复配集料的磨光值进行测试,并经过验证,得出如下规律:

$PSV(aG_1+bG_2)=aPSV(G_1)+bPSV(G_2)$ (1)
式中: G_1 、 G_2 分别为闪长岩、石灰石; a 、 b 为闪长岩、石灰石所占比例。

式(1)亦适用于 W/S 测试方法,且与实测值相关性良好。但沥青混合料抗滑性能还与沥青种类、矿料级配等因素有关。张东长等提出了集料抗滑耐磨性能自动化评价体系,可用于沥青路面抗滑表层室内快速选材。

5 结论

该文从原材料性能、混合料组成设计、复配混合料抗滑性能及差异磨光机理 4 个方面对差异磨光研究现状进行论述,得到以下结论:

- (1) 若单种集料用作抗滑表层,一般要求其磨光值>50%,磨耗满足规范要求,且与沥青黏附性良好。但在差异磨光原理下,复配集料中,一种集料需满足上述要求,其余则可降低要求,采用低品位集料、人造集料等,对降低公路建设成本,提高经济效益具有重要意义。
- (2) 钢渣由于具有特殊的正硅酸盐钙(镁)四面体结构继而形成复杂的硅氧团,因而耐磨性好。对复配混合料而言,钢渣表面粗糙、孔结构较多,增大了沥青膜的厚度,黏附性能好;在抗滑衰减期中,钢渣破裂形成的新破裂面表面的纹理构造,能与原有集料形成差异磨光,抗滑性能较不掺钢渣沥青混合料提升约 15%。
- (3) 采用新设备、新工艺对集料进行筛选、对掺配方式、掺配比例进行验证,可为高等级公路抗滑表层用集料的遴选提供技术支撑。
- (4) 应进一步开展基于差异磨光原理的路用集料抗滑性能评价与机理分析,提出耐久性预估模型,以利其推广应用。

参考文献:

- [1] Wilson, D. J. An Analysis of the Seasonal and Short — Term Variation of Road Pavement Skid Resistance[D]. Auckland:Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, 2006.
- [2] Kogbara, Masad, Kassem, et al. A State — of — the — Art Review of Parameters Influencing Measurement and Modeling of Skid Resistance of Asphalt Pavements[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 602 — 617.
- [3] D. J. Maclean, F. A. Shergold, The Polishing of Road Stone in Relation to the Resistance to Skidding of Bituminous Road Surfacing[C]. Department of Scientific and Industrial Research, Road Research Laboratory, Road Research Technical Paper No. 43, London, 1958.
- [4] Tourenq C, Fourmaintraux D. Road Surface Roughness and the Properties of Aggregate[J]. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Pontsetchaussees, 1971, 51: 61—69.
- [5] 李鑫. 广西地区沥青路面 SMA—13 材料组成设计与性能研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2017.
- [6] 迟坤东. 集料掺配对沥青路面构造特征及抗滑性能的影响[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2016.
- [7] Sengy Y, Dony A, Colin J, et al. Study of the Skid Resistance of Blends of Coarse Aggregates with Different Polish Resistances [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48(19): 901—907.
- [8] 李菁若, 吴卓科, 陈小莉, 等. 沥青混合料抗滑性能评价指标与抗滑寿命预估方法研究[J]. 重庆交通大学学报, 2019(12).
- [9] 胡超. 混合粗集料抗滑表层配制技术与性能分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2011.
- [10] 刘东旭. 基于分异磨耗原理的沥青混合料抗滑性能研究 [D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2014.
- [11] 李超, 陈宗武, 谢君, 等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用演技进展[J]. 材料导报, 2017(3).
- [12] 谢君. 钢渣沥青混凝土的制备、性能与应用研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文, 2013.
- [13] 冯德成, 杨振丹, 王东升. 废陶瓷在路面抗滑表层中的应用可行性[J]. 华东公路, 2008(6).

- [14] 王泳丹,刘子铭,郝培文.废旧玻璃在沥青混合料中的应用研究进展[J].材料导报,2018(15).
- [15] Shaun Friel, David Woodward. High Friction Surfacing Systems Using Blends of Natural Aggregate and Calcined Bauxite[J]. Coatings, 2019, 9:177.
- [16] 许丁斌.钢渣沥青混合料的材料及性能研究[D].东南大学硕士学位论文,2018.
- [17] Chen ZW, Wu SP, WJ, et al. Utilization of Gneiss Coarse Aggregate and Steel Slag Fine Aggregate in Asphalt Mixture[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:911—918.
- [18] 陈贺.基于差异磨损原理的 SMA 路面抗滑性能优化研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2016.
- [19] 牛哲.钢渣沥青混合料的制备与性能研究[D].东南大学硕士学位论文,2016.
- [20] 王元元,何亮,孙璐.矿料分异处理对沥青混合料抗滑性能的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2017(6).
- [21] 谭巍.基于沥青路面抗滑特性的实验系统开发与石灰岩优选关键技术研究[D].重庆交通大学博士学位论文,2017.
- [22] 艾长发,胡超,屠凌波,等.石灰岩与玄武岩混合粗集料压碎特性分析[J].中外公路,2012(3).
- [23] 李菁若,谭巍,罗忠祥,等.用于沥青路面抗滑表层的石灰岩碎石筛选技术[J].新型建筑材料,2018(4).
- [24] 王丹.石灰岩与玄武岩混合集料沥青路面表层抗滑性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2015.
- [25] 姜从盛,彭波,李春,等.钢渣作耐磨集料的研究[J].武汉理工大学学报,2001(4).
- [26] 吴少鹏,杨文锋,薛永杰,等.钢渣沥青混凝土的研究与应用[C].中国硅酸盐学会 2003 年学术年会论文摘要集,2003.
- [27] Xie J, Wu S, Lin J, et al. Recycling of Basic Oxygen Furnace Slag in Asphalt Mixture: Material Characterization & Moisture Damage Investigation[J]. Construction & Building Materials, 2012, 36:467—474.
- [28] Ma LL, Xu DB, Wang YS, et al. Expansion Inhibition if Steel Slag in Asphalt Mixture by a Surface Water Isolation Structure[J]. Road Materials and Pavement, 2020, 21(8):2 215—2 229.
- [29] 李灿华,苏悦.钢渣 SMA—13 沥青混凝土及其服役性能研究[J].武钢技术,2012(3).
- [30] Shen AQ, Zhai CW, Guo YC, et al. Mechanism of Adhesion Property between Steel Slag Aggregate and Rubber Asphalt[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(20):1—14.
- [31] Ye Y, Wu SP, Li C, et al. Morphological Discrepancy of Various Basic Oxygen Furnace Steel Slags and Road Performance of Corresponding Asphalt Mixtures [J]. Materials, 2019, 12(14):2 322—2 338.
- [32] Yue YJ, Wu SP, Hou H, et al. Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Used as Aggregate in Asphalt Mixture[J]. Hazard Materialas, 2006, 138(2).
- [33] 高振鑫,申爱琴,翟超伟,等.钢渣沥青混合料体积参数测定与水稳定性影响机理[J].交通运输工程学报,2018(2).
- [34] 申爱琴,陈祥,郭寅川,等.基于灰靶决策理论的钢渣沥青混合料路用性能评价[J].硅酸盐通报,2019(4).
- [35] 申爱琴,刘波,郭寅川,等.隧道路面钢渣沥青混合料抗滑性能衰减试验研究[J].建筑材料学报,2019(2).
- [36] Xie XG, Wang DW, Liu D, et al. Investigation of Synthetic, Self—Sharpening Aggregates to Develop Skid—Resistant Asphalt Road Surfaces[J]. Wear, 2016, 348—349:52—60.
- [37] Kane M, Artamendi I, Scarpas T. Long—Term Skid Resistance of Asphalt Surfacing: Correlation between Wehner—Schulze Friction Values and the Mineralogical Composition of the Aggregates[J]. Wear, 2013, 303:235—243.
- [38] Shabani S, Ahmadinejad M, Ameri M. Developing a Model for Estimation of Polished Stone Value (PSV) of Road Surface Aggregates Based on Petrographic Parameters[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2012, 3:1—14.
- [39] Wang DW, Wang H, Bu Y, et al. Evaluation of Aggregate Resistance to Wear with Micro—Deval Test in Combination with Aggregate Imaging Techniques[J]. Wear, 2015, 338—339:288—296.
- [40] Wang DW, Chen X, Xie XG, et al. A Study of the Laboratory Polishing Behavior of Granite as Road Surfacing Aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2015, 89:25—35.
- [41] 李菁若,张东长,谭巍.粗集料的抗滑耐磨性能评价新方法[J].公路交通科技,2019(12).