

高钛重矿渣作为集料用于沥青混合料的可行性分析研究

王 伟¹, 汪 杰^{2*}, 梁月华²

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 攀枝花学院土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:以攀西地区高钛重矿渣为研究对象,通过理论及试验研究分析了其作为集料用于沥青混合料的可行性,并与目前沥青混合料常用的玄武岩等天然石料进行了对比分析。研究表明:高钛重矿渣表面形貌呈粗糙多孔状且为碱性集料,与沥青黏附性能优于天然石料,粘附性等级为 5 级;高钛重矿渣为五元渣系,属低钙富钛渣、低活性渣,体积稳定性及高温稳定性好;高钛重矿渣具有优异的颗粒形态特性且力学性能、耐久性能良好,但密度略低于天然石料且吸水率更高;高钛重矿渣作为沥青混合料集料的综合性能不低于天然石料,且具有明显的环境、经济效益。

关键词:高钛重矿渣;沥青混合料;表面特性;稳定性;粘附性

中图分类号:X757,TU528

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2022)04-0087-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Feasibility analysis of high-titanium heavy slag as aggregate for asphalt mixture

Wang Wei¹, Wang Jie^{2*}, Liang Yuehua²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Taking the high-titanium heavy slag in Panxi area as the research object, the feasibility of using it as aggregate for asphalt mixture was analyzed through theoretical and experimental research, also it was compared with the natural stone such as basalt commonly used in asphalt mixture at present. The results show that the surface morphology of high-titanium heavy slag is rough and porous, and it is alkaline aggregate. Its adhesion performance with asphalt is better than that of natural stone, and its adhesion grade is grade 5. High-titanium heavy slag is a five-element slag system, belonging to low calcium and titanium-rich slag and low active slag, with good volume stability and high-temperature stability. High-titanium heavy slag has excellent particle morphology, mechanical properties and durability, but its density is slightly lower than that of natural stone and the water absorption is higher. The comprehensive performance of high-titanium heavy slag as aggregate of asphalt mixture is no worse than natural stone, and it has obvious environmental and economic benefits.

Key words: high titanium heavy slag, asphalt mixture, apparent characteristics, stability, adhesivity

收稿日期:2022-03-03

基金项目:钒钛资源综合利用四川省重点实验室(2021FTSZ15)资助。

作者简介:王伟(1990—),男,工程师,博士研究生,主要从事工程材料方面的应用研究, E-mail: 455107259@qq.com; *通讯作者:汪杰(1988—),男,讲师,工程师,硕导,博士研究生,攀枝花市学术技术带头人后备人选,主要从事大宗工业固废土木工程综合利用研究, E-mail: 542925605@qq.com。

0 引言

我国钛资源非常丰富,储量位于世界前列,其主要矿产类型为钒钛磁铁矿,占比高达90%,主要分布在攀枝花-西昌、承德及汉中等地区,其中攀西地区保有储量达100亿t,占全国钛资源的91%左右^[1-3]。钒钛磁铁矿经选矿、高炉冶炼后产生的废渣称为含钛高炉渣,以 TiO_2 含量 $<10\%$ 、 $10\% \sim 20\%$ 、 $>20\%$ 为指标将其划分为低钛型高炉渣、中钛型高炉渣及高钛型高炉渣^[4-5]。攀钢含钛高炉渣无论是慢冷型重矿渣还是急冷型粒化渣,其 TiO_2 含量均高达 $20\% \sim 29\%$,属典型的高钛型高炉渣。虽然攀钢高炉渣含钛量很高,但由于其钛品位低、岩相复杂、杂质含量高等原因,很难进行进一步提钛等冶金工艺利用,同时又因为含钛量高的特点不能作为常规高炉渣使用,导致其综合再利用的难度较大。目前攀西地区高钛型高炉渣每年产出近400万t,历史堆积量已接近7000万t,面临巨大的环保压力^[6]。

普通高炉渣为四元渣系,化学成分类似于波特兰水泥,具有较高的潜在活性,其综合利用技术经过多年快速发展已较为成熟,主要用作制备水泥、矿渣粉、微晶玻璃及农业肥料等^[7]。对于我国产量较低的低钛及部分中钛型高炉渣,可按普通高炉渣使用方法进行利用,但产量最高的高钛型高炉渣为典型五元渣系,与普通高炉渣的成分、物化性质等差异很大。其特点之一为活性低,如果用于水泥掺合料会显著降低水泥强度。虽然已有研究成果^[8]显示掺入部分高钛型高炉渣制备的钛矿渣硅酸盐水泥能满足国家标准,但由于高钛型高炉渣质地坚硬,研磨成本高且掺入量低,不利于大量推广利用。另外,也有研究人员将高钛型高炉渣用于制备微晶玻璃、光催化剂及复合肥料,但由于工艺复杂、效率不高及存在有害成分等原因,同样存在大规模推广应用的瓶颈问题^[9]。因此,目前高钛型高炉渣(尤其是产量最高的高钛重矿渣)的大规模应用主要集中在用作水泥混凝土骨料、制备砖材等建筑材料方面,但也不能达到中和产出的水平,更不能解决历史堆积的“欠账”问题。同时,随着我国房地产市场逐渐趋于饱和,相关建材的消耗也将逐年减少。近年来,国家各层面对于固废再利用问题愈发重视,2019年国家发改委发布了《关于推进大宗固体废弃物综合利用产业集聚发展的通知》、2020年环保相关部门发布了《关于推进实施钢铁工业超低排放的意见》、2021

年国家发改委、工信部等十部委印发了《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》。可见,进一步深化固废再利用程度、拓展固废再利用途径是我国实现“双碳”目标的重要路径之一。

沥青路面由于其表面平整、行车舒适、通车快且易于维护等优点成为我国近年来高等级公路及重要干道的主要路面形式。目前沥青混合料集料主要为玄武岩、石灰岩等天然石料,由于其消耗量大,在当前“绿色低碳循环发展”的前提下,天然石料资源短缺现象日趋严重、价格居高不下。因此,探索成本低廉、利于生态循环的新集料已是交通行业绿色发展的重中之重。美国于20世纪90年代就开始将高炉渣碎石作为集料用于市政道路、民用机场跑道及赛车场跑道,其工程性能十分优异;国内孙长新等^[10]将高炉重矿渣应用于沥青面层并研究了混合料的高温稳定性及疲劳特性;覃琳等^[11]对不同掺量的高炉渣沥青混合料进行弯曲流变试验,对其低温性能进行了综合评价;孙建国等^[12]对掺高炉渣沥青混合料进行了配合比设计并研究了混合料的力学性能及疲劳性能。根据以上已有研究成果显示,普通高炉渣用作沥青混合料集料是可行的。而高钛重矿渣由于其具有明显区域性等特性,尚无相关领域研究成果可循。鉴于此情况,笔者在高钛重矿渣已有的相关性能研究基础上,结合室内试验及性能分析,探讨了高钛重矿渣作为集料用于沥青混合料的可行性,以期为攀西地区大宗固废的再利用提供新的思路。

1 原材料与研究方法

1.1 原材料

集料:采用攀钢产出的高钛重矿渣碎石,粒径范围为 $4.75 \sim 26.5 \text{ mm}$,按JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》将其筛分后用于各性能指标检测;用于对比研究的天然石料为市售玄武岩及石灰岩,按不同粒径范围筛分备用。

沥青为韩国双龙牌70#基质沥青。基本性能参数见表1。

1.2 研究方法

根据已有研究成果、成分数据等对高钛重矿渣的酸碱性、活性等基本物化性能进行分析;采用高清相机、SEM扫描电镜等对高钛重矿渣、玄武岩及石灰岩三种集料的表观形貌特性进行对比分析;通过同步热分析试验对高钛重矿渣的高温稳定性进行

评价; 参照 JTG E42-2005《公路工程集料试验规程》对三种集料进行针片状含量、密度及吸水率、压碎值、磨耗值、体积膨胀性等关键物理性能的试验研究, 其中体积膨胀性试验级配为 OGFC-16 合成级配 (表 2)。集料与沥青粘附性参照 JTG E20-2011《公

路工程沥青及沥青混合料试验规程》中规定的水煮法进行试验。主要试验设备有扫描电子显微镜、同步热分析仪、电液式压力试验机、击实仪、洛杉矶磨耗试验机、电热鼓风干燥箱、恒温水浴箱、数显游标卡尺等。

表 1 基质沥青性能参数
Table 1 Performance parameters of asphalt matrix

25℃针入度(0.1 mm计)/(°)	15℃延度/cm	软化点/℃	闪点/℃	60℃动力粘度/(Pa·s)
68	>150	48	350	189

表 2 膨胀性试验级配
Table 2 Grade of expansion test

尺寸/mm	筛余/%	尺寸/mm	筛余/%
16	5.5	1.18	4.5
13.2	20	0.6	3
9.5	23.5	0.3	2
4.75	30.5	0.15	2
2.36	5.5	0.075	3.5

2 试验及结果分析

2.1 高钛重矿渣的表观形貌特性

从图 1 可以看出, 高钛重矿渣、玄武岩及石灰岩分别呈灰黑色、墨绿色及灰白色, 且棱角分明。石灰岩表面结晶体较多, 表面虽有起伏, 但总体上较其它两种集料更为光滑。玄武岩表面纹理较石灰岩更为粗糙, 且具有些许坑洼结构。高钛重矿渣由于其成渣过程类似于喷出型岩浆岩, 表面凹凸不平且具有明显的气孔构造, 纹理更为粗糙。从集料与沥青的粘结性能来看, 高钛重矿渣粗糙多孔的宏观形貌能更好地与沥青形成“锚固作用”, 粘结性能必然更强^[13]。为进一步探究高钛重矿渣的微观形貌, 采用电子扫描显微镜对高钛重矿渣微观表面进行研究, 扫描结果见图 2。

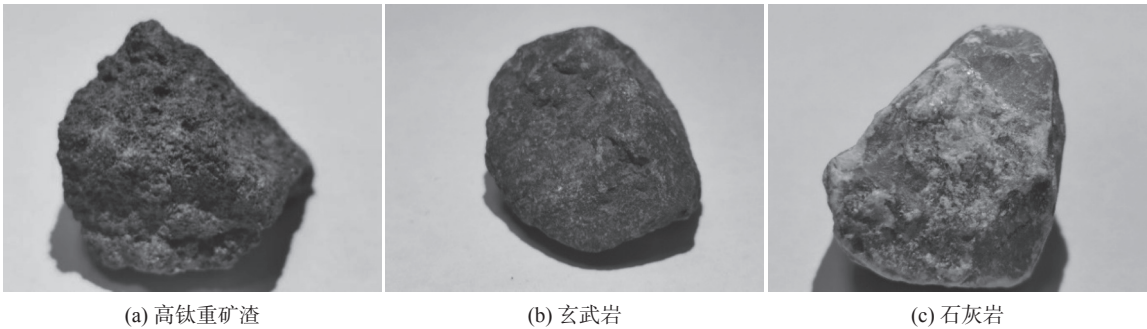


图 1 高钛重矿渣、玄武岩及石灰岩的宏观形貌
Fig. 1 Macroscopic morphologies of high-titanium heavy slag, basalt and limestone

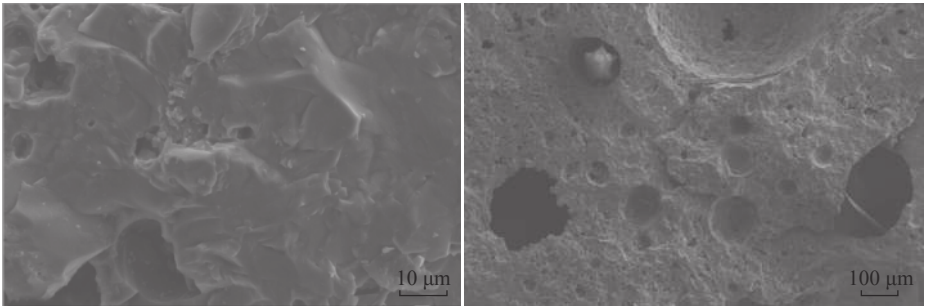


图 2 高钛重矿渣的微观形貌
Fig. 2 Microstructures of high-titanium heavy slag

观察图 2 可知,高钛重矿渣在最小识别长度为 100 μm 时,其表面凹凸不平且呈现出多孔结构。当放大倍数至最小识别长度为 10 μm 时,其表面显得更为粗糙且呈现无序的峰谷形态。不同放大倍数下高钛重矿渣微观形貌与宏观观察的结果相似,进一步佐证了其在形貌特性上与沥青有优异的粘结性能。

2.2 高钛重矿渣的物化特性

2.2.1 组成成分

物质的化学组成对于其宏观性能影响很大,矿渣主要由不同的氧化物组成,因此其化学性质及性能取决于不同氧化物的含量占比^[6]。普通高炉渣及高钛重矿渣主要成分见表 3。

表 3 普通高炉渣与高钛重矿渣主要组成成分
Table 3 Main components of common blast furnace slag and high-titanium heavy slag

%

矿渣类型	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂
普通高炉渣	38 ~ 46	26 ~ 42	7 ~ 20	4 ~ 13	
高钛重矿渣	22 ~ 29	22 ~ 26	16 ~ 19	7 ~ 9	20 ~ 29

总体上看,高钛重矿渣属五元渣系,而普通高炉渣为四元渣系。两者主要区别在于高钛重矿渣 CaO、SiO₂ 含量更低, TiO₂ 含量则很高,属典型的低钙富钛渣。从硅酸盐分解、生石灰水化及碱集料反应等稳定性问题的角度来看,高钛重矿渣比普通高炉渣的稳定性更高。另外,参考 GB/T 203-2008《用于水泥中的粒化高炉矿渣》中以质量系数 ≥ 1.2 作为矿渣活性的判别标准,经计算,普通高炉渣质量系数约为 1.61,活性很高,而高钛重矿渣质量系数为 1.08,属低活性矿渣,因而难以应用在水泥生产中。但由于其活性低、稳定性好,作为沥青混合料的集料不会出现体积膨胀、崩解等不良现象。

从酸碱性角度来看,能提供 O²⁻ 的氧化物是碱性氧化物,例如 CaO、MgO 等。反之,会吸收 O²⁻ 的氧化物则是酸性氧化物,例如 SiO₂、V₂O₅、Al₂O₃、TiO₂ 则是两性氧化物^[6]。根据高钛重矿渣中酸、碱

性氧化物的平均含量来看,碱性氧化物含量(35.01%)是明显大于酸性氧化物(24.88%)的,因此可判断高钛重矿渣呈碱性。也有文献^[14]按照 SiO₂ 的含量来进行石料的酸碱性评价: SiO₂ 含量大于 65% 为酸性、小于 52% 为碱性、在此之间则为中性。由此也可判定高钛重矿渣为碱性矿渣。大多数沥青由于含有沥青酸及酸酐而呈酸性,在和碱性集料接触时会发生化学反应从而产生远大于范德华力的化学吸附力,从这个角度来说,高钛重矿渣与沥青具有较强的结合能力。

2.2.2 密度和吸水率

采取常用的网篮法对不同粒径高钛重矿渣、玄武岩及石灰岩进行表观相对密度、毛体积相对密度及吸水率对比试验。三种骨料在表 4 中分别以 1[#]、2[#]、3[#]表示。

表 4 不同粒径骨料的密度和吸水率
Table 4 Density and water absorption of aggregates with different particle sizes

公称最大粒径/mm	表观相对密度			毛体积相对密度			吸水率/%		
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]
16	2.66	2.80	2.74	2.55	2.57	2.70	2.89	0.62	0.32
13.2	2.68	2.84	2.75	2.54	2.58	2.72	3.41	0.84	0.37
9.5	2.63	2.81	2.77	2.47	2.58	2.73	4.22	1.19	0.41
4.75	2.61	2.80	2.77	2.42	2.56	2.73	4.93	1.40	0.44

从表 4 可以看出,四种粒径范围下玄武岩的表观相对密度最大,石灰岩次之,高钛重矿渣最小;毛体积相对密度则是石灰岩最大,玄武岩次之,高钛重矿渣最小;吸水率为石灰岩最小,玄武岩次之,高钛重矿渣最大,且随粒径的减小逐渐增大。究其原因

在于高钛重矿渣熔融炉渣自渣口排出后,其中含有的部分气体溢出,形成气孔状构造,导致密度更小、比表面积增大且吸水率也随之增大。

JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》中规定用于沥青混合料的粗集料表观相对密度不得小

于 2.45、吸水率不得大于 3%。高钛重矿渣各粒径表观相对密度均大于 2.60, 满足规范要求, 但其吸水率较大, 公称最大粒径为 4.75 mm 时吸水率最高, 为 4.93%。吸水率过大, 可能导致的问题主要集中在易造成沥青与集料界面产生剥落效应及导致沥青用量增大这两个方面。而高钛重矿渣表面凹凸不平且为碱性集料, 与沥青的粘结性十分优异, 水很难进入集料与沥青的交界面。对于沥青用量略微增大而导致成本升高的问题, 笔者认为对于沥青混合料而言, 采用高钛重矿渣的总体成本仍然是低于天然骨料的。原因在于高钛重矿渣属大宗固废, 价格低廉。据调查, 目前玄武岩价格在 180~250 元/t、石灰岩为 50~70 元/t, 高钛重矿渣为 30~35 元/t, 即使沥青用量增加 1%~2%, 其总体价格优势也是十分明显的。

2.2.3 高温稳定性

考虑到热拌沥青混合料在拌和时集料极端最高温度可能会达到 200 ℃, 采用同步热分析仪对高钛重矿渣的高温稳定性进行探究, 试验结果见图 3。从图 3 可以看出, 高钛重矿渣在高温条件下非常稳定。当温度低于 600 ℃ 时, TG 曲线基本没有变化, 仅有略微下降, 此过程为结合水蒸发所导致的。在 630 ℃ 左右, TG 曲线出现略微增加、对应的 DTA 曲线出现一个平缓的吸热峰, 可能是某些还原性物质与气体出现化学反应所引起; 800 ℃ 以后, DTA 曲线吸热峰对应的试样质量逐渐下降, 分析可能是某些物质发生热分解所导致的^[9]。总体来看, 高

钛重矿渣作为沥青混合料集料, 无论是在拌和、施工及应用过程中其高温性能都是十分稳定的。

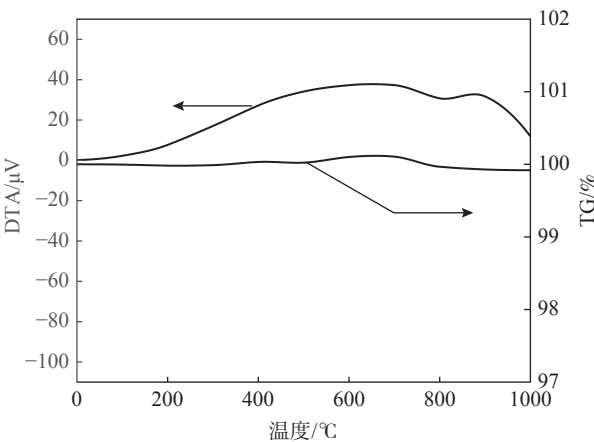


图 3 同步热分析结果
Fig. 3 Synchronous thermal analysis results

2.3 高钛重矿渣的工程特性

2.3.1 针片状含量、压碎值及磨耗值

从表 5 可以看出, 三种集料的针片状含量、压碎值及磨耗值均满足规范要求。不同粒径下高钛重矿渣针片状含量远低于玄武岩及石灰岩, 表明其具有优异的颗粒形态特性, 混合料在车辆荷载反复作用下不容易出现内部损失。另外, 高钛重矿渣压碎值与磨耗值在两种天然骨料之间, 略低于玄武岩, 表明其同样具有良好的抗压、耐磨性能, 从作为沥青混合料集料的角度来看兼具有良好的力学性能和耐久性能。

表 5 不同集料的针片状含量、压碎值及磨耗值
Table 5 The needle-shape content, crushing value and wear value of different aggregates

集料类型	针片状含量/%				压碎值/%	磨耗值/%
	4.75 ~ 9.5 mm	9.5 ~ 13.2 mm	13.2 ~ 16 mm	16 ~ 19 mm		
高钛重矿渣	4.6	4.0	3.9	6.0	11.6	15.6
玄武岩	8.9	7.1	7.5	8.2	11.2	12.9
石灰岩	15.8	10.9	9.9	11.3	15.2	17.5
规范值	≤18	≤12	≤12	≤12	≤26	≤28

2.3.2 体积膨胀性

目前高炉炼铁时会加入石灰岩、白云岩等作为助溶剂, 炼铁结束后这些助溶剂也就成为了炉渣的一部分^[15]。如若当中的 CaO、MgO 等遇水反应, 将会在沥青混合料中产生很大的膨胀力, 进而导致路面出现鼓包、开裂等严重病害。为研究高钛重矿渣的膨胀性, 采用浸水膨胀性试验对其膨胀率进行测试,

试验结果见图 4。

从图 4 可以看出, 高钛重矿渣的 10 d 平均膨胀率为 0.19%, 远小于规范中<2% 的要求。另外, 其膨胀现象主要集中在前 4 天, 后续增长十分缓慢。根据前文成分分析及本试验结果来看, 高钛重矿渣活性极低, 不存在体积安定性不良的问题, 用于沥青混合料不会出现内应力过大的现象。

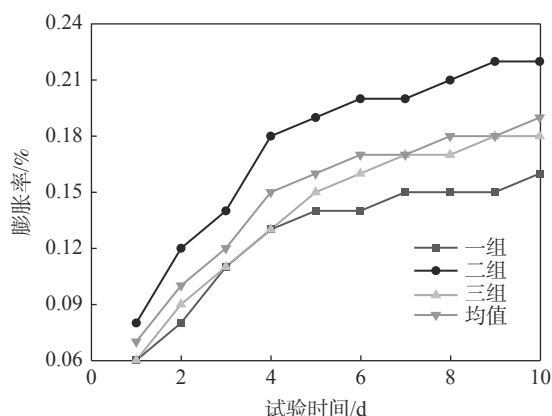


图 4 高钛重矿渣膨胀率随时间变化趋势

Fig. 4 Trend of expansion rate of high-titanium heavy slag over time

2.3.3 粘附性

集料与沥青的粘附性好坏对于混合料的耐久性影响深远,粘附性如若不足,混合料极易出现集料剥落、使用性能急剧下降的问题。采用水煮法对高钛重矿渣、玄武岩及石灰岩进行沥青粘附性试验,结果见表 6。

表 6 不同集料与沥青粘附性
Table 6 Adhesion of different aggregates to asphalt

水煮时间/min	粘附性等级/级		
	高钛重矿渣	玄武岩	石灰岩
3	5	5	5
5	5	4	3
10	3	3	2
15	2	2	1
20	1	1	1

由表 6 可知,三种集料在 3 min 水煮后沥青膜基本没有脱落,粘附性等级均为 5 级,均满足规范要求。在经过 5 min 水煮后,玄武岩沥青膜出现些许剥落,石灰岩则有明显的局部移动现象,高钛重矿渣基本没有剥落和移动的现象。水煮时间 10 min 后,三种集料均出现沥青膜明显移动、剥落的现象,至 20 min 几乎无沥青附着。从延长水煮时间后粘附性等级的变化情况看,高钛重矿渣与沥青的粘附性要优于其它两种天然骨料,原因在于其表面粗糙度更大且为碱性集料,提高了“锚固作用”及化学吸附能力。

3 结论

1)高钛重矿渣为碱性集料,且宏观及微观形貌均呈现凹凸不平、粗糙多孔的特性,与沥青的粘附性较好,且要优于沥青混合料常用的玄武岩及石灰岩。

2)高钛重矿渣为五元渣系,活性低于普通高炉渣,作为沥青混合料集料的体积稳定性好、高温性能好。

3)对比玄武岩及石灰岩,高钛重矿渣针片状含量最低、压碎值及磨耗值介于两者之间且仅略低于玄武岩,作为沥青混合料的集料兼具良好的力学性能及耐久性能。

4)各粒径范围的高钛重矿渣表观密度略低于玄武岩与石灰岩,但高于其规范要求值;吸水率较天然骨料更大且随粒径的减小而增大,导致沥青用量略微增加,但高钛重矿渣量大价廉,其环保及经济效益显著。

参考文献

- [1] Chen Deming. Characteristics of titanium resources in Panxi area[J]. Panzhihua Sci-Tech & Information, 2009, (3): 5-9.
(陈德明. 攀西地区钛资源的特点及其利用途径[J]. 攀枝花科技与信息, 2009, (3): 5-9.)
- [2] Du Hegui. The principle of blast furnace smelting vanadium titanomagnetite[M]. Beijing: Science Press, 1996.
(杜鹤桂. 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.)
- [3] Zhou Chunlin. Investigation on the key technological problems during manufacturing superior quality ferrous materials by vanadium-titanium bearing magnetite ore[D]. Shengyang: Northeastern University, 2013.
(周春林. 应用钒钛磁铁矿生产高品质钢铁材料关键技术问题的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.)
- [4] Zhen Yulan. New ways of recycling titanium-bearing blast furnace slag in Panzhihua[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
(甄玉兰. 攀枝花含钛高炉渣资源化利用新途径[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.)
- [5] Bai Chenguang. Study on some physical chemistry problems of blast furnace slag-bearing titania [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
(白晨光. 含钛高炉渣的若干物理化学问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.)

- [6] Zhou Zhiming. Study on separating titania from furnace slag containing high TiO_2 [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
(周志明. 高钛型高炉渣渣钛分离研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.)
- [7] Wang Hao, Wang Xiaojia, Gui Feng, *et al.* The status and prospect of blast furnace slag resource utilization[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2021, 50(11): 48–53.
(王浩, 王晓佳, 桂峰, 等. 高炉矿渣资源化利用现状及展望[J]. *化工矿物与加工*, 2021, 50(11): 48–53.)
- [8] Fang Rongli, Jin Chengchang. The way of high value comprehensive utilization of titanium slag in Panzhihua Iron & Steel Co., Ltd. production of composite cement and less clinker cement by residue after titanium extraction[J]. *Sichuan Environment*, 1994, (2): 39–42.
(方荣利, 金成昌. 高价值综合利用攀钢钛矿渣的途径—利用提钛后残渣生产复合水泥与少熟料水泥[J]. *四川环境*, 1994, (2): 39–42.)
- [9] He Siqi. Study on principle and chemical kinetics of valuable components extraction and separation from Panzhihua high titanium-vlast furnace slag [J]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
(何思祺. 攀枝花高钛高炉渣有价值组分提取分离原理与化学动力学研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.)
- [10] Sun Changxin, Wang Binggang. Application of the blast furnace heavy slag in asphalt concrete pavement[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1994, (2): 9–14, 26.
(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, (2): 9–14, 26.)
- [11] Qin lin, Li Jianghua, Ma Yaozong, *et al.* Study on the influence of blast furnace slag as the aggregate on low-temperature performance of asphalt road[J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2018, (8): 18–21.
(覃琳, 李江华, 马耀宗, 等. 高炉炉渣作为骨料对沥青道路低温性能的影响研究[J]. *西部交通科技*, 2018, (8): 18–21.)
- [12] Sun Jianguo, Chen Yujie, Wang Qiuyun, *et al.* Discussion on the application of blast furnace slag in asphalt concrete pavement surface[J]. *Create Living*, 2019, (5): 128–131.
(孙建国, 陈玉洁, 王秋云, 等. 浅谈高炉矿渣用于沥青混凝土路面面层的应用探索[J]. *居业*, 2019, (5): 128–131.)
- [13] Chai Chao. Research on mechanical properties and durability of composite modified porous steel slag asphalt mixture in seasonal frozen region[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
(柴潮. 季冻区复合改性多孔钢渣沥青混合料力学性能及耐久性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.)
- [14] Tan Wei. Study on experimental system development and key technology of limestone optimization based on anti-sliding characteristics of asphalt pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
(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: 重庆交通大学, 2017.)
- [15] Yang He. A heuristic view about resource recovery of titania-bearing blast furnace slags [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
(杨合. 含钛高炉渣再资源化的一个启发性观点[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.)

编辑 杨冬梅

(上接第74页)

- [14] Shelton M C, Cotterill I C, Novak S T A, *et al.* 2-Keto-3-deoxy-6-phosphogluconate aldolases as catalysts for stereocontrolled carbon-carbon bond formation[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1996, 118(9): 2117–2125.
- [15] Qi Zhengfeng. Diffusion and phase transition in solid metals[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998.
(戚正风. 固态金属中的扩散与相变[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.)
- [16] Yan Ying. The interface basis of solid materials[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2008.
(颜莹. 固体材料界面基础[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2008.)
- [17] Giovannetti G, Khomyakov P A, Brocks G, *et al.* Substrate-induced bandgap in graphene on hexagonal boron nitride[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(7): 3009–3014.

编辑 杨冬梅