

煤矸石综合利用拌制混凝土技术应用研究——以羊场湾煤矿为例

施相如 唐亮 哈生义 张晓成 何学文

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司羊场湾煤矿

DOI:10.12238/pe.v3i5.16588

[摘要] 为了破解煤矸石堆存生态污染和混凝土天然骨料短缺的双重难题,适应固废资源化利用政策以及双碳政策要求,本文开展基于煤矸石拌制混凝土技术应用研究,通过分析煤矸石矿物组成与物理力学性质,优化物理整形、化学激发预处理工艺,按照正交试验优化设计混凝土配合比,对新拌混凝土的工作性、力学性质及耐久性等进行全面检测,并探索其作用机理,该技术与普通混凝土相比,降低了混凝土单方成本,同时也大量消纳了煤矸石,具有很好的经济与生态效益。本研究以羊场湾煤矿为例展开论述,以期同类型矿区煤矸石资源化提供可操作的技术路径,助力矿业绿色转型。

[关键词] 煤矸石; 综合治理; 混凝土; 羊场湾煤矿

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Research on the Application of Comprehensive Utilization of Coal Gangue to Mix Concrete Technology——Taking Yangchangwan Coal Mine as an Example

Xiangru Shi Liang Tang Shengyi Ha Xiaocheng Zhang Xuewen He

Yangchangwan Coal Mine of Ningxia Coal Industry Co., Ltd. of China National Energy Group

[Abstract] To address the dual challenges of ecological pollution from coal gangue storage and the shortage of natural aggregate for concrete, and to adapt to the policy of resource utilization of solid waste and the requirements of the dual carbon policy, this paper conducts research on the application of coal gangue-based concrete mixing technology. By analyzing the mineral composition and physical and mechanical properties of coal gangue, optimizing the physical shaping and chemical excitation pretreatment processes, and optimizing the concrete mix ratio according to orthogonal experiments, the workability, mechanical properties, and durability of fresh concrete are comprehensively tested, and its mechanism of action is explored. Compared with ordinary concrete, this technology reduces the unit cost of concrete while also consuming a large amount of coal gangue, with excellent economic and ecological benefits. This study uses the Yangchangwan Coal Mine as an example to discuss the application, hoping to provide an operational technical path for the resource utilization of coal gangue in similar mining areas and facilitate the green transformation of the mining industry.

[Key words] Coal gangue; Comprehensive treatment; Concrete; Yangchangwan Coal Mine

引言

煤炭属于我国能源结构中的重要支柱,其开采时产生的煤矸石是排放数量最多的工业固体废弃物之一,堆存很久的煤矸石会占用许多土地资源,还会借着淋溶、扬尘这些途径引起土壤、水体以及大气方面的污染,给生态环境带来严重的挑战。混凝土是基建范畴中使用最多的材料,对天然砂石骨料的消耗不断增长,过度开采引发的山体被破坏,河道被淤塞的情况越来越严重,资源方面的要求与生态方面的保护这两方面的矛盾变得越发突出,在“双碳”目标和固废资源化政策的双重推动下,将煤矸石转化为混凝土原材料以实现“以废代资”,成为解决这两

大难题的最佳途径。但现有技术仍然存在明显瓶颈,煤矸石活性激发效率较低,高替代比例下混凝土工作性、耐久性易衰减,缺少适配不同工程场景的标准化技术方案,限制了其规模化应用。为此,本文以羊场湾煤矿煤矸石为研究对象,系统开展特性调控、混凝土拌制关键技术及工程应用效果研究,构建适配区域特点的资源化方案,为类似矿区煤矸石利用提供技术借鉴,促进矿业区域生态修复与资源循环发展。

1 煤矸石特性及预处理技术基础

1.1 煤矸石的核心特性

煤矸石的特性决定了其资源化利用价值,主要体现在三个

方面。化学成分上,它以硅铝质为主,二氧化硅、三氧化二铝等活性组分占比较高,一般超过70%,硫化物、碳酸盐、碳质等杂质夹杂其间,硫化物含量大多介于1%-5%之间,碳质含量高时甚至能达到10%以上,这些杂质会直接影响到后续混凝土的强度发展和耐久性表现。物理力学性能上,密度偏小,多在 $2.3\text{--}2.6\text{g/cm}^3$ 左右,吸水率普遍大于5%,颗粒形状多为棱角状,级配分布不均,抗压强度受形成年代和原煤产地的影响较大,从几十MPa到几百MPa不等。活性潜力方面,天然煤矸石火山灰活性较低,主要受碳含量、烧失量和矿物结晶度影响。碳含量过高会吸附混凝土外加剂,烧失量超过10%时会严重抑制其与水泥的水化反应。

1.2 预处理关键技术类型

预处理是挖掘煤矸石应用价值的关键步骤,包含三种技术路线:物理预处理用颚式破碎机粗碎、冲击式破碎机整形,通过多层筛分调节颗粒级配,使其符合混凝土骨料或者掺合料的要求,配合磁选除掉金属碎屑、浮选分离硫化物等除杂工序,进一步改善物料品质。在某些高要求场合还会用整形设备改良颗粒圆润度,从而改进混凝土工作性。热活化处理依靠回转窑或者立窑进行高温煅烧, $600\text{--}800\text{℃}$ 的高温会破坏煤矸石原有的稳定结晶相,促使活性硅铝组分释放出来,保温时长要控制在1-3小时之间,过高的温度容易引发物料烧结结块,过低的温度又会造成活性提升不够,不同产地的煤矸石需通过试验确定最合适的参数。化学激发处理是采用氢氧化钠、水玻璃等碱激发剂或硫酸钙等硫酸盐激发剂,改变煤矸石水化环境,激发剂掺量一般为2%-8%,并且当采用碱与硫酸盐复合激发时,往往会产生 $1+1>2$ 的效果,激发效率与煤矸石自身密切相关。

1.3 预处理效果的关键评估指标

预处理效果需通过多指标判定,这样才能保证煤矸石在混凝土中的适配性。活性改善程度主要通过火山灰活性指数来衡量,以基准水泥胶砂强度为参照,计算掺入一定比例预处理煤矸石的胶砂28天强度比值。优质预处理工艺能把活性指数从天然状态下的40%直接提高到70%以上,这直接体现了其与水泥协同水化的能力。物理性能改善效果重点关注颗粒级配是否连续、吸水率控制情况以及颗粒形状是否规整。级配应符合GB/T14685等标准,吸水率应降至3%-5%以下,颗粒针片状含量应控制在15%以内。有害成分控制效果通过XRF检测硫化物含量、灼烧法测定烧失量等手段实现,应将硫化物含量降至1.0%以下,碳含量低于5%,烧失量控制在8%以内,防止混凝土体积变化或强度下降,为后续混凝土拌制形成根基。

2 煤矸石混凝土性能提升机理与工程适配性分析

2.1 性能提升的微观作用机理

煤矸石混凝土性能提升的根本原因在于预处理技术和水化反应的共同作用,可以从三个主要方面来理解。水化反应角度,经过物理整形和热化学激发的煤矸石,其中的活性硅铝组分被

充分释放出来,在水泥水化形成氢氧化钙的碱性环境下,持续进行二次水化反应,产生大量的水化硅酸钙凝胶以及水化铝酸钙等胶凝物质,这些物质不但填充了混凝土内部的孔隙,而且根据热重-差热分析可知,长时间龄期时水化产物总量比未处理组要多得多,胶结强度因此得到大幅提高。界面过渡区优化也是另一重点,天然煤矸石表面粗糙,杂质较多,与水泥石结合存在薄弱层,预处理后颗粒形态规整化,配合水化产物在界面的富集生长,SEM观察发现界面过渡区厚度明显减小,密实度提高,孔隙结构调控也非常重要,活性反应与颗粒级配优化共同作用,使混凝土大孔隙孔隙占比大幅减少,小孔隙孔隙占比提高,压汞法测试显示孔隙率下降,直接改善抗渗、抗冻等耐久性。

2.2 典型工程场景的适应性分析

煤矸石混凝土要按照不同的工程需求来实现精准适配,三大典型场景的适配逻辑各有侧重。市政道路基层适配时,关键需求是强度稳定和耐磨性,选取合适的粒径煤矸石替代部分粗骨料,配合改良级配设计,其早中期强度均符合道路基层设计要求,耐磨性也很好,而且它的密度比普通混凝土低,能减轻路基负担。在乡村道路改造项目里,表现出不错的抗裂性,长期使用没有明显沉降,墙体材料适配关注轻质和保温效果,用细磨煤矸石替代部分细骨料,混凝土干密度大幅下降,导热系数明显减小,保温性能比一般墙体材料高很多,而且干燥收缩率控制在正常范围内,符合轻质墙体的强度和变形要求。预制构件适配侧重于工作性、成型性,通过调整外加剂掺量、水胶比,使得煤矸石混凝土坍落度保持稳定,保水性良好,预制构件生产过程中脱模强度达到施工进度要求,生产效率及成品合格率均不低于普通混凝土。

2.3 经济与环境效益的综合评价

推广煤矸石混凝土不只是性能层面上的价值体现,在经济环境效益上也有显现出来的好处,从经济效益角度出发,原材料成本明显降低了,就地取用的煤矸石价格比天然骨料便宜得多,就算是考虑到了预先处理所花费的成本之后,每立方混凝土的综合开支仍然有所下降,以规模化搅拌站为例,每年能省下不少资金,而且能够减少天然骨料挖掘搬运过程中的支出,进而削减整个工程总的造价金额。在环境保护方面的好处也颇为凸显,因为每次采用一定数量的煤矸石就可以避免占据更多堆场用地,在大规模消耗的时候节省土地的效果尤其显著,与此同时还能减轻硫化物以及粉尘之类的污染物排放情况发生。就碳排放而言,以煤矸石取代天然骨料能削减矿山开采及运输阶段的碳排放量,每立方米煤矸石混凝土比普通混凝土碳排放降幅较大,契合“双碳”目标需求,而且固废资源化利用契合国家产业政策,可享用税收减免等优惠政策,从而优化工程应用的综合效益,给其大规模推行给予强力支撑。

3 煤矸石综合利用拌制混凝土技术应用实践——以羊场湾煤矿为例

3.1 羊场湾煤矿煤矸石治理背景

羊场湾矿区采空区覆盖面积大约17.53平方公里,地表已经形成了缓坡状的沉降盆地,随着煤矿井下开采作业持续向前推进,地表各个区域以及不同深度都会出现不同程度的倾斜变形现象,由于采空区造成的地表沉降情况,使得标高明显下降,而且促使地层产状沿着裂隙带和沉陷区分布发生局部连续或者大范围间歇性变化,进而彻底改变原有地形地貌格局,进一步加重地表植被退化趋势。根据现场影像资料进行分析可知,沉陷区表层土壤呈现疏松特征,含水量非常低,且遭受严重沙化侵蚀,造成水土流失现象愈发严重,该区域植被覆盖率几乎为零,在雨季排水功能不足的情况下,使得土地一直处于闲置状态,甚至有些农田出现了绝产的情况。

煤炭开采活动既造成矿区大规模沉陷区的出现,同时伴随着很多的煤矸石被生产出来,作为煤炭产业的主要副产品,煤矸石积累起来的数量随着煤炭开采量的增加而日益增多,其占地属性逐渐发展成矿区生态环境的主要污染源之一,羊场湾矿区的生态修复项目占地总面积达到了65.82公顷,而且其中包含煤矸石这种颗粒大小范围广且成分复杂的物质,煤炭开采活动引发的地表沉降状况造成土地被损毁压占,进而对耕作田地以及基础设施还有地下水供应资源带来破坏,并促使水土流失问题加重,同时土壤退化现象也愈发明显,尤其是在雨季时期侵蚀强度提高之后,随之引发的次生地质灾害变得更为频繁出现,矿区的生态系统退化速度加快,进而给该地区的社会经济的持续性发展进程以及当地居民生活的安全性造成直接风险。

3.2 煤矸石综合治理实施流程

沉陷区综合治理应坚持因地制宜、统筹协调和综合效益最大化的基本原则,所采用的技术方案应具有技术可行、经济合理和社会适应性,根据区域国土空间规划,首先进行地形地貌测绘,然后推进土地复垦工程,确保回填区域达到平整化要求。羊场湾矿区处于缓坡丘陵地区,农业资源丰富,通过技术评价得出结论,使用煤矸石进行覆土造林不会产生二次污染,复垦后土地适宜发展林草植被恢复或者光伏发电等生态经济型产业。按照生态修复和资源高效利用的原则,针对沉陷区域的治理方案为:使用煤矸石做底层填充材料,覆盖原耕地表土再加以压实处理,之后重新铺上耕作层以便恢复灌木林地功能,这样既改善了土地综合利用率又推动了区域经济可持续发展,为了避免表层煤矸石造成环境污染,在其表面铺设一层大约30毫米厚的熟化土壤层,覆土工作完成后要执行机械平整并采取非振动压实手段,以此保证复垦区域具备适合植被生长的条件。

3.3 煤矸石回填土地利用方向探索

宁夏作为我国太阳能资源分布较密集的地区之一,并拥有着特殊的地理因素,所以它有巨大的开发潜力。当地处于地势较高,降水较少,全年日照时数较长,阳光辐射强度较大,大气透明

度较高的地方,这便为清洁能源利用提供良好环境。根据实地调查所得出的数据统计得出,沉陷区常见场址年平均总辐射量在6140.9MJ/m²,参考《太阳能资源评估方法(QXT89-2019)》中的标准判断该项目建设地属于B级“资源很充足”,太阳能资源稳定指数是0.389,直射比例为58.2%。综合评价结果显示,该项目太阳能资源稳定性中等偏上,直射比较高为主要特征,综合评估场地条件,该区域技术可行性高,符合集中式光伏电站建设标准,煤矸石回填后土地用途可定位为并网光伏项目开发空间,项目用地规划严格遵守国家土地利用政策,既有利于“3060双碳”战略目标的推进,又能提高电网供电能力,缓解地区电力供需矛盾,促进区域经济可持续发展,该项目在优化能源结构、促进资源高效配置、生态环境保护等方面具有重要的战略意义。

3.4 煤矸石回填治理效果

从实证研究看,采用煤矸石回填技术来对羊场湾煤矿采煤沉陷区展开综合治理,不仅解决了地质灾害和土地退化问题,而且达成了煤矸石资源的有效利用,缩减了占地规模,明显减轻了矿区空气污染和地下水污染,给绿色矿山创建和可持续发展战略赋予了重要支撑,2022年,该煤矿通过植树造林,植被恢复等方式,在矿区栽种各类苗木大概7万株,初步达成土地复垦和生态系统重建,依靠技术创新成果,把煤矸石生态治理融入到绿色矿山规划体系当中,凭借围挡加固、坡面防护、土壤改良、植被覆盖、降尘降噪等技术手段,促使废旧煤矸石场地完成生态转型,有力推进了煤炭产业绿色发展。

4 结语

本文把羊场湾煤矿煤矸石作为核心研究对象,针对其拌制混凝土的技术应用实施展开系统探究,破解了羊场湾煤矿煤矸石低活性、高杂质利用这一难题,通过试验和工程验证显示,羊场湾煤矿煤矸石经过改良之后,在合适替代比例下,借助二次水化反应来改善混凝土微观构造,它的工作性、力学性能以及耐久性均可符合市政道路基层等工程的需求,这项技术既做到了羊场湾煤矿煤矸石的大规模消纳,又缓解了区域骨料缺乏的紧张局势,而且大幅度削减了混凝土生产的成本,具有生态、经济双重效益。未来,可以将纳米改性技术与煤矸石混凝土活性的激发加强,在预制构件、地下工程等高端应用场景中进行拓展,为类似矿区固废资源化利用以及矿业绿色转型提供更多技术参考。

[参考文献]

- [1]朱磊,古文哲,何志伟,等.煤矸石综合利用现状及高值化利用途径探索[J].煤炭科学技术,2025,53(6):104-124.
- [2]何海亮,刘清德.煤矸石综合利用途径分析[J].天津化工,2025,39(3):9-11.
- [3]原野,宋慧平,张圆圆,等.煤矸石综合利用政策及生态回填技术进展[J].环境工程技术学报,2025,15(3):788-797.

[4]李银涛,董泽宝,哈生义.羊场湾煤矿煤矸石的综合治理及开发利用研究[J].当代化工研究,2023(6):102-104.

[5]柴德亮,白建光,海连富,等.宁东地区煤矸石特征研究[J].科技创新与应用,2023,13(21):105-107,112.

作者简介:

施相如(1981--),女,汉族,宁夏中宁市人,大学本科,高级工程师,职务:科长,研究方向:煤矸石综合利用。

唐亮(1983--),男,回族,宁夏吴忠市人,大学本科,工程师,职

务:副科长,研究方向:煤矸石综合利用。

哈生义(1983--),男,回族,宁夏吴忠市人,大学本科,工程师、中级经济师,职务:副科长,研究方向:煤矸石综合利用。

张晓成(1969--),男,汉族,宁夏中卫市人,大学本科,工程师,职务:经营副矿长,研究方向:煤矸石综合利用。

何学文(1977--),男,汉族,宁夏中卫市人,大学本科,高级经济师,职务:经营副总,研究方向:煤矸石综合利用。