

基于数字图像技术的高掺量磷石膏水泥稳定碎石层施工技术

王 丰 姚启文

中冶建工集团有限公司 重庆 400084

摘 要: 磷石膏是磷肥生产过程中产生的大宗工业固体废弃物,我国累计堆存量达数亿吨,环境风险突出。道路基层工程因用料量大、适配性广,是消纳磷石膏的理想途径。传统技术中磷石膏掺量仅 10%~20%,难以大宗消纳;高掺量时存在强度不足、浸出毒性超标、施工均匀性难以保证等问题。研究团队通过自主研发的矿渣基地聚物固化剂,将磷石膏掺量提升至 35%;引入数字图像均匀性评价系统,实时调控混合料搅拌质量;形成涵盖配合比设计、原材料预处理、连续式拌合、数字图像监控、静压碾压、养护检测的全流程施工工艺技术。研究结果显示,7d 无侧限抗压强度达 5.3~6.6MPa,满足高速公路及一级公路基层强度要求;污染物固化率超 96%,浸出毒性符合《污水综合排放标准》一级标准要求。

关键词: 磷石膏;水泥稳定碎石;高掺量;数字图像技术;道路基层

引言

磷石膏是湿法磷酸生产排放的工业副产石膏,每生产 1t 磷酸约产生 4.5~5t 磷石膏。据统计,全球磷石膏年产能约 2 亿吨,我国年产量超 8 千万吨,累计堆存量达 8.7 亿吨。其中重庆市綦江区、南川区、涪陵区三地磷石膏总堆存量 2285 万 t,四川省达州市瓮福集团堆场堆存量约 2 千万吨,堆场已接近饱和。大量堆存的磷石膏占用土地资源,所含可溶性磷、氟及重金属会污染周边土壤与地下水,制约区域经济社会可持续发展。

道路工程基层用料量大,是消纳大宗工业固废的理想场景,但磷石膏在道路基层应用中长期面临多重技术瓶颈:纯磷石膏作基层材料易开裂、水泥掺量高、对施工设备要求高,且原材料需水洗,经济性差;传统水泥稳定碎石层中磷石膏掺量仅 10%~20%,消纳能力有限;掺量提高后,混合料 7d 无侧限抗压强度难以达标,浸出毒性也存在超标风险;此外高掺量磷石膏混合料粉末占比大,磷石膏易受潮结块,传统搅拌方法无法保证均匀性,也无法在生产中及时调整。

针对上述问题,研究团队围绕 30%~40% 磷石膏掺量的水泥稳定碎石材料设计与施工方法开展攻关,形成基于数字图像技术的高掺量磷石膏水泥稳定碎石层施工技术。本文系统阐述该技术的材料设计原理、施工工艺流程及工程应用效果,为磷石膏高效路用资源化利用提供技术参考。

1 技术特点与工艺原理

1.1 核心技术特点

本技术的核心创新体现在三个方面。其一,自主研发了矿渣基地聚物固化剂。该固化剂由矿渣粉、硅灰、片状氢氧化钠及液体硅酸钠四种组分构成,能够在增强混合料强度的同时有效激活磷石膏与水泥的水化反应,生成更多的水化凝胶产物,从而更有效地吸附和固定磷石膏中的特征污染物及重金属离子。其二,实现了磷石膏的高掺量利用。依托固化剂的性能改善作用,磷石膏掺量由传统的 10%~20% 提升至 35%,且原材料无需水洗或煅烧即可直接现场使用。经大量试验与现场实践验证,该新型水泥稳定碎石层的路用性能指标及浸出毒性均符合设计与规范要求。其三,引入数字图像技术保障搅拌质量。针对高掺量磷石膏混合料和易性差的特点,通过 CCD 相机采集拌合料表面图像,经图像处理与分析评价,实时量化反映混合料的搅拌均匀程度,并据此动态调节搅拌机的搅拌时间、转速等参数^[1]。

1.2 工艺原理

本技术的工艺原理可从材料科学与质量控制两个层面加以阐释。

材料科学层面,磷石膏与水泥水化可生成少量吸附重金属和污染物的水化凝胶,掺加固化剂后,磷石膏与水泥反应活性增强,钙矾石和 C-S-H 凝胶含量大幅提高;固化剂活性成分经二次水化生成额外水化凝胶,形成致密内部结构与三维骨架,在提升混合料强度的同时,增强了对特征污染物的吸附固定能力,还可中和磷石膏弱酸性,激活

胶结料二次水化,优化材料微观结构。

质量控制层面,本技术建立基于数字图像的混合料均匀性评价方法,通过 CCD 相机采集拌合料表面图像,经多步图像处理识别集料颗粒分布,基于四边静矩理论计算得均匀系数 E_a , E_a 越小集料分布越均匀,当 E_a 小于 1.3% 时均匀性合格。该方法实现了搅拌质量实时量化评价,为动态调整工艺参数提供依据。

2 施工工艺流程

2.1 原材料要求与配合比设计

本技术所用原材料包括磷石膏、水泥、固化剂及粗集料。磷石膏需经人工破碎过筛后得到灰白色粉状产物,含水率不应大于 15%。水泥采用散装 P.O42.5 水泥,应在出厂保质期 3 个月以内使用。固化剂由 S95 级矿渣粉、硅灰、模数 2.3 的液体硅酸钠及纯度 98% 的片状氢氧化钠组成。三种集料分别选用中粗砂、5~10mm 碎石及 10~20mm 碎石,含泥量不超过 3%,碎石压碎值不大于 35%。

配合比设计是保障材料性能的关键环节。试验分两阶段进行:先进行混合料配合比设计,再进行高掺量磷石膏基无机结合料的设计。通过无侧限抗压强度试验,综合对比不同磷石膏掺量对基层材料力学性能的影响规律,最终确定磷石膏掺量为 35% 时混合料强度最优。在此基础上,基于碱激发地聚物理论,研发由矿渣、硅灰、氢氧化钠、硅酸钠组成的固化剂,部分替代原配合比中的水泥。大量试验表明,35% 磷石膏搭配 4% 水泥及 1% 固化剂的配比不仅能提供优良的胶结性能,还有利于形成稳定的骨架结构,其 7d 无侧限抗压强度均高于磷石膏掺量为 15%~30% 和 40%~50% 的试件。单位体积 (m^3) 高掺量磷石膏水泥稳定碎石层各组分材料用量为:10~20mm 碎石 981kg、4.75~10mm 碎石 435kg、砂 67kg、磷石膏 843kg、水泥 105kg、矿渣 18.1kg、硅灰 2.0kg、硅酸钠 5.2kg、氢氧化钠 1.0kg、水 69.3kg。

2.2 施工准备与混合料拌合

施工准备阶段主要包括磷石膏的翻晒过筛和固化剂的预拌合两项工作。磷石膏从露天堆场运输至料仓时含水率较高,需提前翻晒 2~3 天,确保含水率降至 15% 及以下。翻晒后的磷石膏采用移动破碎站进行破碎过筛,得到灰白色粉状物料,以保证其能顺利通过投料口进入传送带。固化剂的固体组分(矿渣+硅灰)需与中粗砂提前进行预拌合,液体组分(硅酸钠+氢氧化钠)则与水进行预拌合,所有预拌合工作应在混合料正式拌合前 3~12 小时内完成。预拌合过程中需特别注意:片状氢氧

化钠与水混合会发生放热反应,应先添加足量的水后再加入氢氧化钠进行拌合,以保障设备和人员安全。

混合料拌合采用连续式搅拌机进行规模化生产。将固化剂-中粗砂混合料、10~20mm 碎石、5~10mm 碎石和磷石膏分别投入对应投料口,通过传送带送入拌合机;水泥和固化剂液体组分则通过拌合机配备的喷洒系统掺加。投料机配置的自动计量装置控制各传送带的转动速率及喷洒系统的工作速率,确保混合料按预定配合比生产。生产过程中需根据天气变化、磷石膏含水率及前场铺筑情况适时调整加水量。

2.3 数字图像均匀性评价

在搅拌机出料口旁安装 CCD 相机,相机镜头距离混合料表面 80~100cm,保持与混合料表面平行。暂停出料待运输车内混合料静止后进行图像采集,图像通过无线网络传输至笔记本电脑进行处理分析。

基于 MATLAB 软件开发了磷石膏水泥稳定碎石均匀性评价系统。载入图像后,系统自动依次进行维纳滤波复原、灰度转换、直方图均衡化、二值化及形态学处理。处理完成后,系统识别并分类各档集料颗粒,统计各颗粒面积及其到图像四边的距离,计算各颗粒的静矩值,进而求得所有集料颗粒对四边的静矩之和及均值,最终得出均匀系数 E_a 。

通过采集 100 幅现场混合料图像进行分析计算,并与实际搅拌均匀程度进行对比验证,确定均匀系数合格标准为 $E_a < 1.3\%$ 。生产过程中每隔 15s 进行一次分析评价,数据稳定合格后方可判定混合料均匀性合格。对于均匀系数不合格的情况,将混合料倒入废料池进行无害化处理,并适当调整搅拌机转速、搅拌时间及用水量等参数^[2]。

2.4 摊铺、碾压与养护

经均匀性评价合格的混合料应立即装料运输,并在 2 小时内运至施工现场进行摊铺。运输过程中需用篷布覆盖,防止水分损失。摊铺前应保证下承层作业面清洁,撒布水泥净浆以增加层间粘结。采用平地机进行摊铺,松铺厚度控制在 16~20cm 之间。摊铺后设专人消除集料离析及磷石膏结团部位。

碾压工序是本技术的重要特色之一。因高掺量磷石膏混合料密实度高,采用普通钢轮压路机静压 3~4 遍即可满足要求,无需振压。具体工艺为:摊铺完成后间隔 15min 开始碾压,初压采用 12T 钢轮压路机静压 1 遍(速度 1.5~1.7km/h),复压采用 22T 钢轮压路机静压 2 遍(速度 1.8~2.2km/h),终压采用 25T 钢轮压路机静压 1

遍（速度 1.5 ~ 1.7km/h）。整个碾压过程不采用振压，以避免混合料碾压后表面泛浆。碾压过程中混合料表面需始终保持湿润，水分蒸发过快时可少量雾状补水。

碾压完成并经压实度检查合格后，采用节水保湿养生膜进行养护，保持湿润。常温下养护 7 天后，方可铺筑面层。

3 质量控制与效果分析

3.1 质量控制体系

本技术建立了覆盖原材料、生产过程、成品检测的全过程质量控制体系。原材料方面，磷石膏进场前须检测放射性及重金属含量指标，含水率不合格者须经翻晒或热风烘干处理；磷石膏储存时应搭建防雨防潮棚，堆放高度不超过 2m，每周至少检测一次库存磷石膏含水率；各种原材料在工程开工前须进行检验，材料来源或规格发生变化时须重新检验。

施工过程控制方面，压实度采用灌砂法检测，高速公路和一级公路基层压实度应不小于 98%；碾压完成后应立即检测，遇雨后施工或特殊地质条件需待基层稳定后再进行。弯沉值检测在碾压完成后 7 ~ 10 天进行，检测值不应大于设计要求值。平整度、厚度、7d 无侧限抗压强度等检测项目应符合《公路路面基层施工技术细则》相关要求。

成品检测方面，7d 无侧限抗压强度在摊铺当天现场取样后在试验室击实成型，封闭养护 6 天并泡水 1 天后测定。浸出毒性检测采用钻芯取样，分别在养护 7 天及铺筑完成 1 年后进行。芯样经具备资质的检测机构检测，各项指标均满足《污水综合排放标准》一级标准与《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》要求^[3]。

3.2 工程应用效果

本技术在达州两项道路工程中得到了应用，两工程累计消纳磷石膏约 7000t。现场检测结果表明：7d 无侧限抗压强度约 5.3MPa，满足高速公路及一级公路极重、特重交通基层强度要求；现场使用近一年，铺筑的沥青路面未出现沉降开裂，综合路用性能优于传统磷石膏水稳层。试验路检测结果显示，铺筑路段 7d 无侧限抗压强度达 6.2MPa，路面弯沉值 0.17mm，芯样结构密实均匀。浸出毒性测试表明，磷、氟污染物固化率分别达 99.97%、96.23%，砷离子浸出浓度大幅降低。

3.3 效益分析

经济效益方面，经综合测算原材料方面因磷石膏替

代部分砂石，节约费用折合每方约 24.93 元。社会与环境效益方面，磷石膏掺量由传统的 10% ~ 20% 提升至 35%，显著提高了固废综合利用率。经测算，每吨磷石膏可减少占地约 0.3m²。研发的固化剂有效吸附固化磷石膏中的特征污染物，避免了水土污染。该技术为达州市地方标准的拟定提供了技术支撑，对同类工程具有较好的推广应用价值。

4 结论

（1）通过自主研发的矿渣基地聚物固化剂，可将磷石膏在水泥稳定碎石层中的掺量提升至 35%，且原材料无需水洗或煅烧即可直接使用。优化配合比为碎石 60%、磷石膏 35%、水泥 4%、固化剂 1%，单位体积材料用量明确可控。

（2）建立了基于数字图像技术的混合料均匀性评价方法。通过 CCD 相机采集图像，经维纳滤波、灰度转换、直方图均衡化、二值化及形态学处理，基于四边静矩理论计算均匀系数 E_a 。以 $E_a < 1.3\%$ 作为合格标准，实现了搅拌质量的实时量化评价与工艺参数的动态调控。

（3）形成了涵盖磷石膏翻晒过筛、固化剂预拌合、连续式拌合、数字图像监控、静压碾压、保湿养护、成品检测的全流程施工工艺。该工艺设备要求低，采用普通钢轮压路机静压 3 ~ 4 遍即可，无需振压，节省机械台班费用。

（4）工程应用表明，该技术 7d 无侧限抗压强度达 5.3 ~ 6.6MPa，可满足高等级公路基层强度要求；污染物固化率超 96%，浸出毒性符合国家环保标准；综合经济效益节约 23 ~ 25 元/m³，累计消纳磷石膏约 7000t。该技术为磷石膏的大宗消纳与路用资源化利用提供了可行的技术方案，具有良好的推广应用前景。

参考文献

- [1] 邢安安, 苗俊艳, 刘欣雨, 等. 磷石膏应用现状和热点趋势的文献计量学分析 [J/OL]. 应用化工: 2025, 01 (23) : 1-13. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20250123.007.
- [2] 唐雪梅, 王美波, 徐丽, 等. 磷石膏低温煅烧增白研究 [J/OL]. 无机盐工业, 2024, 56(08): 110-115. DOI: 10.19964/j.issn.1006-4990.2023-0533.
- [3] 陈秋松, 张琦, 齐冲冲, 等. 磷石膏充填体强度和浸出毒性的温变规律 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(04): 1084-1095.