

工业固废磷石膏高效路用资源化关键技术

姚启文

中冶建工集团有限公司 重庆 400052

摘要: 针对我国磷石膏堆存量、资源化利用率低、路用应用受限的行业难题,本文以高掺量磷石膏稳定碎石道路基层材料为研究对象,系统开展原材料理化特性分析、配合比优化设计、路用性能检测、微观机理剖析及施工工艺研发等系列研究。依托自研矿渣基聚物固化剂,构建磷石膏-水泥、磷石膏-水泥-固化剂两套稳定体系,有效解决传统技术磷石膏掺量低、污染风险高、力学性能不足、难以规模化施工等痛点。试验结果表明:优化体系可实现磷石膏35%高掺量利用,仅1%固化剂掺量即可显著提升材料力学性能与水稳定性,污染物固化率超96%,浸出毒性完全符合国标要求。依托试验路优化形成成套施工与质量控制技术,可满足高等级公路基层使用标准。该技术可高效消纳工业固废,兼具经济、环保与工程价值,为磷石膏规模化路用资源化利用提供技术支撑。

关键词: 磷石膏;工业固废;道路基层;资源化利用;路用性能;固化技术;施工工艺

0 引言

磷石膏是磷酸与磷肥生产过程中产生的工业副产固废,全球年产能约2亿吨,我国年产量超8000万吨,累计堆存量达8.7亿吨,堆场趋近饱和,土地占用与生态污染问题日益严峻。目前国内磷石膏综合利用率仅40%,且现有路用研究多将其作为微量外加剂使用,掺量仅8%~15%,无法实现大宗消纳。同时,高掺量磷石膏路用材料存在胶结配比不合理、长期环保性未知、强度形成机制模糊、量产施工技术缺失等诸多问题,严重制约其工程推广。

道路基层工程用料量大、适配性广,是大宗工业固废资源化消纳的最优场景之一。为突破现有技术瓶颈,本文结合微观试验与宏观工程试验,围绕原材料特性、配合比设计、路用性能、固化机制、施工工艺五大核心开展系统性研究,开发低成本、高性能、绿色安全的高掺量磷石膏路用关键技术,形成完善的资源化利用体系,助力绿色交通建设与工业固废无害化处置^[1]。

1 原材料及理化特性解析

本研究原材料主要包括原状磷石膏、42.5级普通硅酸盐水泥、自研矿渣基聚物固化剂及石灰岩集料,通过宏观物理试验与微观表征手段,全面剖析各材料理化性能,为配合比设计与性能研究奠定基础。

试验所用磷石膏取自四川达州磷化工堆场,经烘干破碎筛分后呈灰白色粉状,微观结构以柱状二水石膏、片状石英晶体为主,整体疏松多孔、孔隙发达。物理性能测试显示,磷石膏天然含水率21%,pH值5.4,呈弱酸性,粒径分布介于0.3 μm ~400 μm ,颗粒特性与粉土相近。化学组分测试表明,其主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, SO_3 与CaO质量占比分别为52.64%、38.36%,同时含有可溶性

磷、氟及微量砷、铅等重金属杂质。

浸出毒性检测结果显示,磷石膏原样中 F^- 、 PO_4^{3-} 、 As^{3+} 浸出浓度远超污水综合排放标准一级限值,是资源化利用中需要重点固化的特征污染物,其余重金属离子含量均满足规范要求。辅助原材料中,42.5级硅酸盐水泥的安定性、凝结时间、力学强度等指标均符合公路工程规范标准;自研CA1、CA2两款矿渣基固化剂,以矿渣为核心原料,复配硅灰、偏高岭土及碱激发剂,具备高活性、强固化效果;石灰岩粗细集料的压碎值、针片状含量、粉尘含量等指标优良,满足路面基层用料要求^[2]。

2 高掺量磷石膏稳定碎石配合比与质量安全设计

以无害化、高掺量、高质量为核心目标,结合磷石膏污染特性与道路工程规范要求,开展集料级配优化、胶结料配比设计及无害化验证,确定最优混合料配合比,保障材料工程性能与环境安全性。

本研究采用骨架密实型集料级配结构,针对性调低4.75mm以下细集料通过率,抵消磷石膏细颗粒对混合料级配的干扰,提升整体密实度。基于磷石膏-水泥净浆浸出试验结果,确定水泥与磷石膏配比不低于1:9,确保污染物有效固化。设置20%~50%梯度无机结合料掺量,通过击实试验测定各配比混合料最佳含水率与最大干密度,为试件成型与施工控制提供参数依据。

通过7d、28d、60d无侧限抗压强度试验,对比分析不同胶结料掺量、配比、养护龄期对材料力学性能的影响,筛选出无固化剂体系最优配合比:60%石灰岩碎石+5%水泥+35%磷石膏。该配比下试件各龄期强度满足中轻交通高等级公路基层使用标准。为进一步提升材料性能,采用自研固化剂部分替代水泥,设计梯度替代配比,

最终确定复合体系最优方案：60%碎石+4%水泥+1%固化剂+35%磷石膏，实现磷石膏高掺量利用的同时，大幅提升材料力学性能与质量稳定性^[3]。

3 高掺量磷石膏稳定碎石路用性能

表3.1 高掺量磷石膏-水泥-固化剂稳定碎石各龄期无侧限抗压强度

编号	7d无侧限抗压强度（MPa）	28d无侧限抗压强度（MPa）	60d无侧限抗压强度（MPa）
B0(A19)	3.9	4.5	6.0
B1	6.0	9.0	10.7
B2	5.2	7.1	9.1
B3	3.8	6.1	8.8
B4	2.4	4.8	7.7
B5	0.8	4.9	6.0
B6	6.6	9.3	11.3
B7	5.8	7.8	9.2
B8	4.4	5.6	8.8
B9	3.1	5.3	7.9
B10	0.7	4.5	6.4

力学性能测试结果表明，固化剂改良体系性能提升效果显著，CA2固化体系7d、28d、60d无侧限抗压强度分别达6.6MPa、9.3MPa、11.3MPa，可满足特重交通高等级公路基层要求。长龄期试验显示，材料强度随养护时间

为验证高掺量磷石膏稳定碎石的工程适用性，系统开展不同体系材料的抗压强度、劈裂强度、水稳定性、干缩特性、回弹模量等路用性能试验，探究其长期服役性能演变规律。

持续增长，90d后性能趋于稳定，可将90d作为材料性能评定特征龄期。水稳定性试验表明，1%CA2固化剂改良试件28d水稳系数达92.4%，较纯水泥体系提升12.4%，抗水侵蚀能力大幅优化^[4]。

表3.2 高掺量磷石膏稳定材料长龄期无侧限抗压强度

编号	90d无侧限抗压强度（MPa）	180d无侧限抗压强度（MPa）
A21	5.7	6.9
A19（B0）	6.6	7.5
A17	7.1	8.0
B1	11.2	12.5
B6	12.0	12.9

劈裂强度试验证实，固化剂可有效提升材料抗拉性能，提升幅度达33.8%~42.9%，长龄期抗拉性能稳定性良好。干缩特性研究发现，材料呈现早期轻微失水收缩、后期钙矾石微膨胀的特征，29d干缩系数为负值，可有效抵消水泥水化收缩，降低路面开裂风险。90d抗压回弹模量稳定在2100~2350MPa，刚度与抗变形能力完全适配道路基层服役要求，综合路用性能优于传统水泥稳定碎石材料。

4 高掺量磷石膏稳定碎石强度形成机制及环境质量调控

结合XRD、FTIR、SEM-EDS等微观表征技术，从物相组成、微观结构、元素分布层面，揭示材料强度形成机理，同时阐明污染物固化调控机制，实现材料性能与环境安全双控。

宏观强度形成方面，水泥水化生成C-S-H凝胶提供基础黏结力，磷石膏与水泥铝酸盐组分反应生成针棒状钙矾石晶体，交错搭接形成稳定骨架结构。自研矿渣基固化剂可中和磷石膏弱酸性环境，激活胶结料二次水化反应，生成大量C-(A)-S-H凝胶，填充混合料内部孔隙，优化界面结构，显著提升材料密实度与整体强度。

微观测试结果表明,掺加固化剂后,体系内钙矾石、C-S-H凝胶含量大幅提升,微观结构由疏松多孔转变为致密均匀。环境质量调控机制显示,磷石膏中可溶性 F^- 、 PO_4^{3-} 可与水化产物中 Ca^{2+} 生成难溶性盐类沉淀,重金属离子通过氢氧化物沉淀、凝胶物理包裹及离子吸附作用实现固化。最优配比体系下,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,浸出毒性完全符合国标限值,实现固废资源化利用的环境安全可控。

5 高掺量磷石膏稳定碎石基层试验路施工工艺及质量研究

针对传统间歇式拌合无法规模化量产、施工精度不足的问题,依托达州实体试验路,优化形成成套施工工艺与质量控制标准,实现高掺量磷石膏基层材料规模化工程应用。

施工工艺方面,创新采用连续式拌合设备替代传统间歇式拌合机,解决量产难题。制定标准化施工流程:磷石膏预处理阶段通过翻晒、筛分控制含水率 $\leq 15\%$,保证原料均匀性;固化剂固液组分单独预拌合,规避拌合不均问题;引入数字图像监控技术,实时监测混合料拌合均匀性,严控均匀系数 $\leq 1.3\%$ 。摊铺阶段采用平地机匀速摊铺,控制松铺厚度16~20cm;碾压采用多级钢轮静压工艺,规避振动碾压引发的泛浆、离析问题,严格把控压实工序。

质量控制方面,明确施工压实度 $\geq 98.7\%$,基层摊铺完成后保湿养护7d方可开展上层施工。试验路检测结果显示,铺筑路段7d无侧限抗压强度6.2MPa,路面弯沉值0.17mm,芯样结构密实均匀,微观结构完整致密,污染物浸出指标达标,各项质量参数均满足高速公路、一级公路基层施工质量标准,工艺稳定性与工程可靠性得到有效验证^[5]。

6 研究结论

本文通过系统试验研究与工程验证,完成高掺量磷

石膏稳定碎石路用资源化关键技术攻关,得出核心结论如下:第一,达州堆场原状磷石膏疏松多孔、呈弱酸性,磷、氟、砷为核心污染控制指标,通过胶结固化技术可实现无害化处置,适配道路基层资源化利用场景。第二,优化形成35%磷石膏高掺量配比体系,依托1%微量矿渣基固化剂改良,可在低胶凝材料用量条件下,使材料力学性能、水稳定性、体积稳定性显著提升,满足高等级公路基层服役要求。第三,探明了固化剂改良体系的强度形成与污染固化双机制,水化凝胶与钙矾石共生结构提升材料性能,多重固化作用实现污染物高效稳定,环境安全可控。第四,创新形成连续式拌合、数字化质控的规模化施工工艺,突破传统技术量产瓶颈,施工质量稳定、可控,适配大面积工程推广。第五,该技术可实现磷石膏大宗消纳,有效解决固废堆存污染问题,相较于传统道路建材,工程成本更低、综合效益更优,契合绿色交通与双碳发展理念,具备广阔的工程应用与产业化推广前景。

参考文献:

- [1]周武,李杨,冯伟光,等.磷石膏的综合利用及其在建筑材料领域的应用研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(02):534-542.
- [2]宗炜,王远辉,许亮,等.工业固废磷石膏路面基层材料路用性能研究[J].硅酸盐通报,2024,43(02):766-773.
- [3]王应富,张树光,黄啸,等.磷石膏-钢渣-矿渣固化低液限粉质黏土力学性能及耐久性能研究[J].土木工程学报,2023,56(S1):
- [4]郑玉龙,嵇帅,陆春华,等.基于固废磷石膏制备胶凝材料的工艺与机制[J].复合材料学报,2024,41(03):1436-1446.
- [5]朱雪涛,杜兵,阿曼角,等.半水磷石膏地下充填材料的磷和氟浸出特性及地球化学模拟[J].中国环境科学,2022,42(02):680-687.