

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.012

# 磷石膏基道路稳定基层材料应用研究

刘志浩<sup>1</sup>, 胡波<sup>1</sup>, 吴元欣<sup>2</sup>, 刘浩<sup>2</sup>, 徐静<sup>2</sup>, 代攀<sup>2</sup>, 叶哲强<sup>2</sup>, 陈昌彪<sup>2</sup>

(1.湖北聚海环境科技有限公司, 湖北 武汉 430040; 2.湖北江汉工程咨询有限公司, 湖北 武汉 430041)

**摘要:** 为了将大宗固废磷石膏变废为宝, 促进资源的节约、集约利用, 文中将再生磷石膏与废弃土和轻集料掺配制得再生磷石膏基道路稳定基层材料并应用于道路基层。先通过室内试验检测再生磷石膏的化学、物理性能, 结果均符合相关技术标准要求; 然后将再生磷石膏与废弃土、人造轻集料掺配制得再生磷石膏基道路稳定基层材料, 对该材料进行无侧限抗压强度、水稳定性、抗弯拉和抗劈裂强度测试, 测试结果表明再生磷石膏基道路稳定基层材料符合公路基层设计和施工技术要求, 且具有良好的耐候性、高稳定性、资源节约性、环保节能性, 是实现绿色低碳环保型公路建设的较佳选择。

**关键词:** 公路; 再生磷石膏; 基层; 路用性能; 经济分析; 低碳环保

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)06-0055-05

磷石膏主要有灰黑色和灰白色两种, 颗粒直径一般为 5~50  $\mu\text{m}$ , 结晶水含量为 20%~25%。磷石膏是磷矿湿法制造磷酸的副产物, 工业生产中常用二水法生产磷酸, 每生产 1 t 磷酸会产生 4.5~5.5 t 磷石膏。据统计, 截至 2020 年, 中国磷石膏总堆存量超过 6 亿 t, 年排放量约 7 500 万 t (其中湖北省磷石膏年排放量 2 255 万 t, 约占全国的 30%), 而年使用量仅 3 100 万 t, 磷石膏消纳综合利用的速度赶不上增量, 更谈不上消纳存量。目前磷石膏大多采用露天堆放处理, 不仅造成土地资源浪费, 而且磷石膏中残留的强酸、磷、氟、有机物等杂质随着雨水进入地下和河流, 污染土地和水资源, 给人民群众的生产、生活及身体健康带来巨大危害。由于公路工程建设需要消耗大量原材料, 将废弃磷石膏通过技术处理再生成符合国家标准石膏建材, 再将再生磷石膏作为道路基层材料使用, 既能变废为宝, 促进资源的节约、集约利用, 又能产生较好的经济和生态效益, 符合节约资源和保护环境的基本国策。

## 1 再生磷石膏稳定基层

### 1.1 原材料

(1) 再生磷石膏。磷石膏取至湖北大悟黄麦岭磷石膏堆场, 为颗粒直径为 150~300  $\mu\text{m}$  的尾矿 (见图 1)。采用磷石膏协同再生处理技术, 通过脱水干化、粉磨、高温煅烧 (研究表明, 将温度上升至 200~400  $^{\circ}\text{C}$ , 五氧化二磷可转化为较难溶解的磷酸

盐; 温度上升到 950  $^{\circ}\text{C}$  左右时, 有机磷中的五氧化二磷含量降低至极限, 氟含量也明显降低, 磷石膏的有害性得到基本控制) 制成磷石膏粉 (见图 2)。其化学检测指标见表 1, 物理性能见表 2, 均符合相关技术标准要求。



图 1 处理前磷石膏



图 2 处理后磷石膏

表 1 磷石膏的化学指标检测结果

项目	指标要求	检测结果	
		处理前	处理后
二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )含量/%	$\geq 80$	27.60	82.50
水溶性五氧化二磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )含量/%	$\leq 0.30$	0.60	0.25
水溶性氟离子( $\text{F}^-$ )含量/%	$\leq 0.20$	0.34	0.18
水溶性氧化镁( $\text{MgO}$ )含量/%	$\leq 0.30$	0.57	0.25
水溶性氧化钠( $\text{NaO}$ )含量/%	$\leq 0.10$	0.21	0.08
pH 值	—	2.50	7.20

表 2 磷石膏的物理性能检测结果(3.0 等级)

项目	指标要求	检测结果
细度/%	$\leq 10$	0
初凝时间/min	$\geq 3$	16
终凝时间/min	$\leq 30$	20
2 h 抗折强度/MPa	$\geq 3$	3.5
2 h 抗压强度/MPa	$\geq 6$	7.0

(2) 废弃土。采用液限小于 50%、塑性指数小于 26、含水量小于 25% 的废弃土,要求其不含草皮、生活垃圾、树根、腐殖质性土。

(3) 再生轻集料。采用湖北聚海环境科技有限公司生产的 0~5 mm 轻骨料,密度为 700~800  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 1.2 试验方案

根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》、JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行击实试验,选用甲法进行试验。因试验材料再生磷石膏为直径 45~150  $\mu\text{m}$  的粉料,废弃土的粒径也小于 4.75 mm,采用小型击实筒,采用重型击实。

### 1.2.1 方案一:再生磷石膏与废弃土掺配

采用湿土法制作土样,按四分法至少制备 5 个土样,用天然含水率的土样作为第一个样品,其余样品分别按 2%~3% 含水率递减。再生磷石膏拌和后在 1 h 内完成击实试验,得到最佳含水率和最大干密度。根据最大干密度和最佳含水率,采用 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中静压法成型试件,在 (20+2)  $^{\circ}\text{C}$  养护箱内养护 6 d 后泡水 1 d。将已浸水 1 d 的试件从水中取出,放在承载比试验仪上进行 7 d 无侧限抗压强度试验。

为充分发挥再生磷石膏的固有建材特性,以磷石膏基为胶凝材料形成高性能复合道路基层。在前期

大量试验数据的基础上,选取再生磷石膏掺量分别为 60%、70%、80%、90% 进行基准配合比设计并进行路用性能试验,试验结果见表 3。

表 3 方案一各掺配比例下磷石膏基道路稳定基层材料路用性能试验结果

掺配比例(再生磷石膏:废弃土)	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最佳含水 率/%	7 d 无侧限抗 压强度/MPa
60:40	1.720	14	0.30
70:30	1.665	18	2.20
80:20	1.658	16	3.15
90:10	1.602	16	5.55

由表 1 可知:除再生磷石膏与废弃土掺配比例为 60:40 时不满足要求外,其他掺配比例下强度均满足各等级公路底基层强度和二级及以下公路基层的技术要求。

### 1.2.2 方案二:再生磷石膏与轻集料掺配

采用干法制作土样。将再生磷石膏与轻集料按比例进行掺配,加水拌和均匀后在 1 h 内完成击实试验。用天然含水率的土样作为第一个样品,其余样品分别按 2%~3% 含水率递增进行击实,得到最佳含水率和最大干密度。根据最大干密度和最佳含水率,采用 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中静压法成型试件,在 (20+2)  $^{\circ}\text{C}$  养护箱内养护 6 d 后泡水 1 d。将已浸水 1 d 的试件从水中取出,放在承载比试验仪上进行 7 d 无侧限抗压强度试验。

以磷石膏基为胶凝材料形成高性能复合道路基层,选取再生磷石膏掺量分别为 60%、70%、80%、90% 进行基准配合比设计并进行路用性能试验,试验结果见表 4。

表 4 方案二各掺配比例下磷石膏基道路稳定基层材料路用性能试验结果

掺配比例(再生磷石膏:轻集料)	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最佳含水 率/%	7 d 无侧限抗 压强度/MPa
60:40	1.470	18	3.80
70:30	1.482	18	5.45
80:20	1.489	18	6.63
90:10	1.503	18	7.45

再生磷石膏属于气硬材料,遇水后凝结较快,考虑到凝结过快不利于现场施工,添加缓凝剂。相关研究表明:缓凝剂掺量小于 0.2% 时,磷石膏的凝结时间随缓凝剂掺量的变化较平缓;掺量大于 0.2%

时,磷石膏的凝结时间随缓凝剂掺量增加而延长。选用再生磷石膏与轻集料掺配比例为 90 : 10,缓凝剂掺量为 0、0.1%、0.3%、0.5% 分别进行 7 d 无侧限抗压强度试验,试验结果见表 5。

表 5 不同缓凝剂掺量下再生磷石膏与轻集料掺配比例为 90 : 10 时磷石膏基稳定基层材料的抗压强度

缓凝剂掺量/%	时间/h	7 d 无侧限抗压强度/MPa	缓凝剂掺量/%	时间/h	7 d 无侧限抗压强度/MPa
0.0	1	—	0.3	1	4.15
0.0	2	—	0.3	2	4.10
0.0	3	—	0.3	3	4.05
0.1	1	4.10	0.5	1	4.00
0.1	2	—	0.5	2	4.00
0.1	3	—	0.5	3	4.00

注:“—”表示试样结块,无法成型试件。

由表 5 可知:在未掺缓凝剂时,再生磷石膏基道路稳定基层材料 1 h 后即结块硬化,不满足施工要求;在掺 0.1% 缓凝剂时,2 h 后即结块硬化,不满足施工要求;在掺 0.3% 缓凝剂时,3 h 后未出现结块硬化现象且强度损失较小,满足施工要求;在掺 0.5% 缓凝剂时,3 h 后未出现结块硬化现象且强度未损失,满足施工要求。

再生磷石膏是采用脱水干化、粉磨、高温煅烧技术将磷石膏中二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )转化成半水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ),恢复其建筑材料的功能。再生磷石膏属于气硬材料,水化反应硬化后具有多封闭的细微孔和水稳定性差的特点,需加入防水剂,解决吸水率大和遇水软化的问题,提高硬化

后强度。选用再生磷石膏与轻集料掺配比例为 90 : 10,缓凝剂掺量为 0.3%,防水剂掺量为 0、0.1%、0.3%、0.5% 进行试验,检测其泡水后软化性能,试验结果见表 6。

表 6 不同防水剂掺量下再生磷石膏与轻集料掺配比例为 90 : 10 时磷石膏基稳定基层材料泡水后性能

防水剂掺量/%	强度/MPa	
	未泡水(养护 7 d)	泡水 1 d(养护 6 d)
0.0	8.21	4.10
0.1	8.21	5.75
0.3	8.21	7.45
0.5	8.21	7.49

由表 6 可知:未掺防水剂时,再生磷石膏基道路稳定基层材料泡水 1 d 后强度损失 50%;掺 0.1% 防水剂时,泡水 1 d 后强度损失 30%;掺 0.3% 防水剂时,泡水 1 d 后强度损失 10%;掺 0.5% 防水剂时,泡水 1 d 后强度损失 9%。掺 0.3% 和 0.5% 防水剂时强度损失较小,考虑后期经济成本,选用 0.3% 防水剂掺量。

2 路用性能比较分析

选用再生磷石膏与轻集料掺配比例为 90 : 10,缓凝剂掺量为 0.3%,防水剂掺量为 0.3% 的再生磷石膏基道路稳定基层材料进行无侧限抗压强度、劈裂强度、抗弯拉强度检测,并与水泥稳定基层材料进行对比,结果见表 7。

由表 7 可知:与水泥稳定碎石基层材料相比,磷

表 7 磷石膏基道路稳定基层材料和水泥稳定基层材料性能试验结果

稳定基层材料	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最佳含 水率/%	7 d 无侧限抗 压强度/MPa	90 d 无侧限抗 压强度/MPa	BDR 冻融 残留强度比/%	90 d 劈裂 强度/MPa	90 d 抗弯拉 强度/MPa
磷石膏基复合稳定材料	1.503	18.0	7.45	8.20	80.0	0.5	1.1
水泥稳定基层材料	2.200~2.400	5.0~7.0	3.00~5.00	6.50~7.00	75.0~85.0	0.5~0.7	1.0~1.3

石膏基道路稳定基层材料的密度小、强度高,满足各等级公路路面基层的技术要求。

3 经济比较分析

3.1 方案一

以长度 1 000 m、宽度 24 m、厚度 0.2 m 的路基工程为例,其材料用量为 4 800  $\text{m}^3$ ,分别计算再生磷石膏与废弃土掺配比例为 70 : 30 和 90 : 10 磷石膏基道路复合稳定基层的材料费用,并与 5% 水泥稳定基

层的材料费用进行比较。再生磷石膏与废弃土掺配比例为 70 : 30 时,最大干密度为 1.665  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,压实度取 97%,所需材料为 7 752 t;再生磷石膏与废弃土掺配比例为 90 : 10 时,最大干密度为 1.602  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,压实度取 97%,所需材料为 7 459 t;5% 水泥稳定基层的最大干密度为 2.360  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,压实度取 97%,所需材料为 10 998 t。两种基层的经济性比较见表 8。

由表 8 可知:与 5% 水泥稳定基层相比,采用最佳配合比(再生磷石膏与废弃土掺配比例为 90 :

表 8 方案一下磷石膏基道路复合稳定基层与水泥稳定基层的经济性比较

稳定基层名称	材料名称	比例/%	质量/t	单价/(元·t <sup>-1</sup> )	材料费用/元	费用合计/元
磷石膏基道路复合稳定基层	废弃土	30	2 325	40	93 000	961 320
	再生磷石膏	70	5 427	160	868 320	
	废弃土	10	746	40	29 840	1 103 920
	再生磷石膏	90	6 713	160	1 074 080	
5% 水泥稳定基层	粗骨料	65	6 791	120	882 830	1 506 210
	细骨料	35	3 657	90	329 130	
	水泥	5	550	535	294 250	

10)的磷石膏基道路复合稳定基层,每公里可节约材料费用 26.7%。

3.2 方案二

以长度为 1 000 m、宽度为 24 m、厚度为 0.2 m 的路基工程为例,其材料用量为 4 800 m<sup>3</sup>,分别计算再生磷石膏与轻集料掺配比例为 60 : 40 和 90 : 10 时磷石膏基道路复合稳定基层的材料费用,并与 5%水泥稳定基层的材料费用进行比较。再生磷石

膏与轻集料掺配比例为 60 : 40 时,最大干密度为 1.470 g/cm<sup>3</sup>,压实度取 97%,所需材料为 6 844 t;再生磷石膏与轻集料掺配比例为 90 : 10 时,最大干密度为 1.503 g/cm<sup>3</sup>,压实度取 97%,所需材料为 6 998 t;5%水泥稳定基层的最大干密度为 2.360 g/cm<sup>3</sup>,压实度取 97%,所需材料为 10 998 t。两种基层的经济性比较见表 9。

由表9可知:与5%水泥稳定基层相比,采用最

表 9 方案二下磷石膏基道路复合稳定基层与水泥稳定基层的经济性比较

稳定基层名称	材料名称	比例/%	质量/t	单价/(元·t <sup>-1</sup> )	材料费用/元	费用合计/元
磷石膏基道路复合稳定基层	轻集料	40	2 738	520	1 423 760	2 080 720
	再生磷石膏	60	4 106	160	656 960	
	轻集料	10	700	520	364 000	1 371 680
	再生磷石膏	90	6 298	160	1 007 680	
5%水泥稳定基层	粗骨料	65	6 791	120	882 830	1 506 210
	细骨料	35	3 657	90	329 130	
	水泥	5	550	535	294 250	

佳配合比(再生磷石膏与轻集料掺配比例为 90 : 10)磷石膏基道路复合稳定基层,每公里可节约材料费用 8.9%。

4 碳排放量比较分析

再生磷石膏是采用协同处理技术的资源综合利用,不需要单独消耗能源。而生产水泥熟料需燃烧标准煤炭提供热能,会产生二氧化碳。以磷石膏基道路稳定基层材料代替传统水泥稳定碎石基层材料中的砂石骨料,可避免开采和破碎环节产生的能源消耗及由此产生的二氧化碳排放。采用再生磷石膏,无需专有能源,能达到零碳或负碳排放。相比水泥稳定基层,采用磷石膏基道路复合稳定基层,在节约煤炭资源消耗的同时可减少约 438 t/km 二氧化碳排放,实现绿色低碳环保。

5 磷石膏基道路复合稳定基层的应用

试验段为湖北聚海环境科技有限公司磷石膏全产业链综合开发利用科技园进园区道路,路线全长约 480 m,道路红线宽 20 m。再生磷石膏与轻集料掺配比例为 70 : 30,缓凝剂掺量为 0.3%,防水剂掺量为 0.3%。将磷石膏基道路稳定基层材料用于路面基层底基层施工,采用集中厂拌的生产工艺。每层摊铺厚度控制在 25 cm,在 3 h 内完成摊铺。碾压工序为双钢轮压路机初压 1 遍→单钢轮压路机强振 2 遍→单钢轮压路机弱振 1 遍→胶轮压路机静压 1 遍。施工后覆盖土工膜,养生 1 d,养生期间禁止施工设备与车辆通行。

施工完后进行检测,最大干密度为 1.465 g/cm<sup>3</sup>,压实度为 98.6%,7 d 无侧限抗压强度为 5.25 MPa,芯

样强度为 5.0 MPa,满足要求。磷石膏基道路稳定基层材料能满足各等级公路路面底基层的技术要求。

施工注意事项:1) 在拌和机械选用时,考虑到再生磷石膏掺配比例很高,按照 4~6 个料仓配置。因再生磷石膏为 45~150  $\mu\text{m}$  的粉料,对料仓进行密封和除尘。拌和用水量根据现场温度在最佳含水率上增加 0.5%~1.0%。2) 由于磷石膏基道路复合稳定基层材料的密度较小,松铺系数较大,铺筑厚度受限,最大设计厚度为 25 cm。3) 考虑到磷石膏基道路稳定基层材料较细,碾压后表面较光滑,不利于下层的黏结,先用羊足碾压路机进行静压,再用钢筒式压路机进行复压,最后用轮胎压路机收面。

## 6 结论

(1) 高温煅烧后磷石膏中氟、磷等有害污染物能达到相关标准要求,使用时采用防水剂对其进行固化,将其应用于道路工程不会对环境造成二次污染。

(2) 再生磷石膏基道路稳定基层材料具有良好的耐候性、高稳定性、资源节约性、环保节能性,符合公路基层设计和施工技术要求。

(3) 将再生磷石膏应用于公路建设,既能减少磷石膏的库存量,又能减小公路建设对砂石料的依赖,节约自然资源,促进绿色公路建设。

## 参考文献:

[1] 茹晓红.磷石膏基胶凝材料的制备理论及应用技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.

- [2] 余军,王磊,贺华明,等.湖北省磷石膏综合利用与对策[J].资源环境与工程,2018,32(1):150—154.
- [3] 贺晓燕,吕飞,贺光照.我国工业固体废弃物磷石膏预处理及综合利用[J].资源节约与环保,2021(3):114—115.
- [4] 河南建筑材料研究设计院有限责任公司,中国磷复肥工业协会,四川宏达股份有限公司,等.磷石膏:GB/T 23456—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [5] 河南建筑材料研究设计院有限责任公司,瓮福(集团)有限责任公司,云南云天化国际化工股份有限公司.建筑石膏:GB/T 9776—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [6] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [7] 交通部公路科学研究院.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [8] 邱聪.磷石膏缓凝剂的研究[J].新型建筑材料,2014(1):76—79.
- [9] 邓志拓.磷石膏煅烧条件的研究[J].河北化工,2003(6):49—50.
- [10] 谭明洋,相利学,李国龙.磷石膏在道路工程应用的研究现状[J].广州化工,2016,44(8):37—38.
- [11] 克高果,夏正求,罗辉,等.煅烧磷石膏改性磷石膏废料的路用性能[J].土木工程与管理学报,2018,35(4):58—64.
- [12] 刘晶,段悦.水泥生产  $\text{CO}_2$  减排技术及案例分析[J].山西建筑,2014,40(28):211—212+245.

收稿日期:2022-01-12

(上接第 43 页)

- [13] 林丽,张永强,高敏杰.道路交通事故黑点成因鉴别与改善对策[J].南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(6):157—160.
- [14] 王海,李瑞敏.改进的聚类法在事故多发点成因分析中的应用[J].公路工程,2017,42(5):106—110.
- [15] 牛志鹏,祁首铭,吴东玲,等.考虑系统聚类的公路交通事故多发点鉴别研究[J].中国安全科学学报,2018,28(11):104—109.
- [16] 王洪德,赵婷.道路交通事故的灰色预测与黑点分析[J].大连交通大学学报,2014,35(1):37—40.
- [17] 江山,宋柯,谢维成,等.基于灰色关联与 Apriori 算法的道路交通事故数据分析[J].公路工程,2019,44(4):67—73.
- [18] 孙连超,邵毅明,颜雪丽,等.基于 TCT 的公路交通事故黑点鉴别方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(1):63—67.

- [19] 张朝旭.基于灰色理论的交通事故多发点段评价模型[J].广东公安科技,2020,28(1):45—49.
- [20] 贾嘉,张健.公路交通事故影响因素的粗糙集评价[J].公路,2014(8):91—95.
- [21] 姚磊.基于 RST 的事故黑点成因实例分析[J].交通运输工程与信息学报,2014,12(1):104—108.
- [22] 李亚军.基于粗糙集属性理论和差分进化算法的交通事故黑点成因分析[J].现代交通技术,2014,11(2):68—71.
- [23] 李玉祺,王广民,徐猛.随机 OD 需求下城市道路网络设计问题的 BP 神经网络算法研究[J].系统工程理论与实践,2021,41(11):3009—3019.
- [24] 陈海龙,彭伟.改进 BP 神经网络在交通事故预测中的研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),2017(2):61—68.

收稿日期:2022-06-22