

# 水泥稳定碎石搅拌方式研究

应荣华, 黎凯, 胡恒武

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 为研究振动搅拌技术相比于传统搅拌技术的优势, 依托广东省兴华(兴宁—五华)高速公路工程, 分别对采用传统拌缸与振动拌缸拌料施工的试验路段现场取样, 进行室内筛分、水泥剂量滴定及无侧限抗压强度试验。结果表明, 相较于传统搅拌技术, 采用振动搅拌技术的水泥稳定碎石各档筛分结果的变异系数更小, 7 d 无侧限抗压强度平均值提升约 25%, 振动搅拌技术在水泥稳定碎石混合料拌和均匀性上具有明显优势, 且对初期强度的形成有明显改善作用。

**关键词:** 公路; 水泥稳定碎石; 传统搅拌技术; 振动搅拌技术

**中图分类号:** U416.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)05-0061-04

中国大部分路面设计遵循“强基、薄面、稳土基”的指导思想, 半刚性基层在高等级公路上应用广泛。采用半刚性基层能提高路面承载能力, 降低沥青面层厚度, 节约工程造价。但大量工程实践表明半刚性基层材料往往会在其薄弱位置首先开裂, 减少材料的薄弱位置, 保证其均匀性, 是减少无机结合料稳定材料开裂的工艺要求。然而传统的水泥稳定碎石搅拌技术的均匀性难以满足, 造成施工后的路基存在许多薄弱环节, 整体性不足, 使用期间易出现裂缝等早期病害。该文结合广东省兴华(兴宁—五华)高速公路工程, 对采用传统拌缸与振动拌缸拌料施工的基层试验段进行对比, 分析振动搅拌技术的优势。

## 1 振动缸拌与传统拌缸搅拌技术

水泥稳定碎石搅拌通过搅拌器使集料之间发生对流运动及扩散运动, 使集料颗粒混合均匀, 其中对流运动通过集料的循环运动达到宏观均匀(单位粗骨料含量误差小于 5%, 砂浆密度误差小于 0.8%), 扩散运动通过砂浆的均匀分布达到微观均匀(各种细集料、胶结料颗粒均匀分布)。

### 1.1 振动搅拌机与传统搅拌机的区别

传统搅拌机一般分为强制性搅拌机和自落式搅拌机。自落式搅拌机主要通过滚筒的转动使水泥稳定碎石混合料在滚桶内做自由落体运动达到搅拌效果, 其动力消耗较大, 搅拌强度不够。强制式搅拌机滚桶内具有若干组绕竖轴或卧轴旋转的叶片, 将混合料强制搅拌均匀, 其搅拌强度大。但机件磨损严重, 生产效率较低; 且叶片各处线速度不一, 靠近搅拌轴的区域线速度较低, 形成搅拌低效率区域, 极易

出现“抱轴”现象。以上两类传统搅拌机均能使混合料达到宏观上的均匀状态, 但仍存在少量骨料没有被完全包裹, 呈干燥状态。此外, 还有少部分水泥未被水完全均匀地分散, 在显微镜中可观察到一部分水泥颗粒聚集在一起[见图 1(a)]。这是因为水泥水解、水化过程中成团的水泥颗粒表面被水化产物覆盖, 阻止了其进一步进行水化反应, 减少了水化产物产生数量。而强度是由这些水化产物按照一定的方式靠多种引力相互搭接和联结而形成, 水化产物的减少势必对混合料强度的提高带来不利影响。将成团的水泥颗粒搅拌开, 达到图 1(b)所示理想状态, 仅通过传统搅拌机很难实现, 必须寻求新的搅拌技术将混合料达到微观上的均匀。

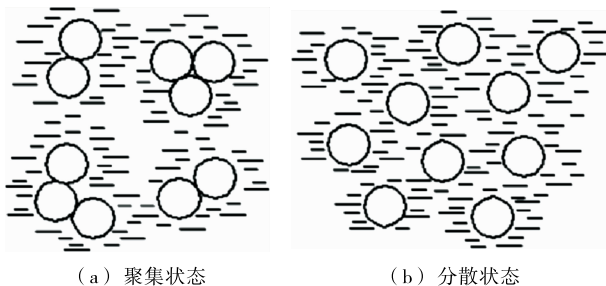


图 1 水泥颗粒微观分布状态

振动搅拌技术是在传统搅拌机的基础上添加振动作用, 通过振动作用破坏水泥成团现象, 使水泥颗粒分布均匀, 易于水解、水化反应的发生, 提高生产效率。振动作用还可使“抱轴”的混合料振动脱落, 使水泥稳定碎石在搅拌筒内形成循环运动, 消除搅拌低效率区域, 改善搅拌轴周围混合料的搅拌效果, 大大提高拌和均匀性。

## 1.2 振动搅拌对水泥稳定碎石的影响机理

水泥稳定碎石由水泥、稳定碎石、砂、石屑、粉煤灰等材料按一定比例组成,其强度的形成主要靠稳定碎石通过胶凝材料进行嵌挤锁结。水泥稳定碎石可看成是各松散成分的集合,水泥稳定碎石结构破坏只是改变了其颗粒之间的联结方式,颗粒本身并未被破坏。在水泥稳定碎石搅拌过程中,颗粒与颗粒、颗粒与搅拌器械之间的滑动摩擦力是搅拌机所需克服的,其过程满足土的抗剪强度公式:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: $\tau_f$  为水泥稳定碎石的抗剪强度; $\sigma$  为剪切面上的垂直总压应力; $\varphi$  为混合料颗粒之间的内摩擦角; $\tan \varphi$  为混合料颗粒之间的内摩擦系数; $c$  为混合料颗粒之间的粘聚力。

根据式(1),水泥稳定碎石性能的主要影响因素是剪切面上的垂直总压应力  $\sigma$ 、内摩擦角  $\varphi$  与颗粒之间的粘聚力  $c$ 。其中内摩擦角  $\varphi$  的主要影响因素是碎石颗粒形状、大小及水泥稳定碎石级配与密实度等,颗粒之间的粘聚力  $c$  主要由骨料中黏性颗粒与水泥颗粒等具有分子粘结力的颗粒通过结合水的联结作用产生,具有一定的抗拉与抗剪能力。因此,颗粒之间的粘聚力  $c$  主要由混合料中各组成成分的

物理性质、化学性质及混合料的含水量决定。

对水泥稳定碎石进行振动搅拌时其颗粒不分大小均处于振颤状态,所受振动加速度的方向与剪切面的法向应力方向相反,使其剪切面上的垂直总压应力大大减小。此外,振动作用还能将处于相互嵌挤紧锁状态的颗粒分离开来,大大减少颗粒间的内摩擦阻力。分散开聚集状态的水泥颗粒能使水泥与水发生更彻底的水解、水化反应,增加水化产物的生成数量,提升水泥稳定碎石的性质。

综上,振动搅拌通过减小水泥稳定碎石搅拌过程中颗粒之间的内摩擦力、粘聚力及剪切阻力提高水泥稳定碎石搅拌的均匀性。

## 2 原材料及试验方案

### 2.1 原材料

两试验路段均采用塔牌 P.C32.5R 水泥,其性能指标符合 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》的要求。集料采用当地生产的辉绿岩,依据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》和设计文件的要求,基层按 0~5、5~10、10~20 和 10~30 mm 4 档材料进行施工。各档集料筛分结果、掺配比例及合成级配见表 1。

表 1 各档集料筛分结果及合成级配

规格 名称	公称粒径/ mm	通过各筛孔(mm)的质量百分率/%											
		26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
G3	19~26.5	95.8	46.8	23.2	4.9	1.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4
G8	9.5~19	—	100.0	95.3	78.8	6.6	1.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8
G11	4.75~9.5	—	—	—	100.0	97.8	9.0	2.0	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5
XG3	0~4.75	—	—	—	—	100.0	92.4	52.4	37.0	26.8	12.0	7.2	5.2
合成级配		98.5	80.8	71.8	63.4	53.9	35.1	19.5	13.9	10.3	4.9	3.2	2.4
掺配比例		XG3(0~5):G11(5~10):G8(10~20):G3(20~25)=36:11:17:36											

### 2.2 试验方案

分别在运用传统拌缸与振动拌缸工艺施工的试验路段进行现场取料,进行水洗筛分、水泥剂量检验、室内无侧限抗压强度试验及现场取芯强度试验,

对试验数据进行对比分析。

#### 2.2.1 水洗后混合料筛分结果

对试验路段进行多次混合料现场取样筛分,结果见表 2。

表 2 混合料筛分结果

筛孔尺寸/ mm	传统拌缸混合料通过率/%			振动拌缸混合料通过率/%		
	平均值	均方差	变异系数	平均值	均方差	变异系数
31.500	100.0	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00
26.500	98.6	1.11	1.13	97.7	0.79	0.81
19.000	81.3	2.90	3.57	80.2	1.82	2.27
16.000	71.6	4.38	6.12	72.8	4.10	5.63
13.200	63.7	6.47	10.16	64.0	5.16	8.06

续表 2

筛孔尺寸/ mm	传统拌缸混合料通过率/%			振动拌缸混合料通过率/%		
	平均值	均方差	变异系数	平均值	均方差	变异系数
9.500	52.8	3.84	7.27	52.3	2.86	5.47
4.750	32.6	2.46	7.55	32.2	2.43	7.55
2.360	22.5	3.41	15.16	23.2	3.34	14.40
1.180	15.9	3.15	19.81	16.0	2.76	17.25
0.600	11.2	2.02	18.04	12.0	1.92	16.00
0.300	7.5	1.66	22.13	8.0	1.43	17.88
0.150	4.2	1.04	24.76	4.9	0.84	17.14
0.075	2.6	0.77	29.62	3.1	0.52	16.77

由表 2 可知:与传统拌缸相比,采用振动拌缸搅拌的混合料的筛分结果中各档集料的变异系数普遍偏小,表明混合料在宏观上拌和相对均匀,集料混合充分,减少了原材料的抱团离析现象。

2.2.2 水泥剂量检验

两试验路段均采用 5% 水泥剂量。依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》测定其基层混合料的水泥剂量,结果见表 3。

表 3 水泥剂量测定结果

搅拌方式	水泥剂量/%						标准差/%	变异系数/%
	测定结果					平均值		
传统拌缸	5.2	5.6	4.5	4.4	5.8	3.7	4.9	16.30
振动拌缸	5.3	5.0	5.0	5.3	5.1	4.9	5.1	3.33

由表 3 可知:振动拌缸工艺下混合料的水泥剂量变异系数较小,表明在微观层面上振动拌缸能使水泥在集料中均匀分布,使水泥的胶凝作用得到充分发挥。

2.2.3 无侧限抗压强度

依据 JTG E51—2009 分别成型两试验路段基层混合料试件,在标准养生条件下养生 6 d、泡水 1 d 后进行无侧限抗压强度试验,结果见表 4。

表 4 7 d 无侧限抗压强度试验结果

搅拌方式	强度设计值/ MPa	无侧限抗压强度试验结果				
		最大值/MPa	最小值/MPa	平均值/MPa	标准差/MPa	变异系数/%
传统拌缸	4	4.5	5.7	5.1	0.646 1	12.67
振动拌缸	4	7.2	5.3	6.4	0.349 9	5.47

由表 4 可知:在同等试验条件下,振动拌缸工艺下混合料的 7 d 抗压强度平均值比传统拌缸提高 25%,且变异系数更小。

2.2.4 现场芯样

依据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》对两试验路段基层进行钻取芯样,图 2 为其芯样照片。

由图 2 可知:两试验路段基层芯样整体均完整;振动拌缸施工的基层其切面集料分布较均匀,而传统拌缸施工的基层材料出现轻微离析现象,会影响基层强度的形成与发展。

3 振动搅拌技术对水泥稳定碎石性能的影响

水泥稳定碎石结构主要由骨料、水泥石和界面过渡层构成,其中水泥石由硅酸钙、铝酸钙等水化物硬化形成,界面过渡层与水泥石组成成分相同,其区别在于微观结构不同。

3.1 对水泥稳定碎石强度的影响

水泥稳定碎石所能承受的最大应力即为水泥稳定碎石强度。水泥稳定碎石的 3 个组成成分的强度

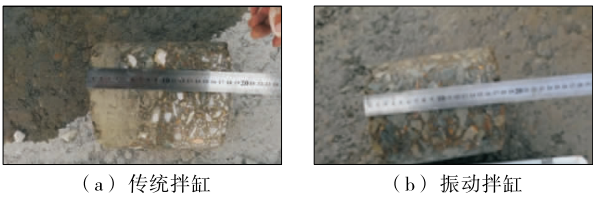


图 2 试验段芯样

大小为骨料>水泥石>界面过渡层,而材料往往是在其薄弱位置首先开裂,故改善界面过渡层的强度能有效提高水泥稳定碎石强度。振动搅拌技术能从微观角度改善界面过渡层强度,其作用原理如下:

(1) 骨料周围与界面过渡层的水膜受到振动搅拌的振动作用而破裂,增大了参与水化反应的水膜总表面积;振动作用能使聚集成团的水泥颗粒分散开来,让更多的水泥颗粒参与水化反应,促使水泥水化产物数量大大提高。

(2) 由于水膜的作用,在水泥稳定碎石拌和过程中偶尔会出现大水囊,使混合料中局部水灰比增大,影响强度的均匀发展。而振动搅拌能将这些大水囊一一破坏,形成的水化产物晶体体积更小,结构更致密,大孔隙数量减少。

(3) 振动作用将砼内部的大气孔破坏成更细小的气孔,增加了砼的毛细孔隙与凝胶孔隙。

(4) 振动作用能清除骨料表面的泥土,消除骨料与水泥水化产物进行进一步化学反应的障碍,其形成的硅酸钙或铝酸钙等水化产物数量的增加能有效提高过渡区的强度。

### 3.2 对水泥稳定碎石抗裂性的影响

振动搅拌作用能减少水泥稳定碎石基层的裂缝数量。这是因为振动搅拌能在满足同等强度的条件下减少水泥用量,使水泥石具有较小弹性模量和收缩系数,相应地减少用水量,使混合料的含水量降低,减少由于水分减小而引起的干缩现象;振动搅拌使骨料表面的灰尘脱落,使骨料与水泥浆充分混合,消除骨料表面的干燥露白现象,防止裂缝从骨料表面产生;振动作用将团聚的水泥颗粒重新分散,保证所有水泥颗粒完全参与水化反应,使水化产物在硬化前有足够的空间自由生长,防止未水化水泥在已水化硬化的水泥石中继续水化产生较大的压应力导致应力集中形成裂纹;振动作用能提升颗粒之间的碰撞频率和碰撞程度,使所有成分达到宏观和微观上的均匀,避免由于离析现象而产生的裂缝;振动搅拌使水泥石和界面过渡层的组成成分结构致密,减少大孔隙数量,增大混合料的抗拉强度,从而减少裂缝形成,提高混合料的抗裂性能。

## 4 结论

(1) 振动拌缸工艺可显著改善水泥在宏观及微观层面上的均匀性,使水泥等细集料充分分散,水泥水化更充分,有效提高铺筑效果,减少薄弱环节,铺

筑后的基层更具整体性。

(2) 振动拌缸工艺使混合料的抗压强度提高25%,路用性能得到较大提升。在保证基层整体性和强度的前提下,相同设计条件下可尝试适当降低水泥用量,以降低工程造价。

(3) 运用振动拌缸技术可改善路面基层早期破坏问题,为解决提高无机结合料稳定材料的强度与增加无机结合料之间矛盾提供新的思路,具有较高的应用及推广价值。

### 参考文献:

- [1] 李红涛,徐冠春,杨彦昌.浅谈路面基层材料的应用与发展[J].山西建筑,2010,36(2).
- [2] Rawlings R E.Drying shrinkage of cement treated paving materials[J].Journal of Transportation Engineering,1988,11(4).
- [3] Brown Norman R.Solution for distressed pavements and crack reflection[J].Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,2003,1819(1).
- [4] Scullion Tom.Precracking of soil-cement bases to reduce reflection cracking:field investigation[R].Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,2002,1787(1).
- [5] 冯忠绪,赵利军.搅拌机低效区及其消除方法[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(6).
- [6] 冯忠绪.混凝土搅拌理论与设备[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [7] 蒋应军.水泥稳定碎石振动试验方法及工程应用研究[D].南京:东南大学,2009.
- [8] 陈磊.水泥稳定碎石振动试验方法研究[D].西安:长安大学,2009.
- [9] 张雪强.水泥稳定碎石组成结构及强度形成机理分析[J].山西建筑,2009,35(19).
- [10] JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [11] JTG/T F20-2015,公路路面基层施工技术细则[S].
- [12] 蒋应军,王富玉,刘斌.水泥稳定碎石强度特性的试验研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(15).
- [13] 葛永卫.骨架密实型水泥稳定碎石抗裂性能分析[J].交通标准化,2009(19).
- [14] 孙兆辉.水泥稳定碎石抗裂性能指标研究[J].公路工程,2009,34(3).
- [15] 李勇.骨架密实型水泥稳定碎石抗裂性能分析[J].山西建筑,2009,35(10).

(下转第68页)

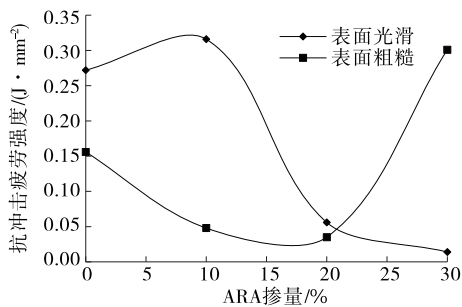


图6 表面构造对辉绿岩抗冲击疲劳性能的影响

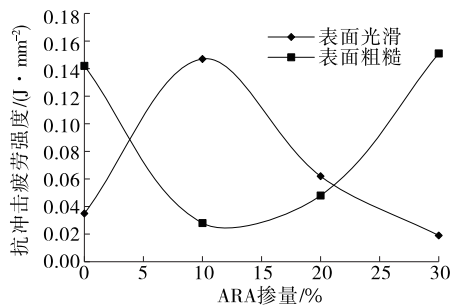


图7 表面构造对玄武岩抗冲击疲劳性能的影响

光滑试件的抗冲击疲劳强度变化规律相反。ARA 掺量低于 25% 时,掺入 ARA 对试件的抗冲击疲劳性能未能起到提高的效果;ARA 掺量高于 25% 时,随着掺量的增大抗冲击疲劳性能逐渐增强。

由图 7 可知:表面粗糙玄武岩试件的抗冲击疲劳强度随 ARA 掺量的变化规律与表面粗糙辉绿岩类似。ARA 掺量低于 5% 或高于 20% 时,在相同掺量下,表面粗糙玄武岩试件的抗冲击疲劳强度比表面光滑玄武岩试件的大;ARA 掺量为 5%~20% 时则相反。

剪切面粗糙试件的抗冲击疲劳强度未随天然沥青掺量的变化呈线性变化,与评定沥青-石料之间粘附性的试验结果不符。剪切面粗糙试件的破坏并不是因为沥青-石料之间粘附性不足,而是由沥青-石料之间的沥青膜决定。因此,选用冲击疲劳试验模拟沥青-石料之间的粘附性需对石板表面进行打磨处理。

### 3 结论

(1) 辉绿岩的抗冲击疲劳强度随 ARA、TLA 掺量的增大先升高后降低;掺量低于 10% 时,抗冲击疲劳强度随 ARA、TLA 掺量的增大而升高;TLA 掺量高于 10% 时,抗冲击疲劳强度随 TLA 掺量的增大急剧降低。玄武岩的抗冲击疲劳强度随 ARA、TLA 掺量的增大先升高后降低,在 ARA 掺量为 10% 时达到峰值,TLA 掺量为 30% 时抗冲击疲劳强度降低 68.6%。

(2) 辉绿岩和玄武岩经浸水处理后其抗冲击疲劳性能急剧下降;表面粗糙辉绿岩、玄武岩试件的抗冲击疲劳强度随 ARA 掺量的增大先降低后升高;ARA 掺量低于 5% 或高于 20% 时,在相同掺量下,表面粗糙玄武岩试件的抗冲击疲劳强度比表面光滑试件的大,ARA 掺量为 5%~20% 时则相反。

### 参考文献:

- [1] 刘洋.沥青路面水损害机理分析及对策研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [2] 马峰,郝景贤,傅珍,等.天然沥青改性沥青的表面自由能分析[J].交通运输工程学报,2015,15(1).
- [3] 孔维川.集料特性对沥青-集料界面性能影响研究[D].西安:长安大学,2012.
- [4] 袁峻,董文斌,钱武彬.基于超声波的沥青-集料粘附性试验方法研究[J].科学技术与工程,2013,13(5).
- [5] 梅迎军,吴金航.沥青胶浆-集料界面水损机制及评价研究进展[J].武汉理工大学学报,2013,35(3).
- [6] 陈燕娟,高建明,陈华鑫.基于表面能理论的沥青-集料体系的粘附特性研究[J].东南大学学报:自然科学版,2014,44(1).
- [7] 董满生,鹿婧,凌天清,等.考虑温度效应的沥青混合料参数模型[J].工程力学,2016,33(6).
- [8] 季节,索智,文博,等.水、温拌剂对沥青-集料界面粘附能力的影响[J].中国公路学报,2015,28(7).

收稿日期:2018-02-26

(上接第 64 页)

- [16] 蒋应军.基于振动试验法设计的抗裂型水泥稳定碎石基层应用研究[J].公路,2008(12).
- [17] 李明杰.水泥稳定碎石振动试验方法研究及应用[D].西安:长安大学,2010.
- [18] 周诚喜.水泥稳定碎石基层抗裂机理的微观分析[J].上海公路,2005(2).
- [19] 施洲辉,甘先永,罗增杰.振动搅拌技术对水泥稳定碎石强度性能的影响[J].公路与汽运,2016(3).
- [20] 章迁.水泥稳定碎石层刚度控制指标研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.

收稿日期:2018-04-03