

# 聚酯纤维和振动搅拌工艺对水泥稳定碎石的 路用性能影响规律研究

房英锋

(中电建路桥集团有限公司,北京市 100089)

**摘要:**采用振动搅拌工艺对水泥稳定碎石进行搅拌加工,对比振动搅拌工艺与传统搅拌工艺对水泥稳定碎石强度性能的影响及改善机理。在振动搅拌成型工艺的基础上,分析聚酯纤维对水泥稳定碎石无侧限抗压强度、劈裂强度、干缩性能、温缩性能和均匀性的影响规律。试验结果表明:采用振动搅拌成型的水泥稳定碎石 28 d 无侧限抗压强度、劈裂强度比传统拌和成型试件分别提高了 21.6%、21.2%,干缩系数和温缩系数分别降低了 23.4%和 21.3%;除 7 d 劈裂强度指标外,聚酯纤维的掺入可有效改善水泥稳定碎石的各项路用性能,且最佳掺量范围为 0.6‰~0.8‰。

**关键词:**水泥稳定碎石;振动搅拌;聚酯纤维;强度;收缩系数

公路水泥稳定碎石半刚性基层普遍存在收缩开裂、均匀性差等问题,是公路基层产生诸多病害的主要原因之一。一般认为,通过工艺提升、外掺添加剂和设计优化等技术手段能够改善半刚性基层材料的强度、抗裂性能等,从而提高公路基层的路用性能和耐久性。目前相关研究认为:纤维能够对水泥稳定碎石具有增

强和增韧效应,掺加纤维是改善水泥稳定碎石路用性能方法之一;另外振动搅拌工艺可从宏观和微观层面上改善材料拌和过程中的均质性,从而提高强度和各项使用性能。

聚酯纤维材料化学稳定性好、强度高,同时具有良好的耐酸性能和抵抗非极性溶剂侵蚀的能力,是综合

## 参考文献:

- [1] 方恒亮,赵茂才,张海,等.基于有限元的水泥路面冰冻损伤机理[J].公路交通科技,2011(8).
- [2] 喻文兵,李双洋,冯文杰,等.道路融雪除冰技术现状与发展趋势分析[J].冰川冻土,2011(4).
- [3] 张洪伟,韩森,张丽娟,等.盐化物沥青混凝土抑制结冰与融雪试验[J].长安大学学报(自然科学版),2011(2).
- [4] 王华军,赵军.地热能道路融雪化冰过程实验研究[J].太阳能学报,2009(2).
- [5] Zenewitz J A. Survey of Alternatives to the Use of Chlorides for Highway Deicing, FHWA-RD-77-52[R]. Washington D.C.: Offices of Research and Development, Federal Highway Administration, 1977.
- [6] 高一平.利用太阳能的路面融雪系统[J].中外公路,1997(4).
- [7] Ramsey J W, Hewett M J. Updated Design Guidelines for Snow-Melting Systems[J]. ASHRAE Trans, 1999, 105(2): 1 055-1 065.
- [8] Zhao H, Wang S, Wu Z, et al. Concrete Slab Installed with Carbon Fiber Heating Wire for Bridge Deck Deicing[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(6): 500-509.
- [9] 张倩雯,赵艳华,吴智敏.混凝土路面碳纤维发热线融雪化冰研究[J].公路交通科技,2015(2).
- [10] 袁玉卿,许海铭,张永健.导电沥青混凝土发热性能实验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014(10).
- [11] 张永健,袁玉卿,杨玲.矮寨特大桥融雪防冰电发热沥青混凝土试验研究[J].中外公路,2011(6).
- [12] 姜绍升,孙青松.化学类冻结抑制沥青路面融雪效果评价[J].中外公路,2012(1).
- [13] 邹孟秋.物理及化学作用综合融雪除冰沥青混合料研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2016.
- [14] 杨慧成.蓄盐材料制备及其除冰融雪研究[D].长安大学硕士学位论文,2014.

收稿日期:2019-09-09(修改稿)

作者简介:房英锋,男,大学本科,高级工程师.E-mail:2379382427@qq.com

性能较好的纤维材料。目前中国多家单位研究基于静压成型方法分析了聚酯纤维对水泥稳定碎石材料的强度和干缩性能的影响,但未对采用振动成型工艺条件下聚酯纤维对水泥稳定碎石的各项路用性能影响规律进行深入研究。

因此,该文首先对比振动搅拌工艺和传统静压成型方法对掺入聚酯纤维水泥稳定碎石的无侧限抗压强度、劈裂强度、均匀性、干缩性能和温缩性能的影响规律,并在振动搅拌成型工艺的基础上,研究纤维掺量对

水泥稳定碎石上述各项路用性能的影响,最终确定基于振动搅拌成型工艺的聚酯纤维的最佳掺量范围。

## 1 原材料

(1) 水泥。采用矿渣硅酸盐水泥 P—S—A32.5,具体技术指标见表 1。

(2) 聚酯纤维。采用普通聚酯纤维,具体指标见表 2。

表 1 水泥技术指标

细度(45 μm 方孔筛)/%	安定性 (煮沸法)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
13.2	1.0	245	475	21.7	41.2	3.6	7.1

表 2 聚酯纤维技术指标

长度/mm	直径/μm	比重	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	抗酸性	断裂伸长率/%
50~60	25	698	1.25	7 430	强	11

(3) 集料与矿料级配。所用集料为石灰岩,级配见表 3。

表 3 矿料级配

孔径/mm	通过率/%	孔径/mm	通过率/%
31.5	100	2.36	21.9
26.5	92.2	1.18	19.2
19	74.2	0.6	11.5
16	72.2	0.3	8.4
13.2	64.8	0.15	6.0
9.5	50.2	0.075	2.2
4.75	27.7		

## 2 试验方案及方法

为了研究聚酯纤维在水泥稳定碎石基层混合料中的应用,该文通过分析研究聚酯纤维掺量对水稳碎石无侧限抗压强度、劈裂强度、干缩系数和温缩系数、离散系数的影响规律,确定其最佳掺量。

### 2.1 试验方案

聚酯纤维掺量分别为 0‰、0.4‰、0.6‰、0.8‰ 和 1‰。采用 600 t/h 连续式试验室内小型试验水泥稳定碎石振动搅拌设备,当养生龄期为 7、28 d 时分别对其性能评价指标进行试验。

### 2.2 评价指标及试验方法

水稳碎石混合料路用性能指标测定包括无侧限抗压强度、劈裂强度、干燥收缩、温度收缩,通过试验研究分析聚酯纤维的掺量对其指标的影响规律。

#### 2.2.1 无侧限抗压强度试验方法

无侧限抗压强度是水稳碎石混合料的主要性能指标,其大小直接决定路面基层承载力的大小,按照规范要求,抗压强度的试件制作成  $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的圆柱体,在标准养生龄期分别为 7、28 d 时对试件做加载试验,根据不同纤维掺量和不同龄期制作 16 组且每组平行试件 5 个,共有 80 个。

无侧限抗压强度按式(1)计算:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: $R_c$ 、 $P$ 、 $A$  分别为试件的无侧限抗压强度(MPa)、破坏时的最大压力(kN)、截面面积( $\text{mm}^2$ )。

#### 2.2.2 劈裂强度试验方法

抗拉强度是水稳碎石混合料的另一个重要性能指标,混合料的抗拉能力可以用劈裂强度大小反映,故水稳碎石混合料的抗拉强度采用劈裂强度试验。其试件配合比、尺寸和数量与无侧限抗压强度试验相同,在标准养生龄期分别为 7、28 d 时对试件做加载试验。

劈裂强度计算公式为:

$$R_t = \frac{2P}{\pi dh} \left[ \sin(2\alpha) - \frac{a}{d} \right] \quad (2)$$

式中:  $R_l$ 、 $P$ 、 $d$  分别为试件劈裂强度(MPa)、破坏时的最大压力、直径(mm);  $h$  为浸水后试件的高度(mm);  $\alpha$  为半压条宽对应的圆心角( $^\circ$ );  $a$  为压条的宽度(mm)。

### 2.2.3 干燥收缩试验方法

干燥收缩是因其内部含水量的变化而引起整体宏观体积收缩的现象。此次干缩试验是在室内自然条件下进行的,采用 100 mm×100 mm×400 mm 的水泥稳定碎石混合料小梁试件,每组有 5 个平行试件,其养护龄期为 7 d,测试时间间隔第 1 d 为 6 h 一次,第 2~5 d 为 12 h 一次,之后 24 h 一次,直到含水量基本不变为止。平均干缩系数的计算公式为:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{w_0 - w_i} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_0$  为第  $i$  次及初始测得的试件干缩应变( $\mu\varepsilon$ );  $w_i$ 、 $w_0$  为第  $i$  次及初始测得的试件含水量(%)。

### 2.2.4 温度收缩试验方法

温缩是温度下降时引起水稳碎石混合料外部体积变化的现象。温缩试验在高低温交变环境箱中进行,温度从 55  $^\circ\text{C}$  降到 -25  $^\circ\text{C}$ ,每次降温 10  $^\circ\text{C}$ ,降温速率为 1  $^\circ\text{C}/\text{min}$ ,每次降温后恒温 2 h。试件的制备、数量与干缩试验相同,其养护龄期为 7、28 d。

温缩系数的计算公式为:

$$\alpha_t = \frac{\varepsilon_i}{t_i - t_{i+1}} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_t$ 、 $\varepsilon_i$ 、 $t_i$  分别为温缩系数、温缩应变、温度区间( $^\circ\text{C}$ )。

## 3 纤维掺量对水泥稳定碎石路用性能的影响

### 3.1 纤维掺量对强度的影响

由式(1)、(2)可得 7、28 d 两个龄期的无侧限抗压强度及劈裂强度的试验结果分别如图 1、2 所示。

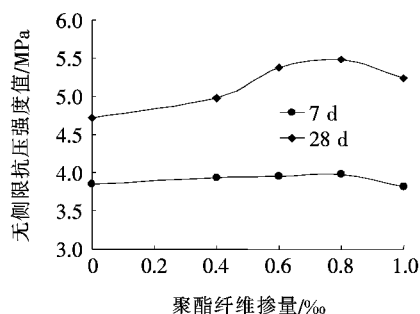


图 1 聚酯纤维掺量对无侧限抗压强度的影响

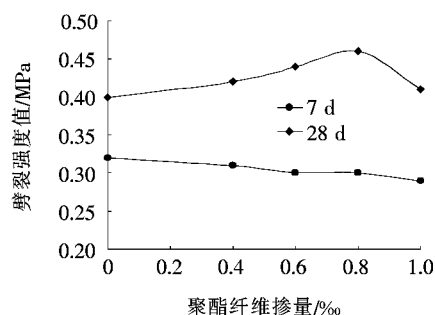


图 2 聚酯纤维掺量对劈裂强度的影响

由图 1、2 可知:① 聚酯纤维对水稳碎石混合料的早期无侧限抗压强度影响较小,而对其后期抗压强度具有一定的增强作用;② 掺入聚酯纤维对水稳碎石混合料早期劈裂强度会产生不利影响;③ 养护龄期为 28 d 时,随着聚酯纤维掺量的增加,水稳碎石混合料的抗压强度和劈裂强度均先增大后减小,掺量为 0.6%~0.8% 时,混合料的抗压强度提高了 16% 左右。

养护早期试件混合料中的水泥尚处于水化状态,与掺入的聚酯纤维之间的联结较弱,这样使得聚酯纤维对其强度影响较小,甚至会降低强度值。当养护时间不断增加时,混合料中的水泥水化反应逐渐完成,其水化产物提升了两者之间的联结,这时聚酯纤维的掺入对混合料会产生有利的影响。

### 3.2 纤维掺量对收缩系数的影响

(1) 由式(3)计算得养护龄期为 7 d 的试件的平均干缩系数的试验结果如图 3 所示。

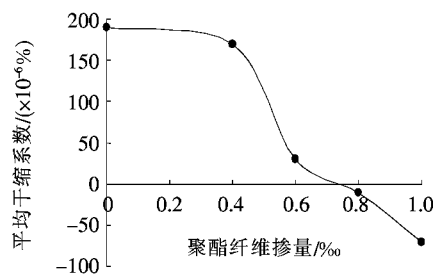


图 3 聚酯纤维掺量对干缩系数的影响

由图 3 可知:① 在水稳碎石混合料养护龄期为 7 d 时,随着聚酯纤维的增加,其平均干缩系数逐渐减小,这是因为聚酯纤维被分散到水稳碎石混合料中的孔隙处,从而阻止了自由水分的散失,当聚酯纤维增加到一定量时混合料会出现膨胀现象,这可能是由聚酯纤维的模量引起的,随着掺量的不断增加,其模量的弹性性能会造成试件体积的扩张;② 当聚酯纤维掺量为 0.4%~0.6% 时,会大幅度降低平均干缩系数,而在 0.6%~0.8% 之间有一个最佳聚酯纤维掺量会消除干

缩现象。

(2) 由式(4)可计算得养护龄期为 7、28 d 的试件的温缩系数的试验结果如图 4 所示。

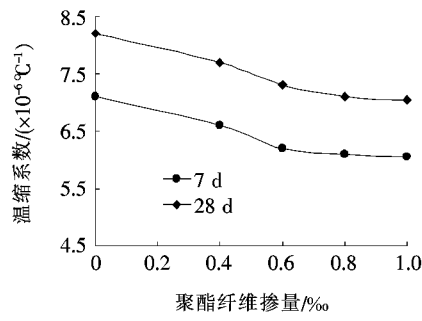


图 4 聚酯纤维掺量对温缩系数的影响

由图 4 可知:① 随着水稳碎石混合料养护龄期的增长,温缩系数呈现增加的趋势,这是由水泥水化反应形成的胶结物和晶体引起的;② 随着掺入聚酯纤维,两个不同龄期的温缩系数均逐渐减小,这是因为聚酯纤维的线性温缩系数低于混合料的线性温缩系数,从而对胶结物起到了抑制作用;③ 当聚酯纤维掺量达到一定值时,温缩系数减小幅度逐渐下降;④ 掺量为 0.6‰~0.8‰时,其温缩系数降低了 14%左右。

3.3 纤维掺量对均匀性的影响

当聚酯纤维掺量为 0.8‰、0.6‰养护龄期为 7、28 d 时,每组平行 5 个试件的无侧限抗压强度试验结果如表 4 所示。

表 4 无侧限抗压强度测试结果							
聚酯纤维掺量/‰	龄期/d	下列试件的无侧限抗压强度/MPa					离散系数 $C_v$ /%
		1	2	3	4	5	
0.8	7	3.95	3.97	3.98	4.03	3.97	0.67
	28	5.43	5.44	5.52	5.51	5.50	0.68
0.6	7	3.93	3.96	3.94	3.97	3.95	0.36
	28	5.38	5.34	5.40	5.36	5.37	0.37

由表 4 可知:随着聚酯纤维掺量的增加,会降低水稳碎石混合料的均匀性,但降低幅度不大。

4 成型拌和工艺对水泥稳定碎石路用性能的影响

除混合料配合比设计外,拌和工艺对水泥稳定碎石基层路面的使用性能也有一定的影响。基于此,在聚酯纤维掺入量为 0‰、0.6‰和 0.8‰时,通过试验对比振动拌和与传统拌和工艺分别对无侧限抗压强度、

劈裂强度、干燥收缩以及温度收缩性能的影响,结果如图 5~8 所示。

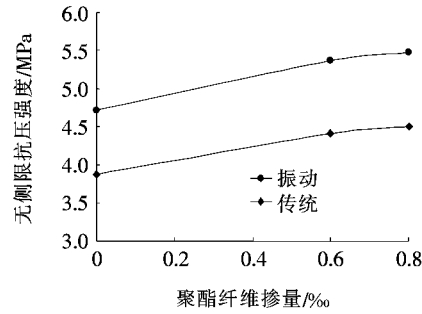


图 5 拌和工艺及聚酯纤维掺量对无侧限抗压强度的影响(龄期为 28 d)

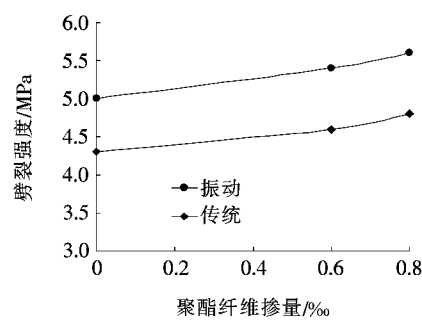


图 6 拌和工艺及聚酯纤维掺量对劈裂强度的影响(龄期为 28 d)

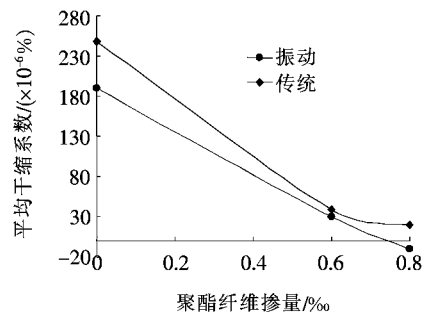


图 7 拌和工艺及聚酯纤维掺量对干缩的影响(龄期为 7 d)

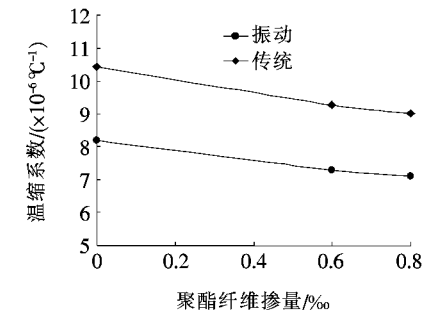


图 8 拌和工艺及聚酯纤维掺量对温缩的影响(龄期为 28 d)

由图 5、6 可知:在试件养护龄期为 28 d,不掺聚酯纤维时,振动拌和的无侧限抗压强度、劈裂强度与传统拌和的相比分别提高了 21.6%、21.2%,这是因为振动作用提高了混合料中水泥水化反应的比例,使得水化产物也相应增多。随着聚酯纤维的掺入,其抗压强度进一步提高。故振动拌和技术以及聚酯纤维可以有效提高水稳碎石混合料的无侧限抗压强度。

由图 7 可知:在试件养护龄期为 7 d,不掺聚酯纤维时,振动拌和的平均干缩系数与传统拌和的相比降低了 23.4%,随着聚酯纤维的掺入,其平均干缩系数进一步降低。故振动拌和技术以及聚酯纤维可以有效降低水稳碎石混合料的平均干缩系数。

由图 8 可知:在试件养护龄期为 28 d,不掺聚酯纤维时,振动拌和的温缩系数与传统拌和的相比降低了 21.3%,随着聚酯纤维的掺入,其温缩系数进一步降低。故振动拌和技术以及聚酯纤维可以有效降低水稳碎石混合料的温缩系数。

当聚酯纤维掺量为 0.8‰、养护龄期为 28 d 时,振动搅拌和传统搅拌每组平行 5 个试件的无侧限抗压强度试验结果如表 5 所示。

表 5 聚酯纤维掺量为 0.8‰时无侧限抗压强度(28 d 龄期)

拌和方式	下列试件的无侧限抗压强度/MPa					离散系数/%
	1	2	3	4	5	
振动	5.43	5.44	5.52	5.51	5.50	0.68
传统	4.30	5.20	4.10	4.50	4.40	8.31

由表 5 可知:振动拌和与传统拌和抗压强度的离散系数分别为 0.68%、8.31%,故振动拌和较传统拌和能更好地打散水泥结团现象,使其均匀地分布在混合料的周围,提高水稳碎石混合料的黏结性,改善基层的路用性能。

## 5 结论

通过试验分析聚酯纤维和振动拌和技术对水泥稳定碎石性能的影响,得到以下结论:

(1) 聚酯纤维的掺入对水稳碎石混合料养护早期

强度影响较小;但当养护龄期为 28 d 时,随着聚酯纤维掺量的增加,混合料的强度先增大后减小,聚酯纤维的最佳掺量为 0.6‰~0.8‰,无侧限抗压强度和劈裂强度均提高 16%左右。

(2) 当混合料养护龄期为 7 d 时,聚酯纤维的掺入会降低其平均干缩系数,其最佳掺量为 0.6‰~0.8‰时会消除干缩现象;当混合料养护龄期为 7、28 d 时,聚酯纤维的掺入会降低温缩系数,聚酯纤维的最佳掺量为 0.6‰~0.8‰会降低温缩系数 14%左右。

(3) 随着聚酯纤维掺量的增加离散系数会逐渐变大,表明聚酯纤维会降低水稳碎石混合料的均匀性,但幅度不大。

(4) 通过对比混合料振动拌和与传统拌和技术可知,振动拌和技术可以有效提高水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度 21.6%、劈裂强度 21.2%;降低水泥稳定碎石混合料的平均干缩系数 23.4%、温缩系数 21.3%。

## 参考文献:

- [1] 尚志刚,魏宏.聚酯纤维对水泥稳定碎石的强度影响规律研究[J].中外公路,2012(2).
- [2] 韦小碧.聚酯纤维掺量对水泥稳定碎石收缩及力学性能影响研究[D].中国矿业大学硕士学位论文,2018.
- [3] 付春梅,施小明.聚酯纤维水泥稳定碎石抗裂性能试验研究[J].路基工程,2012(3).
- [4] 杨明.玄武岩一聚丙烯混杂纤维水稳碎石基层的路用性能研究[D].长安大学硕士学位论文,2017.
- [5] 梁爽.水泥稳定级配碎石振动搅拌技术的应用研究[D].东北林业大学硕士学位论文,2018.
- [6] 张良奇,孔鲜宁.水泥稳定碎石振动搅拌装置的研制及工业试验[J].广西大学学报(自然科学版),2015(5).
- [7] 李元.纤维对水泥稳定碎石力学性能的影响分析[J].建筑工程技术与设计,2014(24).
- [8] 暴英波.纤维增强水泥稳定碎石的研究现状及展望[J].天津建设科技,2018(4).
- [9] 李淑.玄武岩纤维水泥稳定碎石路用性能试验研究[D].中国海洋大学硕士学位论文,2014.
- [10] 薛青.振动搅拌对水泥稳定碎石性能影响的试验研究[D].长安大学硕士学位论文,2016.