

高强合成纤维混凝土机场道面接缝抗冲击性能

岑国平, 陈悦[✉], 崔云化

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 针对高强合成纤维对机场道面接缝处的抗冲击性能改善作用进行了研究。研究中采用改制后的混凝土路面轮辙试验机进行轮式抗冲击试验,以混凝土脱落量来衡量其损伤程度。试验试件分为无错台和有错台 2 组,模拟机场道面接缝处的实际情况。结果表明:对于 2 组道面试件组,冲击荷载作用次数的增加均会导致混凝土脱落量的增加。对于无错台试件,1 000 次冲击作用后,纤维掺量为 1.4 kg/m^3 的混凝土脱落量比普通混凝土减少 51.1%。对于有错台试件,随着纤维掺量增加至 1.4 kg/m^3 ,混凝土脱落量分别减少 73.3%,72.5%,46.6%。这说明高强合成纤维掺量的增加可以有效减轻接缝两侧边角和错台边角的混凝土受冲击脱落现象,且改善效果越来越明显。

关键词 机场道面;混凝土;高强合成纤维;接缝边角;错台;抗冲击性能

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.05.005

中图分类号 V35;TU528.58 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)05-0025-05

Research on the Impact Resistance of High Strength Synthetic Fiber Concrete at Airport Pavement Joint

CEN Guoping, CHEN Yue[✉], CUI Yunhua

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Researches on how to add the high strength synthetic fibers in the pavement concrete at the airport to improve its performance, and the impact resistance improvement of the high strength synthetic fibers at the airport pavement joints. The restructured concrete pavement rut testing machine is adopted to take the wheeled impact test in the study. Moreover, the shedding concrete quantity is used to measure the degree of injury. The test specimens are divided into two groups, i. e. specimens without staggered steps and with staggered steps. The actual situation of the airport pavement joint is simulated. The results show that as for the two test groups, an increase in the number of impact load will cause the increase of concrete weight loss. As for the specimens without staggered steps, after 1 000 times of impact, the amount of shedding concrete dropped by 1.4 kg/m^3 is 51.1% lower than that of ordinary concrete. For the specimens with staggered steps, the concrete shedding decreases by 73.3%, 72.5%, and 46.6% respectively with the increase of fiber content to 1.4 kg/m^3 . The result shows that the increase of the synthetic fiber content can effectively reduce the shedding quantity of the joint angle and the angle at staggered steps, and the improvement effect is more and more obvious.

收稿日期: 2018-01-23

作者简介: 岑国平(1962—),男,浙江慈溪人,教授,博士生导师,主要从事机场工程材料研究。E-mail:cenguoping@163.com

通信作者: 陈悦(1994—),男,北京人,硕士生,主要从事机场工程材料研究。E-mail:zhenchenyue@163.com

引用格式: 岑国平,陈悦,崔云化. 高强合成纤维混凝土机场道面接缝抗冲击性能[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(5): 25-29.
CEN Guoping, CHEN Yue, CUI Yunhua. Research on the Impact Resistance of High Strength Synthetic Fiber Concrete at Airport Pavement Joint[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 25-29.

Key words: airport pavement; concrete; high strength synthetic fiber; joint edge angle; staggered steps; impact resistance

国内外对公路和机场道面用混凝土的抗冲击性能进行了较多地研究,而且近年来,合成纤维由于其良好的性能已经逐步在路面或道面混凝土中开始应用^[1-3]。王晓光等利用自行设计制作的导杆式冲击试验装置对不同种类纤维混凝土薄板抗冲击性能进行了试验研究^[4]。王璞,龚斌等将混凝土的抗冲击性能作为动力学性能来探讨分析,并分析了纤维对混凝土抗冲击性能的改善效果和相应的作用机理^[5-6]。吴晓春,郝景文,朱江等人分别对纤维在高速公路和桥梁混凝土中的应用进行了一定的研究^[7-10],部分研究涉及到了路面混凝土承受抗冲击荷载的能力,分析了钢纤维,聚丙烯纤维,碳纤维混杂纤维等纤维对混凝土抗冲击性能的改善作用,确定了合适的纤维掺量并进行了性能上的对比。对于机场道面的抗冲击性能,苏长征等研究人员提出了设计与计算理论^[11]。王硕和刘文等人针对道(路)面接缝对道面平整度的影响进行了分析,并通过建立仿真模型对道面接缝处错台的成因和传荷方式进行了理论研究^[12-13],但是结论没有关注混凝土的脱落问题,也没有提出相应的改善措施。在国外,CK Kankam 和 J Katzer 等学者也将充分论证了各种合成纤维掺入路面混凝土之后对其抗冲击性能的提升作用,A Bordelon 具体的指出了不同级别和使用荷载的路面所适合的纤维种类和对应掺量^[14-16]。综上可知,现有文献对机场跑道混凝土的研究较为少见。道面接缝处混凝土在冲击作用下的掉落现象仍然是威胁飞机安全运行的一大现实问题,目前还没有系统的改善措施。因此,有必要对其进行深入的研究。

1 高强合成纤维道面混凝土轮式抗冲击试验

1.1 试验原材料及配合比

试验材料采用 42.5R 普通硅酸盐水泥,密度 3.10 g/cm^3 , $80 \mu\text{m}$ 筛余量为 1.6% , 3 d 和 28 d 抗折强度分别为 5.0 MPa 和 9.0 MPa , 3 d 和 28 d 抗压强度分别为 28.9 MPa 和 52.3 MPa 。混凝土骨料采用 $5\sim 10 \text{ mm}$, $10\sim 20 \text{ mm}$, 二级配石灰岩碎石,级配比例为 $40:60$, 碎石密度为 2.70 g/cm^3 , 骨料堆积密度为 1.69 g/cm^3 , 其压碎指标为 3.4% 。砂是细度模数为 2.78 的灞河中砂,属于 II 区级配,密度为 2.63 g/cm^3 , 堆积密度 1.50 g/cm^3 。试验用水为生活饮用水。由于试件较薄,要求骨料粒径较小,试件不掺入大石。混凝土基准配合比见表 1。

试验中,试件按不同掺量掺入高强合成纤维,主要技术指标见表 2。采取绝对密实体积法进行道面混凝土的配合比设计。此外,搅拌过程使用双卧轴强制式搅拌机搅拌,投料顺序为:砂子+水泥+纤维(30 s)+水(30 s)+石子(120 s),确保衡量误差不超过 $\pm 2\%$ 。

表 1 抗冲击试验混凝土基准配合比

Tab. 1 The mix proportion of impact test concrete kg/m^3

| 水泥 | 水 | 砂 | 中石 | 小石 |
|-----|-------|-----|-----|-----|
| 350 | 157.5 | 605 | 816 | 544 |

表 2 高强合成纤维性能指标

Tab. 2 Performance index of high strength synthetic fiber

| 长度 /mm | 比重 | 弹性模 量/GPa | 断裂伸 长率/% | 抗拉强 度/MPa | 吸水性 /% | 熔点 /°C |
|------------|----------------|--------------|-------------|--------------|-----------|-----------|
| $5\sim 20$ | $0.9\sim 1.31$ | 6.1 | 3.1 | 760 | 0.7 | 257 |

1.2 试验试件制备

本文制备的试件分为 2 组,分别是无错台组和有错台组。其中,无错台组试件主要是模拟机场道面接缝处的状态。因为接缝填缝料刚度小,变形大,飞机机轮通过时,对接缝两侧的边角会产生振动冲击作用。有错台组试件要针对部分机场道面接缝由于长期使用而产生的错台现象。

1) 无错台组。试件尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 纤维掺量分别为 $0, 0.9, 1.2, 1.4 \text{ kg/m}^3$ 的纤维混凝土试件各 3 个。在全部试件表面切 3 道缝,切缝间隔为 60 mm ,缝宽为 8 mm ,缝深为 20 mm ,见图 1。由于试验过程中混凝土边角脱落量较少,用单条接缝模拟试验结果离散性较大,因此采用 3 条接缝,用 3 条接缝的总脱落量之和作比较分析,以提高效率,减少偶然性,降低误差。



图 1 无错台试件

Fig. 1 Specimens without staggered steps

2) 有错台组。对于投入使用中的道面,随着时间的推延,平整度逐渐变差,从而错台高度就会增

加。经过观察研究发现,绝大多数错台情况不会超过 10 mm,因此本试验中取试件错台高度为 10 mm。制作试件时,薄板部分试件尺寸为 300 mm×150 mm×40 mm,厚板部分试件尺寸为 300 mm×150 mm×50 mm,错台高度设为 10 mm,见图 2。其中,纤维掺量为 0、0.9、1.2、1.4 kg/m³ 的纤维混凝土试件各 3 个。



图 2 有错台试件

Fig. 2 Specimens with staggered steps

1.3 试验方法

1.3.1 试验设备

考虑到高强合成纤维水泥混凝土试件的特殊性,本试验中采用钢轮代替橡胶制的实心轮作为冲击加载轮。改制后的轮式冲击试验机由试验台、刚性试验轮及控制系统等组成,见图 3。钢轮外径 170 mm,宽 50 mm;控制系统用来设置荷载大小,并控制曲柄连杆驱动加载轮作往返运行,加载轮行走距离 230 mm±10 mm,行走速度 1 min 21 次往返。



图 3 轮式冲击试验机

Fig. 3 Wheel impact test machine

1.3.2 试验步骤

1) 无错台组。试验滚动次数以 250 次为基数,每块试件分别进行 250、500、750、1 000 次共 4 轮试验,钢轮荷载为 1 000 N。在每一轮试验结束后,用干净的毛刷将钢轮荷载作用下 3 条接缝产生的混凝土脱落碎块及粉末清扫至托盘并进行称重,记录每次混凝土掉落质量并与前一次叠加。

2) 有错台组。钢轮荷载采用 580 N、680 N 和 780 N 共 3 级荷载,钢轮滚动次数以 500 次为基数,每块试件分别进行 500、1 000 次共 2 轮试验。在每一轮试验结束后,用干净的毛刷将钢轮荷载冲击作用下产生的混凝土脱落碎块及粉末清扫至托盘并进行称重,记录每次混凝土掉落质量并与前一次叠加。

2 试验结果及分析

2.1 无错台轮式抗冲击试验

通过上述轮式冲击试验,可以得到不同冲击次数下不同纤维掺量的无错台试件的混凝土掉落质量,见表 3。

表 3 轮式抗冲击试验混凝土脱落量(无错台)

Tab. 3 Concrete shedding amount of wheel type impact test (without staggered steps) g

| 纤维掺量/ (kg·m ⁻³) | 冲击次数 | | | |
|--------------------------------|------|------|------|-------|
| | 250 | 500 | 750 | 1 000 |
| 0 | 2.07 | 3.29 | 4.50 | 5.26 |
| 0.9 | 2.01 | 3.02 | 4.00 | 4.53 |
| 1.2 | 1.88 | 2.67 | 3.32 | 3.69 |
| 1.4 | 1.61 | 1.98 | 2.32 | 2.57 |

通过对表 3 试验数据的对比分析,绘制出不同纤维掺量、不同荷载冲击次数与混凝土脱落质量之间的关系曲线见图 4。

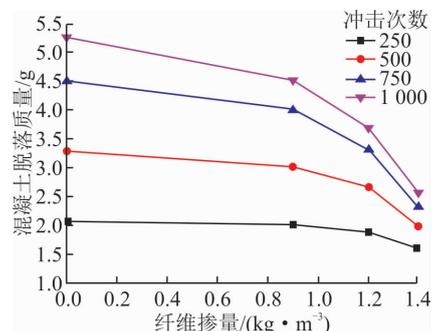


图 4 不同纤维掺量、荷载冲击次数与脱落质量关系

Fig. 4 Relationship between different fiber content, load impact times and shedding quality

通过对表 3 及图 4 的分析可以得出如下结论:

1) 对于无错台的试件,随着冲击次数的增加,混凝土脱落碎块和粉末质量都会随之增加,且呈现出先快后慢非线性增加趋势,例如:试件的纤维掺量为 1.2 kg/m³,冲击第 1 轮试验脱落量为 1.88 g,第 2 轮试验脱落量却为 0.79 g,第 3 轮试验脱落量为 0.65 g,第 4 轮试验脱落量为 0.37 g,仅为第 1 轮的 19.7%。造成这一现象的主要原因是起初冲击阶段,在切缝过程中已损伤部位容易脱落,而且开始时缝槽边角为直角形结构,后期被逐渐磨损变为圆滑的钝角,混凝土脱落量则逐渐减少。

2) 相同钢轮冲击次数下,随着高强合成纤维掺量的增加,道面试件的混凝土脱落质量相应减少,且规律性较好,比如冲击作用 500 次时,纤维掺量为零时脱落量为 3.29 g,纤维掺量分别为 0.9、1.2、1.4

kg/m^3 时,脱落量分别为 3.02、2.67、1.98 g,分别为不掺纤维时脱落量的 91.7%、81.2% 和 60.2%。在 1 000 次冲击作用下,随着纤维掺量从 $0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 增加到 $1.4 \text{ kg}/\text{m}^3$,混凝土脱落量减少 51.1%。说明纤维掺入量的增加可以明显地提高高强合成纤维混凝土道面接缝两侧边角的抗冲击性能。

3)通过图中曲线之间的对比可以看出,在冲击作用初期,纤维掺量的增加导致混凝土边角掉落质量减小,但变化幅度较小。随着冲击荷载作用次数的增加,道面试件的混凝土脱落碎块和粉末质量随纤维掺量增加而变化的幅度增大,反应在图上就是曲线斜率逐步增大。此外,对于掺量为 $1.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 试件,750 次冲击和 1 000 次冲击时掉落的混凝土质量极为接近。这一现象说明在道面混凝土配合比正常的基础上,随着冲击次数的增加,增大纤维掺量对道面试件抗冲击性能的改善越来越明显,且高强合成纤维的掺量的增加对提升道面混凝土后期的抗冲击性能有显著效果。主要原因是高强合成纤维具有良好的韧性,可以在混凝土内部起到联结作用,防止混凝土的脱落。

2.2 有错台轮式抗冲击试验

有错台轮式抗冲击试验混凝土脱落量见表 4。

表 4 轮式抗冲击试验混凝土脱落量(有错台)

Tab. 4 Concrete shedding amount of wheel type impact test (with staggered steps) g

| 荷载/N | 冲击次数 | 纤维掺量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | | | |
|------|-------|---|------|------|------|
| | | 0 | 0.9 | 1.2 | 1.4 |
| 580 | 500 | 0.43 | 0.22 | 0.14 | 0.09 |
| | 1 000 | 0.60 | 0.34 | 0.26 | 0.16 |
| 680 | 500 | 0.33 | 0.25 | 0.14 | 0.09 |
| | 1 000 | 0.51 | 0.37 | 0.24 | 0.14 |
| 780 | 500 | 0.37 | 0.23 | 0.20 | 0.15 |
| | 1 000 | 0.58 | 0.39 | 0.29 | 0.31 |

将表 4 中有错台试件的试验结果绘制成不同纤维掺量、不同荷载与脱落量之间的关系曲线图 5。按照不同垂直荷载试验结果绘制图 6。

1)通过对图 5 中曲线的纵向比较,我们可以发现:对于有错台试件,在相同纤维掺量和相同荷载作用下,试件的混凝土脱落量随着冲击次数的增加而增加。然而,在相同荷载相同冲击次数下,脱落量随着纤维掺量增加而减少,在荷载为 580 N,680 N,780 N 的 1 000 次冲击作用下,随着纤维掺量从 $0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 增加到 $1.4 \text{ kg}/\text{m}^3$,混凝土脱落量分别减少 73.3%、72.5%、46.6%;对应已经产生错台的机场混凝土道面接缝处的边角部位,机轮对道面冲击次数的增加会逐步导致混凝土的脱落,但高强合成纤维

的掺入可以有效地缓解这一损伤现象的发生,正常范围内掺量越高,改善效果越明显。

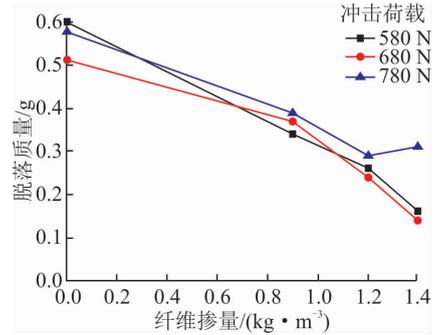


图 5 不同纤维掺量、不同荷载与脱落质量关系
Fig. 5 Relationship between different fiber content, load impact times and shedding quality

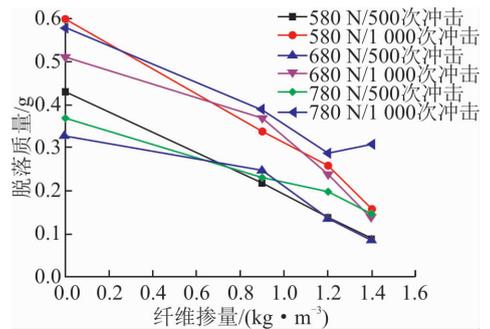


图 6 混凝土脱落质量

Fig. 6 Shedding quality of the concrete

2)通过对图 7 曲线的综合对比分析可知,在相同的冲击荷载作用下,高纤维掺量试件和低纤维掺量试件达到相同的混凝土脱落量所受到的冲击作用次数有所差异,高掺量试件的作用次数始终要高于低掺量试件。例如:荷载为 680 N,混凝土脱落量为 0.25 g 左右时,纤维掺量为 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的试件受冲击次数为 500 次左右,纤维掺量为 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 试件受冲击次数则为 1 000 次左右。由此可以看出,纤维掺量的适当增加可大幅提高错台混凝土道面抗冲击次数,也就是说在同等的损伤状态标准下,混凝土纤维掺量较高的机场道面可使用时间更长,可承受机轮冲击次数更多,抗冲击性能也就越好。

3 结论

1)对于无错台道面试件,冲击荷载作用次数的增加会导致混凝土脱落量的增加,且呈现出先快后慢非线性的增加趋势;相同冲击次数下,高强合成纤维掺量的增加可以有效减轻道面接缝两侧混凝土受冲击脱落现象;随着冲击次数的增加,增大纤维掺入量对道面抗冲击性能的改善越来越明显,且能显著提升道面混凝土后期的抗冲击性。

2)对于有错台道面试件,高强合成纤维的掺入可以有效缓解机场道面接缝处错台受冲击脱落现象的发生,提升混凝土边角的抗冲击性能;正常范围内,纤维掺量越高,对混凝土抗冲击性的提升效果越明显;高强合成纤维掺量的适当增加可以大幅提高错台混凝土道面的抗冲击次数,为飞机的滑跑过程提供安全保障。

参考文献(References):

- [1] 杨慧,曹亚,陈磊. 超高强改性合成纤维在机场道面混凝土中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(19):184-187.
YANG H, CAO Y, CHEN L. Research and Application of FC Fiber in Airport Pavement Concrete Engineering [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(19): 184-187. (in Chinese)
- [2] 李海川,许金余,邵武亮,等. 杜拉纤维混凝土在机场道面中的应用[J]. 公路, 2006, 51(7): 155-157.
LI H C, XU J Y, SHAO S L, et al. Dulla Fiber Concrete in the Airport Road Surface Application [J]. Highway, 2006, 51(7): 155-157. (in Chinese)
- [3] 沈荣熹,崔琪,李青海. 新型纤维增强水泥基复合材料[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2004.
SHEN R X, CUI Q, LI Q H. New Fiber Reinforced Cement Matrix Composite [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 王晓光,周乾,张亚仿,等. 不同种类纤维混凝土薄板抗冲击性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(9): 60-63.
WANG X G, ZHOU Q, ZHANG Y F, et al. Experimental Study on Anti-Impact Test of Different Kinds of Fiber Concrete Sheet [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(9): 60-63. (in Chinese)
- [5] 王璞,黄真,周岱,等. 碳纤维混杂纤维混凝土抗冲击性能研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12): 14-18.
WANG P, HUANG Z, ZHOU D, et al. Impact Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Hybrid Carbon Fibers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12): 14-18. (in Chinese)
- [6] 杨庆国. 柔性纤维水泥砼冲击性能研究[J]. 重庆交通大学学报, 2004, 23(3): 24-26.
YANG Q G. The Study on Impact Performance of Flexible Fibers Concrete [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(3): 24-26. (in Chinese)
- [7] 吴晓春,唐煜,李佳颖. 混杂纤维混凝土的力学与抗冲击性能试验研究[J]. 公路, 2015, 60(8): 226-229.
WU X C, TANG Y, LI J Y. Experimental Study on Mechanical and Impact Resistance of Hybrid Fiber Concrete [J]. Highway, 2015, 60(8): 226-229. (in Chinese)
- [8] 郝景文,梁世春. 常用纤维混凝土抗冲击性能分析[J]. 山西建筑, 2003, 29(1): 108-109.
HAO J W, LIANG S C. The Analysis on the Shock Resistance of Common Fiber Concretes [J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(1): 108-109. (in Chinese)
- [9] 朱江. 聚丙烯纤维混凝土在路面工程中的应用研究[J]. 广东工业大学学报, 2001, 18(2): 62-65.
ZHU J. Application of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete in Pavement Construction [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2001, 18(2): 62-65. (in Chinese)
- [10] 刘卫东,王依民. 聚丙烯纤维混凝土的耐磨损及抗冲击性能研究[J]. 混凝土, 2005(1): 43-45.
LIU W D, WANG Y M. Resistances of Impact and Abrasion for Polypropylene Fiber Concrete [J]. Concrete, 2005(1): 43-45. (in Chinese)
- [11] 苏长征. 冲击荷载作用下机场道面的设计、计算理论[D]. 西安:西北工业大学, 2003.
SU C Z. Design and Calculation Theory of Airport Pavement Under Impact Load [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [12] 王硕,向会伦. 某机场道面错台测试及成因分析[J]. 机场建设, 2014(2): 21-23.
WANG S, XIANG H L. Test and Cause Analysis of an Airport Pavement Wrong Platform [J]. Airport Construction, 2014(2): 21-23. (in Chinese)
- [13] 刘文,凌建明,赵鸿铎. 考虑接缝影响的机场水泥混凝土道面结构响应[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 15-18, 23.
LIU W, LING J M, ZHAO H D. Analysis on Mechanical Responses of Rigid Airport Pavement with Load Transfer of Joints [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(12): 15-18, 23. (in Chinese)
- [14] KANKAM C K. Impact Resistance of Palm Kernel Fiber-reinforced Concrete Pavement Slab [J]. Journal of Ferrocement, 1999, 29(4): 279-286.
- [15] KATZER J. Impact Resistance of Sustainable SFRCC Road Pavement [J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2012, 7(3): 198-203.
- [16] BORDELON A C, ROESLER J R. Fiber-Reinforced Concrete Pavement Design and Material Requirements [J]. Erol Tutulumluer, 2009, 28(5): 717-727.

(编辑:姚树峰)