

# 掺加聚丙烯纤维对路面混凝土抗冲击韧性的影响

杨成忠<sup>1,2</sup>, 刘新荣<sup>2</sup>, 李虹<sup>3</sup>, 李纪德<sup>3</sup>

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;  
3. 湖北省宣恩县恒通路桥有限公司, 湖北宣恩 445500)

**摘要:**水泥混凝土是一种典型的脆性材料,如何改善承受车辆动荷载作用下的水泥混凝土路面板结构的抗冲击性能,是改善水泥混凝土路面使用性能的关键问题之一。参照美国混凝土协会混凝土抗冲击韧性试验方法,自制落锤冲击试验装置,在混凝土中掺加不同掺量的聚丙烯纤维,在满足工作性能的条件下,成型制作掺量不同的聚丙烯纤维混凝土进行冲击试验。采用初裂次数、终裂次数等指标对聚丙烯纤维混凝土的抗冲击韧性进行评定,并与基准混凝土试验结果进行对比。结果表明:当纤维掺量由0、0.6 kg/m<sup>3</sup>、0.9 kg/m<sup>3</sup>增加到1.2 kg/m<sup>3</sup>时,其抗冲击韧性最大增长4.3倍。聚丙烯纤维大大提高混凝土抗冲击韧性的特性,对于承受动荷载的路面结构是非常有利的。

**关键词:**混凝土路面;聚丙烯纤维增强混凝土;冲击试验;韧性

**中图分类号:**TU377.9<sup>+</sup>4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2008)06-0042-04

## Adding Polypropylene Fiber to Pavement Concrete and its Influence on Shock Resistance Toughness

YANG Cheng-zhong<sup>1,2</sup>, LIU Xin-rong<sup>2</sup>, LI Hong<sup>3</sup>, LI Ji-de<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Hengtong Road & Bridge Co., Ltd., Xuanen County, Hubei 445500, P. R. China)

**Abstract:** Because cement concrete typically is a fragile material, raising the shock resistance toughness of cement concrete pavement structures under vehicular loads is a key challenge for improving the service performance of cement concrete pavement. The concrete test method developed by ACI to gauge shock resistance toughness was adopted. By using homemade drop hammer test equipment, adding different doses of polypropylene fiber to concrete, and molding concrete specimens, shock resistance toughness tests were carried out on specimens with required workability. The shock resistance toughness of polypropylene fiber concrete was evaluated by examining indicators such as first crack time and final crack time. The test results were compared with those of normal concrete. The results show that when the polypropylene fiber content varies from 0 g/m<sup>3</sup>, 0.9g/m<sup>3</sup> to 1.2g/m<sup>3</sup>, the maximal shock resistance toughness increases by 4.3 times. The ability of polypropylene fiber to increase greatly the shock resistance toughness of concrete is favorable for its use in pavement structures under vehicular loads.

**Key words:** concrete pavement; polypropylene-fiber reinforcement; shock test; toughness

水泥混凝土路面是由脆性材料形成的承受动荷载作用薄板结构,如何改善水泥混凝土柔韧性,降低其脆性,一直是混凝土领域致力研究的课题。近年来出现了许多增强混凝土抗变形能力的新技术<sup>[1-5]</sup>,在道路领域也不例外,如聚合物改性混凝土、连续配筋混凝土、纤维

增强混凝土等。但这些混凝土改性技术也存在许多不足。如由于钢纤维分散困难,钢纤维混凝土路面难于实现大规模机械化生产。玻璃纤维随着路面结构暴露在大气环境中时间的延长,其增强强度和韧性会有大幅度下降<sup>[6]</sup>,且玻璃纤维太脆,在搅拌过程中极易断裂,以致

\* 收稿日期:2008-07-16

基金项目:江西省自然科学基金(2007GZC0849);江西省教育厅科研基金(2005130)

作者简介:杨成忠(1964-),男,副教授,博士后,主要从事道路工程研究。(E-mail)ycz0791@sina.com  
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

使玻璃纤维在混凝土中的应用受到很大制约。总之,许多改性技术由于工艺复杂、造价过高或自身不足而难以推广。但是,在合成纤维中,以杜拉纤维为代表的聚丙烯纤维,具有稳定的化学性质、较高的抗拉强度和良好的自分散性等优点<sup>[7]</sup>,作为混凝土的掺合料改善混凝土性能,无疑给路面水泥混凝土性能改善和使用寿命延长指引了一条光明的道路。有关学者对此进行了一定的研究<sup>[8-13]</sup>。文献14~16对路用聚丙烯纤维混凝土的力学性能和耐久性进行了较系统的研究。但是,抗冲击性能作为评价混凝土路用性能的重要指标之一,有关研究很少。因此,本文针对水泥混凝土路面承受车辆冲击荷载的特性,通过不同掺量聚丙烯纤维混凝土抗冲击韧性试验,并与基准混凝土试验结果进行对比,研究掺加聚丙烯纤维对混凝土冲击韧性的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试验原材料

水泥采用52.5级普通硅酸盐水泥,其品质指标满足要求。粗骨料采用5~25 mm碎石,含泥量0.5%,针片状含量3.7%,连续粒级,级配良好。细骨料采用细度模数为2.73的河砂,含泥量1.8%。水采用自来水。

聚丙烯纤维采用美国希尔兄弟化工公司生产的杜拉纤维,无毒无味,半透明状,呈束状单丝结构,具有良好的分散性能。其主要物理化学特性见表1。

表1 杜拉纤维物理化学性能

纤维类型	比重	纤维长度/mm	分散性	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	极限拉伸率/%
束状单丝	0.91	19	极好	276	3793	15

### 1.2 试样制备

混凝土抗折强度等级为5.0 MPa。为了对比聚丙烯纤维的作用效果,避开其它因素的影响,在配合比设计时,保持混凝土中其它材料用量不变,分别掺加0、0.6 kg/m<sup>3</sup>、0.9 kg/m<sup>3</sup>、1.2 kg/m<sup>3</sup>的聚丙烯纤维进行试配。混凝土每m<sup>3</sup>体积材料用量为(kg)水泥:碎石:砂:水:减水剂=343:1273:716:164:3.2。

试件制作时,将砂、碎石、水泥、纤维加入搅拌机中,加水拌和,并加入计算用量的减水剂。为了使纤维能均匀分布在混凝土中,整个搅拌过程较普通混凝土适当延长1~2 min。然后取样测试其坍落度。在拌合物和易性良好、坍落度满足要求的基础上,采用Φ152 mm、厚63.5 mm模具浇注成型试件。成型试件按照出料、人工翻拌1遍、装模、振捣、补足混凝土、表面整修步骤进行。试件浇注24 h后脱模,在标准室养护28 d。试验前4 h

将试件从养护室取出晾干,再进行冲击试验。考虑到混凝土的离散性,为了真实地反映纤维混凝土的抗冲击性能,每一种纤维混凝土配合比浇注5个试件。

### 1.3 试验方案

由于国内对纤维混凝土的抗冲击性能研究相对较少,抗冲击试验没有现成的落锤式冲击试验机。《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30-2005)等有关规范<sup>[17-18]</sup>对路面水泥混凝土抗冲击韧性的试验方法和试验流程没有作出规定。因此,本试验参考ACI(美国混凝土协会)544委员会推荐的方法<sup>[19]</sup>,采用自制自由落锤冲击试验法,如图1。

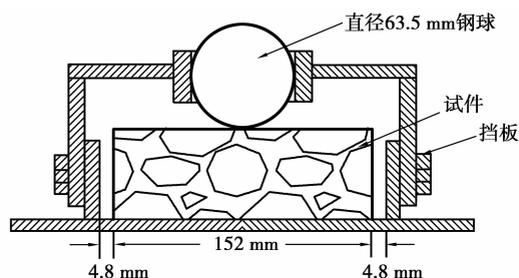


图1 自由落锤冲击试验装置

该方法使用一个重4.54 kg的钢锤从落距457 mm的高度自由下落冲击试件。试件呈圆饼状,其直径152 mm、厚63.5(±3 mm),见图1。试验时在试件底部抹一层黄油以减少底板对试件的横向约束。试件的上表面正中心放置一个直径63.5 mm的钢球。在试验过程中,钢锤自由下落冲击钢球,钢球再将冲击能量传递给试件吸收。在一次次冲击下,仔细观察试件表面,记录下初裂的冲击次数 $N_1$ 。在随后的不断冲击下,裂缝扩展,试件体积发生膨胀,当膨胀的试件接触到四个挡板中的三个的时候,标准ACI 544.2R-88定义试件破坏,记录破坏时的冲击次数 $N_2$ 。

试验采用试件初裂冲击次数 $N_1$ 、试件破坏冲击次数 $N_2$ 、初裂与终裂破坏次数差 $\Delta N$ 、试件破坏过程吸收的全部冲击能 $W$ 以及初裂后继续吸收的冲击能 $\Delta W$ 作为评价混凝土抗冲击能的评价指标。

美国ACI544委员会推荐使用式(1)计算混凝土受到的冲击能量:

$$W = Nmgh \quad (1)$$

式中: $W$ 为冲击能量( $N \cdot m$ ); $N$ 为冲击次数; $h$ 为重锤下落高度(mm); $m$ 为重锤质量(kg); $g$ 为重力加速度( $m^2/s$ ),其值取9.81。

为了保证冲击试验得出的数据的可靠性,采用格拉布斯法对数据进行取舍,即对每组试件冲击次数 $x_i$ 由小到大进行排序,并按式(2)、式(3)计算统计量 $g$ <sup>[20]</sup>:

当最小值 $x_1$ 可疑时,则:

$$g = \frac{\bar{x} - x_1}{S} \quad (2)$$

当最大值  $x_i$  可疑时,则:

$$g = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (3)$$

式中:  $\bar{x}$  为冲击次数的算术平均值;  $x_1$  为冲击次数的最小值;  $x_i$  为冲击次数的最大值;  $S$  为冲击次数的标准偏差。

在显著水平  $\alpha = 0.05$  下,求得可疑值的临界值  $g_0(\alpha, n)$ 。若满足式(4):

$$g \geq g_0(\alpha, n) \quad (4)$$

则可疑值舍去。

式中:  $n$  为每组试件的试件数。当舍弃后试件数小于 3 时,则重新成型试件试验。对于有效数值,取它们的平均值作为结果数值,见表 2。冲击次数与纤维掺量的关系如图 2,冲击能与纤维掺量的关系如图 3。

表 2 抗冲击试验结果

试样编号	纤维掺量 / (kg · m <sup>-3</sup> )	初裂冲击次数 / 次	终裂冲击次数 / 次	初裂终裂冲击次数差 / 次	试件破坏吸收全部冲击能	初裂后试件吸收的能量
CJ1	0	41	56	15	834	305
CJ2	0.6	98	118	20	1995	407
CJ3	0.9	116	145	29	2361	590
CJ4	1.2	170	239	69	3460	1404

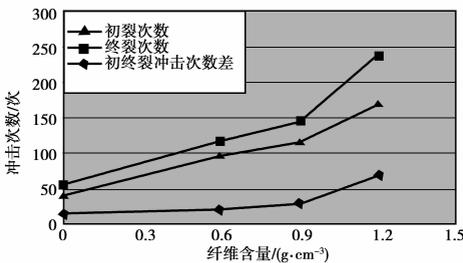


图 2 冲击次数与纤维掺量的关系

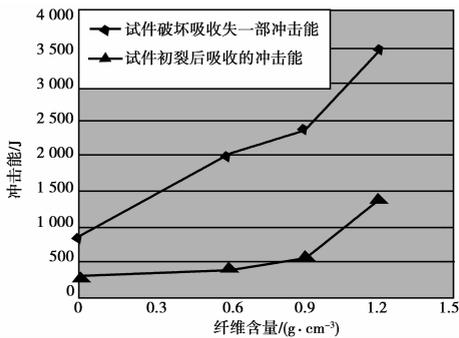


图 3 冲击能与纤维掺量的关系

## 2 试验结果讨论

1) 从表 2 和图 2 可以看出:随着聚丙烯纤维掺量的增加,混凝土试件初裂次数和破坏次数均表现出增加的趋势。当纤维掺量小于 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时,混凝土初裂次数和终裂次数呈相对缓慢的增长趋势。当纤维掺

量小于 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时,混凝土初裂次数和终裂次数呈相对明显的增长趋势,且终裂冲击次数与初裂次数之差也变得更加明显。采用初裂次数和终裂次数评价聚丙烯纤维对水泥混凝土抗冲击性能时,当纤维掺量为 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时,混凝土抗冲击性能比基准混凝土提高约 2.6~2.8 倍;当纤维掺量为 1.2 kg/m<sup>3</sup> 时,混凝土抗冲击性能比基准混凝土提高约 3.7~4.3 倍。即掺有聚丙烯纤维的混凝土试件抗冲击韧性较不掺纤维的成倍提高,并随着纤维掺量的增加而增加;

2) 从表 2 和图 3 可以看出:随着聚丙烯纤维掺量增加,混凝土试件破坏过程吸收的全部冲击能和初裂后吸收的冲击能均表现出增加趋势。当纤维掺量小于 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时,试件破坏过程吸收的全部冲击能和初裂后吸收的冲击能呈相对缓慢的增长趋势,但混凝土试件破坏过程吸收的全部冲击能的增长趋势比初裂后吸收的冲击能的增加趋势更明显。当纤维掺量大于 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时,试件破坏过程吸收的全部冲击能和初裂后吸收的冲击能则呈相对显著的增长趋势。采用混凝土试件破坏过程吸收的全部冲击能和初裂后吸收的冲击能评价聚丙烯纤维对混凝土抗冲击性能改善的指标,与基准混凝土相比,纤维掺量为 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时,其抗冲击性能提高约 1.9~2.8 倍;纤维掺量为 1.2 kg/m<sup>3</sup> 时,其抗冲击性能提高约 4.5~4.6 倍。即聚丙烯纤维的掺入成倍的增强了混凝土对冲击能吸收的能力;

3) 对比图 2、图 3 可知:由于聚丙烯纤维分布在混凝土中,聚丙烯纤维混凝土抗冲击能力的提高,是因为纤维的作用,纤维能有效地减小混凝土的裂隙程度,增强材料介质连续性,减小冲击波被阻断引起的局部应力集中现象,可以阻碍混凝土中裂缝的扩展。混凝土初裂后,低弹性模量的聚丙烯纤维使混凝土保持一定整体,继续吸收冲击能的能力有明显提高,且随着纤维量的大幅增加效果更加明显,从而使混凝土的抗冲击能力成倍增长;

4) 以杜拉纤维为代表的聚丙烯纤维具有良好的自分散性,在混凝土内掺入聚丙烯纤维后,由于纤维与混凝土有较强的结合力,纤维均匀地分布在混凝土空间的各个方向,在混凝土内部构成一种均匀乱向支撑体系。聚丙烯纤维细度很大,在较少的掺量下就能获得巨大的纤维根数。纤维在水泥基材中充分分散的情况下,混凝土中纤维间距很小。以 0.9 kg/m<sup>3</sup> 为例,每 cm<sup>3</sup> 的混凝土中有近 20 多条纤维丝,这种均匀的乱向支撑体系有助于提高混凝土受冲击时动能的吸收。同时聚丙烯纤维独特的表面处理工艺使纤维混凝土可以和水泥基料紧密结合在一起,极大地保持了混凝土的整体强度。混凝土在受到冲击荷载作用时,聚丙烯纤维

维吸收了能量,从而有效地减少了应力集中作用,可以有效地阻碍混凝土中裂缝的迅速扩展,从而提高混凝土的抗冲击性能。

### 3 结 语

聚丙烯纤维掺入混凝土中,大大提高了混凝土的抗冲击性能,这一特性对于承受冲击荷载作用的混凝土路面是非常有利的。聚丙烯纤维良好的自分散性、稳定的物理化学性质、特殊的表面处理工艺和不需要改进的技术路线是聚丙烯纤维改善路面混凝土使用性能的基础。

### 参考文献:

- [1] Li V C. High performance fiber reinforced cementitious composites as durable material for concrete structure repair[J]. IJR, 2004, 10(2): 163-180.
- [2] BANTHIA N, NANDAKUMAR N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2003(5): 3-9
- [3] CENGIZ O, TURANLI L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high fibre reinforced shotcrete in panel test [J]. Cement and Concrete , 2003 (12): 1701-1707.
- [4] LOK TS. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split hopkinson pressure bar [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16 (1): 54-59.
- [5] P H EMMONS, A M VAYSBURD, J E MCDONALD, et al. Selecting durable repair materials: performance criteria[J]. Concrete International, 2000(3): 38-45.
- [6] 袁勇,邵晓云. 合成纤维增强混凝土的发展前景[J]. 混凝土, 2000(12): 3-7.  
YUAN Yong, SHAO Xiao-Yun. Bright future of synthetic fibre concrete [J]. Concrete, 2000(12): 3-7.
- [7] 龚益,沈荣熹. 杜拉纤维在土木工程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 翁兴中,蔡良才,崔树业,等. 道面聚丙烯纤维混凝土的耐久性研究[J]. 混凝土, 2008(4): 54-56.  
WENG Xing-zhong, CAI Llang-cai, CUI Shu-ye et al. Study on durability of pavement polypropylene fiber reinforced cement concrete[J]. Concrete, 2008(4): 54-56.
- [9] 侯晓峰,方秦,张育宁,等. 高掺量聚丙烯纤维混凝土动力特性的 SHPB 试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(4): 351-354.  
HOU Xiao-feng, FANG Qin, ZHANG Yu-ning et al. SHPB test study on dynamic characteristics of polypropylene fiber concrete [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 6(4): 351-354.
- [10] 曹诚,刘家彬. 聚丙烯纤维对混凝土动力学特性的影响研究[J]. 混凝土, 2000(5): 43-45.  
CAO Cheng, LIU Jia-Bin. Study of polypropylene fiber effect on dynamic properties of concrete [J]. Concrete, 2000(5): 43-45.
- [11] 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 Wei-dong, WANG Yi-ming. Resistances of impact and abrasion for polypropylene fiber concrete [J]. Concrete, 2005(1): 43-45.
- [12] 张鹏,郭平功,赵铁军. 聚丙烯纤维混凝土的收缩抗裂性能[J]. 低温建筑技术, 2008(1): 4-6.  
ZHANG Peng, GUO Ping-gong, ZHAO Tie-jun. Shrinkage property and cracking resistance of polypropylene fiber reinforced concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008(1): 4-6.
- [13] 邓宗才,李建辉,孙宏俊. 纤维混凝土的抗弯冲击性能[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 24-27.  
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, SUN Hong jun. Flexural impact performance of steel and glass fiber reinforced concrete beams [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (6): 24-27.
- [14] 黄贻凤,杨成忠,刘道荣. 聚丙烯纤维路面混凝土耐久性性能的试验研究[J]. 铁道建筑, 2008(4): 103-104.  
HUANG Yi-feng, YANG Cheng-zhong, LIU Dao-rong. Experimental study on durability of polyacrylic fiber concrete used in pavement [J]. Railway Engineering, 2008(4): 103-104.
- [15] 杨成忠,黄贻凤,杨吉新,等. 聚丙烯纤维路面混凝土力学性能试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2007 (12): 50-52.  
YANG Cheng-zhong, HUANG Yi-feng, YANG Ji-xin, et al. Study on the mechanical performance of polypropylene fiber reinforced concrete in Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Technical Edition), 2007(12): 50-52.
- [16] 黄贻凤,杨成忠,莫振龙. 聚丙烯纤维路面混凝土配合比设计试验研究[J]. 混凝土, 2008(4): 117-119.  
HUANG Yi-feng, YANG Cheng-zhong, MO Zhen-long. Experimental study on the mix ratio of durable reinforced pavement concrete [J]. Concrete, 2008(4): 117-119.
- [17] JTG D40-2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [18] JTG E30-2005 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [19] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [20] 李宇峙. 工程质量监理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.