

聚丙烯纤维在水工高性能混凝土中的作用

盛松涛, 方坤河

(武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

[摘要] 水工高性能混凝土除了要解决普通混凝土的脆性大、易开裂和抗冲击性能差等问题外, 还对抗裂、抗渗、抗冻和抗冲磨能力有更高的要求。在水工混凝土中掺入适量的聚丙烯微纤维, 能改善混凝土的脆性破坏特征, 减少混凝土的收缩裂缝, 提高混凝土的韧性、抗冲耐磨性, 还能提高混凝土的抗渗、抗冻等特性, 是使水工混凝土高性能化的很好途径。

[关键词] 聚丙烯纤维; 聚丙烯纤维混凝土; 高性能混凝土; 水工高性能混凝土

[中图分类号] TU5.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1002-3550(2003)11-0051-04

Application of polypropylene fiber in the high performance hydraulic concrete

SHENG Song-tao, FANG Kun-he

(School of hydroelectricity, Wuan University, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract: Do not like the normal concrete which is high in brittleness, easy to be cracked and have poor ability to resist impact, moreover, the high performance hydraulic concrete have especial ability to resist crack, leakage, frostbite and gall. The polypropylene fiber can lessen the shrinkage crack of concrete, enhance its toughness and the ability of resisting crack, impact and fatigue, improve its brittleness destroy character, and polypropylene fiber can also improve the ability of resisting leakage, frostbite etc. So, appending polypropylene fiber in concrete is a good way to make the hydraulic concrete be high performance.

Key words: polypropylene fiber; polypropylene fiber concrete; high performance concrete; high performance hydraulic concrete

1 引言

混凝土的高性能化是混凝土材料发展的总趋势, 用水工混凝土浇筑的水工建筑物大多属于关系国计民生的重要的工程, 投资巨大, 一旦失事将威胁下游成千上万人民的生命财产安全, 因此水工混凝土的高性能化显得尤为重要。

水工混凝土和一般混凝土材料一样, 均存在脆性大、易开裂和抗冲击性能差等问题, 除此之外, 由于水工混凝土长期与水接触, 其抗渗、抗冻和抗冲磨能力的要求更高, 同时水工大体积混凝土的水化热温升和温度裂缝问题比较突出, 所以, 要使水工混凝土高性能化就得从上述问题综合考虑。

在混凝土中掺入适量的聚丙烯微纤维, 能改善混凝土的脆性破坏特征, 减少混凝土的收缩裂缝, 提高混凝土的韧性、抗冲耐磨性, 还能提高混凝土的抗渗、抗冻等特性, 是使水工混凝土高性能化的很好途径。

2 高性能混凝土及水工高性能混凝土的基本特点和要求

高性能混凝土(HPC)的概念是1990年5月由美国国家标准与技术研究院(NIST)和美国混凝土协会(ACI)首先提出的。当时, 高性能混凝土的定义是具有所要求的性能和匀质性的混凝土, 这些性能包括: 易于浇筑、捣实而不离析; 高超的、能长期保持的力学性能; 早期强度高、韧性高和体积稳定性好; 在恶劣的使用条件下寿命长。也就是说, HPC要求高的强度、高的流动性与优异的耐久性。在我国, 目前多数的专家认为: 具有一

定强度($\geq C30$)和高工作性及高耐久性(使用寿命 ≥ 100 年)的混凝土则可称之为高性能混凝土, 其中高耐久性最为重要。

可见, 高性能混凝土是把耐久性要求作为主要指标, 基本指导思想在于通过对原材料进行选择及合理设计配合比, 并从拌合物的流动性、施工工艺方面考虑, 以获得质量均匀而又密实高强的混凝土, 使其耐久性能得以有效改善。水工高性能混凝土则是根据水工混凝土的特点, 重点考虑耐久性要求而进行研究开发的水工混凝土。水工高性能混凝土不一定高强, 但一定要耐久。

根据混凝土所处部位、使用条件以及耐久性要求的侧重点不同, 可把水工高性能混凝土分为三类:

第一类是大体积内部混凝土, 包括图1中的D区和E区。其特点是要求水化温升低、和易性好、易于振捣密实、具有较大适应变形的能力, 徐变要尽量大, 以降低温度应力, 减少收缩裂

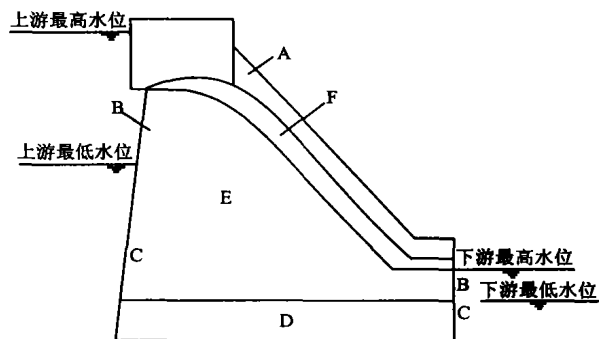


图1 坝体混凝土分区

缝和温度裂缝;强度要求不高,不必考虑抗冻问题。

第二类是大体积外部混凝土,包括图1中的A区、B区、C区的混凝土。这类混凝土除了要求低热高强外,最重要的耐久性要求是具有较高的抗渗能力和较高的抗冻性能。

第三类是抗冲耐磨混凝土,如泄水建筑物溢流面混凝土(图1中的F区)、输水隧洞、导流隧洞、排砂洞等的衬砌混凝土。这类混凝土由于受到高速水流的冲刷和泥沙磨蚀,最重要的耐久性要求是具有较高的抗冲耐磨性能;同时由于混凝土的体积较大,施工条件较差,施工质量要求高,对水化热温升和混凝土的流动性、粘聚性要求也必须予以足够的重视。

综上,水工混凝土的高性能化应从提高混凝土的抗裂性、抗渗性和抗冻性、抗冲耐磨性等方面来考虑。

3 聚丙烯纤维对混凝土性能的改善及作用机理

聚丙烯纤维一般分为单丝和网形两种规格,长度19mm~50mm,密度 $0.91\text{g}/\text{cm}^3$,熔点 165°C ,燃点 590°C ,弹性模量 3500MPa 。聚丙烯纤维不吸水,导热性低,对酸碱盐的阻抗高,属于无毒材料。为了增强纤维与混凝土的表面粘结力,纤维表面都经过了特殊处理。同常用的钢纤维相比,聚丙烯纤维的特点是细度高(当量直径 $0.02\text{mm}\sim 0.1\text{mm}$)、比表面积大、数量多(常用的 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 的掺量充分分散可获得700万~3000万根纤维单丝)、在混凝土中的纤维间距小。每公斤聚丙烯微纤维连起来的总长度可绕地球10多圈,若分布在 1m^3 的混凝土中,则可使每 cm^3 的混凝土中有近二十条纤维丝。搅拌均匀时可在混凝土内部构成均匀的乱向支撑体系。

3.1 聚丙烯纤维对混凝土收缩裂缝的控制

3.1.1 聚丙烯纤维能减少混凝土的塑性收缩和收缩裂缝

混凝土的塑性收缩一般发生在混凝土浇筑后2h~10h,其收缩的大小约为水泥绝对体积的1%。一是由于混凝土此时出现泌水和水分急剧蒸发,引起失水收缩;二是由于泌水和混凝土内不同颗粒的不均匀沉降,使混凝土与钢筋之间、骨料与胶结材料之间发生不均匀收缩变形。混凝土表面在材料硬化前失水收缩引起拉应力,内部的变形由于骨料和钢筋的约束也会产生拉应力,同时混凝土的早期抗拉强度达不到混凝土收缩所产生的应力,因而出现不可恢复的塑性收缩裂缝。

在水泥混凝土中掺入聚丙烯纤维后,与未掺纤维相比,首先,由于表层材料中存在纤维,使其失水面积有所减小,水分迁移较为困难,从而使毛细管失水收缩形成的毛细管张力有所减少;其次,聚丙烯纤维在混凝土砂浆中乱向分布形式大大有助于削弱混凝土的塑性收缩,收缩的能量被分散到每立方米数千万条具有高抗拉强度而弹性模量相对较低的纤维单丝上,从而极为有效地增加了混凝土的韧性,抑制了混凝土微细裂缝的产生和发展;第三,无数纤维形成的支撑体系,有效地保证了均匀泌水,阻碍沉降裂缝的产生;第四,低弹性模量的聚丙烯纤维相对于塑性浆体成为了高弹性模量材料,依靠纤维材料与水泥浆之间的界面吸附粘结力、机械咬合力等,增加了材料抵抗开裂的塑性抗拉强度,从而使失水收缩产生的应力小于材料塑性抗拉强度,材料表面的开裂状况得以减轻,甚至消失。

随着纤维掺量的增加,混凝土的收缩变形和开裂减少幅度加大(见图2)。

3.1.2 聚丙烯纤维能抑制裂缝的产生和扩展

混凝土在停止养护后,还会由于干燥失水产生干燥收缩,

温度下降产生冷缩,碳化产生碳化收缩等变形,这些变形若不加以控制,超过混凝土的极限变形,混凝土就会开裂。另外,混凝土承受荷载时,其内部也会引发许多裂缝。聚丙烯纤维对上述裂缝的产生和扩展也有抑制作用。

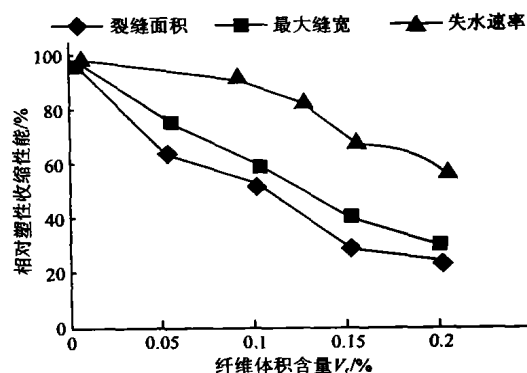


图2 聚丙烯纤维体积掺率对混凝土塑性收缩性能影响

由于聚丙烯纤维以单位体积内较大的数量均匀分布于混凝土内部,故由收缩变形引起的微裂缝在产生的过程中必然遭遇纤维的阻挡,消耗了能量,难以进一步发展。而当裂缝出现后,聚丙烯纤维的存在又使得裂缝尖端的发展受到限制,裂缝只能绕过纤维或把纤维拉断来继续发展,这就需要消耗巨大的能量来克服纤维对裂缝发展的限制作用。聚丙烯纤维相当于提高了混凝土的抗拉强度,同时钝化了原生裂隙尖端的应力集中。当微裂缝的长度大于纤维的间距时,纤维将跨越裂缝起到传递荷载的桥梁作用(见图3a),使混凝土内的应力场更加连续和均匀,使微裂缝尖端的应力集中得以钝化,裂缝的进一步扩展受到约束;而当微裂缝的长度小于纤维间距的原生裂缝扩展遇到纤维时,纤维将迫使其改变延伸方向或跨越纤维生成更微细的裂缝场(见图3b),显著增大了微裂缝扩展的能量消耗。

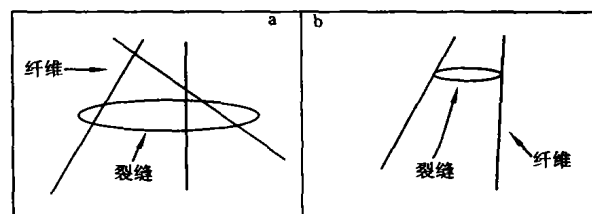


图3 纤维对不同长度裂缝的约束机理

3.2 聚丙烯纤维对混凝土强度和变形性能的影响

3.2.1 聚丙烯纤维对混凝土强度的影响

和不含纤维的普通混凝土相比,聚丙烯纤维混凝土的抗压强度没有提高,反而有所降低,但减小幅度不大,在10%以内。这是因为聚丙烯纤维的弹性模量比混凝土低(约为混凝土的1/10),以致在较高的应力情况下,纤维能够产生约束应力之前,混凝土已开始破裂,可见聚丙烯纤维不能作为混凝土的增强材料。而掺聚丙烯纤维混凝土的抗拉强度和抗折强度则有增加(掺入体积率不超过0.2%的聚丙烯纤维,可使混凝土的劈拉、抗折强度提高10%左右),相应其脆性系数有所降低。

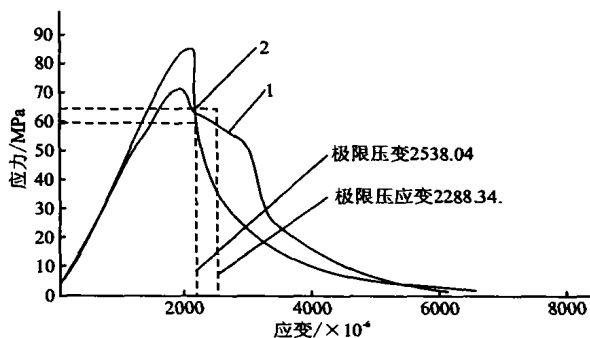
掺入一定量的聚丙烯纤维能降低混凝土脆性的主要原因在于纤维的阻裂效应。混凝土从无缺陷理想状态来讲,其抗压强度、抗折强度的增长幅度应该是基本一致的,之所以聚丙烯纤维混凝土抗压强度提高幅度低于抗折强度提高幅度,主要是由于混凝土内部存在不同尺度的微裂缝,而微裂缝对抗折强度

的影响远大于抗压强度。在结构形成过程中,聚丙烯纤维阻止了这些裂缝的引发,从而减少了裂缝源的数量,并使裂缝尺度变小,这就降低了裂缝尖端的应力强度因子,缓和了裂缝尖端应力集中程度,在受力过程中,又抑制了裂缝的引发与扩展。这就能充分提高混凝土的抗折强度,而不能提高混凝土的抗压强度。

3.2.2 聚丙烯纤维对混凝土变形性能的影响

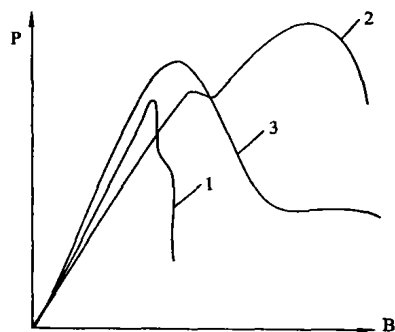
掺聚丙烯纤维可使混凝土的延性和韧性有较大提高。

图4是C100高强混凝土轴压应力—应变曲线,图5是弯曲荷载作用下的P-δ曲线。由曲线可见,高强混凝土掺用聚丙烯纤维后,抗压强度有所下降,断裂能明显提高,极限压应变增加(以应力下降15%时的应变计,增加10.9%),混凝土构件的延性和韧性提高。



1. 掺聚丙烯纤维的混凝土 2. 不掺纤维的混凝土

图4 C100高强混凝土轴压应力—应变曲线图^[8]



1. 素混凝土 2. 钢纤维混凝土 3. 聚丙烯纤维混凝土

图5 混凝土P-δ曲线

由于聚丙烯纤维的弹性模量较低,聚丙烯纤维混凝土的弹性模量低于不掺纤维的混凝土,因而其极限拉伸变形明显高于普通混凝土,断裂伸长率大于普通混凝土断裂伸长率。聚丙烯纤维所具有的这些特征提高了混凝土的延性,改善了混凝土变形的性能,这对约束混凝土裂缝的扩展以及提高混凝土裂后所具有的承载能力都起很大的作用。

综上所述,掺聚丙烯纤维可以弥补混凝土脆性大、韧性低、变形能力差的不足。

4 聚丙烯纤维在水工混凝土中的高性能化作用

水工高性能混凝土最重要的特征是其优异的耐久性,对水工混凝土来讲,其抗裂、抗渗、抗冻、抗冲磨和抗疲劳耐久性显得尤为重要。

4.1 提高水工混凝土的抗裂性能

聚丙烯纤维的乱向分布形式可削弱混凝土的收缩,收缩的

能量被分散到无数的纤维丝上,从而有效地增强混凝土的韧性,减少混凝土初凝时收缩引起的裂纹和裂缝;同时,无数的纤维丝在混凝土内部形成的乱向撑托体系可以有效阻碍骨料的离析,保证混凝土早期均匀的泌水性,从而阻碍了沉降裂纹的形成。试验表明,同普通混凝土相比,体积掺量0.05%的美国杜拉纤维混凝土的抗裂能力提高了近70%。

4.2 提高水工混凝土的抗渗性能

在混凝土中掺入聚丙烯纤维,可以有效地抑制混凝土早期干缩开裂及离析裂纹的产生及发展,减少混凝土的收缩裂缝,尤其是有效地抑制了连通裂缝的产生;另外,均匀分布在混凝土中彼此相粘连的大量聚丙烯微纤维起了“承托”骨料的作用,降低了混凝土表面的析水与集料的离析,从而使混凝土中直径为50nm~100nm和>100nm的有害孔隙的含量大大降低。因而对于普通混凝土而言,提高了混凝土的抗渗性能。试验表明,0.05%体积掺量的杜拉纤维混凝土比普通混凝土的抗渗能力提高了60%~70%。

4.3 增强水工混凝土的抗冻性能

在混凝土中加入聚丙烯纤维,均匀细密的乱向支撑纤维丝可以缓解混凝土冻融时因温度变化而引起的混凝土内部应力的作用,阻止温度裂缝的扩展;同时,由于聚丙烯纤维减少了混凝土的收缩裂缝,也有利于其抗冻能力的提高。

4.4 改善水工混凝土的脆性

由于聚丙烯纤维混凝土的抗压强度没有提高反而有所降低,而抗折强度则有所提高,相应其脆性系数有所降低,脆性系数可降低到4以下。而且随着纤维体积率的增加,混凝土的脆性降低得越多。表明掺聚丙烯纤维可以提高混凝土的韧性,从而弥补混凝土脆性大的不足。

4.5 提高水工混凝土的抗冲击性能

聚丙烯纤维在混凝土内部构成均匀的乱向支撑体系,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,这是纤维的阻裂作用所致。在混凝土受冲击荷载作用时,纤维可以有效地阻碍混凝土中裂缝的迅速扩展,增强材料内部的连续性,从而减少冲击波被阻断引起的局部应力集中程度,吸收由于冲击荷载所产生的动能,提高混凝土的抗冲击性能。如表1所示为不掺纤维和掺有纤维的混凝土抗冲击落重试验的结果。

表1 落重试验结果^[2]

试件组	素混凝土	掺聚丙烯纤维混凝土 (V _f =0.05%)	掺聚丙烯纤维混凝土 (V _f =0.1%)
初裂冲击次数	30	89	103
破坏冲击次数	37	98	114

表1数据表明,掺有聚丙烯纤维的混凝土试件的初裂冲击次数和破坏冲击次数较不掺纤维的成倍提高,并随着纤维掺量的增加而增加。

4.6 改善水工混凝土的抗疲劳特性

聚丙烯纤维在混凝土中体积掺率在0.05%≤V_f≤0.1%范围时,其静力弹性模量低于普通混凝土,但其疲劳变形模量则随着掺率增大而增大,说明对动力荷载作用下的结构,聚丙烯纤维能发挥更大的效果^[2]。试验证明,聚丙烯纤维混凝土具有优良的弯曲疲劳性能,尤其在高应力比下,与普通混凝土相比,疲劳寿命可成倍增长。

·下转第59页·

从正交设计 $L_9(3^4)$ 表的极差和 K 值大小可以看出,同时取得较大坍落度、扩展度和较高抗压强度的最佳配合比是 $A_2B_1C_2$ 。但是考虑到选择 B_1 抗压强度过高,会造成胶凝材料不必要的浪费,如果选择 B_2 也能满足混凝土抗压强度要求,并且坍落度、扩展度变化较小,符合本课题技术指标,因此得出的最佳配合比是 $A_2B_2C_2$ 。

3 应用

3.1 施工过程质量控制

由于大方量混凝土泵送施工,质量控制十分重要,具体措施如下:

A. 施工不要在雨天进行,气温最好低于 30 摄氏度。

B. 专人检查原材料的稳定性,尽量与试验吻合,特别注意骨料的质量。

C. 在施工前和施工时,复合原材料称量系统,称量偏差符合相关规范。

D. 泵送钢纤维膨胀混凝土的搅拌,采用将钢纤维、掺合料、水泥和骨料先干拌,而后加水和减水剂的方法,并增加搅拌时间。

E. 在搅拌和泵送两个环节上,派专人观察混凝土的坍落度、和易性、稠度,混凝土不得有离析、泌水、钢纤维团聚现象。

3.2 施工后质量检查,见(表 6)

表 6

技术指标	统计数目	平均值	均方差	考核结果
扩展度/mm	10 次	530	16.2	合格
坍落度/mm	10 次	195	6.8	合格
收缩率/ $(1 \times 10^{-4} \text{mm/mm})$	3 组	均 < 3.5	—	合格
强度/MPa	10 组	48.5	2.05	合格
坍落度损失/mm	10 次	均 ≤ 30	—	合格
抗渗等级/P	6 组	均 ≥ 10	—	合格
超声波声速/(m/s)	32 点	4312	3.2	合格

·上接第 53 页·

4.7 提高水工混凝土的耐磨性

在高性能混凝土中掺加聚丙烯纤维可以显著提高混凝土的耐磨性能,因为聚丙烯纤维以每方数千万根的数量掺入到混凝土中,其互相搭接、牵连,在混凝土内部构成均匀的乱向支撑体系,阻碍由于冲击或磨损发生的裂缝的发展,纤维也牵制了混凝土碎块从基体中剥落,使混凝土碎块从基体中剥落需要消耗更多的能量,从而提高了混凝土的耐磨性能。当高性能混凝土中掺加纤维 $0.6 \text{kg/m}^3 \sim 1.2 \text{kg/m}^3$ 时,混凝土的耐磨性能可以提高 24% ~ 45%^[7]。

5 聚丙烯纤维在水工高性能混凝土中的应用

聚丙烯纤维混凝土对提高混凝土耐久性的上述优良性能,可以有针对性地利用聚丙烯纤维提高水工大体积混凝土内部的抗裂性;提高大体积外部混凝土抗渗、抗冻性;提高抗冲耐磨混凝土的抗冲击性、抗疲劳性和耐磨性。

在实际运用中,聚丙烯纤维在混凝土中掺量低(一般体积掺率 0.1%),较经济,易施工,适用性广泛,使用效果显著,在水利工程界已受到越来越多的关注。在我国,聚丙烯纤维混凝土已应用于碾压混凝土面板混凝土、渠道防渗、大坝补强、堤防护砌等多项不同类型的水利工程。随着高性能混凝土的广泛

4 结语

4.1 在普通混凝土基体中按体积比掺入一定量钢纤维所形成的多相复合材料,具有增强、增韧、阻裂等功能,而膨胀剂却有补偿收缩的作用,钢纤维与膨胀剂共同作用大大改善了混凝土的性能,产生安全的自应力,避免或减少了开裂,进一步提高了混凝土的抗渗能力。

4.2 通过非金属超声波仪,为检测钢纤维的均匀性提供了较好的途径。

4.3 钢纤维与膨胀剂在泵送混凝土中的应用,适应了当前混凝土搅拌站发展,拓宽了钢纤维与膨胀剂的使用领域。

4.4 依据钢纤维与膨胀剂共同作用的原理,这种复合混凝土特别适合应用于刚性屋面、机场跑道、堤坝等特殊要求的工程中。

[参考文献]

- [1] 赵国藩,彭少民,黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 中国工程建设标准化协会标准. 钢纤维混凝土试验方法标准(CECS13:89)[S], 1991.
- [3] 吴中伟,张鸿直. 膨胀混凝土[M]. 中国铁道出版社,1990.

[作者简介] 陈伟(1975-),男,工程师。

[单位地址] 浙江大学宁波理工学院建筑工程系(315104)

[联系电话] 0574-88229507,13065803898;0574-88443843

应用以及水利工程建设热潮的不断高涨,以及对聚丙烯纤维本身性能的不断改性优化,聚丙烯纤维在水工高性能混凝土中亦将具有广阔的应用前景。

[参考文献]

- [1] 曹诚,刘兰强. 关于聚丙烯纤维对混凝土性能影响的几点认识[J]. 混凝土,2000,(9).
- [2] 曹诚,等. 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).
- [3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.5.
- [4] 李伟光. 奚洛渡水电站抗冲耐磨材料试验研究[J]. 第四届全国高性能混凝土学术研讨会论文集,2002,12.4~6.
- [5] 朱江. 聚丙烯纤维在高性能混凝土中的应用研究[J]. 工业建筑,2001,1.
- [6] 亢景富,等. 水工混凝土耐久性问题与水工高性能混凝土[J]. 混凝土与水泥制品,1997.4.
- [7] Low cycle Fatigue of Plain and Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, July-Aug, 1997.
- [8] Damage Accumulation in Concrete with or without Fiber Reinforcement, ACI Materials Journal, Nov-Dec, 1993.

[作者简介] 盛松涛(1971-),男,工程师,主要从事高性能混凝土研究。

[单位地址] 武汉大学水利水电学院研 012(430072)

[联系电话] 13871386106