

# 聚丙烯纤维对高温下混凝土性能的影响

鞠丽艳, 张 雄

(同济大学 混凝土材料研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 聚丙烯纤维对高温下混凝土性能的影响研究表明, 掺  $2.0 \sim 3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  聚丙烯纤维的混凝土与不掺聚丙烯纤维的普通混凝土相比, 抗压强度影响不大, 抗折强度稍有提高, 高温下动弹性模量损失率降低, 混凝土的抗爆裂性能得到有效的改善, 最后分析了聚丙烯纤维影响混凝土抗爆裂性能机理。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 高性能混凝土(HPC); 高强混凝土(HSC)

**中图分类号:** TU 528.042

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-374X(2003)09-1064-04

## Influence of Polypropylene Fibre on Performances of Concrete under High Temperature

JU Li-yan, ZHANG Xiong

(State Key Laboratory of Concrete Materials Research, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper mainly researches into the influence of polypropylene(PP) fibre on concrete performance under high temperature. Results show that compressive strength of concrete with PP fibre has little change compared to that of concrete without PP fibre. PP fibre can improve a little flexural strength of concrete. PP fibre can reduce loss ratio of concrete dynamic elastic modulus under high temperature. PP fibre has significant improvement on anti-bursting of concrete. The mechanism of PP fibre action on concrete anti-bursting performance is discussed in the end.

**Key words:** polypropylene fibre; high performance concrete; high strength concrete

混凝土由于其较高的抗压能力及良好的耐久性, 作为主要的建筑结构材料, 其应用已有 200 多年的历史。近年来, 高强混凝土(HSC)和高性能混凝土(HPC)的应用已日益普及。使用常规的方法和材料, 掺加有助于减少用水量和改善工作性能的特殊的外加剂(掺合料), 生产现拌的 HSC 和 HPC, 技术上和工艺上已日趋成熟。随着 HSC 和 HPC 在现代混凝土建筑工程中的广泛使用, 混凝土遭受高温(火灾)的危险性也日益增加。普通混凝土(NSC)在高温下容易发生的爆裂现象, 对于 HSC 和 HPC 将更加严重。

NSC 防火性能的研究在国外始于 20 世纪 70 年代后期, 此后国内外这方面的研究越来越多, 进展较快。而有关 HSC 和 HPC 热性能方面的研究无论在国外还是国内则是最近几年的事。目前, 国内外许多专家学者已在致力于各种加热方案(包括加热速率、最高加热温度、曝露时间等)下混凝土性能的研究。然而, 对于能改善高温下混凝土性能材料的研究, 就凤毛麟角了。笔者仅对聚丙烯纤维对高温(火灾)下混凝土性能的影响进行分析, 着重研究聚丙烯纤维混凝土的高温抗爆裂性能的影响。

众所周知, 在混凝土中掺入聚丙烯纤维能有效控制混凝土由于塑性收缩和塑性沉降产生的塑性裂缝, 同时提高混凝土的抗冲击韧性和耐磨性, 对混凝土的抗渗性能和抗冻性能也有所改善。聚丙烯纤维在国际混凝土工程中已经得到广泛的应用, 在国内混凝土工程中也逐渐被人们接受。聚丙烯纤维对高温下混凝土

性能的改善作用,也正被人们认识.本文所用纤维为经英国认证的混凝土专用长坚纤维.

## 1 试验原材料与试验方法

### 1.1 试验原材料

海螺牌 42.5 级普通硅酸盐水泥;比表面积为  $4\ 168\ \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ;粉煤灰为 II 级灰;河砂,细度模数为 2.7,密度为  $2.65\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;玄武岩碎石,粒径为 5~25 mm;SN-II 减水剂,减水率大于 15%,聚丙烯纤维的物理性能指标见表 1.

掺长坚纤维混凝土(FRC)与不掺长坚纤维混凝土(NC)的配合比设计见表 2.

表 1 聚丙烯纤维的物理性能

Tab.1 Physical performances of PP fibre

纤维类型	纤维直径/ $\mu\text{m}$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	纤维长度/mm	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	燃点/ $^{\circ}\text{C}$	弹性模量/GPa
单丝	18	0.91	12	255	165	590	2.2

表 2 掺长坚纤维(FRC)与不掺长坚纤维(NC)的混凝土配合比

Tab.2 Concrete mix proportion with changjian fibre and without changjian fibre

试样	单位体积混凝土质量配合比/kg							抗压强度/MPa
	m(水泥)	m(粉煤灰)	m(砂)	m(石子)	m(水)	m(减水剂)	m(长坚纤维)	
NC	400	50	666	1 084	200	4.5	0	51.2
FRC1	400	50	666	1 084	200	4.5	2.0	50.8
FRC2	400	50	666	1 084	200	4.5	2.5	50.6
FRC3	400	50	666	1 084	200	4.5	3.0	50.6
FRC4	400	50	666	1 084	200	4.5	3.5	50.2

### 1.2 试验方法

试件尺寸:100 mm×100 mm×100 mm;100 mm×100 mm×400 mm.试件成型后,经过 24 h 室温下养护脱模,然后放置在标准养护室养护 28 d,再在常温下放置 1 d 后进行高温试验.高温试验所用电炉的升温曲线如图 1 所示,并与国际标准 ISO834 规定的曲线相比较.本电炉的最高温度可达 1 100  $^{\circ}\text{C}$ ,炉膛温度可自动控制,达到指定温度后恒温 1 h.升温方式采用正常升温,即把混凝土从初始温度直接升到目标温度.冷却方式采用炉内自然冷却.这里分别将混凝土从常温升到 105,400,800  $^{\circ}\text{C}$  等 3 个温度进行试验研究.对聚丙烯纤维对混凝土抗爆裂性能影响试验温度为 800  $^{\circ}\text{C}$  和 1 000  $^{\circ}\text{C}$ .

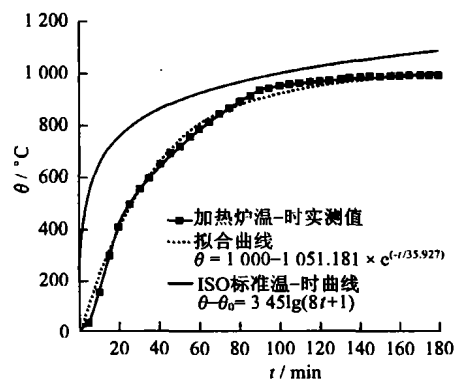


图 1 电炉的升温曲线与 ISO834 标准曲线对比

Fig.1 Comparison of electric furnace temperature rise curve and ISO834 standard curve

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 聚丙烯纤维对高温下混凝土抗压强度 $R_{\text{压}}$ 的影响<sup>[1,2]</sup>

温度对 NC 和 FRC 抗压强度影响见图 2.

从图 2 可知,随着温度升高,混凝土的抗压强度先降低,然后随温度升高抗压强度又有所恢复,在温度达到 400  $^{\circ}\text{C}$  左右时,混凝土强度达最大值,并有可能超过常温时的抗压强度;在混凝土温度超过 400  $^{\circ}\text{C}$  以后抗压强度急剧下降,在 800  $^{\circ}\text{C}$  时,抗压强度降低到常温混凝土强度的 20%~30%左右.FRC 的抗压强度随温度变化的趋势与 NC 的变化趋势相似.

### 2.2 聚丙烯纤维对高温下混凝土抗折强度 $R_{\text{折}}$ 的影响<sup>[2,3]</sup>

聚丙烯纤维对高温下混凝土抗折强度的影响见图 3.

从图 3 可知,同配比的 FRC 的抗折强度比 NC 高,在 200  $^{\circ}\text{C}$  前 NC 抗折强度随温度升高而降低的速度

要比 FRC 的快,随着温度继续升高,NC 与 FRC 抗折强度降低的速度接近,而且都是随着温度的升高,混凝土的抗折强度急剧降低,混凝土达到 800 °C 高温时,NC 与 FRC 的抗折强度相差不多,剩余抗折强度约为常温混凝土抗折强度的 10% 左右. FRC 之所以在 200 °C 前抗折强度降低的速度会比 NC 小,是因为 FRC 中所掺聚丙烯纤维即长竖纤维的熔点为 165 °C,随着温度超过长竖纤维的熔点,其将会挥发逸出,则长竖纤维对抗折强度所起的作用将消失. 到温度升高到一定程度,长竖纤维挥发完毕,导致 FRC 与 NC 的抗折强度随温度变化趋同.

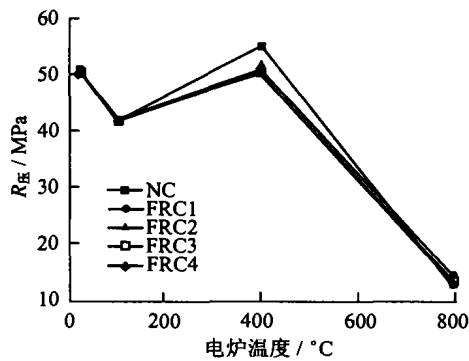


图2 NC与FRC抗压强度随温度的变化

Fig. 2 Variation of compressive strength of NC and FRC with temperature

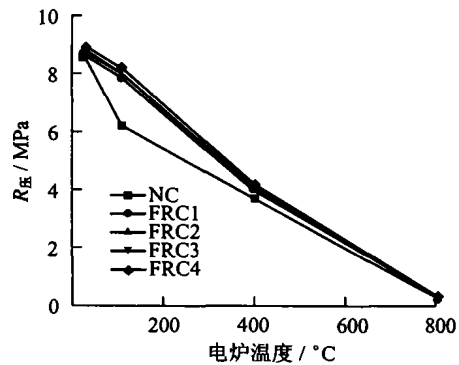


图3 NC与FRC的抗折强度随温度的变化

Fig. 3 Variation of flexural strength of NC and FRC with temperature

### 2.3 聚丙烯纤维对高温下混凝土动弹性模量 $E_D$ 的影响<sup>[2,4]</sup>

NC 与 FRC 的动弹性模量损失率随温度变化如图 4 所示.

FRC 的动弹性模量比 NC 的动弹性模量低,因为聚丙烯纤维的弹性模量低于混凝土的弹性模量.其叠加效果导致 FRC 的弹性模量低于 NC 的弹性模量.从图 4 可知,随着聚丙烯纤维掺量的增加,混凝土动弹性模量损失率逐渐减小,随着温度升高混凝土动弹性模量损失率增大,到 800 °C 时, FRC 残余动弹性模量为常温下的 70% 左右,而 NC 残余弹性模量为 60% 左右.

### 2.4 聚丙烯纤维对高温下混凝土抗爆裂性能的影响<sup>[5,6]</sup>

现代技术已使制作超高强混凝土 (> 250 MPa)、高性能混凝土成为可能,然而,密实的内部结构、较低的渗透性可能导致高温(火灾)抵抗力降低,以致引起混凝土发生突然破坏,甚至爆炸破坏. 在一些案例和文献中已有报道,其中一例是 1996 年—欧洲隧道内单节机动有轨车发生火灾期间,当救援和消防灭火工作正在进行时,隧道的混凝土衬砌由于爆裂引起许多危险,来自消防部门及火灾跟踪的调研报告表明 HPC 的热性能需要进一步研究;其他研究者也已观测到曝露使高温的 HSC 试件爆裂破坏. HSC/HPC 抵抗高温的能力很大程度上被爆裂所牵制.

#### 2.4.1 影响爆裂的因素

在 HSC 和 HPC 中掺加掺合料,特别是硅灰,使得混凝土密实度提高,孔隙率降低.致密的内部微结构提高了混凝土强度,但同时也使内部水蒸气传递和释放困难,从而导致一个较高的爆裂发生的趋势.

化学外加剂对爆裂影响极小,热爆裂显示明显的尺寸效应.试件尺寸对水分失去的速度和实验时的含水量有直接的影响,较小的试件提供了一个加热期间水分逃逸的较短路径,因此减少了爆裂.为了获得一致的结果,控制尺寸效应或进行足尺寸试件试验是必要的.

#### 2.4.2 消除爆裂的途径——掺加聚丙烯纤维

本文将 NC 和 FRC 加热到 1 000 °C 和 800 °C,观测混凝土的抗爆裂性能,见图 5 和图 6. JZ 表示 NC, PP1 和 PP2 代表 FRC.

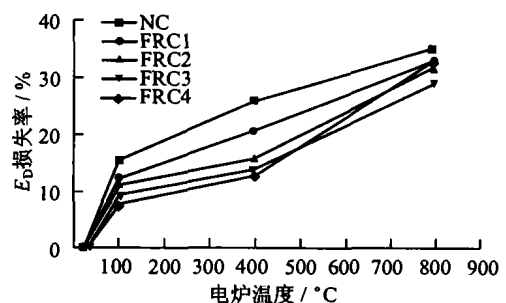


图4 NC与FRC的动弹性模量损失率变化

Fig. 4 Variation of loss ratio of dynamic elastic modulus of NC and FRC with temperature

从图 5,6 可知 FRC 的抗爆裂性能要优于 NC,因为在混凝土中掺了聚丙烯纤维之后,由于聚丙烯纤维的熔点为 165 ℃,当温度超过了聚丙烯纤维的熔点,混凝土内的聚丙烯纤维挥发逸出,并在混凝土中留下了相当于纤维所占体积的孔道,而聚丙烯纤维由于能均匀乱向分布在混凝土中,因此所留下的孔道也是均匀分布在构件中,这对于混凝土内由于温度升高所产生的水蒸气和热量的排出都是很有利的,使孔压力降低,所以聚丙烯纤维对混凝土的抗爆裂性能有很大的改善作用。

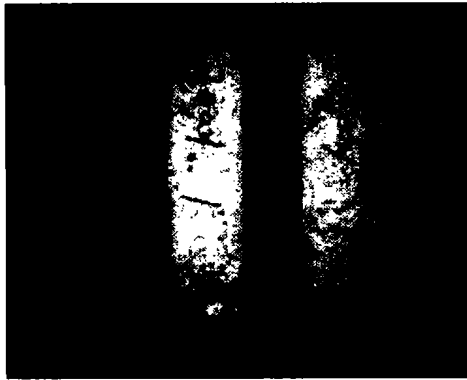


图 5 NC 和 FRC 在 1 000 ℃ 后的状态  
Fig.5 Condition of NC and FRC under 1 000 ℃



图 6 NC 和 FRC 在 800 ℃ 后的状态  
Fig.6 Condition of NC and FRC under 800 ℃

### 3 结论

(1) 掺聚丙烯纤维的混凝土与不掺聚丙烯纤维的普通混凝土相比,抗压强度变化不大,在 400 ℃ 左右 NC 和 FRC 的抗压强度均有所恢复,超过 400 ℃ 抗压强度急剧降低,800 ℃ 时残余的抗压强度仅为常温下的 20%~30%。

(2) 聚丙烯纤维对混凝土的抗折强度有所提高,当温度低于其熔点时,作用还很明显.温度继续升高,并超过聚丙烯纤维的熔点时,NC 和 FRC 的抗折强度随温度升高的变化逐步趋同。

(3) FRC 的动弹性模量低于 NC 的动弹性模量,随着温度的升高,混凝土的动弹性模量损失率逐渐增大,800 ℃ 时 FRC 的残余动弹性模量为常温下的 70% 左右,NC 的残余动弹性模量为常温下的 60% 左右。

(4) 聚丙烯纤维能有效地改善混凝土抗爆裂性能,特别是在 HSC 和 HPC 中效果更明显.这一点对于聚丙烯纤维的推广使用值得推荐。

(5) 综合上述的结果,推荐采用聚丙烯纤维来改善高温下混凝土性能的适宜掺量为  $2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

### 参考文献:

- [1] Chan Y N, Luo X, Sun W. Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 ℃ [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30: 247 - 251.
- [2] Lin T D, Chou Sam. Concrete fire test programs in Taiwan [A]. *International Workshop on Fire Performance of High-strength Concrete*, NIST Special Publication 919 [C]. Gaithersbury: National Institute of Standards and Technology, 1997. 55 - 58.
- [3] Zhang B, Bicanic N, Pearce C J, et al. Residual fracture properties of normal-and high-strength concrete subject to elevated temperatures [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2000, 52(2): 123 - 135.
- [4] Castillo Carlos, Durrani A J. Effect of transient high temperature on high-strength concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1990, 87(1): 47 - 53.
- [5] 朋改非, 陈延年, Mike Anson. 高性能硅灰混凝土的高温爆裂与抗火性能 [J]. *建筑材料学报*, 1999, 2(3): 271 - 275.
- [6] 李 敏, 钱春香, 孙 伟, 等. 高性能混凝土火灾条件下抗爆裂性能的研究 [J]. *工业建筑*, 2001, 31(10): 47 - 49.