

文章编号:1671-6833(2005)01-0001-04

# 冻融后钢纤维混凝土力学性能的试验研究

高丹盈, 朱海堂, 赵 军, 赵广田

( 郑州大学新型建筑材料与结构研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 通过钢纤维混凝土冻融循环试验, 分析了冻融循环次数、混凝土强度等级、钢纤维体积率等因素对钢纤维混凝土冻融后抗压强度、劈拉强度、抗折强度的影响, 探讨了钢纤维对混凝土的增强机理. 试验结果表明, 钢纤维的加入对冻融循环后混凝土的抗压强度影响较小; 当冻融循环次数较少时, 钢纤维对劈拉强度和抗折强度的增强作用比较明显, 而当冻融次数较大且钢纤维体积率较高(2%) 时, 钢纤维对混凝土的劈拉强度和抗折强度反而具有一定的负面影响; 钢纤维混凝土强度等级的提高对改善钢纤维混凝土的抗冻性能较为有效.

**关键词:** 混凝土; 钢纤维; 冻融; 力学性能

**中图分类号:** TU 528 **文献标识码:** A

## 0 引言

我国自建国以来, 兴建了大量的混凝土建筑物. 但是, 随着运行时间的增长, 混凝土建筑物的老化问题日益突出. 混凝土冻融破坏是引起混凝土建筑物老化病害的主要原因之一, 严重影响混凝土建筑物的长期使用和安全运行. 为使这些建筑物继续发挥作用, 每年都要消耗巨额的维修费用<sup>[1]</sup>. 因此, 开展对混凝土冻融的研究具有重要的理论意义、实用价值和经济效益.

普通混凝土的抗冻融性能较差, 难以满足现代土木工程新的结构形式及在特殊环境条件下建造的建筑物对轻质、高强、耐久性的要求. 钢纤维混凝土作为新兴的建筑材料, 由于其优异的性能, 已在工程实践中广泛应用并取得了良好的技术经济效益. 自从钢纤维混凝土出现以后, 国内外许多学者对钢纤维混凝土的力学性能进行了大量的试验研究, 并取得了一系列的研究成果<sup>[2]</sup>, 但对于钢纤维混凝土冻融性能的研究还很少<sup>[3,4]</sup>.

因此, 本文作者通过一系列冻融试验对钢纤维混凝土的抗冻性能进行了试验研究, 为钢纤维混凝土结构耐久性设计和分析提供了试验依据, 以促进钢纤维混凝土生产技术的发展及在工程中的推广和应用.

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

采用中原水泥厂生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥, 级配良好的中砂, 粗集料为天然石灰岩碎石, 粒径 5~25 mm, 连续级配; 钢纤维为铣削型钢纤维, 力学性能见表 1.

表 1 铣削型钢纤维的力学性能					
Tab. 1 Mechanical property of mill cut type steel fiber					
种类	等效直径 ( $10^{-3}$ mm)	长度 /mm	抗拉强度 ( $N/mm^2$ )	弹性模量 ( $N/mm^2$ )	伸长率 /%
铣削型	943.6	32.31	380~800	200 000	0.5~3.5

### 1.2 试验方案

冻融试验以混凝土强度等级和钢纤维体积率为变化参数(见表 2), 制作了 90 个尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 和 45 个尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的混凝土试件. 试件制作按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:89)<sup>[5]</sup> 的规定进行. 搅拌钢纤维混凝土时, 采用强制式搅拌机拌和. 为了保证钢纤维拌和均匀, 先拌和除钢纤维以外的其他材料, 再将钢纤维均匀撒入, 全部投入后再搅拌 2 min 左右. 搅拌过程中, 人工用钢棒辅助搅拌, 以避免出现钢纤维结团现象. 当钢纤维混凝土量

收稿日期:2004-11-28; 修订日期:2005-01-17

基金项目:国家重大基础研究前期计划项目(2004CCA04100); 河南省教育厅自然科学基金资助项目(2004601066)

作者简介:高丹盈(1962-), 男, 河南省三门峡市人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事新型建材与结构性能研究.

比较少时,采用人工拌和,其程序为:将水泥和细集料(砂)拌和均匀,粗骨料(碎石)和钢纤维拌和均匀;再将拌和均匀的钢纤维和粗骨料混和料与水泥和细骨料的混和料拌和,最后加水拌和至均匀.浇筑试件时,在振动台上振动至试件表面不再有气泡冒出为止.24 h 后拆模,室内塑料薄膜覆盖,洒水养护.

表 2 钢纤维混凝土配合比

Tab.2 Mixture proportions of steel fiber reinforced concrete

强度等级	钢纤维体积率/%	水泥	砂	碎石	水	钢纤维 kg/m <sup>3</sup>
C20	1.0	403	817	1 000	210	78.67
C30	0	432	615	1 143	190	0
C30	1.0	477	787	958	210	78.67
C30	2.0	509	858	585	224	157.34
C40	1.0	567	743	907	210	78.67

冻融循环试验按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:89)<sup>[3]</sup>中抗冻性能试验的快冻法进行.采用TDR 1 型混凝土快速冻融试验机,试件在饱水状态下进行快速冻融试验,在冻结和融化终了时,试件中心温度应分别控制在 $-17\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $8\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,3h 左右完成一次冻融循环.

到达试验龄期(28 d)的前 4 d,将试件在 $20\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水中浸泡 4 d.4 d 后将已浸水的试件擦去表面水后,测试对比组混凝土试件的抗压强度、劈拉强度和抗折强度,并将冻融试件放入冻融箱,经过 50 次、75 次冻融循环后,从冻融箱中取出试件盒,将试件从试件盒中取出,冲洗干净擦去表面水份后,测试其冻融后的抗压强度、劈拉强度和抗折强度.

2 试验结果及分析

2.1 抗压强度

图 1 和图 2 表示相对抗压强度(同一钢纤维体积率下冻融与未冻融试件抗压强度的比值)与钢纤维体积率及混凝土强度等级的关系.从图 1 中可以看出,冻融循环 50 次后,随着钢纤维体积率的提高,钢纤维混凝土相对抗压强度呈现上升趋势.当冻融循环次数进一步增加,随钢纤维体积率的增大,相对抗压强度呈下降趋势.总体上,经过冻融循环之后,混凝土的抗压强度有所下降,加入钢纤维对相对抗压强度影响较小.

随钢纤维混凝土强度等级的提高,相对抗压强度呈增大的趋势见图 2. 钢纤维混凝土强度越

高,钢纤维与混凝土之间的粘结作用越强,从而使混凝土的抗剥落能力和抵抗横向变形的能力得到增强,表现为随钢纤维混凝土强度等级的提高,钢纤维混凝土的冻后抗压强度降低较少.

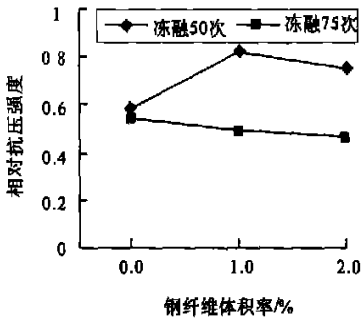


图 1 钢纤维体积率对混凝土相对抗压强的影响  
Fig.1 The influence of sted fiber volume fraction on relative compressive strength

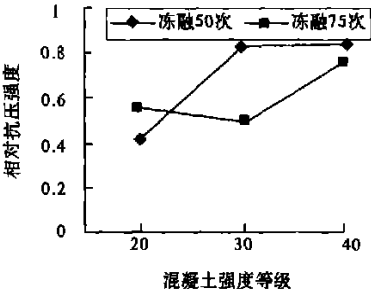


图 2 钢纤维混凝土强度等级对相对抗压强的影响  
Fig.2 The influence of the concrete strength hh on relative compressive strength

2.2 劈拉强度

根据试验数据,绘制出钢纤维混凝土相对劈拉强度(同一钢纤维体积率下冻融与未冻融试件劈拉强度的比值)与钢纤维体积率及混凝土强度等级的关系曲线如图 3 和图 4 所示.图中表明,随着钢纤维体积率和混凝土强度等级的提高,相对劈拉强度逐渐增大.冻融循环次数较小时,钢纤维

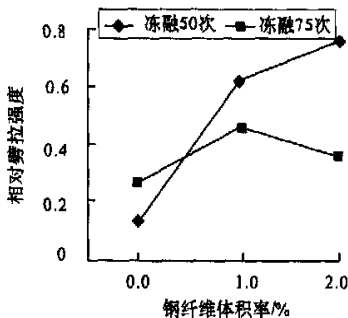


图 3 钢纤维体积率对混凝土相对劈拉强度的影响  
Fig.3 The influence of sted fiber volume fraction on relative splitting strength

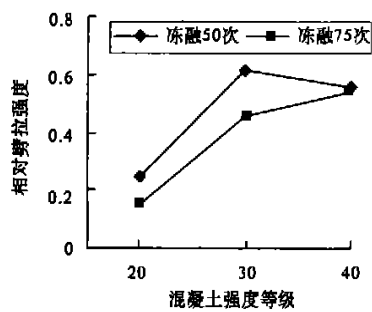


图 4 混凝土强度等级对钢纤维混凝土  
相对劈拉强度的影响

Fig. 4 The influence of the concrete strength on  
relative splitting strength

的增强作用比较明显;随着冻融循环次数的增加,钢纤维与水泥砂浆之间的粘结遭到破坏,钢纤维混凝土内部的缺陷增多,表现为当钢纤维体积率较大时,相对劈拉强度反而有所下降.

2.3 抗折强度

图 5 和图 6 分别反映了钢纤维体积率和混凝土强度等级对抗折强度(同一钢纤维体积率下冻融与未冻融试件抗折强度的比值)的影响.图中表明,当冻融循环 50 次时,随钢纤维体积率的提高,相对抗折强度近似线性增大,当钢纤维体积率为 2%时,相对抗折强度提高了近 4 倍,钢纤维对于冻融产生的裂缝起到了有效的约束作用,从而使冻融试件的抗劈裂能力大大增强.冻融循环达到 75 次且钢纤维体积率较大时,混凝土已接近破坏,骨料之间的水泥砂浆比较疏松,与钢纤维之间的粘结作用降低,钢纤维不但不能有效地发挥阻裂作用,反而会使混凝土内的界面薄弱层增多,表现为相对抗折强度随钢纤维体积率的增大而降低.

提高混凝土强度,使混凝土密实度得到提高,混凝土的内部质量得到改善,骨料间水泥砂浆的

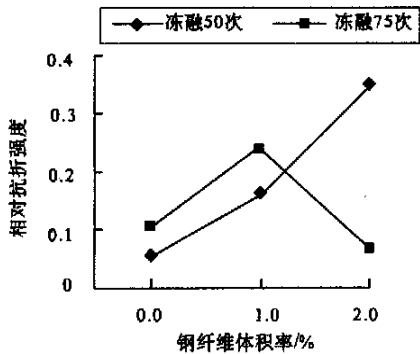


图 5 钢纤维体积率对混凝土相对  
抗折强度的影响

Fig. 5 The influence of steel fiber volume fraction  
on rupture strength

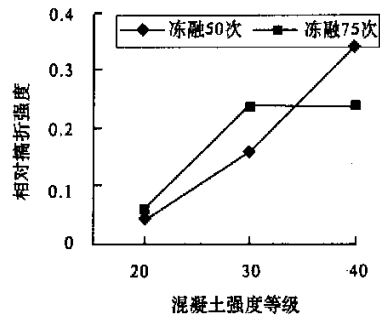


图 6 混凝土强度等级对钢纤维混凝土  
相对抗折强度的影响

Fig. 6 The influence of the concrete strength on  
relative rupture strength

粘结能力增大,钢纤维的作用也能得到有效发挥,则相对抗折强度明显提高.所以,随着钢纤维混凝土基体强度等级的提高,钢纤维混凝土密实度高,抗渗透性能强,钢纤维与砂浆界面粘结性能好,从而钢纤维混凝土冻融后强度下降的幅度减小,抗冻融性能提高.

3 钢纤维混凝土冻融破坏机理

混凝土的冻害机理的研究始于 20 世纪 30 年代,有静水压假说和渗透压假说等,国内外尚未得到统一的认识和结论.目前一般认为当混凝土处于水饱和状态,在某一冻结温度下,毛细孔中水结冰,胶凝孔中水处于过冷状态.水结成冰,使混凝土发生膨胀,另外由于胶凝孔中处于过冷状态的水分子向压力毛细孔中冰的界面处渗透,于是在毛细孔中又产生一种渗透压力.此外胶凝水向毛细孔渗透的结果必然使毛细孔中冰体积进一步膨胀.由此可见,处于饱和状态的混凝土受冻时,其毛细孔壁同时承受膨胀压力和渗透压力两种压力,当这两种压力超过混凝土的抗拉强度时混凝土就会开裂,反复冻融循环后,混凝土中的裂缝会相互贯通,其强度也会逐渐降低,最后甚至会完全丧失,使混凝土由表及里遭受破坏.

对于钢纤维混凝土,在冻融循环过程中,由于温度的变化,在混凝土内形成温度应力场.钢纤维混凝土的基本组成部分是水泥砂浆、粗骨料和钢纤维,由于它们的热膨胀系数不同,在温度应力作用下变形不协调,导致在混凝土内部界面产生拉应力,影响了界面的粘结性能.钢纤维体积率的增大,增加了混凝土内的界面,这些界面是混凝土的薄弱环节.当冻融循环次数不大时,钢纤维与砂浆的粘结性能良好,钢纤维能有效地发挥限裂增强作用,减小裂缝源的数量和裂缝的宽度.所以在冻

融次数较低时,随着钢纤维体积率的增加,使混凝土强度特性下降的幅度降低.随着冻融次数的进一步增大,在温度应力反复作用下,钢纤维与砂浆界面以及骨料与砂浆界面易于疲劳破坏,钢纤维与水泥砂浆以及骨料与砂浆界面的粘结强度减小,骨料、水泥砂浆和钢纤维趋于分离,钢纤维的阻裂增强作用减弱,混凝土的结构状态发生了明显的变化.即由冻融前的堆积状密实体逐步变成疏松状态,而在这一过程中伴随着裂缝的出现和发展,这些微裂缝的数量和宽度随着冻融过程的增加而增多和加宽.所以,钢纤维体积率较大时,在钢纤维混凝土经过一定冻融循环后,与较低钢纤维体积率的钢纤维混凝土相比,强度特性下降的较快.改善钢纤维与水泥砂浆界面粘结性能是提高较大钢纤维体积率的钢纤维混凝土抗冻融性能的关键.

综合上述,在冻融循环过程中,当混凝土基体冻胀开裂以后,掺入混凝土基体的钢纤维的限裂作用发挥得更加充分,分担了截面上的一部分拉力,并能缓和混凝土内部缺陷处的应力集中现象,从而提高了混凝土的变形能力和韧性,达到阻止裂缝产生和发展的目的.另外,跨越裂缝的钢纤维仍能传递应力,继续抵抗外力.由于钢纤维与水泥砂浆的紧密结合,增大了钢纤维对水泥砂浆的影响,水灰比越低,界面粘结越强,钢纤维对混凝土的影响范围也越大,阻裂能力也相应得到提高.但是钢纤维的体积率是有范围性的,过多的钢纤维体积率,大大增加了钢纤维与水泥砂浆的界面,而

这些界面是混凝土内部的薄弱环节,超过一定界限,就可能产生不利影响.

#### 4 结论

(1) 经冻融循环后,混凝土的抗压强度有所降低,钢纤维的加入对冻融循环后混凝土的抗压强度影响较小.

(2) 随着钢纤维体积率的提高,冻融后钢纤维混凝土的劈拉强度和抗折强度均得到了显著提高.但当冻融循环次数较大且钢纤维体积率较大时(2%),钢纤维的增强效果较差.

(3) 钢纤维混凝土强度等级对其抗冻性能影响较大,随着强度等级的提高,钢纤维混凝土的相对抗压强度、相对劈拉强度和相对抗折强度均有所增大.

#### 参考文献:

- [1] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 高丹盈,赵军,朱海堂.钢纤维混凝土设计与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 慕儒,严安,孙伟.荷载与冻融同时作用下HSC和SFRHSC的耐久性[J].工业建筑,1998,28(8):11~14.
- [4] 陈惠苏,孙伟,慕儒.混合材品种对HSC与SFRHSC抗冻性能的影响[J].建筑技术,2000,31(10):675~677.
- [5] CECS 13:89,钢纤维混凝土试验方法[S].

## The Experimental Study on the Basic Mechanical Property of Steel Fiber Reinforced Concrete after Freeze-thaw

GAO Dan-ying, ZHU Hai-tang, ZHAO Jun, ZHAO Guang-tian

(Research Center of New Building Materials & Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Through the freeze thaw experiment, the effects of cycle time of freeze thaw, the grade of concrete strength and the volume fraction of steel fiber on the compressive strength, splitting strength and rupture strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC) are analyzed. The reinforced mechanism of the SFRC under the action of freeze thaw is also discussed. The results show that the effect of steel fiber on compressive strength of concrete is smaller, while the number of freezing-thawing circle is smaller, and the reinforced actions of steel fiber on splitting strength and rupture strength of concrete are notable. On the contrary, the negative effects of steel fiber with high volume fraction on the splitting strength and rupture strength of concrete exist; and the enhancement of the grade of concrete strength is rather effective in improving the freeze resistant property of SFRC.

**Key words:** concrete; steel fiber; freeze thaw; mechanical property