

文章编号: 1671-6833(2005)01-0005-04

# 碳化环境下钢纤维混凝土基本性能试验研究

朱海堂, 高丹盈, 张启明, 汤寄予

(郑州大学新型建筑材料与结构研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 以混凝土强度等级、钢纤维体积率、碳化时间为变化参数, 进行了碳化环境下混凝土、钢纤维混凝土和钢纤维高强混凝土试件的基本性能试验, 测试了不同碳化时间混凝土和钢纤维混凝土的抗压强度、劈拉强度、抗折强度以及碳化深度, 探讨了钢纤维对混凝土碳化性能的增强机理. 研究表明: 混凝土强度等级、碳化时间等对钢纤维混凝土的基本力学性能和碳化深度具有较为显著的影响, 高强钢纤维混凝土具有较高的抗碳化能力; 钢纤维体积率对钢纤维混凝土的抗碳化性能具有一定程度的影响.

**关键词:** 混凝土; 钢纤维; 碳化

**中图分类号:** TU 528 **文献标识码:** A

## 0 引言

混凝土碳化后, 物相结构(如孔隙率等)和化学组分等发生了变化, 导致混凝土材料性能发生改变, 即碳化后混凝土的力学性能与碳化前有所不同. 但是, 现行混凝土结构设计规范没有考虑混凝土碳化后力学性能的改变, 按未碳化混凝土性能设计的结构, 原来是安全的, 经多年碳化后, 可能变成不安全; 改造旧房时, 套用现行混凝土结构设计规范, 按未碳化混凝土的性能指标进行鉴定, 可能会过高估计结构承载力和抗震性能, 造成计算结果失真. 碳化后混凝土及其结构力学性能的研究已受到学术界的高度重视.

为了改善混凝土的抗拉性能低、延性差等缺点, 在混凝土中掺加纤维以改善混凝土性能的研究发展得相当迅速, 其中发展较快、应用较广的是钢纤维混凝土. 目前对钢纤维混凝土力学性能方面的研究较多<sup>[1]</sup>, 而对其耐久性的研究较少, 尤其是碳化后钢纤维混凝土力学性能方面的试验研究尚未见报道. 作者采用实验室快速试验方法, 对碳化后和未碳化钢纤维混凝土试件的基本力学性能进行了测试和对比分析.

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

水泥: 采用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 28 d 平

均强度为 53.7 MPa.

骨料: 级配良好的中粗天然河砂; 天然石灰岩碎石, 粒径 5~25 mm, 连续级配.

减水剂: FDN-1 型高效减水剂. 掺加水泥用量 1% 的减水剂, 约可减水 20%.

钢纤维: 采用铣削型钢纤维, 其力学性能见表 1.

表 1 铣削型钢纤维的力学性能

种类	等效直径 /(10 <sup>-3</sup> mm)	长度 /mm	抗拉强度 /(N·mm <sup>-2</sup> )	弹性模量 /(N·mm <sup>-2</sup> )	伸长率 /%
铣削型	943.6	32.31	380~800	200 000	0.5~3.5

### 1.2 试验设计

碳化试验试件以钢纤维混凝土强度、钢纤维体积率和碳化时间为变化参数. 钢纤维混凝土强度等级采用 CF 20、CF 30、CF 40、C 65 4 种; CF 20 和 CF 40 钢纤维混凝土的钢纤维体积率为 1.0%, CF 30 钢纤维混凝土的钢纤维体积率分别为 0, 1.0%, 2.0%, 碳化时间分别为 3 d, 7 d, 14 d 和 28 d. 为研究钢纤维高强混凝土与普通强度钢纤维混凝土在碳化环境中的性能差异, 设计强度等级为 CF 65 的钢纤维混凝土试件, 钢纤维体积率分别为 0.5%, 1.0%, 2.0%, 碳化时间为 28 d, 配合比见表 2.

试验对 CF 20、CF 30 和 CF 40 的钢纤维混凝土分别进行不同碳化时间的碳化深度、抗压强度、劈拉强度和抗折强度的测试; 对 CF 65 的钢纤维高强

收稿日期: 2004-10-30; 修订日期: 2005-01-18

基金项目: 国家重大基础研究前期计划项目(2004CCA04100); 河南省科技攻关项目(0224310014)

作者简介: 朱海堂(1964-), 男, 河南省虞城县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事高性能混凝土及其结构性能研究.

混凝土进行 28d 碳化时间的碳化深度、抗压强度和劈拉强度的测试. 碳化试验按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ 82-85)<sup>[3]</sup> 中碳化性能试验的室内快速碳化试验方法进行, 力学性能试验按照现行《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:89)<sup>[3]</sup> 中的有关规定进行.

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/%	reinforced concrete				kg/m <sup>3</sup>	
		水泥	砂	碎石	水	钢纤维	高效减水剂
C20	1.0	403	817	1 000	210	78.67	
C30	0.0	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	
C65	0.5	520	710	1 065	156	39.30	7.8
C65	1.0	547	696	1 044	164	78.60	8.2
C65	2.0	600	668	1 002	180	157.20	9.0

## 2 基本力学性能

### 2.1 抗压强度

图 1 是根据试验数据绘制的不同体积率、不同强度等级的钢纤维混凝土试件的抗压强度与其对比组试件抗压强度的比值(即相对抗压强度)与碳化时间的关系图. 由图中可见, 随着碳化时间的增加, 相对抗压强度有增长的趋势, 但增加幅度较小. 碳化条件下, 钢纤维体积率和混凝土强度等级对相对抗压强度的影响较小. 基本上可以认为, 碳化使钢纤维混凝土的抗压强度略有提高, 但与碳化前基体强度相比, 提高幅度较小.

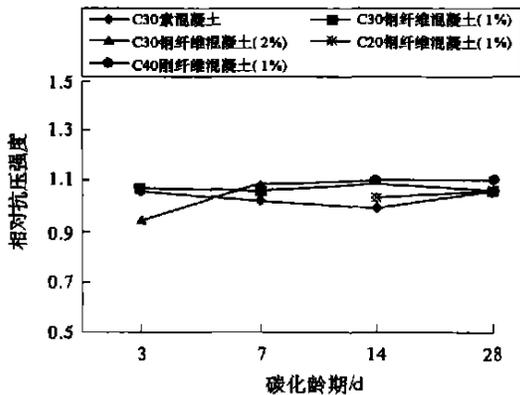


图 1 相对抗压强度与碳化时间的关系

Fig. 1 Relation between relative compressive strength and carbonation time

图 2 为 CF 65 钢纤维混凝土碳化 28d 后的立方体抗压强度与碳化前混凝土抗压强度的比值同

钢纤维体积率的关系. 从中可以看出, 随着钢纤维体积率的增大, 其比值逐渐减小, 即经过碳化后混凝土抗压强度的提高幅度逐渐降低, 当钢纤维体积率达到 2% 时, 碳化后强度反而小于碳化前强度, 也就是说, 过大的钢纤维含量对混凝土的抗压强度将产生负面影响.

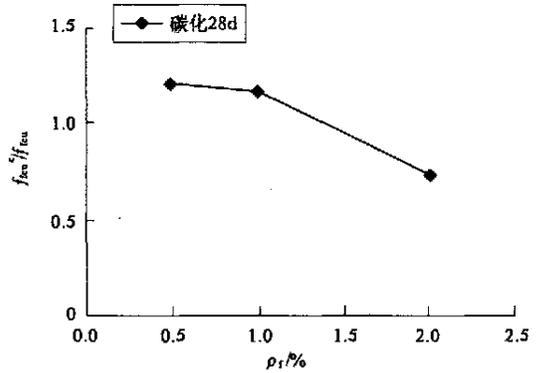


图 2  $f_{cu}^c / f_{cu}$  与  $\rho_f$  的关系

Fig. 2 Relationship between  $f_{cu}^c / f_{cu}$  and  $\rho_f$

### 2.2 劈拉强度

钢纤维混凝土相对劈拉强度与碳化时间、钢纤维体积率以及混凝土强度等级的关系见图 3. 可以发现, 碳化时间和钢纤维混凝土强度等级对相对劈拉强度影响比较明显, 随碳化时间和钢纤维混凝土强度等级的增大, 相对劈拉强度呈线性提高. 基体混凝土强度越低, 受碳化的影响越明显, 随碳化时间的提高, 劈拉强度的增长幅度越大. 加入钢纤维, 可以提高相同碳化时间下混凝土的劈拉强度, 但钢纤维体积率的变化对此影响不大.

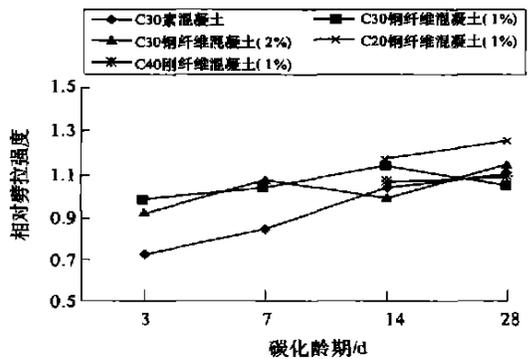


图 3 相对劈拉强度与碳化时间的关系

Fig. 3 Relation between relative splitting strength and carbonation time

图 4 为 CF 65 级钢纤维混凝土碳化 28d 后的劈拉强度与碳化前混凝土劈拉强度的比值随钢纤维体积率变化的关系曲线. 从中可以看出, 当钢纤维体积率在 0.5%~2.0% 之间变化时, 其比值变化很小, 约为 0.92~0.94, 表明钢纤维对碳化环境

下的混凝土劈拉强度几乎没有影响.

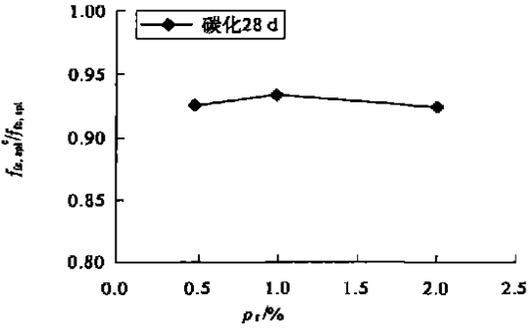


图 4  $f_{fc,sp}^c / f_{fc,sp}$  与  $a$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $f_{fc,sp}^c / f_{fc,sp}$  and  $a$

### 2.3 抗折强度

根据试验数据, 得出相对抗折强度与碳化时间、钢纤维体积率和混凝土强度等级的关系如图 5 所示. 对于混凝土试件, 随碳化时间的增加, 相对抗折强度逐渐下降. 这是由于在碳化过程中, 氢氧化钙与二氧化碳反应生成大量的水分, 导致混凝土产生了碳化收缩, 混凝土碳化层所产生的碳化收缩对核心形成压应力, 表面碳化层产生拉应力, 当这种拉应力超过了水泥胶体极限拉应力, 就有可能在碳化层产生微细裂缝, 从而降低了混凝土的抗折强度. 这种不利情况随钢纤维的加入得到了显著的改善.

对于钢纤维混凝土试件, 随着碳化时间的增大, 相对抗折强度逐渐提高, 且随着钢纤维体积率的增大, 提高效果越来越明显, 提高幅度最大可达到 35%. 钢纤维体积率相同时, 基体强度较高的试件抗折强度提高较明显. 究其原因, 在于钢纤维能改善混凝土的抗拉性能, 提高混凝土的极限拉应变, 限制裂缝的开展, 使碳化层混凝土的抗拉和抗裂能力得到增强, 从而减小碳化收缩带来的不利影响, 且影响程度随着碳化深度的提高愈加明显.

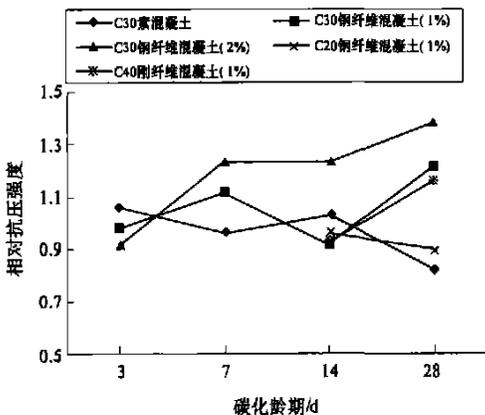


图 5 相对抗折强度与碳化时间的关系

Fig. 5 Relation between the relative rupture strength and carbonation time

### 3 碳化深度

由图 6 和图 7 可以看出, 钢纤维体积率和混凝土强度等级对碳化深度的影响较大. 随着钢纤维体积率的增大, 各龄期的混凝土碳化深度均呈现下降趋势. 随着钢纤维混凝土强度等级的提高, 碳化深度大幅度降低, 当钢纤维混凝土强度达到 CF 65 ( $\rho = 1.0\%$ ) 时, 碳化 28d 后仍然不能测出碳化深度, 表明高强钢纤维混凝土具有较高的抗碳化能力, 在实际工程应用中可不考虑碳化的影响. 随着碳化时间的增大, 混凝土的碳化深度显著增加.

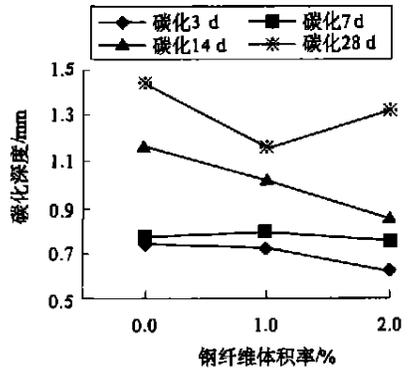


图 6 钢纤维体积率对混凝土碳化深度的影响

Fig. 6 Influence of fiber volume fraction on carbonation depth

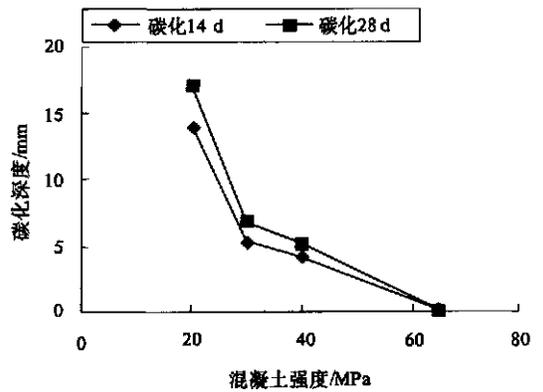


图 7 钢纤维混凝土强度与碳化深度的关系

Fig. 7 Relation between concrete strength and carbonation depth

### 4 钢纤维对混凝土抗碳化性能的影响机理分析

混凝土浇筑后, 往往由于粗骨料的下沉使其底部有水滞留而产生水囊, 加上凝结时水泥石的收缩, 使骨料和水泥石的结合面形成局部的微裂缝, 水分蒸发形成毛细孔道等缺陷. 这些缺陷的存在为  $CO_2$  的渗入和扩散提供了有利条件, 从而造成了碳化现象. 随着时间的推移,  $CO_2$  逐步向混凝土

土内部扩散,碳化反应也逐步深入,碳化深度逐渐增大.

当混凝土中掺入适量钢纤维后,钢纤维均匀分布于混凝土中,改善了混凝土机体的微观结构,使混凝土更加密实,CO<sub>2</sub> 较难渗入且扩散速度降低,碳化速率减缓,表现为同龄期下碳化深度减小.另外,混凝土中钢纤维的存在,延迟了试件边缘裂缝的出现,限制了裂缝的扩展,减小了碳化收缩的不利影响,对混凝土的碳化起到了抑制作用,使混凝土的碳化深度减小,随着钢纤维体积率的增加,这种作用更加明显.

水灰比是决定混凝土性能的重要参数,对混凝土碳化速度影响很大.众所周知,水灰比基本上决定了混凝土的孔结构,水灰比越大,混凝土内部的孔隙率越大,密实性越差,渗透性也就越大.由于CO<sub>2</sub> 扩散是在混凝土内部的气孔和毛细孔中进行的,因此,水灰比在一定程度上决定了CO<sub>2</sub> 在混凝土中的扩散速度,水灰比越小,钢纤维混凝土强度等级越高,则碳化速度也越低,在其他条件相同的情况下碳化深度越小.

钢纤维能够增加混凝土碳化后的极限拉应变,使外荷载作用下混凝土试件的开裂延迟,即使在开裂以后,跨越裂缝的钢纤维可以进一步约束裂缝的开展,破坏前钢纤维的拔出又增加了试件的延性,从而提高了混凝土试件抗拉能力.

## 5 结论

(1) 一般情况下,碳化使钢纤维混凝土的抗压强度较碳化前略有提高,但当钢纤维混凝土强度较高,且钢纤维体积率达到2%时,钢纤维混凝土抗压强度较碳化前有一定幅度的下降.

(2) 随碳化时间和钢纤维混凝土强度等级的增大,相对劈拉强度呈线性提高.加入钢纤维,可以提高相同碳化时间下混凝土的劈拉强度,但钢纤维体积率的变化对此影响不大.

(3) 对于钢纤维混凝土试件,随着碳化时间的增大,抗折强度逐渐提高,且随钢纤维体积率的增大,提高效果越明显,提高幅度最大可达到35%.

(4) 钢纤维混凝土的碳化深度随碳化时间的增加而增大,随钢纤维体积率的增大而降低,随钢纤维混凝土强度等级的提高而减小.钢纤维高强混凝土具有较高的抗碳化能力.

## 参考文献:

- [1] 高丹盈,刘建秀.钢纤维混凝土基本理论[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
- [2] CECS 13:89,钢纤维混凝土试验方法[S].
- [3] 赵述智,王忠德.实用建筑材料试验手册[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [4] 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.

## Test Research on Basic Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete under Carbonization

ZHU Hi -tang, GAO Dan -ying, ZHANG Q -ming, TANG Ji -yu

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

**Abstract** : In the carbonization experiment, the concrete strength, the volume fraction of steel fiber and carbonization time are taken as variable parameters. Through the carbonization experiment of concrete steel fiber reinforced concrete (SFRC), and high strength steel fiber reinforced concrete (HSFRC), the basic mechanical properties before and after carbonization such as compressive strength, splitting strength and rupture strength of SFRC are measured, and also the carbonization depth at every defined carbonization time are surveyed. The reinforced mechanism of the steel fiber upon the carbonization property is studied. The results show that the volume fraction of steel fiber and the concrete strength are the main factors that influence the carbonization resistance of SFRC, and HSFRC have higher ability to resist carbonization. To a certain degree, the volume fraction of steel fiber is also a factor.

**Key words** : concrete ; steel fiber ; carbonization