

# 智能建筑材料

## 石墨砂浆注浆钢纤维混凝土

Zhineng Jianzhu Cailiao

Shimo shajiang zhujiang gangxianwei hunningtu

洪雷 著

中国建材工业出版社

# 智能建筑材料

## ——石墨砂浆注浆钢纤维混凝土

洪 雷 著

中國建材工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

智能建筑材料:石墨砂浆注浆钢纤维混凝土/洪雷著.  
北京:中国建材工业出版社,2009.6  
ISBN 978-7-80227-606-2

I. 智… II. 洪… III. 金属纤维-纤维增强混凝土 IV. TU528.572

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第083436号

## 内 容 简 介

本书在简要介绍钢纤维混凝土的发展和钢纤维混凝土智能化研究的现状与进展基础上,重点介绍了石墨注浆钢纤维混凝土(Graphite slurry infiltrated steel fiber concrete,简称GSIFCON)智能化方面的研究成果。其内容包括:GSIFCON的制备流程及各参数对其材性的影响;GSIFCON导电机理及导电影响因素;GSIFCON电热升温规律;GSIFCON力-阻机敏特性;GSIFCON大尺寸试件野外融雪化冰试验研究及其热效率的计算。

本书可供从事土木工程、力学、物理、材料等方面工作的研究人员,以及大专院校的师生和研究生参考。

### 智能建筑材料——石墨砂浆注浆钢纤维混凝土

洪 雷 著

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街6号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/32

印 张:7.5

字 数:166千字

版 次:2009年6月第1版

印 次:2009年6月第1次

书 号:ISBN 978-7-80227-606-2

定 价:25.00元

本社网址:www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

# 前 言

建筑材料的发展，经历了从简单的天然和人造建筑材料到复合建筑材料，从复合建筑材料到复合功能材料的一个过程，目前，建筑材料的发展正向着智能建筑材料的方向迈进。简单的天然和人造建筑材料如石材、黏土砖等，复合建筑材料如混凝土材料、钢筋混凝土材料、纤维混凝土等。在此基础上，若赋予建筑材料具有一定的功能性质，则属于复合功能性建筑材料。如具有保温性能的加气混凝土、加气钢筋混凝土，具有一定装饰功能的饰面上釉的加气混凝土砌块和饰面空心混凝土砌块等。所谓的智能建筑材料，是指材料不但具备建筑材料应具有的一般的力学性能和耐久性能，还具有能模仿生物体、具有感知或控制等功能材料；是一种具有传感或执行的双重功能的功能材料，它无需外界的帮助，而本身就可以在电、磁、热、机械运动、光、声、化学、流变等性能之间产生耦合行为。当智能建筑材料和具体结构形式结合在一起时便构成了智能建筑结构，它是继复合材料、功能材料发展之后材料发展的另一个重要阶段。混凝土材料是最大宗的建筑材料，是建筑材料的一个重要分支，智能混凝土是指将少量具有某种特殊功能的材料复合于传统混凝土中，使其具有自感应、自诊断、自调节和自愈合等功能的智能材料。

本书主要介绍了作者在石墨砂浆注浆钢纤维混凝土 (Graphite slurry infiltrated steel fiber concrete, 简称 GSIFCON) 的制备及其智能化方面研究的一些成果, 大部分是作者近几年研究课题的一些阶段性研究成果, 包括 GSIFCON 的制备流程及各参数对其材性的影响; GSIFCON 导电机理及导电影响因素; GSIFCON 电热升温规律; GSIFCON 力-阻机敏特性; GSIFCON 大尺寸试件野外融雪化冰试验研究及其热效率的计算等内容。

该材料是一种集优良的力学性能和感知应力、应变、损伤及电热温升等功能于一体的智能建筑材料。它具备功能结构一体化特征, 是一种典型的本征性智能复合材料。

GSIFCON 在具备良好的力学性能和多项智能性质的同时, 还具备良好的耐久性能, 这一系列优良的性能表明, 它在混凝土智能结构体系中具有广阔的应用前景。

尽管 GSIFCON 具备众多的功能特性和良好的力学及耐久性能, 但如想将其成熟地应用于智能结构体系中, 实现对结构实时的智能监控等目的, 还有许多需要研究的内容。因此, 本书对 GSIFCON 的介绍和讨论, 仅能说是对该材料的初步研究的一些结论, 愿望能得到同行专家的批评和指导。此外, 本书中引用了许多国内外学者的有关文献资料, 在此对他们表示衷心的感谢。

作者在从事本项目的研究, 特别是在此书的出版过程中, 得到了长江学者奖励计划特聘教授李宏男先生的莫大鼓励和支持, 在此表示衷心的感谢。

洪 雷

2009年3月9日于大连

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 钢纤维混凝土发展史 .....	1
1.2 新型高性能钢纤维混凝土 .....	7
1.3 钢纤维混凝土的智能化发展 .....	13
1.4 本书的主要工作 .....	20
第 2 章 石墨砂浆注浆钢纤维混凝土的制备 .....	26
2.1 原材料、设备及制作 .....	27
2.2 密实性试验研究 .....	30
2.3 砂浆流动性与密实性关系 .....	36
2.4 小结 .....	37
第 3 章 GSIFCON 导电性能的影响因素 .....	40
3.1 GSIFCON 导电性能的内部影响因素 .....	41
3.2 GSIFCON 导电性能的外部影响因素 .....	55
3.3 GSIFCON 材料强度的影响因素 .....	68
3.4 小结 .....	72
第 4 章 交直流电对 GSIFCON 电阻率、升温性能的影响 .....	76
4.1 交流电、直流电及万用电表测试结果比较 .....	76

4.2	升温试验方法 .....	80
4.3	试验过程及结果分析 .....	81
4.4	GSIFCON 材料导电模型的建立和导电机理研究 ..	86
4.5	小结 .....	90
第5章	GSIFCON 的压敏性能研究 .....	92
5.1	试验方法 .....	92
5.2	压敏性能试验 .....	96
5.3	试验结果与分析 .....	99
5.4	小结 .....	101
第6章	GSIFCON 与素混凝土梁叠合的智能性质研究 ..	102
6.1	试验准备 .....	102
6.2	试件的制作 .....	103
6.3	导电性能测试方案的选择 .....	104
6.4	梁受弯加载试验 .....	107
6.5	小结 .....	120
第7章	GSIFCON 与钢筋混凝土梁叠合的智能性质研究 ..	122
7.1	试验概况 .....	122
7.2	试验结果分析 .....	127
7.3	小结 .....	155
第8章	GSIFCON 融雪化冰试验研究 .....	157
8.1	试件的制作 .....	157
8.2	融雪化冰试件电阻率变化测试 .....	162

8.3	融雪化冰试件的物理力学性能与热力学参数	177
8.4	GSIFCON 材料室内升温化冰试验	187
8.5	GSIFCON 大试件室外升温融雪试验	211
8.6	小结	227



# 第 1 章 绪 论

本章较详细地阐述了钢纤维混凝土的发展历史以及纤维增强理论，并对钢纤维混凝土的智能化发展状况和国内外钢纤维混凝土智能性质的研究状况进行了综述。介绍了钢纤维混凝土智能化改性途径以及本书的主要内容。

## 1.1 钢纤维混凝土发展史

混凝土材料是目前使用最广泛的建筑材料。自英国人 J. Aspdin 于 1824 年发明硅酸盐水泥至今已有 180 余年的历史，硅酸盐水泥的出现，也标志着一种新型建筑材料——混凝土材料的正式诞生。混凝土材料一经出现，由于其众多优点，如材料价格低廉、可模性好、原材料易于获得、抗压强度高，其发展十分迅速。但混凝土材料也存在一些缺点，其最主要的缺点是脆性较大。混凝土的抗压强度虽然较高，但其抗拉、抗弯、抗冲击、抗爆以及韧性等性能却比较差。纤维混凝土就是人们在考虑如何提高其脆性，改善抗拉、抗弯、抗冲击以及抗爆等性能的基础上发展起来的。它是将短而细的分散性纤维，均匀地撒布在混凝土基体中而形成的一种新型建筑材料。

钢纤维混凝土是纤维混凝土中重要的一种形式，它的发

展始于 20 世纪初。1910 年和 1911 年美国的 Porter 和 Graham 分别提出了将钢纤维加入普通钢筋混凝土中的设想并发表了相关的论文。第二次世界大战前后，由于军事工程的需要，英、美、德、日、法等国相继开始了对钢纤维混凝土的研究，陆续发表了一些专利。但那时总的研究并没有本质上的突破，进展不大。这主要是由于这些研究和专利均没能提出纤维对混凝土的理论增强机理。钢纤维混凝土进入有理论指导的研究是在 20 世纪 60 年代初。1963 年，美国的 J. P. Romualdi 发表了钢纤维约束混凝土裂缝发展机理的研究报告，才使得这种复合材料的发展有所突破。

由于钢纤维混凝土组成的多相、多组分和非匀质性，加以钢纤维的“乱向”和“短”的特征，它的增强机理十分复杂，如何使其增强机理能充分体现其自身特点，目前仍在不断争论、完善和发展之中。其增强机理，目前有两种有代表性的理论解释。其一是运用复合力学理论的“复合材料机理”（混合率法则）。最先提出这一理论解释的是英国的 R. N. Swamy、P. S. Mangat，美国的 A. E. Naaman、D. C. Hannant 等学者。其二是建立在断裂力学基础上的纤维间距理论，该理论的主要代表学者是 J. P. Romualdi、J. B. Batson 和 J. A. Mandel。而所有其他的有关钢纤维增强机理的理论，一般均可以认为是以这两个理论为基础经综合完善而发展起来的。

### 1.1.1 纤维间距理论简述

纤维间距理论建立在线弹性断裂力学基础上，认为混凝土内部有尺度不同的微裂缝、孔隙和缺陷，在施加外力时，孔、缝部位产生较大的应力集中，引起裂缝的扩展，最终导

致混凝土破坏。因此，在脆性基体中掺入钢纤维后，在复合材料结构形成和受力破坏的过程中，有效地提高了复合材料受力前后阻止裂缝引发与扩展的能力，达到了纤维对混凝土增强与增韧的目的。

对顺向连续纤维增强混凝土，假定纤维沿拉力方向以棋盘状均匀分布于基体中，如图 1-1 (a) 所示。纤维间距为  $s$ 、裂缝（半宽为  $a$ ）发生在四根纤维所围成的区域中心。在拉力作用下，在裂缝的纤维周围将产生如图 1-1 (b) 所示的粘结力  $\tau$  分布图形。

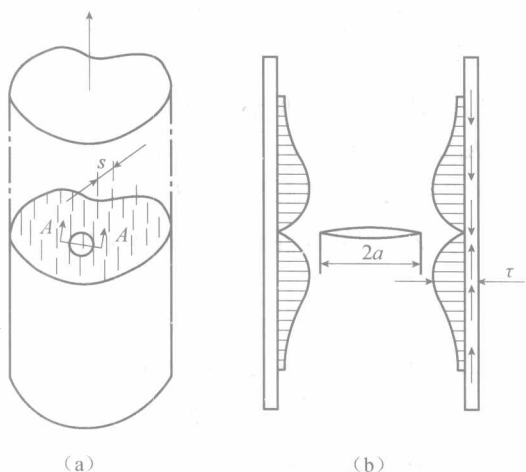


图 1-1 Romualdi 模型

粘结力  $\tau$  对裂缝尖端产生一个反向的应力场，从而降低裂缝尖端的应力集中程度，纤维对裂缝的扩展起约束作用。此时，裂缝尖端产生一个与基体裂缝尖端相反的应力强度因子，总应力强度因子降低为：

$$K_T = K_\sigma - K_f \quad (1-1)$$

或

$$K_T = \frac{2\sqrt{a}}{\pi}(\sigma_{fc} - \tau) \leq K_{lc} \quad (1-2)$$

式中  $K_T$ ——复合材料实际应力强度因子；  
 $K_\sigma$ ——外力作用下无纤维时应力强度因子；  
 $K_f$ ——掺入纤维产生相反的应力强度因子；  
 $K_{lc}$ ——钢纤维混凝土临界应力强度因子；  
 $a$ ——裂缝半宽；  
 $\sigma_{fc}$ ——沿纤维方向施加的均匀拉应力；  
 $\tau$ ——纤维对混凝土裂后附加应变的阻力在纤维与基体界面上产生的最大剪应力。

当  $K_T \geq K_{lc}$  时，材料发生断裂破坏，根据这一理论，Romualdi 等提出纤维间距  $s$  对混凝土抗拉强度有显著影响的观点。若设  $2a = s\sqrt{2}$ ，则纤维混凝土抗拉强度  $f_{fc}$  计算公式为：

$$f_{fc} = \frac{K_{lc}}{Y\sqrt{a}} = \frac{K_{lc}}{Y0.84\sqrt{s}} = \frac{K}{\sqrt{s}} \quad (1-3)$$

式中  $K_{lc}$ ——钢纤维混凝土临界应力强度因子；  
 $Y$ ——与裂缝形状有关的常数；  
 $K$ ——与  $K_{lc}$ 、 $Y$  有关的常数；  
 $s$ ——定向长纤维平均间距。

Romualdi 对定向钢纤维混凝土试件进行了弯拉与劈拉试验，进一步提出钢纤维混凝土的强度只由纤维的平均间距控制的观点。

1964 年 Romualdi 和 J. A. Mandel 将这一概念用于均匀分布的乱向短纤维增强混凝土中，经过实验表明，纤维混凝土的

初裂应力与纤维间距的平方根成反比。实际上，当乱向短纤维的尺度为  $0.4\text{mm} \times 0.6\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，体积率  $\rho_f = 2\%$ ，每  $1\text{m}^3$  钢纤维混凝土纤维重  $157\text{kg}$ ，则有  $333$  万根纤维均布于混凝土中；如  $\rho_f = 1\%$ ，则只有  $166$  万根纤维在混凝土中均匀而又乱向分布，两者纤维间距不同，其增强效率则有显著不同。纤维平均间距除与  $\rho_f$ 、 $l_f$ 、 $d_f$ （ $d_f$  为钢纤维等效直径， $l_f$  为钢纤维长度）有关外，还与纤维的排列分布和纤维的方向性有关。

对于平等排列的纤维，垂直于纤维方向上单位面积的平均间距可近似用下式表达：

$$s = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (1-4)$$

式中  $n$ ——单位面积上纤维的根数。

Krenchel 指出，当纤维排列不成交矩阵形时， $s = K \frac{1}{\sqrt{n}}$ ，例如纤维呈三角形排列时， $K = 1.072$ ，纤维呈六角形（蜂窝状）排列时， $K = 0.877$ 。

考虑纤维方向系数的影响，Krenchel 进一步导出一维、二维、三维的纤维间距与体积率的关系。

对于一维情形：

$$n = \frac{\rho_f}{A_f}$$

$$S_{1.0} = \sqrt{\frac{A_f}{\rho_f}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4} d_f^2}{\rho_f}} = 0.886 \frac{d_f}{\sqrt{\rho_f}} \quad (1-5)$$

对于二维情形：

$$S_{2.0} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} S_{1.0} = 1.1 \frac{d_f}{\sqrt{\rho_f}} \quad (1-6)$$

对于三维情形：

$$S_{3.0} = \sqrt{2}S_{1.0} = 1.25 \frac{d_f}{\sqrt{\rho_f}} \quad (1-7)$$

或

$$S_{3.0} = 1.38 \frac{d_f}{\sqrt{\rho_f}} \quad (1-8)$$

日本的小林一辅根据钢纤维混凝土试验结果，进一步提出了基于纤维间距理论的抗拉强度计算公式：

$$f_{tc} = K \left( \frac{1}{\sqrt{s}} - \frac{1}{\sqrt{s_c}} \right) + f_m \quad (1-9)$$

式中  $f_m$ ——钢纤维与基体粘结强度；

$s_c$ ——钢纤维产生增强效果的纤维间距上限值；

$K$ ——主要由纤维粘结强度决定的常数，对于钢丝切断的直纤维， $K = 4.5$ ；对于薄板剪切钢纤维， $K = 5.7$

式 (1-9) 表明，纤维间距低于  $s_c$ ，纤维的增强效果才得以发挥，换言之，纤维的体积率太低时，纤维对抗拉强度就起不到改善作用。公式还表明，纤维对基体抗拉强度的增强效果与纤维体积率的四次方根成正比，与纤维直径的平方根成反比，与纤维和基体的粘结强度成正比，总的趋势是可以接受的。但以钢纤维混凝土而论，在一定程度上低估了纤维体积率的作用。

### 1.1.2 复合材料机理（混合率法则）简述

这一机理的理论出发点是复合材料构成的混合原理。将纤维增强混凝土看作是纤维强化体系，并应用混合原理来推定纤维混凝土的抗拉和抗弯强度。

在基体和纤维完全粘结的条件下，并在基体和连续纤维构成的复合体上（设纤维是同方向配置于基体中）施加拉伸力时，该复合体的强度由纤维和基体的体积比和应力所决定。用公式表达，则为：

$$R_{XL} = R_{JL}V_J/V + \sigma_x V_m/V = R_{JL}V_J + \sigma_x V_x \quad (1-10)$$

式中  $R_{XL}$ 、 $R_{JL}$ ——纤维混凝土和基体的抗拉强度；

$\sigma_x$ ——纤维混凝土达到抗拉强度时纤维的拉应力；

$V_J = V - V_x = 1 - V_x$ ——单位体积内的基体体积。

式（1-10）是以纤维从基体中拔出，即基体和纤维间的粘结破坏为前提的。

另外，在具体运用复合材料机理时，应当考虑复合体在拉伸应力方向上有效纤维量的比例，和非连续性短纤维的长度修正，应尽量同实际情况相符。由这一原理提出了纤维混凝土强度与纤维的掺入量、方向、长径比以及粘结力之间的关系。

上述两种机理，均为估计纤维混凝土初裂强度或比例极限。至于纤维混凝土的极限强度，则主要取决于纤维的体积百分率、长径比以及纤维与混凝土基体的界面粘结。目前有关钢纤维混凝土的增强理论，均是在以上所述两种理论的基础上进一步发展的一些理论观点，并未见有独立的、更完整的、新的增强理论提出。

## 1.2 新型高性能钢纤维混凝土

### 1.2.1 砂浆渗浇钢纤维混凝土

将不连续钢纤维加入水泥基体（包括砂浆及混凝土），

可多方面改善基体材料的力学性能，其中最重要的是改善延性及能量吸收的能力。在一般情况下，钢纤维含量越高，钢纤维混凝土的断裂能就越高。但是在工程实用中，钢纤维含量有一定限值，超过这一限值，用一般方法搅拌、成型就有困难。例如对于一般常用的钢纤维混凝土，其纤维体积率一般不超过2%，否则就有可能发生纤维离析、纤维成球及空气含量增大等不良后果。

20世纪80年代，国际上开始研究一种新的工艺施工方法来生产高钢纤维含量混凝土，其方法是预先将钢纤维均匀撒布于模具内，再将高流动性砂浆注入已置放于模具中的纤维骨架中，经轻微振捣而成的一种钢纤维混凝土。用这种方法制成的高钢纤维含量的混凝土被称为砂浆渗浇钢纤维混凝土（Slurry Infiltrated Fiber Concrete 缩写 SIFCON），其钢纤维体积率可达27%，一般为5%~20%。SIFCON使用的钢纤维，其长度可达30mm或40mm，纤维用量取决于纤维的形式（长度、直径、外形）、纤维置放于模具内的准确程度、纤维的方向、振动方式及振动时间等因素。SIFCON中不使用粗集料，只使用细集料及粉煤灰或硅灰等，基体的配合比应能使砂浆顺利地渗到模具内事先置放的纤维骨架中去。

有关研究 SIFCON 的报告指出，它可以大幅度提高抗拉强度，而这正是一般常规纤维混凝土所难以达到的，而且其他力学指标也比基体有大幅度提高，特别是韧性和吸收能量的能力。目前主要应用于抗冲击的结构、防护工程、耐火工程、宇航发射台、核容器（防辐射）、机场和路面的快速修补、混凝土框架的抗震节点等部位。



### 1.2.1.1 美国 Naamann 教授研究 SIFCON 的结果

SIFCON 复合材料的断裂韧度高, 在高应力时仍具有很大的延性。美国密歇根大学 Naamann 教授进行了 SIFCON ( $\rho_f = 10\% \sim 11\%$ ) 强度的试验, 得到如下结果:

(1) 4in  $\times$  8in 的圆柱体抗压强度可达 34ksi (约 238MPa), 与抗压强度 5ksi (约 35MPa) 的素混凝土比较, 其受压韧度指标高 60 倍;

(2) 18in  $\times$  3in  $\times$  1.75in 棱柱体抗拉强度达 5.5ksi (约 38.5MPa), 其受拉韧度指标较素混凝土高 1000 倍, 即其受拉断裂能大大高于素混凝土;

(3) 按美国标准试件 4in  $\times$  4in  $\times$  14in 所做的抗折强度达 12ksi (约 84MPa), 其弯曲韧度指标较素混凝土高 600 倍;

(4) 抗剪强度达 5ksi (约 35MPa);

(5) 变形钢筋平均粘结强度达 4ksi (约 28MPa);

(6) 弹性模量达 10000ksi (约 70000MPa)。

SIFCON 的这些力学性能取决于很多参数, 如纤维的长度、直径、长径比、外形、体积率、方向、模板的边壁效应、砂浆的组成、振捣及浇筑程序等。

### 1.2.1.2 印度 Parameswaran 研究 SIFCON 的结果

印度的 Parameswaran 等人也进行了 SIFCON 的研究, 包括静力受弯试验及重复荷载下的受弯试验, 并与普通方法成型的钢纤维增强砂浆试件和钢丝网水泥试件作了比较。其 SIFCON 所用材料是: 水泥、细砂、粉煤灰、钢纤维及减水剂。钢纤维为高强光圆直钢丝, 抗拉强度 1000MPa, 直径