

钢纤维混凝土应用技术

樊承谋 赵景海 程龙保 编著

黑龙江科学技术出版社

一九八八年 哈尔滨

序

将钢纤维掺入混凝土，能显著地提高混凝土的断裂韧性、抗冲击强度、抗弯强度以及抗疲劳性，使属于脆性材料的混凝土转变为具有良好塑性的材料。正由于钢纤维混凝土这一系列优良性能，在问世不久就获得相当广泛的应用。并且从其具有吸收大量能量的能力来看，是用于抗震结构的一种很有前途的材料。

美国、西欧一些国家和日本在七十年代即开始认真研究钢纤维混凝土，目前已进入推广应用阶段。我国在七十年代后期开始这方面的研究，并已经在隧道、水工构筑物、道路等方面试用。这本书汇集了国内外有关的研究和应用的成果，系统地介绍了钢纤维混凝土的性能、计算原理、制造工艺和应用技术，将有助于在我国进一步开展理论和应用的研究，并促进推广应用这项新技术。

王光远

1986年8月

前 言

近年来,纤维水泥与纤维混凝土已从原来仅用石棉纤维增强水泥发展到采用钢纤维、玻璃纤维、碳纤维、聚丙烯等有机合成纤维以及木材、剑麻、亚麻等植物纤维来增强水泥和混凝土。1966年美国混凝土学会增设了纤维混凝土委员会 (ACI Committee 544), 继而国际标准化协会也增设了纤维增强水泥制品技术标准委员会 (ISO TC 77)。1973年在渥太华和1975年在伦敦先后召开了两次纤维水泥及混凝土的国际会议, 其中以钢纤维混凝土的论文占多数。

钢纤维混凝土得到较快发展的原因是, 钢纤维与混凝土的弹性模量比大, 钢纤维在水泥基体中的化学稳定性好, 并且其增强机理的研究已有一定基础。所以美、日、英等国已进入推广应用的阶段。

我国从七十年代开始研究, 并进行试用。

但由于所采用的钢纤维都是各个部门零星制作的, 规格不一且价格较高, 影响了钢纤维混凝土的推广应用。黑龙江省庆安钢铁厂在考察国内外情况的基础上, 从美国引进了目前世界上最先进的熔钢抽丝法钢纤维生产线, 既生产价格低廉的碳钢纤维, 也生产不锈钢纤维, 为我国推广应用这项新技术创造了良好的条件。同时, 也有利于对钢纤维混凝土进行深入的研究, 以便在我国制订统一的钢纤维混凝土设计、施工以及试验测定标准。

编写本书的目的在于为工程技术人员提供钢纤维混凝土的性

能、试验测定方法、制造和应用技术等方面的知识，希望能有助于在我国推广应用这项新技术，以利四化建设。由于作者所掌握的国内外文献资料不足，且水平有限，难免存在缺点和错误，请批评指正。

本书第一章由樊承谋、赵景海编写，第二章由程龙保编写，第三、四、五、六章由赵景海编写，全书由樊承谋主编定稿。

樊承谋 赵景海 程龙保

1986年8月 于哈尔滨

目 录

序

前言

第一章 钢纤维混凝土的性能

1—1 概述.....	1
1—2 钢纤维混凝土的力学性能.....	2
1—3 钢纤维混凝土的主要物理性能.....	39
1—4 钢纤维混凝土的耐久性.....	42
1—5 钢纤维混凝土力学性能的预测.....	48
1—6 钢纤维钢筋混凝土.....	58

第二章 钢纤维的制造方法和主要性能

2—1 钢纤维的种类.....	99
2—2 钢纤维的制造方法	101
2—3 钢纤维的尺寸和形状	106
2—4 钢纤维的主要性能	109
2—5 钢纤维的包装	112
2—6 庆安钢铁厂的钢纤维生产	112

第三章 钢纤维混凝土的配合比设计

3—1 概述	117
3—2 钢纤维在混凝土中分散的均匀性及影响因素	119
3—3 钢纤维混凝土各组分含量对混合料和易性的影 响.....	123
3—4 钢纤维混凝土的配合比设计	126

第四章 钢纤维混凝土的试验方法

- 4—1 试验方法与材料性能的关系137
- 4—2 实验室中纤维混凝土的制作方法141
- 4—3 用于纤维混凝土强度和初度试验的试件制作方
法143
- 4—4 用于喷射成形的纤维混凝土强度和初度试验的
试件制作方法151
- 4—5 纤维混凝土抗弯强度和抗弯初度的试验方法
.....153
- 4—6 纤维混凝土抗剪强度的试验方法158
- 4—7 纤维混凝土抗压强度和抗压初度的试验方法
.....161
- 4—8 纤维混凝土中纤维体积率的测定方法166
- 4—9 纤维粘结性能的试验方法171

第五章 钢纤维混凝土的施工

- 5—1 概述175
- 5—2 搅拌176
- 5—3 运输、浇灌、振捣及养护181
- 5—4 钢纤维的表面处理182
- 5—5 喷射成形的钢纤维混凝土183
- 5—6 施工质量评估187

第六章 钢纤维混凝土的应用

- 6—1 路面、桥面及飞机跑道等工程中的应
用198
- 6—2 隧道、矿井及护坡等工程中的应用210

6—3 水工构筑物中的应用	218
6—4 建筑结构工程中的应用	231
6—5 耐热工程中的应用	239
主要参考文献	243

第一章 钢纤维混凝土的性能

1—1 概 述

钢纤维混凝土或称钢纤维增强混凝土 (Steel fiber reinforced concrete, 简称S.F.R.C)出现于本世纪初。1907~1908年,苏联B.П.Некрасов开始用金属纤维增强混凝土。1910年美国H.F.Porter发表了有关短钢纤维增强混凝土的研究报告。在以后的五十年中,英国、法国、德国和美国的学者先后提出用钢纤维提高混凝土的耐磨性、抗裂性以及制造钢纤维混凝土管的专利和改进钢纤维形状、提高钢纤维与混凝土基体粘结强度的专利。但是,由于这些研究和专利对于纤维增强机理基本上没有解释和说明,因而限制了这种复合材料在工程结构中的推广应用。

1963年美国J.P.Romualdi等人提出了钢纤维的阻裂机理(或称纤维间距理论),引起了广泛的重视,从而促进了钢纤维混凝土的发展。七十年代初,美国研制成功了熔钢抽丝法,得以廉价制造钢纤维,为钢纤维混凝土的实际应用铺平了道路。目前以美国、日本和英国发展较快,在大量研究工作的基础上,建造了不少试验性工程。美国钢纤维的产量从1975年的5,000吨发展到1983年的10,000吨,其中碳钢纤维约8,000吨,不锈钢纤维约2,000吨。日本1980~1982三年间生产钢纤维9,000吨,1983年达到年产5,000吨。七十年代末美国混凝土协会(ACI)544委员会首先制订了《纤维混凝土试验方法》,日本土木学会于1983年制订了《钢纤维混凝土设计施工指南》,日本混凝土工程协会(JCI)

于1984年制订了《钢纤维混凝土试验方法标准》，为钢纤维混凝土的大量推广应用创造了条件。

我国七十年代开始研制钢纤维混凝土。国防科委、建材研究院、空军工程学院、冶金部建筑研究总院、南京工学院、华东水利学院以及浙江水利水电科研所等单位对钢纤维混凝土的基本性能和增强理论都进行了大量的研究。八十年代以来已在多处工程中试用。

钢纤维混凝土是混凝土科学中新兴的分支，如果我们今后能在基本理论和应用研究并重的情况下不断前进，那么肯定会在不长的时间里，与一些技术先进的国家并驾齐驱。

1—2 钢纤维混凝土的力学性能

1—2—1 钢纤维混凝土受力特征及影响因素

钢纤维混凝土受弯工作最具典型代表性，并且其实用意义也最广泛。图1—1示出钢纤维混凝土和普通混凝土受弯时的典型荷载——变形曲线。以钢纤维混凝土达到极限荷载 P_{max} 的B点为界，可将曲线分为I、II两个阶段。在第I阶段荷载从零增至发生初裂的A点为a区，在这个区段中，荷载——变形曲线基

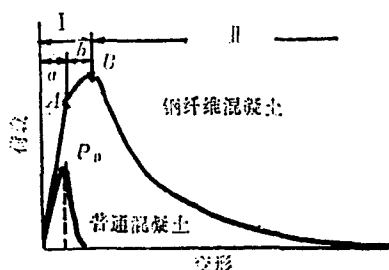


图1—1 钢纤维混凝土和普通混凝土的荷载——变形曲线

本为一直线。此时基体通过界面粘结力将荷载传至纤维，而纤维约

束微细裂缝的扩展，二者变形协调处于弹性阶段，钢纤维与混凝土基体作为一个整体共同承担荷载，使初裂荷载显著提高，反映了钢纤维混凝土的第一个长处。

从初裂荷载的A点到极限荷载的B点为b区。在这个区段中，由于仍处于弹性阶段的钢纤维通过界面粘结力横贯裂缝传递内力，钢纤维混凝土仍能继续增加荷载，混凝土基体的裂缝随荷载增长而逐渐扩展，变形的增长率也随之加大，荷载——变形曲线逐渐弯曲，钢纤维混凝土处于弹塑性阶段，这就是钢纤维混凝土裂后强度增长的阶段，反映了它的第二个长处。

从极限荷载的B点直至破坏为第Ⅱ阶段。由于钢纤维与混凝土基体之间的界面粘结强度达到极限，钢纤维逐次被拔出，钢纤维混凝土的承载能力逐渐减小直至破坏。在这个过程中，由于数目众多的钢纤维脱粘而拔出，需吸收很大的能量，因此钢纤维混凝土的荷载——变形曲线逐渐缓慢地下降，呈现良好的塑性*，与普通混凝土的脆性形成明显的对比，反映了钢纤维混凝土的第三个长处。通常将这种吸收大量能量的性能称之为韧性。

对于纤维乱向散布的钢纤维混凝土来说，其破坏特征是纤维拔出，因此采用弯钩纤维、波形纤维等各种异形钢纤维，或在纤维表面涂层以提高界面粘结强度，能显著地提高承载能力，但在一般情况下，难以改变拔出破坏这个特征。如果采用聚合物浸渍钢纤维混凝土，则可进一步提高界面粘结强度，使钢纤维的抗拉强度得到充分利用，钢纤维混凝土将因纤维拉断而破坏。此时由于复合材料各种组分的潜力都得到应有的利用，其承载能力将成倍

* 在某些论著中，从混凝土基体的角度出发，称为“假塑性”、“准塑性”、“假延性”等等。

地提高。

钢纤维混凝土优于素混凝土主要是纤维增强的结果，因此在一般采用光面圆直纤维的情况下，在影响力学性能的诸因素中，纤维率（一般指体积百分率）、纤维直径、长度及长径比起决定性作用。此外还有下列影响因素：

1. 混凝土基体的性质：水灰比、粗集料最大粒径及含率、砂率、含气率、水泥种类、养护方法以及龄期等等。
2. 钢纤维的性质：钢材种类、纤维形状（圆形或片状、平直或波形、变截面或弯钩等）纤维表面处理以及硬度等等。
3. 钢纤维在基体中分散的均匀性和方向性。
4. 钢纤维与基体界面的粘结性能。

1—2—2 钢纤维混凝土的抗裂性

抗裂性是指钢纤维在脆性的混凝土基体中阻滞裂缝扩展的作用。应当指出，纤维只起阻滞作用，而不能阻止发生裂缝，因为纤维对微观裂缝的引发几乎不起作用。

钢纤维的阻裂作用主要表现为：

1. 阻滞微裂缝扩展为肉眼可见的裂缝

应当指出，在一般的描述中所谓“未出现裂缝”，仅仅是指未出现肉眼可见的裂缝。钢纤维能阻滞微裂缝扩展为肉眼可见的裂缝。R.H. Elvery指出，未加钢纤维的钢筋混凝土试件在加荷试验以前，在空气相对湿度为60%的条件下风干21天后，便出现大量的收缩裂缝，而在相同条件下含有钢纤维的对照试件，甚至在风干520天后，也未发现任何裂缝。

C.D. Johnston指出，厚度为102和127mm的素混凝土公路面层，经三个半月每周稍低于1000车次的使用之后，因开裂严重而

不得不更换。而厚度相同，纤维率为1% (79kg/m^3) 的钢纤维混凝土的面层，经12个月总共50000车次的使用之后，未出现裂缝。

2. 在同一裂缝宽度下提高承载能力

在荷载作用下，由于纤维的阻裂作用，减小了裂缝随荷载提高而扩展的增长率，因此当钢纤维混凝土和素混凝土在荷载作用下，裂缝都扩大到同一宽度时，前者因一部分荷载由横贯裂缝的纤维承担，所以其承载力高于后者。承载力提高的程度随纤维率增长而增长。

应当指出，所谓初裂强度实质上是指在标定的初裂宽度下的强度指标。目前由于对初裂宽度的标定不一，且量测方法差异颇大，以致有关文献中的初裂强度相差悬殊，有的甚至超过100%。D.J.Hannant认为，在实际应用中，可将“开裂”定义为出现肉眼刚可见到的宽度约为0.05mm的裂缝。空军工程学院章文纲等在分析钢纤维混凝土的抗弯强度时，按裂缝宽度为0.02mm时的荷载定为初裂荷载。由此可见，规定统一的初裂宽度，有利于进一步开展研究和推广应用。

从图1—1可以看到，钢纤维混凝土抗弯的初裂荷载比素混凝土显著提高。抗拉、抗压及抗剪的初裂荷载也都有不同程度的提高。

图1—2示出弯曲时钢纤维混凝土的初裂荷载随纤维率而增长的情况，图1—3示出裂缝宽度 $\delta = 0.2\text{mm}$ 时钢纤维混凝土与素混凝土抗弯承载力比值随纤维率增长而提高的情况。

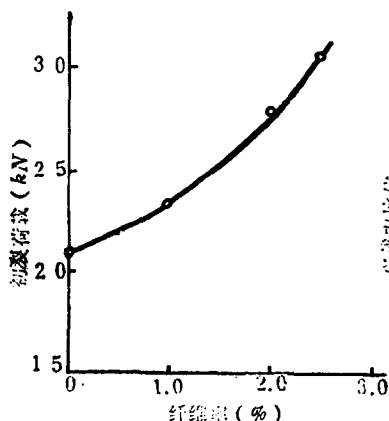


图1—2 弯曲时初裂荷载与纤维率的关系

(钢纤维尺寸 $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$; 粗集料最大粒径 $G_{\max} = 10\text{mm}$; 水灰比 $w/c = 0.5$; 试件尺寸 $10 \times 10 \times 30\text{cm}$)

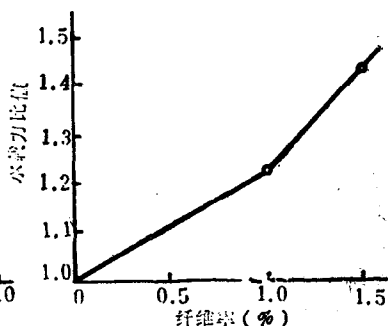


图1—3 裂缝宽度 $\delta = 0.2\text{mm}$ 时抗弯承载力与纤维率的关系

(钢纤维 $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$; 粗集料最大粒径 $G_{\max} = 10\text{mm}$; 水灰比 $w/c = 0.5$)

3. 减小裂缝宽度增加裂缝密度

钢纤维混凝土在张拉荷载作用下,当裂缝形成以后,横贯裂缝的钢纤维承受一定的拉力。当张拉荷载继续增大时,钢纤维中的拉力也随之增大。与此同时,这个拉力促使原有裂缝之间未裂的混凝土中拉应力增长,而形成新的裂缝。这样形成的裂缝,比不含纤维的混凝土中的裂缝宽度小而密度大。

这种抗裂效果对钢筋混凝土甚为有利,如果在钢筋混凝土梁的拉力区使用钢纤维混凝土,与普通钢筋混凝土梁比较,则在同一裂缝宽度下,纵向钢筋中的应力就可以提高。R.N.Swamy等通过拉力区掺入钢纤维(纤维尺寸为 $0.4 \times 25\text{mm}$,纤维率为2%)

的钢筋混凝土梁的载荷试验指出,使用特性强度为700 MPa的高屈服点钢筋时,在设计荷载下的裂缝宽度仅为0.1~0.19mm。这就为高屈服点钢筋的应用提供了途径。

4. 在冲击荷载作用下防止崩解

钢纤维混凝土在冲击荷载(不包括爆炸冲击)作用下,显示出虽裂而不碎的特性。

这种特性能减少溢洪道、闸门等水工构筑物因气蚀带来的危害。因为纤维混凝土在气蚀荷载作用下,即使局部破裂,但乱向分布的纤维仍能将碎块连系在一起,减缓了气蚀破坏的进程。

5. 在疲劳荷载作用下阻滞裂缝的扩展

6. 在高温作用下抑制形成大裂缝和防止剥离

1—2—3 钢纤维混凝土的韧性

材料的韧性是指在受力破坏前吸收能量的性能,可以荷载—变形曲线下的面积度量。从图1—1可见,钢纤维混凝土的韧性远大于素混凝土。

材料具有较好的韧性(或称为延性)利于在工程结构中的应用。在静荷载作用下,能提高结构的安全度,我国国家标准《建筑结构设计统一标准》第20.8条中规定,采用延性破坏材料的结构物的安全度可靠指标 β ,可比用脆性材料的结构物降低0.5,因此就可减少材料的用量,获得可观的经济效益。在动荷载作用下,则可提高抗冲击的性能。

目前在国际上尚无统一的韧度指标。各国之间存在的差异主要是两个方面:第一是对变形限值的规定不一,例如对于受弯构件,美国混凝土协会(ACI)的纤维混凝土委员会(544委员会)以相对挠度 $f/l \geq 1/160$ 时的挠度值为准,他们所采用的标准试件

尺寸为 $4 \times 4 \times 14$ 吋(跨度为12吋), 因此其挠度限值为 $12/160 = 0.075$ 吋, 即1.9mm; 日本混凝土工程协会(JCI)纤维混凝土分委员会则以相对挠度 $f/l \geq 1/150$ 时的挠度值为准; 我国空军工程学院建议以 $f/l \geq 1/250$ 时的挠度值为准。第二是表达方式不同。美国ACI 544采用初度指数 I_t 来表达(图1—4a);

$$I_t = \frac{A_1 + A_2}{A_1} \quad (1-1)$$

式中 A_1 ——从0点到出现可见裂缝时的荷载(即初裂荷载) P_{cr} 这段曲线下的面积;

A_2 ——从 P_{cr} 到挠度为1.9mm时曲线下的面积。

日本JCI则以从0点到挠度限值整个曲线下的面积为初度指标(图1—4, b)。由于所采用的受弯试件跨度为300mm, 故其挠度限值为2mm。

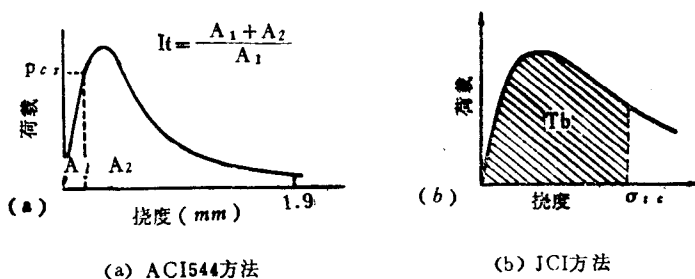


图1—4 确定初度指标的方法

空军工程院所采用的初度指标与日本JCI的相同, 由于试件的跨度为450mm, 故其挠度限值为 $450/250 = 1.8$ mm。图1—5示出空军工程学院采用400号和600号混凝土制作的钢纤维混凝土与素混凝土的初度比随纤维率增长而提高的情况, 从图中可

见，钢纤维混凝土的韧度比素混凝土能提高30~100倍。

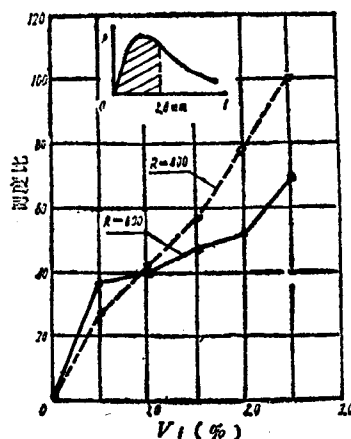


图1—5 弯曲韧度比与纤维率的关系

(钢纤维直径 d : 0.45, 0.5, 0.7mm; $l/d = 60 \sim 109$,
 $G_{max} = 10\text{mm}$; 试件 $15 \times 15 \times 30\text{cm}$)

1—2—4 抗弯强度

在1—2—1 节中我们根据钢纤维混凝土受弯时的荷载——变形曲线，介绍了受力各个阶段的特征，特别是裂后承载的工作特征。现在讨论各个阶段的破坏机理。从图1—6中可见，在弹性阶段 I_e ，中性轴位于构件截面中央，受压区和受拉区的应力相同；在塑性阶段 I_b ，由于裂缝扩展，受拉区应力减小，中性轴上升；进入塑性区后，由于纤维开始被拔出，受拉区表层的应力降到0，而中性轴继续上升。根据钢纤维混凝土弯曲试验的数据，当达到抗弯极限强度时，中性轴约上升到距受压面层 $h/4$ 处，因此可将求抗弯极限承载力的计算应力图形简化为图1—6， I'_b 所示的情况。按这个图形我们可以求得抵抗力矩为：

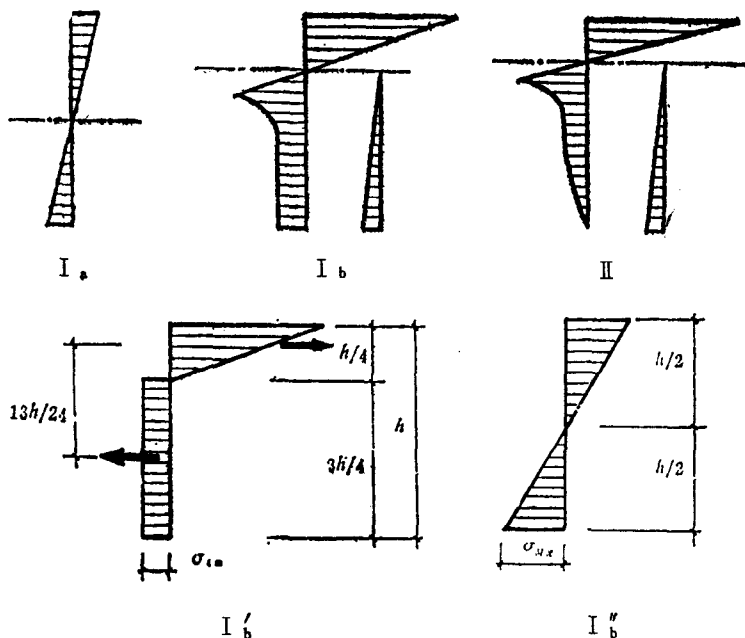


图1—6 钢纤维混凝土受弯时各阶段的应力图形及简化的计算应力图形

$$M = \sigma_{cu} \frac{3h}{4} \times \frac{13}{24} h = \sigma_{cu} \frac{13}{32} h^2$$

而通常是假定应力按图1—6, I''_b 分布, 与其相应的抵抗力矩为:

$$M' = \sigma_{sr} \frac{h^2}{6}$$

由于这两个抵抗力矩是等价的, 令 $M = M'$ 得抗弯极限强度为:

$$\sigma_{sr} = \frac{39}{16} \sigma_{cu} = 2.44 \sigma_{cu}$$