

超短超细 钢纤维增强混凝土 性能研究

石飞 熊卫士 应文宗 杨庆国 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

超短超细 钢纤维增强混凝土 性能研究

石飞 熊卫士 应文宗 杨庆国 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

由于普通钢纤维(长度20~40mm、直径0.5mm左右)和混凝土搅拌过程中易结团、分布不均,本书针对超短超细钢纤维(长度6mm、直径0.2mm)增强混凝土及其应用展开研究。通过大量试验研究了超短超细钢纤维增强水泥砂浆和超短超细钢纤维增强混凝土的力学性能,并研究了超短超细钢纤维和普通钢纤维共同增强混凝土的力学性能,分析了超短超细钢纤维对混凝土的增强机理,介绍了超短超细钢纤维增强混凝土的配合比。

本书可供土木工程的科技人员及相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

超短超细钢纤维增强混凝土性能研究 / 石飞等编著

— 北京:中国水利水电出版社,2012.11

ISBN 978-7-5170-0318-2

I. ①超… II. ①石… III. ①金属纤维—纤维增强混凝土—研究 IV. ①TU528.572

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第263342号

书 名	超短超细钢纤维增强混凝土性能研究
作 者	石飞 熊卫士 应文宗 杨庆国 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 6.75印张 107千字
版 次	2012年11月第1版 2012年11月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	20.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

普通钢纤维混凝土已经经历了几十年的应用和研究，作为超短超细钢纤维混凝土材料，本书的研究还仅是初步的，因此各方面的研究工作还不完善、不全面，但由于初步研究发现该材料具有较大的潜力和发展前景，通过本书的出版可公之于众，以引起注意，使更多人了解、研究和应用。

本书是在重庆市交通委员会科技项目的支持下完成的，在此表示感谢。伸缩缝混凝土修复工作是在重庆高速公路集团有限公司中渝营运分公司的大力支持下完成的，在此对他们的大力支持表示感谢。

本书的试验工作大部分是重庆交通大学研究生王龙飞完成的，同时研究生孙冠军、韩记明、王旭、张耀等均参与了试验和应用研究，在此对他们的辛勤工作表示感谢。

本书的编写得到了重庆交通大学易志坚教授的鼓励，并对研究工作给予了大力的支持和指导，在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中错误在所难免。本书的目的在于抛砖引玉，对于相关研究，期待有更加成熟的见解，对于书中错误，敬请读者批评指正。

作者

2012年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钢纤维混凝土的发展.....	1
1.2 钢纤维混凝土的性能.....	3
1.3 影响钢纤维混凝土增强效果的因素	4
1.4 超短超细钢纤维混凝土的优势	5
1.5 本书的研究内容	6
第 2 章 超短超细钢纤维的种类和型号	7
2.1 熔抽耐热不锈钢纤维.....	7
2.2 钢板剪切钢纤维	9
第 3 章 超短超细钢纤维增强水泥砂浆试验研究	10
3.1 试验概况	10
3.2 试验设计	11
3.3 试验方法	13
3.4 剪切型超短超细钢纤维增强中粗砂砂浆性能试验分析	15
3.5 熔抽型超短超细钢纤维增强中粗砂砂浆性能试验结果分析	26
3.6 不同类型钢纤维增强中粗砂砂浆强度试验结果分析	32
3.7 熔抽型超短超细钢纤维增强砂浆（特细砂）强度试验分析	35
3.8 超短超细钢纤维砂浆的韧性	38
第 4 章 超短超细钢纤维砂浆收缩研究	40
4.1 自由收缩试验与测量方法评价	40
4.2 约束收缩试验方法及其评价	42
4.3 超短超细钢纤维砂浆收缩	47
4.4 超短超细钢纤维对混凝土收缩的影响和改进.....	52

第 5 章 超短超细钢纤维增强混凝土力学性能研究	53
5.1 试验概况	53
5.2 试验设计	53
5.3 试验设备和试验方法	55
5.4 长度 6mm 熔抽型超短超细钢纤维混凝土性能试验结果分析	56
5.5 长度 13mm 熔抽型超细钢纤维混凝土性能试验结果分析	60
5.6 不同尺寸钢纤维混杂增强混凝土性能试验结果分析	62
第 6 章 超短超细钢纤维混凝土的增强机理	65
6.1 引言	65
6.2 混凝土的破坏过程分析	66
6.3 超短超细钢纤维的阻裂原理	67
6.4 超短超细钢纤维增强混凝土的基本理论	68
6.5 本章小结	76
第 7 章 配合比设计	77
7.1 钢纤维替代细骨料法	78
7.2 钢纤维替代粗细骨料的搭配法	79
7.3 二次合成法	80
7.4 以抗压强度为主控的配合比设计方法	85
7.5 超短超细钢纤维混凝土配合比设计方法	92
第 8 章 工程应用、结论与展望	93
8.1 工程应用	93
8.2 主要结论	96
8.3 展望	97
参考文献	98

第 1 章 绪 论

1.1 钢纤维混凝土的发展

钢纤维混凝土 (Steel Fiber Reinforced Concrete, 简称为 SFRC) 是以水泥浆、砂浆或混凝土为基体, 在普通混凝土中掺入乱向分布的短钢纤维所形成的一种新型复合材料。

水泥浆、砂浆与混凝土的主要缺点是塑性收缩大、抗拉强度低, 极限延伸率小、脆性大, 掺加抗拉强度高、极限延伸率大的钢纤维可以部分克服上述缺点, 改善水泥砂浆和混凝土的性质。钢纤维混凝土不仅具有普通混凝土的优良特性, 同时由于钢纤维限制了裂缝的开展, 从而使原来脆性的混凝土材料呈现出很高的抗裂性能并能推迟裂缝的出现, 使混凝土具有较大的延性和韧性以及优良的抗拉、抗折、抗冲击、耐磨损、抗疲劳等特性。

随着研究的深入, 钢纤维混凝土的应用日益广泛。

钢纤维混凝土最早出现于 20 世纪初, 1907 年俄国开始用金属纤维增强混凝土; 1910 年美国的 H. F. Porter 发表了短钢纤维的研究报告; 1911 年美国的 Graham 曾把钢纤维掺入普通混凝土中。1963 年美国学者 J. P. Romualdi 和 G. B. Baston^[1~5]发表了一系列钢纤维阻裂机理的论文, 提出了著名的“纤维间距理论”, 即认为钢纤维混凝土的开裂强度是由对拉伸应力起有效作用的钢纤维平均间距所决定的理论, 这引起了广泛的重视, 从而促进了钢纤维混凝土的发展。20 世纪 70~80 年代是钢纤维混凝土, 特别是钢纤维高强混凝土与超高强混凝土的研究和开发应用十分活跃的时期。

在美国, 钢纤维混凝土的研究和开发主要由 Battele 公司和陆军工程兵部门建筑技术研究所进行。此外, 伊利诺大学受联邦铁路局的委托进行了钢纤维混凝土在地下铁道衬砌中应用的研究。同时, 也广泛开展了路面铺设和

喷射钢纤维混凝土的研究。美国在高层建筑中已经大量采用纤维增强预制墙板、阳台、波纹板和空心楼板，铺设了大量公路路面和桥面。美国较有代表性的应用实例为得克萨斯州胡德堡坦克停车场罩面工程，因采用钢纤维混凝土作护面材料，使用寿命提高了近 8 倍；丹佛国际机场采用了掺粉煤灰的纤维混凝土，显著减少了铺面厚度，节约了大量投资^[6-8]。

在加拿大，拉法尔格水泥应用研究中心和工业材料研究院合作，于 1985 年建立了北美最大的纤维混凝土私营实验室，进行了钢纤维混凝土路面铺设试验。试验表明，当用玻璃纤维增强时路面厚度可减少 20%^[20]，用钢纤维增强时路面厚度可减少 45%^[7]。阿尔伯特州交通部自 1950 年起即开始了建造钢纤维简支梁构件。此外，钢纤维混凝土还广泛应用于桥面铺装、桥梁局部补强和加固、水管制造等方面^[7]。

在欧洲，英国 National Standard Co. 和 Johnson & Nephew Co. Ltd. 两公司，以及丹麦 B. B 海德豪森公司首先建立了纤维增强水泥和混凝土专业工厂，英国谢菲尔德大学 R. N. Swamyfzs 研究组则积极开展纤维增强混凝土的基础理论和设计施工方面的工程实际问题研究，取得了一系列成果。钢纤维混凝土成功地应用于伦敦希思罗机场高层停车场的预制地板，法兰克福国际机场跑道和停机坪的改建工程，瑞典岩石稳定和结构加固工程。在欧洲，钢纤维混凝土应用最广的是工业建筑中的地板和墙板，以及路面铺装，其次为隧道衬砌和各种预制建筑构件^[3]。

在日本，首先于 1973 年，由日本钢管株式会社用切断冷延薄钢板的方法生产商品钢纤维，接着于次年住友金属株式会社同样方法制造出异形钢纤维向市场出售。1977 年新日本制铁株式会社也先后步入生产钢纤维的行列。而后东京大学成功研制出机械切削生产钢纤维的新方法，使生产便宜而优质的钢纤维成为可能。日本各株式会社纷纷开展钢纤维混凝土研究开发工作，并推广应用于建筑结构、隧道衬砌（如中央高速公路惠那山隧道）、路面铺装、机场跑道、桥面和结构局部补强等方面^[8-11]。

在我国，研究和应用钢纤维混凝土开始于 20 世纪 70 年代，同美国和日本等发达国家相比，我国在钢纤维混凝土的开发应用上还有很大差距，但近 20 多年，发展非常迅速。全国已有几十家钢纤维的生产厂家，品种齐全，年生产量大，应用范围日益广泛，应用领域不断拓宽。近年来，钢纤维混凝

土已在矿业工程、地下工程、路面和机场跑道、铁路轨枕、桥梁结构、建筑工程、水工建筑等许多工程领域得到应用。随着钢纤维混凝土材质的提高、工艺的改进、机理探讨的逐步深入,现在钢纤维混凝土已开始应用于新型长大建筑结构中^[12-14]。

1.2 钢纤维混凝土的性能

近年来,国内外对钢纤维混凝土的研究已日趋深入,对其一些基本性能已经有了较系统的认识。

钢纤维混凝土的性能与钢纤维类型、几何形状、掺量(体积百分率)、钢纤维的长径比、基体混凝土材料的性能及钢纤维与基体材料之间的黏结特性有关。根据大量的研究资料以及钢纤维混凝土的研究成果,钢纤维混凝土具有以下几方面特性。

(1) 比强度高(比强度=强度/密度)。这是钢纤维混凝土具有优越经济性的重要指标,也是它具有广阔应用前景的重要保证^[15-17]。抗拉强度和主要由主拉应力控制的抗剪、抗弯、抗扭强度明显提高。当纤维掺量在1%~2%范围内,抗拉强度提高25%~50%,抗弯强度提高30%~80%,用直接双面试验所测定的抗弯强度提高50%~100%。抗压强度提高幅度较小,一般在0~25%^[18-20]。

(2) 变形性能明显改善。钢纤维对混凝土抗压弹性模量影响不显著,受拉弹性模量随纤维掺量的增加约提高0~20%^[19]。钢纤维混凝土的韧性比素混凝土大大提高。在通常的纤维掺量下,抗压韧性可提高2~7倍,抗弯韧性可提高几倍到几十倍^[21];弯曲冲击韧性可提高2~4倍^[19,22],板式试验落锤法击碎试验所测得的冲击韧性可提高几倍到几十倍^[22]。

(3) 抗收缩和徐变性能有所提高。钢纤维混凝土的收缩值随着掺量的增加而有所降低。例如,掺量为1.5%(长径比为50)的钢纤维混凝土较普通混凝土的收缩值降低7%~9%^[23]。持续荷载下钢纤维混凝土的受压徐变比相同条件的普通混凝土有所降低^[21]。

(4) 抗裂和抗疲劳性能有较大改善。由于钢纤维对混凝土的阻裂作用,钢纤维混凝土比素混凝土具有更好的韧性和抗疲劳性能^[24,25]。例如,掺有

2%的钢纤维混凝土抗压疲劳寿命达到 2×10^6 次时, 应力水平可达到 0.92, 而普通混凝土的应力水平为 0.56^[26]。

(5) 具有较好的物理耐久性和化学耐久性。钢纤维混凝土在各种物理因素作用下的耐久性一般来说都有不同程度的提高, 其中耐久性、耐热性和抗气蚀性有显著提高, 抗渗性能与普通混凝土相比没有明显提高变化^[16,17,27], 国内外学者做了大量的耐化学腐蚀性试验和现场暴露试验, 几乎得出一致的结论: 钢纤维混凝土在空气、污水和海水中都表现出良好的耐腐蚀性。

钢纤维混凝土在土建工程中应用广泛, 应用前景十分广阔。近 20 年来, 国内外对钢纤维混凝土的力学和结构性能做了大量的研究, 并将其用于道路、桥梁、隧道、水利、海洋、建筑和耐火材料结构等各项工程中。因此针对钢纤维混凝土进一步研究和开发, 在工程实践中具有重要意义。

1.3 影响钢纤维混凝土增强效果的因素

钢纤维混凝土中乱向分布的短纤维主要作用是阻滞混凝土内部微裂缝的扩展和阻滞宏观裂缝的发生和发展, 因此, 其抗拉强度和由主拉应力控制的抗弯、抗剪、抗扭强度等有明显的改善作用。

根据钢纤维增强机理的各种理论, 诸如纤维间距理论、复合材料理论以及大量试验数据的分析, 纤维的增强效果主要取决于基体强度、纤维的长径比、纤维的体积率、纤维与基体间的黏结强度以及纤维在基体中的分布和取向的影响。

当钢纤维破坏时, 大都是纤维被拔除而不是被拉断, 因此改善纤维与基体间的黏结强度是改善纤维增强效果的主要控制因素之一。

改善的办法有三种:

(1) 增强纤维的黏结长度 (即增加长径比), 但纤维太长易于成团, 会影响拌和物的和易性和施工质量, 导致强度降低。所以普通钢纤维长度一般为 20~40mm, 最长不超过 60mm, 长径比一般在 40~120 之间。

(2) 改善基体对钢纤维的黏结性能, 例如掺入 10% 硅灰可使钢纤维的黏结强度提高 20%, 抗折强度提高 40%。

(3) 改善纤维形状, 增加纤维与基体间的摩阻和咬合力。纤维分布和趋

向的影响也是很重要的。若能使纤维分布于受拉区,并按受拉方向定向排列,则增强效果将大大加强。

1.4 超短超细钢纤维混凝土的优势

钢纤维混凝土材料具有较高的抗压强度、抗折强度和优良的抗裂性能,因此在公路路面和桥梁结构中得到了广泛的应用。

然而,传统的钢纤维混凝土采用的钢纤维的直径较粗一般为 0.5mm,长度较长一般 30mm 左右 (20~40mm),因此在钢纤维混凝土在使用中存在着以下两个主要问题:

(1) 力学性能改善幅度有待提高:传统钢纤维的掺入量较小,一般达到体积率的 1.5% 左右时,钢纤维结团严重,无法继续增加钢纤维掺量,因此致使钢纤维混凝土的力学性能受到钢纤维掺量的限制,无法继续提高。

(2) 钢纤维混凝土的施工性有待进一步改善:普通钢纤维的长度偏大,拌和物流动性差,从而施工难度增加。甚至高含量时由于纤维分布不匀,其强度可能反而会下降。

显然,采用传统钢纤维制作出的钢纤维混凝土材料无法克服以上两个问题,从而限制了钢纤维增强混凝土优良性能的进一步发挥。

既然钢纤维增强混凝土的性能和效果主要取决于纤维和混凝土的黏结,因此将粗纤维变为细纤维必将增加黏结面积,同时为了改善施工性,可将纤维的长度降低,使之与骨料的尺度协调,基于以上认识和超高强混凝土研制的启示,作者提出了超短超细钢纤维增强普通水泥混凝土的思路,并进行了系列研究。

目前,超短超细钢纤维主要用于改善硅灰高强度混凝土的施工性和脆性。硅灰高强度混凝土的干缩大、养护困难,破坏时呈现脆性性质,一般只在特殊情况下使用。实践表明:超短超细钢纤维能够明显减小硅灰高强度混凝土凝固过程中的收缩、明显改善硅灰高强度混凝土的脆性,从而使硅灰高强度混凝土的应用成为可能。硅灰高强度混凝土在国内的研究还处于起步阶段。

在普通混凝土中加入超短超细钢纤维,以进一步提高钢纤维混凝土的工

作性和强度的研究还进行得较少。

本书的研究表明：超短超细钢纤维（长度为 6mm，直径为 0.2mm，小于普通钢纤维直径的 1/2）在混凝土中的体积掺量可达到 7%，和传统的钢纤维混凝土相比，超短超细钢纤维混凝土在保持了较好的工作性的同时，抗压强度和抗折强度提高幅度十分显著，破坏呈延性。特别值得一提的是，超短超细钢纤维混凝土的抗折强度可以达到 10MPa 以上。

针对超短超细钢纤维混凝土的应用研究，事实上得到了一种性能更加优良的新材料，其力学性能和参数均已超出了普通钢纤维混凝土的范畴。

对于超短超细钢纤维混凝土性能的充分了解和应用，为特殊情况下的工程结构提供了新的技术保证和支撑，其应用必将会提高实体工程的工程质量。

1.5 本书的研究内容

由于在水泥混凝土力学性能研究中，其试块尺寸相对较大，因此研究中首先针对超短超细钢纤维增强水泥砂浆进行试验研究，然后在其基础上展开了超短超细钢纤维增强水泥混凝土的试验研究，最后总结了钢纤维增强水泥混凝土的机理。

目前超短超细钢纤维主要有熔抽型和剪切型两种，本书针对这两种型号进行了较为详细的试验研究。

第 2 章 超短超细钢纤维的种类和型号

目前市场上的超短超细钢纤维有两种形式：一是熔抽耐热不锈钢纤维 (MELT-EXTRACTED STEEL FIBRES)；二是钢板剪切钢纤维 (Slit steel fibres)。

2.1 熔抽耐热不锈钢纤维

熔抽耐热不锈钢纤维 (MELT-EXTRACTED STEEL FIBRES)：原材料为不锈钢钢锭，用电炉将钢锭熔融成 $1500\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 的钢液，然后在钢液表面，以一个高速旋转的熔抽轮接近钢液，熔抽轮上按照所需钢纤维尺寸的要求，刻出许多槽子。当熔抽轮下降到钢液面时，钢液被槽刮出，以高速旋转的离心力抛出，以极快的速度冷却成形。熔抽轮内必须通水，以保持冷却速度。这种方法可以根据客户的要求生产出不同材质、不同尺寸的钢纤维。熔抽型超短超细钢纤维与普通钢纤维对比见图 2-1。

目前，熔抽钢纤维主要应用在耐火材料中，提高耐火材料的韧性、抗裂性、耐磨、抗剥落等性能，从而增加耐火材料的使用寿命。随着工业炉窑向高温、长寿命方向发展，炉窑的耐火材料衬里的使用条件越来越苛刻，如高温、急冷急热、热冲刷、热腐蚀、机械冲击、机械磨损等。这些条件将产生极强的热应力和机械应力。由于几乎所有的耐火材料都是具有脆性，在这种应力的作用下，极易产生脆裂脆断、剥落，致使耐火材料衬里的使用寿命很短，炉窑的运转率很低。为了改善耐火材料的脆性，在耐火材料基体中掺入具有韧性和高强度的耐热钢纤维，改变基体中应力分布，并且每根耐热钢纤维成为一个裂纹抑制器，阻止裂纹在耐火材料基体中的扩张，从而提高了耐火材料的抗裂性、抗剥落和韧性，加入钢纤维使耐火材料强化，增加了耐火材料的使用寿命。用钢纤维耐火材料作为炉窑耐火材料衬里，可以提高炉窑使

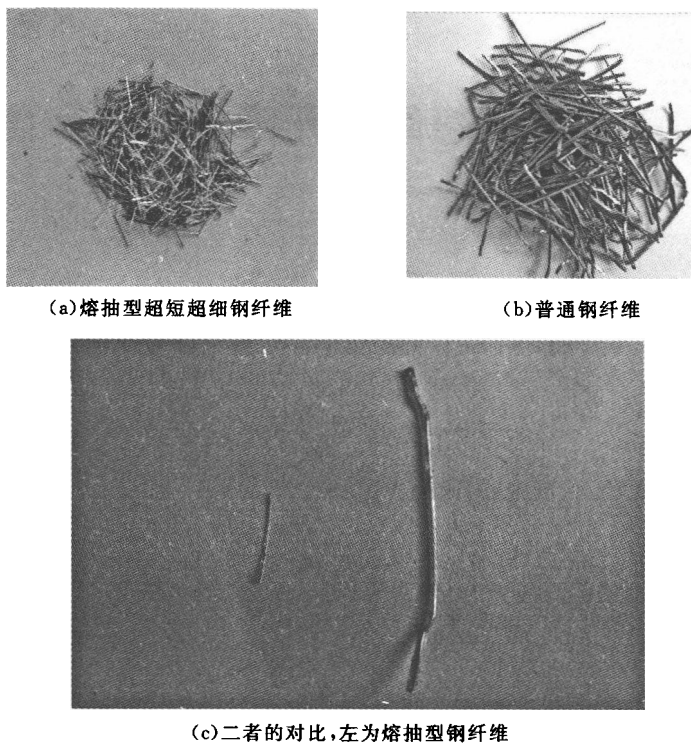


图 2-1 熔抽型超短超细钢纤维与普通钢纤维

使用寿命和运转率，减少维修次数，从而获得较大的经济效益。

但在普通的土木建筑工程中，熔抽钢纤维应用较少。当熔抽钢纤维应用于耐火材料时，需要进一步了解其在高温状态下的物理、化学和力学性能，然而在土建工程中应用时，仅需了解其常规物理力学性能。表 2-1 为熔抽型钢纤维的几何尺寸和力学性能。

表 2-1 熔抽型钢纤维的主要物理力学性能

钢纤维品种	长度 (mm)	直径 (mm)	长径比	密度 (t/m ³)	弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)
普通钢纤维	25	0.5	50	7.8	210	1000
熔抽钢纤维	6 (超短)	0.2 (超细)	30	7.8	240	>880
	13		65	7.8	240	>880

注 本表所列熔抽型钢纤维性能主要参考了鞍山科比特科技发展有限公司生产的熔抽型钢纤维产品以及其他厂家生产的产品性能。

2.2 钢板剪切钢纤维

钢板剪切钢纤维 (Slit steel fibres): 用冷轧薄钢板剪切而成。剪切前, 用特制的小型纵剪机将冷轧薄板剪成带钢卷, 钢卷宽度和钢纤维的长度相同, 然后将带卷连续送入旋转刀具或普通冲床切断, 旋转刀具的轴与薄板进给方向互相垂直。原材料一般采用退火的冷轧钢板, 为提高强度, 也可使用未退火的冷轧钢板。由于冷轧钢板的成本较高, 常采用边角料作为原材料以降低成本。图 2-2 是剪切型超短超细钢纤维与普通钢纤维对比图。

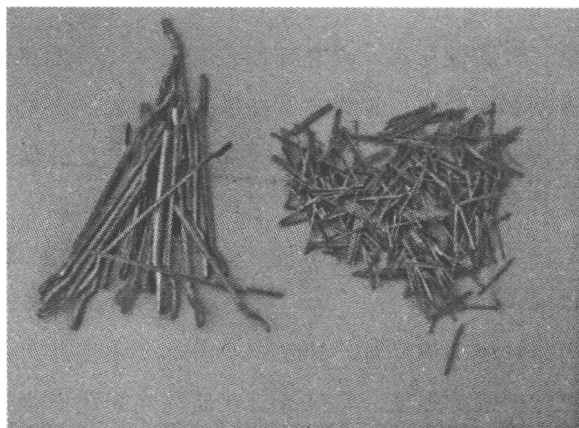


图 2-2 剪切型超短超细钢纤维与普通钢纤维

剪切型钢纤维的耐火性尚需进一步研究, 目前常用于土建工程, 表 2-2 为剪切型钢纤维的几何尺寸和力学性能。

表 2-2 剪切型钢纤维的种类及主要物理力学性能

钢纤维品种	长度 (mm)	直径 (mm)	长径比	密度 (t/m ³)	弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)
普通钢纤维	25	0.5	50	7.8	210	1000
剪切型超 细钢纤维, 剪切型钢纤维	6 (超短)	0.2 (超细)	30	7.8	210	>860
	13		65	7.8	210	>860

注 本表所列剪切型钢纤维性能主要参考了重庆庆港钢纤维有限公司生产的剪切型钢纤维产品以及其他厂家生产的产品性能。

第 3 章 超短超细钢纤维增强水泥砂浆试验研究

3.1 试验概况

水泥砂浆是一种脆性材料，具有韧性差、强度压折比高的缺点。为了增加砂浆的抗折强度和耐磨性，工程中常在砂浆中掺入一定量的钢纤维。但由于普通钢纤维（长度 20~40mm、长径比 40~120），尺寸偏大、搅拌过程中易结团，高含量时由于钢纤维分布不均，其强度可能反而会下降，所以通常工程中钢纤维的掺量一般不能超过 2%（体积含量），致使钢纤维的增强作用得不到充分体现^[28,29]。

本章试验把超短超细钢纤维、超细钢纤维加入水泥砂浆，来研究超短超细钢纤维增强水泥砂浆的强度。本试验旨在研究超短超细钢纤维、超细钢纤维增强水泥砂浆力学性能以及超短超细钢纤维砂浆弯曲韧性。

本章试验通过测试不同超短超细钢纤维、超细钢纤维、普通钢纤维体积率的钢纤维砂浆的抗压、抗折强度，进而研究它们的弯曲韧性，从宏观上得出超短超细钢纤维、超细钢纤维砂浆的力学特性，并与水泥砂浆、普通钢纤维砂浆相比，研究超短超细钢纤维增强水泥砂浆独特的力学性能和优势。试验主要在重庆交通大学建筑材料实验室进行。

3.1.1 试验内容

主要试验内容有：超短超细钢纤维水泥砂浆（长度 6mm、直径 0.2mm）、超细钢纤维水泥砂浆（直径 0.2mm、长度 9mm 与 13mm）、普通钢纤维（长度 25mm、直径 0.5mm）水泥砂浆、普通水泥砂浆的抗压强度、抗折强度、韧性试验。

3.1.2 钢纤维体积率

在不同基体砂浆强度下，超短超细钢纤维的体积率分别为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、5.0%、6.0%、7.0%；超细钢纤维的体积率为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%；普通钢纤维体积率为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%。

3.1.3 砂浆材料及强度等级

基体砂浆的材料分为两种：一种是由中粗砂、水、水泥组成的；另外一种是由特细砂、水、水泥组成的。

中粗砂基体砂浆有两种不同强度等级。

3.2 试验设计

3.2.1 试验原材料

(1) 水泥采用重庆拉法基有限公司生产的 P. O32.5 普通硅酸盐水泥。

(2) 细骨料为洞庭湖砂，细度模数为 3.0，属中粗砂；重庆河砂，细度模数 0.9，属于特细砂。

(3) 试验用水为自来水。

(4) 试验所用的钢纤维是由鞍山科比特科技发展有限公司生产的熔抽型超短超细钢纤维、超细钢纤维；重庆庆港钢纤维有限公司生产的剪切型超短超细钢纤维、超细钢纤维、普通钢纤维。其物理力学性能如表 3-1 所示。

表 3-1 钢纤维的种类及主要物理力学性能

钢纤维品种	长度 (mm)	直径 (mm)	长径比	密度 (t/m ³)	弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)
普通钢纤维	25	0.5	50	7.8	210	1000
剪切型超短 超细钢纤维	6	0.2	30	7.8	210	860
熔抽型超短超 细钢纤维	6	0.2	30	7.8	240	880