

钢纤维混凝土

蒋之峰编译

顾直青校订

冶金部建筑研究总院技术情报研究室

前 言

钢纤维混凝土是一种钢纤维和混凝土复合而成的新型材料。虽然钢纤维混凝土的研究、生产和应用的历史还不长，但因为它在抗裂、抗拉、抗弯、抗压、抗剪、耐冲击、耐磨损、耐冻融、耐疲劳、韧性、延伸率等方面具有良好的性能，可在广泛的领域中应用，因而越来越引起工程界的关注。

《钢纤维混凝土》系根据日本工学博士小林一辅著《纤维混凝土》、《最新混凝土技术》两书中有关钢纤维混凝土的章节编译。内容包括钢纤维混凝土的发展、钢纤维的制造方法、钢纤维混凝土的性能、增强机理、钢纤维的分散和排列、配合比、试验方法以及钢纤维混凝土的搅拌、浇灌、振捣、喷射和工程实例。叙述力求系统、简明扼要。

编译过程中，董凯尧同志、牛清山同志给予很多帮助，特此致谢。

由于本人水平所限，文中错误一定很多，诚恳欢迎批评指正。

蒋之峰

1984.3.10.

内容简介

《钢纤维混凝土》共九章。内容包括钢纤维混凝土的发展、钢纤维的制造方法、钢纤维混凝土的性能、增强机理、钢纤维的分散和排列、钢纤维混凝土的配合比、试验方法、施工及其应用实例。可供生产、施工、教学、科研单位有关人员参考。

钢纤维混凝土

蒋之峰编译

顾直青校订

冶金部建筑研究总院技术情报研究室

(北京德外学院路)

北京市朝阳区新村印刷厂印装

开本: 787×1092 1/32 印张: $4\frac{9}{32}$ 字数: 96千字

1984年7月印刷

(内部发行)

目 录

第一章 概要	(1)
1.1 钢纤维混凝土的定义	(1)
1.2 钢纤维混凝土的性能	(1)
1.3 钢纤维混凝土的发展	(2)
第二章 钢纤维混凝土中的钢纤维	(7)
2.1 钢纤维的四种制造方法	(7)
2.2 钢纤维的性质	(8)
2.3 钢纤维的包装	(11)
2.4 钢纤维的涂层	(12)
2.5 日本市场上销售的钢纤维	(12)
第三章 钢纤维混凝土的一般性质	(14)
3.1 概要	(14)
3.2 抗裂性能和变形能力 (韧性)	(14)
3.3 抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度及抗压强度	(17)
3.4 抗冲击强度和耐疲劳性能	(22)
3.5 弹性模量	(24)
3.6 耐久性	(24)
3.7 导热系数、耐热性能	(24)
第四章 增强机理	(27)
4.1 引言	(27)
4.2 纤维间距理论	(28)
4.3 纤维和混凝土复合原则	(30)
4.4 钢纤维混凝土增强机理	(32)

第五章 钢纤维的分散和排列	(34)
5.1 概要	(34)
5.2 钢纤维的分散	(36)
5.3 钢纤维的排列	(40)
5.4 钢纤维的定向方法及其应用	(47)
第六章 配合比	(51)
6.1 概要	(51)
6.2 根据抗拉强度或抗弯强度确定钢纤维混凝土的配合比	(51)
6.3 根据密实度确定钢纤维混凝土的配合比	(53)
6.4 外加剂的使用	(64)
第七章 试验方法	(65)
7.1 概要	(65)
7.2 试件的尺寸	(65)
7.3 试件的制作方法	(65)
7.4 抗弯强度和抗弯韧性试验	(66)
7.5 抗压强度和抗压韧性试验	(69)
7.6 抗拉强度试验	(70)
7.7 抗剪强度试验	(71)
7.8 工作性试验	(71)
7.9 钢纤维混凝土中钢纤维量的测定方法	(72)
7.10 其他试验方法	(73)
第八章 钢纤维混凝土的施工	(74)
8.1 概述	(74)
8.2 钢纤维混凝土的拌制方法	(74)
8.3 钢纤维的计量和投入	(82)
8.4 钢纤维混凝土的搅拌	(85)

8.5	钢纤维混凝土的运输	(88)
8.6	钢纤维混凝土的浇灌和捣实	(86)
8.7	钢纤维混凝土喷射施工	(89)
第九章	钢纤维混凝土的应用及工程实例	(96)
9.1	概述	(96)
8.2	铺设路面	(97)
9.3	隧道施工.....	(108)
9.4	道路桥梁施工.....	(118)
9.5	坡面防护.....	(123)
9.6	用于水坝及其他水工构筑物.....	(126)
9.7	建筑领域中的应用.....	(127)
9.8	混凝土预制构件.....	(129)
9.9	其他应用.....	(131)

第一章 概 要

1.1 钢纤维混凝土的定义

钢纤维混凝土是指把直径为0.3~0.6毫米、长为20~40毫米的短钢纤维按某个特定方向或随机方向均匀地掺入到混凝土中的一种新的复合混凝土。钢纤维的使用量一般为混凝土体积的1~2%（其重量约为80~150公斤/米³）。

1.2 钢纤维混凝土的性能

钢纤维混凝土与普通混凝土相比，其主要优点是：（1）抗裂性能好；（2）裂缝产生后，由于钢纤维对外力具有抵抗性，所以材料的韧性很高；（3）抗拉强度、抗弯强度以

表1.1 钢纤维混凝土的性能(纤维掺入率为2%)

性 能	与 普 通 混 凝 土 比 较
早期抗裂强度	1.5~2.0倍
抗拉强度和抗弯强度	1.5~1.8倍
延伸率	约 2 倍
抗压强度	1.0~1.3倍
抗剪强度	1.5~2.0倍
韧性	40~200倍
疲劳强度	有所改善
耐冲击性能	5~10倍
耐磨损性能	有所改善
耐热性能	显著改善
对冻融作用的抵抗性能	同上

及抗剪强度高；（4）抗冻融性能好等。

表1.1为钢纤维混凝土与普通混凝土的性能比较。

至多掺入2%的钢纤维后，混凝土性能得到了上述几点显著的改善，其理由将在《增强机理》中予以介绍。在这里，我们只想指出掺入混凝土中钢纤维的数量及其整个表面积的大小。

若钢纤维的尺寸为 $0.5 \times 0.5 \times 30$ 毫米，那么一根钢纤维的重量约为60毫克。以混凝土体积的2%掺入时，1立方米混凝土中钢纤维约为267万根，整个钢纤维的表面积将达160平方米。这个数约相当于同样钢材量的钢筋（ $\phi 16$ 毫米 $\times 5.5$ 米，1⁸根）整个表面积的32倍。

表1.1中所介绍的钢纤维混凝土的性能将受到诸多因素的影响，其中包括：混凝土中钢纤维的排列方向和分散情况，钢纤维的掺入率和外形尺寸以及混凝土配合比（水灰比、粗骨料最大粒径、细骨料的比率等）。就是说，决定钢纤维混凝土质量的因素很多，比起普通混凝土来要复杂得多。此外，钢纤维的排列情况（即钢纤维是按某个特定方向排列还是随机排列）随着施工方法（特别是振捣方法）和构件断面尺寸的变化而变化，这是钢纤维混凝土的特点之一。若能很好地利用这一点，即：使钢纤维按某个特定方向排列，钢纤维混凝土就可采用普通混凝土的施工方法进行施工，也能收到与钢筋混凝土构件同样的效果。

1.3 钢纤维混凝土的发展

有关钢纤维混凝土的最早文献见之于本世纪初。美国波特于1911年提出建议，开展在混凝土中均匀掺入钢纤维以作为增强材料的研究。其设想与现在的钢纤维混凝土大体相同。1911年，美国Graham通过研究，初步搞清了在普通混

凝土中掺入钢纤维后，强度和稳定性得以提高的道理。此后直至四十年代，美国、英国、法国、德国等国公布了许多有关钢纤维混凝土的专利文献。

日本在第二次世界大战中因军事需要开展了有关钢纤维混凝土的实验研究。据当时在原陆军中从事这项工作的净法寺博士介绍，所用钢纤维系把8#镀锌铁丝（直径4.2毫米）切成8~10厘米长，再以手工方法把它投入到圆筒形搅拌机内的混凝土中，并与混凝土均匀拌合，掺入量为混凝土量的1%以下。当时称此为“麻刀混凝土”。这种“麻刀混凝土”被用来进行防炸弹结构的试验，并与钢筋混凝土在耐爆性能方面进行对比分析研究，但还没有达到实用阶段。

导致钢纤维混凝土实用化的研究是由美国Romualdi(当时为卡纳西工业大学的副教授)等人于1963年进行的。他们相继发表了有关钢纤维控制混凝土开裂的一系列文献。根据Romualdi等人的研究，掺入钢纤维后混凝土的抗裂强度是由与抗拉应力相对应的钢纤维的平均间距决定的。这一研究成果成为后来美国贝特（Battelle）开发公司所拥有的两项专利的基础。

这些专利中，1969年被批准的专利3429094号“混凝土、钢材双向材料”不仅为现在有关纤维混凝土的技术打下了基础，而且对于将来开发钢纤维混凝土的应用技术具有极为重要的意义。因此，这是那些以钢纤维混凝土为研究课题的研究人员必读的参考文献。

迄今为止，阻碍钢纤维混凝土在工程中推广应用的主要原因是钢纤维的价格太高。但是，由于贝特开发公司贝特研究所研究出了一种具有划时代意义的钢纤维制造法——熔钢抽丝法，钢纤维混凝土在工程中的应用将越来越广泛。

现在,关于钢纤维混凝土的开发研究,以日本、美国和英国最为活跃,试验和应用实例很多。此外,加拿大、意大利、澳大利亚、西德、比利时、挪威等国也进行了一些零星的研究。至于钢纤维的制造技术则以日本较为先进。

(1) 美国的开发研究情况

在钢纤维的生产方面,美国贝特开发公司据有垄断地位。现在还有若干个公司也生产钢纤维。美国钢纤维的年产量约为5000吨,每吨最高零售价为11万日元左右。

在美国,主要由贝特开发公司和陆军工兵部队建设技术研究所担当钢纤维混凝土的研究和开发工作。此外,伊利诺伊大学受联邦铁路局的委托,对钢纤维混凝土用作地下铁道盾构衬砌进行了研究。自1972年进行试验性施工以来,这种混凝土已在一些道路和机场的铺面施工中应用。有关此类混凝土喷射施工法的研究也较活跃。

(2) 英国的开发研究情况

钢纤维用线材制造。主要由国家标准公司和约翰逊-涅费有限公司制造、销售。钢纤维混凝土以Sheffield大学的Swamy为中心进行开发研究,不仅进行钢纤维混凝土的基础研究,而且还进行与构件的设计、施工有关的应用研究。研究范围非常广阔。同时,还对试验和施工进行指导。其应用实例以某机场中的多层停车场的钢纤维混凝土预制楼板最为著名。

(3) 日本的开发研究情况

日本是从1973年开始,由日本钢管株式会社通过切断冷压薄钢板的办法制造钢纤维(商品名为苔丝萨)并在市场上销售。1974年,住友金属株式会社也以同样方法制造异型钢纤维(商品名为IS纤维)在市场上销售。1977年,新日铁(商

品名斯泰拔)和川崎钢铁公司(商品名科利脱纤维)也开始加入到钢纤维的制造者行列中。还有神户钢铁公司(商品名为新柯纤维)也开始制造钢纤维。图1.1所示为上述各钢铁公司生产的钢纤维。

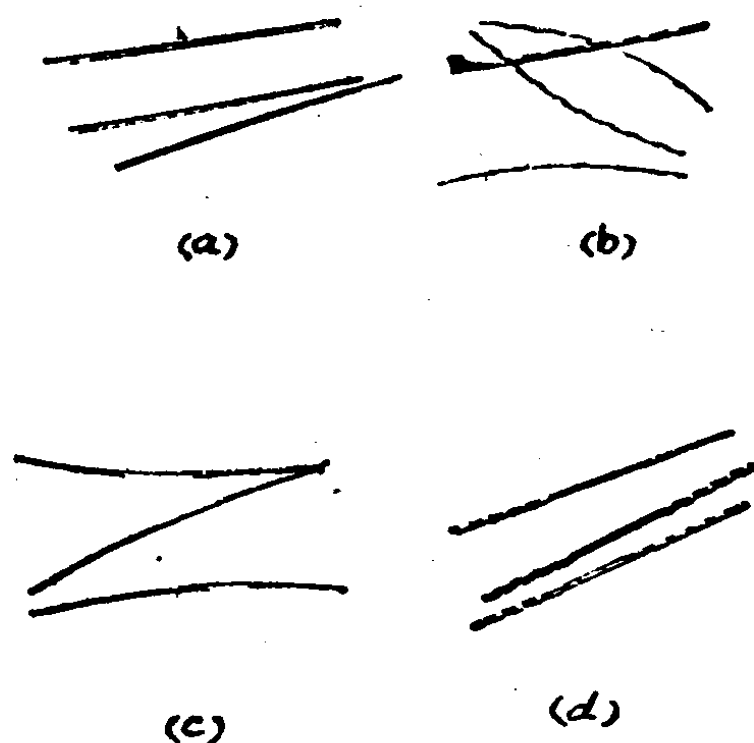


图1.1 日本市场上销售的钢纤维

(a) 一荅丝萨纤维; (b) -IS纤维;

(c) 一斯泰拔纤维; (d) 一科利脱纤维

日本开始研究用机械方法制造钢纤维。东京大学生产技术研究所中川教授研究开发出了机械切削法。因为这种钢纤维所用原材料是比较便宜的钢锭,所以制造出来的钢纤维也最便宜。现在,日本已开始生产优质的切削纤维。

关于钢纤维混凝土的基本理论和应用技术的研究主要由东京大学生产技术研究所进行。此外,德岛大学、名古屋大学、鹿岛建设株式会社、大成建设株式会社、清水建设株式

会社、日本钢管株式会社、住友金属工业株式会社、新日铁等单位也积极进行研究。

试验工程实例主要有以下几个：公用工程有中央高速公路那山隧道衬砌工程（1973年）、国营公路4号线黑矾辅助道路的铺面工程（1975年、1977年）、国营公路158号足宗3号线钢筋混凝土地板（1977年）、上越新干线盐泽隧道衬砌工程（1977年）；民用工程中，钢纤维混凝土在钢铁厂使用和一般在建筑物中使用是有区别的，在钢铁厂中，主要用于钢锭等重物运输车辆通行场地和道路的铺面材料、初轧厂轧制辊道基础，与加热炉有关的可塑耐火材料等。在一般建筑物中，用作大楼的隔墙、预制楼梯、饰面砂浆等。

第二章 钢纤维混凝土中的钢纤维

2.1 钢纤维的四种制造方法

钢纤维混凝土所用钢纤维有四种制造方法（见图2.1）。

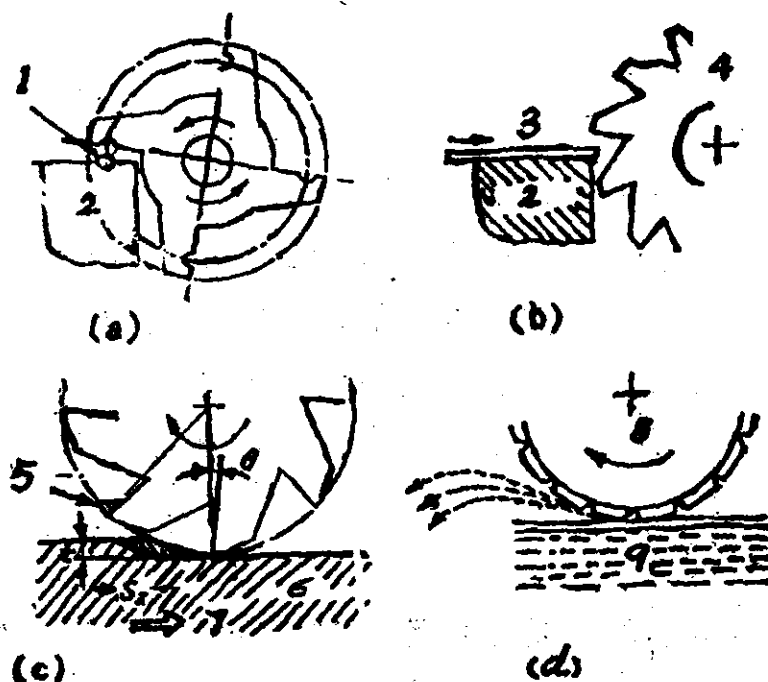


图2.1 钢纤维的制造方法

(a) 一钢丝切断法；(b) 一薄钢板切断法；(c) 一切削法；(d) 一熔钢抽丝法；1—钢丝；2—胎具；3—薄钢板；4—切削刀轮；5—钢纤维；5—软钢钢锭；7—前进方向；8—冷却圆盘；9—熔钢

2.1.1 钢丝切断法

钢锭经压延拉拔成丝后，再按设定长度把钢丝切成短纤维即是钢丝切断法。此法加工成的短纤维的抗拉强度比用其他方法加工成的短纤维要高得多，约为100~200公斤/毫米²。

但成本较高，与混凝土的粘结强度较小。关于粘结强度不足的问题可通过改变钢纤维的外形，即通过生产异型钢纤维的办法加以解决。

2.1.2 薄钢板切断法

薄钢板切断法是把冷轧薄钢板切断而制成钢纤维的方法。即先对冷轧薄钢板进行纵向剪切，宽度相当于纤维长度，然后把卷材展开成带钢状，并从板的厚度方向进刀切断。

2.1.3 切削法

所用原材料系厚钢板或钢锭，采用在厚钢板或钢锭上旋转平面铣刀的方法进行切削，即可获得一定长度的钢纤维。切削时，钢纤维将产生很大塑性变形。以普通低碳钢为原材料，所切削的纤维经加工硬化后，其强度约为原低碳钢强度的两倍半，成为一种高强度的钢纤维。而且，由于切削加工时，在纤维表面形成若干根线条，因而与混凝土的粘结强度有所提高。

2.1.4 熔钢抽丝法

所谓熔钢抽丝法是指用边缘呈螺纹状的圆盘与熔钢表面相接触并旋转圆盘，与圆盘接触处的熔钢瞬间凝固抽丝，因离心力作用而与圆盘分离并被甩出。圆盘用水冷却。此法制造过程非常简单，能够廉价而大量地制造钢纤维

2.2 钢纤维的性质

2.2.1 形状、尺寸

作为混凝土增强材料的钢纤维，必须具备以下条件：当把它投入搅拌机中后，其形状、尺寸一定要适合于能够均匀地分散到混凝土中去，如果纤维过细过长，搅拌过程中多数纤维将会出现纤维球（见图2.2），从而使钢纤维难以均匀

分散。反之，如果纤维过粗过短，振捣时容易与混凝土分离而下沉。考虑了以上各点以后，钢纤维的直径（或一边长度）以0.3~0.6毫米，长度以40毫米为好。如果纤维过短，就收

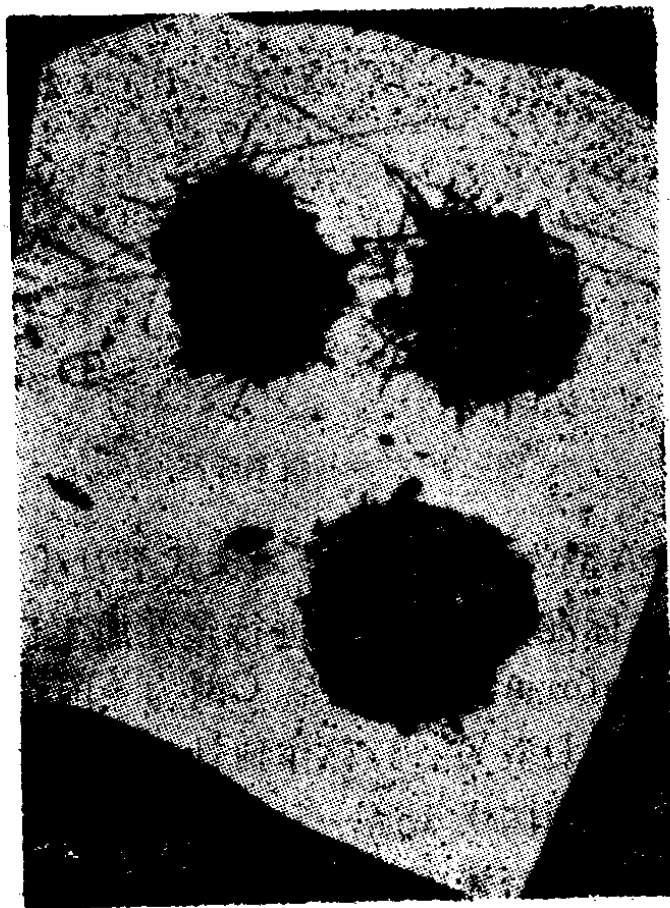


图2.2 纤维球

不到增强效果，因此其长度为直径的40~60倍（长细比 $l/d=40\sim60$ ）时，比较能够均匀地分散到混凝土中去。

2.2.2 粘结强度

为了能够发挥钢纤维对混凝土的增强作用，钢纤维与混凝土的粘结强度一定要高。钢纤维的抗拉强度与 $\tau \cdot l/d$ 相比要尽可能大。粘结强度越高，抗裂性能越好，抗拉强度和抗弯强度也能得到明显的提高。

一般说来，提高钢纤维粘结强度的方法有二：其一是沿钢纤维的轴线方向以一定间距对截面进行塑性加工；其二是对

钢纤维的端部进行加工,使其成为异型钢纤维(见图2.3)。

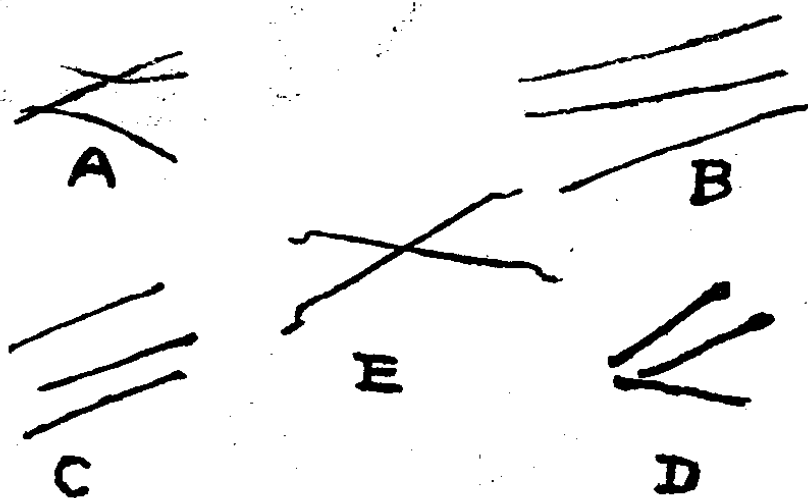


图2.3 各种异型钢纤维

图2.3中, A型为日本住友金属株式会社生产的钢纤维; B型为英国国家标准公司对断丝进行塑性加工后在市场上销售的“杜福(Duofom)”钢纤维; C型为美国产品,系对断丝进行加工而成; D型为一般称作狗骨状钢纤维,系根据熔钢抽丝后制成的。图中E型是一种最独特的钢纤维。从图中可以看到,这是对钢纤维端部进行折弯加工后形成,然后把数根钢纤维用水溶性粘结剂粘结在一起再投入到搅拌机中混合搅拌,使钢纤维分散到混凝土中。因为成包的钢纤维相互间没有缠绕在一起,所以投入搅拌机中时不用分散机分散。E型钢纤维系比利时贝克特(Bekaert)公司生产。欧洲各国在试验研究时大多用的是这种钢纤维。

2.2.3 硬度

现在市场上销售的钢纤维,大多在制作加工时硬化。以低碳钢为原料的钢纤维也具有一定的硬度,所以搅拌时很少发生弯曲现象。但如果在热处理过程中钢纤维过于软化,则搅拌时容易弯曲,增强效果将减少一半。反之,如果钢纤维

过硬过脆，搅拌中容易折断，其增强效果也将显著减少。尽管钢纤维有一定的硬度，人们还是希望它也具有一定的弹性。

2.2.4 抗拉强度

对钢纤维抗拉强度的要求，只是在钢纤维混凝土发生破坏时没有被拉断的那个值。一般说来，若钢纤维的长度为 l ，直径为 d ，与混凝土的粘结强度为 τ ，假定钢纤维在混凝土中所产生的抗拉应力为 σ_t ，则 $\sigma_t = \tau \cdot l/d$ 。现在市场上销售的钢纤维的 τ 值为50~60公斤/厘米²， l/d （长细比）为60~80。钢纤维的抗拉强度若能达到50公斤/毫米²就很不错了。

2.2.5 耐腐蚀性能

因为钢纤维比钢筋细得多，所以如果钢纤维被腐蚀，那么钢纤维混凝土就立即损坏。我们在后面将要谈到，钢纤维在混凝土中不容易遭到腐蚀，但暴露在混凝土表面的钢纤维，其中一部分将产生褐色斑点。因此，在有碍观瞻的幕墙等处使用钢纤维混凝土时，要对所用钢纤维进行防锈处理。关于防锈处理技术，已开发出来的有三菱化成工业株式会社的阿塞尔处理法，鹿岛建设株式会社的镀锌和环氧树脂双镀层技术以及使用不锈钢纤维等。

2.3 钢纤维的包装

现在日本市场上销售的钢纤维，出厂时都装在纸板箱中，每箱20公斤。因装箱时钢纤维的三维方向是随机的，运送过程中往往结成块状。因而，在把钢纤维投入搅拌机中搅拌前，要先用分散机把它解开。另外，钢纤维要是任意地装在纸箱中，其体积非常大，运送很不经济，施工操作也很不方便。最近，日本钢管株式会社为了解决这一问题，研究出一种按一个方向包装钢纤维的技术。