

纤维配筋混凝土

[苏] Ф. Н. 拉比诺维奇

李景星 钱清扬 译

中国建筑工业出版社

纤维配筋混凝土

Ф.Н.拉比诺维奇

李景星 钱清扬 译

中国建筑工业出版社

译 者 的 话

二十世纪初期，人们已经开始利用钢纤维作为混凝土的配筋材料。随着科学技术的发展，到六十年代中期，特别是近十年，除了金属纤维外，开始采用玻璃纤维、有机合成纤维和陶瓷纤维等作为混凝土的增强材料，并在实际工程中得到应用。《纤维配筋混凝土》这本小册子的作者，根据英、美、法、西德等国最近对纤维混凝土的研究和使用情况做了综合分析，从纤维种类、纤维配筋混凝土理论问题、制造工艺、基本性能和在建筑工程中的应用做了简明而系统的介绍，对我们了解国外纤维配筋混凝土这种新型复合材料是有一定参考价值的。但书中对纤维配筋混凝土的理论，仅就“混合物法则”做了介绍，而对“纤维间隔学说”未加叙述。如果读者在参阅本书的同时，再查找日本最近在纤维配筋混凝土方面的研究和使用情况，那么对了解国外纤维配筋混凝土的概貌就会全面些。本书译完后，经国家建筑材料工业总局建筑材料科学研究院吴中伟总工程师审阅，在此，表示感谢。但由于译者水平所限，不当之处，请批评指正。

译 者

一九七七年十二月

前 言

十年前还很少有人认真地研究用人造纤维作为结构材料应用在实际建筑工程中，而最近几年在这方面有着明显的改变，这在很大程度上促进了采用人造纤维作为水泥与石膏的砂浆和混凝土配筋材料工作的进展。

目前，国外对纤维配筋材料的研究工作特别重视，这是一方面由于人们希望从本质上提高混凝土材料的抗拉强度、抗裂性和韧性（抗冲击粘度）；另一方面，现代建筑对配筋混凝土结构提出了更高的要求，国外的许多公司会从制得有效配筋混凝土结构中获得利益。

随着技术的发展，结构物的使用条件更加严格，这就要求进一步提高和改善结构材料的质量，其中也包括水泥与石膏的砂浆和混凝土。正如某些专家所指出的那样，世界上工业产品的生产按着指数规律在增长，这将导致不断地增加天然原料的消耗，提高动力的使用量，增加废料的形成量和污染环境等。因此，在选择建筑材料时，必须严格考虑所有这些因素。

在这方面，具有一定意义的文献^[1]报告指出，对于生产混凝土材料所需要的能量（动力消耗）比制造钢、铝、玻璃、砖和塑料所需要的能量（换算成统一的当量值）都要小。除此，生产混凝土材料所需要水的数量要比生产钢时所需要水的数量少，这样对环境污染的程度也就小。同时也证实了，配筋的混凝土将大大地提高材料的“动力容量”（抵

抗外部作用的能量——译者注)。因为钢筋混凝土应用范围很广，所以最大限度地节省金属用量和最有效地发挥混凝土中金属(钢材)的作用具有重要意义。

例如，如果在多数情况下只根据结构的运输或安装应力来确定混凝土的配筋，此时构件的厚度一般不得少于60~80毫米(为防止钢筋腐蚀，混凝土保护层必须有足够的厚度)，那么从强度观点来看，构件有这么大的厚度是没有必要的。这就不可避免地造成结构材料的浪费，其中也包括钢筋，而结构物中的钢筋实际也没有真正发挥配筋的作用。因此进一步提高混凝土材料的性能，不仅要改善其力学特性，而且要寻找更合理利用金属材料(钢筋)的途径，还要创制新的高效能的非金属配筋材料。

目前，已大大地提高了制备混凝土所用矿物胶凝材料水泥和石膏的活性。这就能够制备抗压强度达1000公斤/厘米²的水泥混凝土，抗压强度达500公斤/厘米²的石膏铸件。按某些专家的见解^[1]，在廿世纪末，混凝土的抗压强度可以达到4000公斤/厘米²，但是其抗拉强度比抗压强度仍要低好多倍。然而对于这个观点，有些专家持有保留意见并认为需进一步证实。为了克服混凝土材料抗拉强度不够的缺点，可以采用纤维作为配筋材料制备新型的混凝土，更广泛地应用在建筑中。

纤维分散配筋混凝土是一种典型的复合材料，这种材料有自己的特征和性能。通常这种材料同时含有抗拉强度不高的塑性基体材料和抗裂性大以及弹性模量高的定向和无序配置的纤维配筋材料。按着传统的配筋结构概念，纤维强化的基本假设是，施加在混凝土基体材料上的荷载，借助于作用在界面上切线力传递到纤维材料上，如果纤维的弹性模量大

于基体材料的弹性模量，那么大部分力要由纤维来承受，所以复合材料总强度正比于纤维的体积含量。

在一定条件下，用不同类型的材料进行组合时，可以得到一种高效能的新型材料，而这种材料的性能无论从质量上还是从数量上都不同于单组分材料的性能。目前，在建设中得到实际应用的纤维配筋混凝土就是一个很好的例证。

目 录

前 言

纤维的种类和性能·····	(1)
纤维配筋混凝土的某些理论问题·····	(7)
制备纤维分散配筋混凝土的工艺方法·····	(15)
纤维配筋混凝土的性能·····	(23)
实际应用经验及某些经济问题·····	(43)
结 语·····	(57)
参考文献·····	(58)

纤维的种类和性能

纤维材料在许多国家得到广泛地生产，但不是所有纤维材料都可作为混凝土的增强配筋材料。首先要考虑纤维的强度、变形性、化学稳定性、同混凝土的粘结力和线膨胀系数等，而纤维材料的成本和产量，在某些条件下，更具有重要意义。例如，被称为“晶须”的纤维状单晶，具有很高的抗拉强度和弹性模量，在不同介质中都有很大的稳定性，是一种理想的纤维材料。但是这种纤维的生产量即使在工业发达的国家也是有限的。至于象卡普龙、尼龙这类纤维，其变形模数比混凝土要低的多，不能作为增强混凝土的配筋材料。

目前，国外通常采用三种类型的纤维增强材料：钢纤维（图1）、玻璃纤维和聚丙烯类纤维。这些材料具有一个共同的特点，在作为增强材料使用时，必须进行分散。钢纤维作为结构的增强材料最有效，其弹性模量比混凝土要高出4倍，玻璃纤维直径一般在8~10微米，其强度相当于高碳冷拔钢丝强度，约 $18\sim 25\times 10^3$ 公斤/厘米²，其容重要轻71%。玻璃纤维的弹性模量比钢要低，但比混凝土的弹性模量约高一倍。而比石膏的弹性模量平均要高出4倍，这

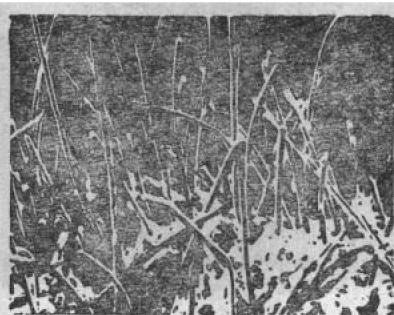


图1 钢纤维配筋混凝土

就确定玻璃纤维是一种有效的纤维增强材料。

用聚丙烯和其它有机原料制备的合成纤维都具有很高的变形性。而且这类纤维的弹性模量不超过普通混凝土弹性模量的四分之一。因此聚丙烯类纤维难以用来作为混凝土的增强材料。如果使用这类纤维，就需要附加（构造）配筋，提高局部抗冲击强度和耐磨强度，以防止构件在运输和安装过程中损坏和崩裂。

按着配筋的惯例，纤维在结构中能够有效的工作，在很大程度上取决于纤维的变形性能。因此可将纤维分成两类：低模量（尼龙、聚乙烯、聚丙烯），这类纤维具有较大的拉伸相对变形；高模量（钢、玻璃、碳）^[3,4]。对于配筋的混凝土，首先希望获得很高的韧性（抗冲击粘度），其次是增加抗拉强度、刚度和抵抗动荷载的强度^{[5][6]}。

采用纤维作为混凝土的增强材料存在的主要问题是涉及到配筋材料与混凝土组成材料之间的化学作用。现已证实，使用钢纤维作为水泥混凝土的配筋材料是成功的，而在石膏制品硬化介质中将发生很强的腐蚀；相反，普通的玻璃纤维在石膏制品硬化介质中呈惰性，而在波特兰水泥浆（混凝土）中有明显的腐蚀现象。

应用玻璃纤维作为混凝土的增强材料，在国外有两条途径。英国建筑研究院^①和玻璃纤维公司试制成耐碱玻璃纤维，并公布了专利，牌号称“塞姆菲尔”^[7,8]，作为波特兰水泥混凝土的配筋材料。●英国皮尔金顿公司和法国“拉法

● BRS 应为英国建筑研究院，原文有误。

● 牌号“塞姆菲尔”（Cem-fil）的纤维是将二氧化锆、二氧化钛或二氧化锡添加到氧化钠-二氧化硅，氧化钠-氧化钙（氧化镁）-二氧化硅系统的玻璃组分而制成的，纤维本身具有耐碱性能。据苏联国家玻璃研究所公布的专利 № 249577，№ 313797，也研制成耐碱玻璃纤维。

尔”公司应用普通 E 型玻璃纤维配筋制成结构混凝土制品，这种纤维的化学成分接近于苏联的铝硼硅酸盐纤维。制备混凝土采用的胶凝材料是矾土水泥，同波特兰水泥相比，具有较低的 pH 值，对纤维的腐蚀性较小，并建立专门公司生产玻璃纤维混凝土制品，称“埃尔卡莱特”^[7]。

应用 E ① 型无碱玻璃纤维配筋的石膏制品，同有碱纤维相比对外界条件的作用具有很高的稳定性，是一种很有效的配筋材料^[9]。

矿物（硅酸盐）纤维及其制品不但具有良好的工艺性能，而且还存在原料广、成本低的优点，因此得到广泛应用。矿物纤维包括玻璃、矿渣、石英、陶瓷纤维，以及用熔融岩石（包括玄武岩）制备的纤维和结晶纤维。但是玻璃纤维应用最广泛。目前，国外至少有65家公司获得许可生产玻璃纤维配筋混凝土制品^[10]。

英国的“皮尔金顿”公司和西德的“海捷立别尔盖尔”公司采用“塞姆菲尔”纤维制造波特兰水泥混凝土制品^[11]。

美国对各种玻璃纤维的生产量和需要量是很大的。1973年玻璃纤维的生产量达29万吨，而1975年的预计产量可达50至60万吨^[12]。然而其中大部分用来制造玻璃钢（玻璃纤维增强塑料——译者注）。至于把玻璃纤维做为混凝土增强材料的研究工作是从六十年代初期开始的^[13]。最近，美国“欧恩斯-卡尔宁格”公司生产耐碱玻璃纤维带和纤维布，作为波特兰水泥砂浆和混凝土的加筋材料^[14]。

增强混凝土所采用的玻璃纤维有各种形式，切短的玻璃

① 指电气工程用玻璃。

纤维、丝状的和束状的纤维、玻璃纤维布和玻璃纤维编织物等。接着混合方法，掺入混凝土中的纤维多采用切短的直径0.005~0.015毫米，长25毫米的尺寸，无秩序地分散在整个体积中。在特殊条件下，可以采用长度到50毫米的纤维或者是连续玻璃丝^[11,13,14]。

作为配筋材料的金属纤维可以采用机械的，电化学的和融化成型的方法制造。机械的方法应用最普遍，例如普通的拉丝，拔制，以及用金属薄片和薄板切割等等。选择金属纤维的生产工艺主要取决于所需金属纤维的直径。超细纤维一般应用金刚石拉模来拔丝。尽管这种纤维具有很高的强度和很好的效果，由于成本较高（图2）应用量仍然不大^[15]。

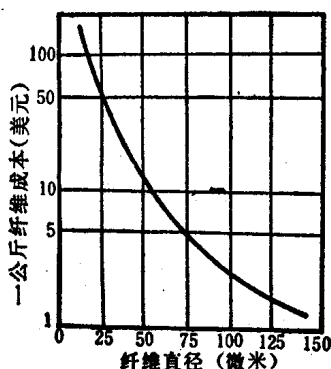


图2 铬镍钢纤维的成本与纤维直径的关系

特别要指出，用拔丝的方法生产直径小于0.01毫米的金属纤维是不经济的^[15]。应用较普遍的方法还是切割直径为0.1~1.5毫米，长为6~70毫米的钢纤维或尺寸为 $(0.15 \sim 0.41) \times (0.25 \sim 0.90)$ 毫米的钢纤维薄片的方法。而这些薄片是通过切割金属箔，薄板或扁圆形纤维而得^[13,16]。

最近，美国“普鲁森科”公司报道了生产不同直径的金属纤维的新工艺^[18]。按这种工艺所生产的纤维成本取决于直径大小，但比拔丝方法要便宜得多。该公司用这种新工艺生产直径为12微米钢纤维的成本，同拔丝方法相比要低98%。

纤维和混凝土的粘结力及边界层效应对纤维混凝土有效（共同）工作有很大的影响。为了增加钢纤维和混凝土之间的粘结力，美国和其它国家生产和加工特种形式的纤维，纤维的断面有直角形和正方形的，纤维的长度（轴）方向被折弯、扭曲、压波纹或使表面呈凹凸不平状态^[16,19]。

英国“壳牌国际化学公司”获得了用聚丙烯纤维配筋生产混凝土的专利权^[20]。直径为0.02~0.038的纤维是将薄膜纵向切割拉伸和搓捻得到的。然后再将其切割成长10~100毫米的一段段长纤维。聚丙烯纤维在波特兰水泥水化物中是稳定的^[21]，但按物理性能来比较，这类纤维不如钢或玻璃纤维。

为了改善混凝土制品的质量，在英国对碳（石墨）纤维配筋材料进行了研究，发现它可显著提高水泥石的抗拉强度和弹性模量^[22,23]，而且这种纤维在水化水泥中不被腐蚀。这种碳纤维被制成宽70~80毫米、厚为几十分之一毫米带状^[23]，其抗拉强度为190~260公斤/毫米²，每米重80毫克。但必须指出，碳纤维的成本远比钢纤维和玻璃纤维要高，因此这种纤维多应用在特殊工程中。

国外指出，来源广的石棉纤维，可用作增强材料，但由于这种纤维一般比较短，松解困难，和由此而造成的生产工艺复杂故推广受到限制。还应指出，天然的优质石棉在许多国家的贮藏量是有限的。因此寻找新型有效的配筋材料引起了专家们的兴趣。表1列出了英国应用最广的纤维材料的物理力学性能及几种纤维的成本。

强化混凝土的纤维同混凝土之间有效的（共同）工作，不仅与所用纤维种类有关，而且还取决于纤维在混凝土中的分布和配向。配筋有两种方案，一种是按受力方向的定向配

筋（基本上按长度方向），另一种是对于短纤维的无序的分散配筋。由于纤维在材料中几乎是所有方向均匀的分布，这就可承受来自任何方向的应力，阻碍裂缝的形成和扩展，也就提高了水泥石的抗拉强度。从结构上来讲，水泥石是非匀质材料，在不同方向存在微观和亚微观缺陷，在受力时，这种缺陷就可移动、发展、甚至相邻的缺陷可以会合，最后便可出现“可见”裂缝。纤维可以抑制微观缺陷的发展。如果水泥石中存在着形成裂缝的根源，而要闭锁和抑制裂缝的增长和发展，那么纤维配筋要比普通的集中配筋更为有效。到目前为止，还没有完全解决提高纤维的抗拉强度和增加纤维同混凝土的粘结力的问题。

表 1

纤维种类	密 度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 ×10 ³ (公斤/厘米 ²)	弹性模量 ×10 ³ (公斤/厘米 ²)	断 裂 伸 长 (%)	成 本	
					1公斤 (英磅)	断 面 1毫米 ² 长1千延米 (英磅)
尼龙纤维	0.9	4.0~7.7	35~80	10~25	0.5	0.45
	0.95	7.0	14~42	10	—	—
	1.10	7.7~8.4	42	16~20	0.9	0.99
	1.10	2.1~4.2	21	25~45	—	—
	1.40	7.3~7.8	84	11~13	—	—
	1.50	4.2~7.0	49	3~10	—	—
石棉纤维	2.60	9.1~31.0	680	0.6	0.1	0.26
玻璃纤维	2.60	10.5~38.5	700~800	1.5~3.5	0.9	2.2~2.4
钢 纤 维	7.80	11.0~31.5	2100	3~4	0.2~0.3	1.8~2.4
碳 纤 维	2.00	20.0	2450	1.0	60	120

增强纤维的配向对纤维混凝土在荷载下性能的影响，许多专家采用效力指标来加以说明^[17]。

纤维的配向	效力指数, %
平行的	100
垂直的	40~50
平面分散的	30~70
体积分散的	约20

由此可见, 平面分散的“二维”配筋要比“三维”的无序配筋效果高一倍, 这是由于组分在荷载作用下, 大部分纤维都参加了工作的缘故。

纤维配筋混凝土的某些理论问题

为了评价纤维增强结构材料的力学性能, 可以通过选择模型来模拟在荷载作用下各单元组分之间的状态, 建立一个精确的模型就有可能反映出复合材料中不同单元组分之间相互作用的复杂特点和这种材料的实际应力状态。当然, 这个任务是很复杂的。在研究定向配筋的复合材料时, 通常假定, 复合材料是均质的、连续的, 纤维同基体材料(水泥石、砂浆或混凝土——译者注)之间的粘结力是相同的^[15,24], 采用这种假定便可以利用“混合物法则”来解释。也就是作用在复合材料上的荷载 P_0 , 分配在纤维材料上的为 P_f 和分配在基体材料上的为 P_m 。

$$P_0 = P_f + P_m$$

将荷载换算成应力, 可得到下面关系:

$$\sigma_0 A_0 = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

$$\sigma_0 = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

式中 σ_0 , σ_f , σ_m ——复合材料、纤维材料和基体材料的应力;

A ——面积；

V_f, V_m ——纤维材料和基体材料的体积百分比。

如果认为在纤维材料和混凝土的界面上没有滑动，而复合材料与纤维材料和基体材料的变形是相等的，也就是说 $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$ ①，那么上式又可写成：

$$\sigma_c = E_m \varepsilon_c V_m + E_f \varepsilon_c V_f$$

或者

$$\sigma_c = E_m \varepsilon_c V_m + E_f \varepsilon_c (1 - V_m)$$

式中 E_m 和 E_f ——基体材料和纤维材料的弹性模量。

因为 $V_f + V_m = 1$ ，那么作用在纤维材料上的荷载同作用在基体材料上的荷载的比，可写成下式：

$$\frac{E_f \varepsilon_c (1 - V_m)}{E_m \varepsilon_c V_m} = \frac{E_f (1 - V_m)}{E_m V_m}$$

由此可见，为使纤维材料承受较大的应力和发挥较大的效力，就必须使纤维材料的弹性模量高于基体材料的弹性模量。

克罗克和布拉乌特曼强调指出，为使纤维材料承受荷载的数量增大，增加复合材料中纤维的含量是很重要的^[15]。但是，如果材料中纤维含量超过一定限度，由于基体材料不能很好润湿和浸透纤维束，那么材料的性能将变坏，纤维同基体材料的粘结力减小，以致使材料内部形成空隙。

马克达涅尔斯等认为，纤维增强结构材料在受力时，有四个变形阶段：1. 纤维和基体材料都处于弹性变形阶段；2. 纤维弹性变形和基体材料的塑性变形阶段；3. 纤维和基体材料都处于塑性变形阶段；4. 复合材料破坏阶段^[15]。

① 原文似有误。——译者注

在第一阶段，复合材料的弹性模量可根据“混合物法则”来确定：

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m V_m$$

在第二阶段，基体材料呈曲线变形，复合材料的模量（变形模量——译者注）应按曲线上每一点的模量来计算，按下式：

$$E_c = E_f \cdot V_f + \left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m} \right)_{\varepsilon_f} \cdot V_m$$

式中 $\left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m} \right)_{\varepsilon_f}$ ——在变形 ε_f 时，基体材料变形曲线倾斜角的正切值。

根据上述条件推导出确定 σ_c 和 E_c 的分析关系式，此时复合材料中具有塑性的基体材料同纤维可共同工作，承受较大的力而又不出现裂缝。如果采用脆性纤维增强基体材料，一般不存在第三受力阶段，而采用塑性的纤维，第三阶段的复合材料的变形模量与第二阶段的变形模量相同。根据受力状态，对于混凝土这种基本材料，要考虑做必要的修正。必须指出，采用高强度和高弹性模量的纤维增强的混凝土，具有很大的抗拉极限变形值，在瞬时荷载作用下，没有发现存在第三个受力阶段。

复合材料破坏的难易性与纤维强度和复合材料强度之间的相互联系是最令人感兴趣的。拉比诺维奇指出，根据整个复合材料都具有相同变形和达到破坏荷载时仅是纤维拉断的假定，而建立的复合材料破坏的简单模型，尽管可以利用“混合物法则”，并不是就没有缺欠的。这是因为，用高强度和高弹性模量纤维制备的最理想的复合材料，从本质上来讲，一般具有脆性材料破坏的特点，其缺陷呈统计的分布。当复合材料受拉时，纤维的断裂是发生在缺陷最严重的地方。

方，而后在破坏处应力重新再分配。

也可从另外的角度对复合材料的性能进行分析。在界面上的最大切向应力，可使沿纤维长度方向的粘结力破坏和降低纤维同基体材料共同工作的效果。如果不是这样，那么就是

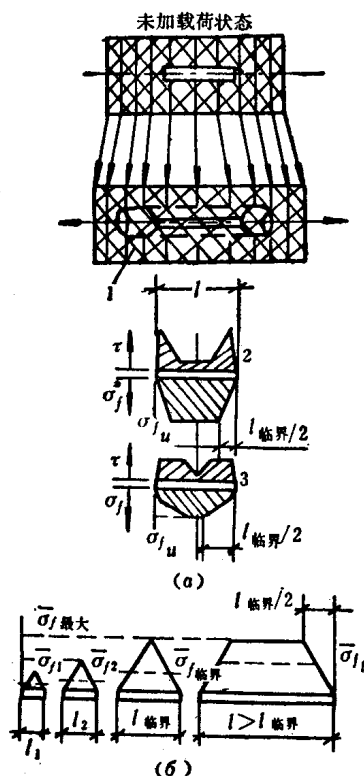


图 3 界面处的剪切应力 τ 和纤维的拉应力 σ_f 图

(a) 纤维受拉时在长度方向上的平均拉应力 $\bar{\sigma}_f$; (b) 1. 变形集中区; 2. 弹性变形的基体材料; 3. 弹-塑性变形的基体材料

纤维被拉断。可以认为，当复合材料破坏时，纤维的长度将减少，若再增加荷载，纤维不再承受外力，基体材料达到剪切极限强度。按纤维拉断的假说，纤维拉断导致基体材料受剪破坏最后导致整个材料破坏。

对于无序的短纤维配制的复合材料，采用“混合法则”是有局限性的。因为利用这个理论的基本假定是连续的和定向的配筋，所以对无序的纤维配筋材料的破坏机理另有专著阐述。

许多研究证实，采用有限长度的（不长的）纤维配筋的材料性能，不能用上述的关系来说明，如果纤维的长度 l 不超过临界值 $l_{临界}$ ，有限长度