

纤维水泥与纤维混凝土

[英] D.J. 汉南特

陆建业 译

林 振 校

中国建筑工业出版社

纤维水泥与纤维混凝土

[英] D.J. 汉南特

陆建业 译

林 振 校

中国建筑工业出版社

序

Hannant博士在本书中同时介绍了纤维水泥和纤维混凝土的科学研究和工艺技术。在脆性物质中掺入纤维是一项基本技术，已有数千年历史。《出埃及记》（Exodus）一书的作者指出，没有稻草便不能制砖（该书第五章第六节）。而石棉增强水泥的工艺，已为大家所知约有七十多年。但是，在了解纤维如何掺进脆性物质中能防止破裂之后，对其科学原理只不过近来才加以研究、了解和合理应用。玻璃工业及纺织工业的进步，以及航天工业要求寻找轻而坚硬的材料，才促进了这项研究。这方面的资料来源极为广泛，很需要有一本书将科学技术文献中各方面的成果搜集一起。Hannant博士贡献了他本人学术上的聪明才智，并在此工作中提供了全面完整的最新论述，以便工程师和科学工作者应用。

使用本书中介绍的成果，水泥能做成各种式样与形状的制品，至今可代替更贵重和稀有的材料。水泥，一种首先由罗马人制造并于十八世纪末重新发现的人造石，现在已能将纤维掺入其中而制成在某些情况下几乎不碎的制品了。

由于对能源需求增加，使用如水泥这样的材料，与生产钢铁或塑料相比较，所耗能源少，能使我们的能源使用更久。每生产一立方米钢所需能源为生产同体积水泥的二十二倍。而单位体积水泥的能源消耗还不到普通塑料的五分之一。再者，生产水泥所需的矿石，世界上几乎数量无限，而

且地理上分布广泛。这两个特点促进了纤维与水泥的结合，不失为普遍文明的一个有利条件。

理学博士、萨里大学副校长
A. Kelly

前 言

科学和工程的许多分支越来越趋向专门化，但在纤维水泥和纤维混凝土领域，各种学科却结合在一起，试图用纤维掺入相对脆性的水泥基体以制造假延性材料。

物理、数学、材料科学和化学工作者，以及工程师们都对本课题的研究作出了贡献。发表的研究成果广泛散布于各种期刊及会刊，而这种刊物形式未必便于工程师和材料科学工作者使用。

因此，本人编写此书的目的在于沟通研究工作者和愿把这种新材料付之实际使用者之间的关系。这样，可以使实际工作者有一本综合论述纤维水泥和纤维混凝土的性能、制造和应用等内容的书。书中概述了基本的理论原理，并简化了理论计算，但用于许多实际场合仍然很准确。

本题是发展中课题，书中介绍的所有材料并非结果都好。不过，我希望通过对复合材料物理性能基本原理的充分了解，会鼓励人们在适当场合使用这类材料。

D. J. Hannant

使 用 符 号

A	断面面积
A_c, A_f	复合材料断面面积, 纤维断面面积
A_g	$\frac{\text{大于 5 mm 集料的重量}}{\text{混凝土总重}}$
D	梁断面高度, 即梁深
D_f, D_m	纤维密度, 基体密度
E	弹性模量
E_c, E_f, E_m	复合材料弹性模量, 纤维弹性模量, 基体弹性模量
F	拉力
M	模量比
N	通过复合材料单位面积的纤维数
P	弯曲载荷
P_f	纤维周长
SFS	纤维比表面积, 即复合材料单位体积内所有纤维表面面积的总和
V	体积
V_c, V_f, V_m	复合材料体积, 纤维体积, 基体体积
$V_{f(crit)}$	基体开裂后尚能承受复合材料开裂前载荷的最小纤维体积
V_f'	随应力方向取向的纤维有效体积, 用有效因子从 V_f 计算得出

W_f	纤维重量占复合材料总重量百分比
W_f	纤维重量占基体重量百分比
c	复合材料
d	纤维直径
d_n	梁受拉面到中和轴距离
f	纤维
l	纤维长度
l_c	临界纤维长度, 即拔出试验中造成纤维断裂的二倍埋置长度
l_a	梁弯曲的力臂长
m	基体
r	纤维半径
t	受拉
u	抗拉极限
w	裂缝宽度
x'	长纤维应力传递长度 (也即最小裂缝间距)
x''	最终平均裂缝间距
x_d	短纤维应力传递长度
α	比例 (换算) 系数 $= \frac{E_m V_m}{E_f V_f}$
ϵ	应变
$\epsilon_c, \epsilon_f, \epsilon_m$	复合材料应变, 纤维应变, 基体应变
ϵ_{fu}	纤维极限应变
$\epsilon_{comp}, \epsilon_t$	压缩应变, 拉伸应变
ϵ_a	多点开裂开始时的应变
η_1	纤维取向有效因子
η_2	纤维长度有效因子

目 录

使用符号

第一章 概述.....	1
第二章 材料性能.....	3
第三章 纤维增强单向抗拉的理论原理.....	9
第四章 纤维增强抗挠的理论原理.....	41
第五章 钢纤维混凝土: 新拌混凝土性能及同时考虑 拌合料工作性的配合比设计.....	62
第六章 钢纤维混凝土: 硬化状态时的性能.....	73
第七章 聚丙烯纤维用于混凝土、砂浆和水泥.....	96
第八章 玻璃纤维用于水泥及混凝土.....	117
第九章 石棉水泥.....	158
第十章 除石棉、玻璃纤维、聚丙烯纤维及钢纤维 以外的其他纤维.....	170
第十一章 钢、聚丙烯、玻璃及石棉纤维的应用.....	183
第十二章 钢纤维混凝土用于道路及机场跑道.....	209
附录1. 摩阻型粘结非圆形断面长纤维的最小裂缝间距 (x')理论.....	228
附录2. 典型复合材料理论计算实例.....	230
实例题解.....	233

第一章 概 述

未配筋水泥和素混凝土的性能已有许多资料^[1-4]，而对混凝土工艺基本原理的认识，也为本书所接受。

水泥基体的问题之一是固有的脆性破坏，这种破坏发生在受拉应力系统或冲击载荷情况下。建筑工业界对水泥基材中加入纤维后的性能越来越感兴趣的主要原因，是希望改善基体的韧性或抗拉性能。

强调节能也促进了人们对采用各种代用材料的兴趣，如使用纤维水泥及纤维混凝土代替铸铁、玻璃钢及各种沥青材料。这种代替现有材料的想法也扩大到石棉水泥工业，因为这关系到石棉的长期供应问题，也由于它对健康的危害，所以用人造纤维代替石棉正受到注意。

为了能满足各种有意义的性能要求，纤维复合材料必须达到适当的材料性能。材料工程师试图改善水泥或混凝土性能的主要目标如下：

- (a) 提高抗拉强度或抗挠强度；
- (b) 提高抗冲击强度；
- (c) 靠基体开裂后的延性控制裂缝扩展和改变破坏方式；
- (d) 改变新拌混合料的流变特性或流动特性。

无疑，这些目标在短期内是能达到的。然而对大多数纤维混凝土及纤维水泥的长期性能给予一定程度的注意也是必要的。长期性能在土木工程上也许意味着超过五十年，看

来，这是此类材料当前主要应用于“非结构”构件的原因。这么做可以避免在预想不到的损坏事故中因构件断裂而造成严重的人身危险。

参 考 文 献

1. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Pitman, 1977.
2. Orchard, D. F., *Concrete Technology*, Volumes 1 and 2, John Wiley and Sons Inc., 1968.
3. Troxell, G. E., Davis, H. E., and Kelly, J. W. *Composition and Properties of Concrete*, McGraw-Hill Book Co., 1968.
4. Czernin, W., *Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers*, Crosby Lockwood and Son Ltd., 1970.

第二章 材 料 性 能

2.1 纤维性能和基体性能

从理论上讲，控制复合材料性能的主要因素是纤维及基体的物理性能，以及两者之间的粘结强度。粘结力值将在相应的章节内仅作有限的评述，因为粘结强度受种种不定参数（包括时间）的影响而变化。纤维的其他物理性能的通常指标列于表2.1，某些基体的性能列于表2.2。

从这些表中可明显看出，各种纤维断裂时的伸长比基体破坏时的应变大二到三个数量级，因此远未达到纤维强度前基体便会开裂，这一事实就是在理论分析中强调开裂后性能的原因。

另一方面，纤维的弹性模量一般不超过基体弹性模量的五倍，而且纤维的体积分数很小，这意味着复合材料的弹性模量与基体差不多。

表 2.1 中的纤维可分为两大类：弹性模量小于水泥基体的如纤维素纤维、尼龙和聚丙烯纤维；弹性模量高于基体的如石棉纤维、玻璃纤维、钢纤维、碳纤维及 Kevlar 纤维，它是 Dupont 采用的芳族聚酰胺的一种。把最后二种也包括在内是为了纤维种类齐全。但因它们价格很高，看来难以在大多数工程上应用。

低弹性模量的有机纤维，一般易发生较大的徐变，这意

表 2.1

标准纤维性能

纤维	直径 (μm)	长度 (mm)	密度 ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot 10^{-3}$)	杨氏模量 (GN/m^2)	泊桑比	抗拉强度 (MN/m^2)	断裂时伸长① (%)	断裂时在复合材料 中常用体积 (%)
蛇纹石棉纤维(白)	0.02~30	<40	2.55	164	0.3	200~1800 (纤维束)	2~3	10
石棉纤维	0.1~20	—	3.37	196	—	3500	2~3	—
角闪石棉纤维(青)	8	连续的10	1.90	380	0.35	1800	~0.5	2~12
碳纤维	9	连续的10	1.90	230	—	2600	~1.0	10~20
纤维素纤维	8~10	10~50	1.2	72	0.25	300~500	4.8	2~8
2型(高强度)	12.5	10~50	2.54	80	0.22	2500	3.6	—
E型	110~650	6~6.5	2.7	70	—	1250	—	—
Cem-Fil玻璃纤维单丝	10	6~6.5	1.45	133	0.32	2900	2.1	<2
204单丝纤维束	12	5~50	1.44	69	—	2900	4.0	0.1~6
PRD49	>4	5~50	1.14	与标准有关,最高可达4	0.4	750~900	13.5	0.1~6
Kevlar纤维	100~200	5~50	0.9	与标准有关最高可达5	—	400	18	—
PRD29	500~400	20~75	0.9	最高8	0.29	400	8	0.2~1.2
尼龙纤维(242型)	100~600	10~60	7.86	200	0.46	700~2000	3.5	0.5~2
聚丙烯纤维	10~330	—	—	160	0.28	2100	3	—
纤维化纤维	—	—	—	—	—	—	—	—
高拉力纤维	—	—	—	—	—	—	—	—
碳纤维	—	—	—	—	—	—	—	—
不锈钢纤维	—	—	—	—	—	—	—	—

① 1%伸长=10000 $\times 10^{-6}$ 应变。

标准基体性能

表 2.2

基 体	密 度 (kg/m ³)	杨氏模量 (GN/m ²)	抗拉强度 (MN/m ²)	破坏应变 ×10 ⁻⁶
普通硅酸盐水泥浆	2000~2200	10~25	3~6	100~500
高铝水泥浆	2100~2300	10~25	3~7	100~500
普通硅酸盐水泥砂浆	2200~2300	25~35	2~4	50~150
普通硅酸盐水泥混凝土	2300~2450	30~40	1~4	50~150

意味着如果用于有裂缝的复合材料承受持久的较高应力，在一段时间内可产生显著伸长或很大挠度。因此这类纤维多半用于希望基体不裂，但有瞬时超载的场合如装吊应力、冲击载荷或风载较大的地方。

低弹性模量纤维的另一个问题是通常泊桑比数值较大，联系到它们的低弹性模量，意味着如果沿纤维轴线伸长，其横向收缩比其他纤维大得多。这导致纤维——基体界面较大的侧向拉应力，可能使排列成行的短纤维突然失去粘结而拔出。因此，有必要采用图案式样如编织网或纤化纤维网，使其产生有效的粘结。

甚至高弹性模量的短纤维，除非比表面积很大，可能也需要增加机械粘结以免拔出。因此，钢纤维一般制成变截面或端部弯曲的，以便起锚固作用。玻璃纤维束可在水泥浆液中浸泡一段时间后再使用，以利产生有效的机械粘结作用。

四种基体的性能列于表 2.2，表中的两类水泥对纤维复合材料的性能有重要的影响，主要是因为它们具有不同程度的碱性，而碱性影响着玻璃纤维及钢纤维的耐久性。

基体中最大的颗粒尺寸也很重要，它影响纤维的分布以及复合材料中允许掺入的纤维数量。水泥水化前的平均粒度

在 $10\sim 30\mu\text{m}$ 之间，而砂浆所含集料颗粒最大达 5mm 。要求与纤维一起发挥作用的混凝土，应该不含有大于 20mm 的集料，若只含有小于 10mm 的集料则更好，否则纤维难以达到均匀分布。

为避免新制成品的收缩及表面裂缝，最好用不少于 50% 体积的惰性无机填料。填料可以是集料或磨细粉煤灰、石灰粉。然而，如果惰性填料是大量粗集料，则所含纤维体积将受到限制，从而抗拉强度及复合材料的延性也受到限制。

基体的强度主要受水/灰比的影响，这个参数对弹性模量也有一定的影响，因此表2.2中基体性能的变化幅度很大。

表2.1中纤维的密度很重要，因为有了这个参数才能在理论计算时对所用的纤维体积和配料计量时所用的纤维重量之间进行换算。这个计算因实际问题而复杂化，纤维重量(W_f)常表示为纤维在水泥或混凝土基体重量中所占的比例，而理论计算中纤维重量(W_f)及纤维体积(V_f)一般表示为纤维在整个复合材料重量或体积中所占的比例。

例如：

$$\begin{aligned} (a) \text{ 实际中 } W_f &= \frac{\text{纤维重量}}{\text{基体重量}} \times 100\% \\ &= \frac{V_f D_f}{V_m D_m} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} (b) \text{ 理论计算 } W_f &= \frac{\text{纤维重量}}{\text{基体重量} + \text{纤维重量}} \times 100\% \\ &= \frac{V_f D_f}{V_m D_m + V_f D_f} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.2)$$

若混凝土中加入 2% （体积）的钢纤维，用公式(2.1)及(2.2)和表2.1、2.2中的材料性能可得出：

$$W_1 = \frac{0.02 \times 7860}{0.98 \times 2350} \times 100 = 6.84\%$$

$$W_2 = \frac{0.02 \times 7860}{0.98 \times 2350 + 0.02 \times 7860} \times 100$$

$$= 6.24\%$$

因此，在同一基体中钢纤维的体积相同（2%），根据配料计量或理论计算的不同要求，可各自得出重量比为6.84%或6.42%。这种情况也适用于其他纤维。

纤维复合材料的商业生存能力完全决定于纤维价格。纤维对成品价格起主要作用，因为基体极便宜。

因此，商业上决定是否由纤维水泥或纤维混凝土制造一种产品代替现有产品有利，取决于能否使用最少量最便宜合适的纤维达到所要求的强度和耐久性。

可惜提不出具体的价格，因为纤维价格的波动很大，它决定于对该纤维的需求量及纤维生产中的能源价格。但是，只要知道纤维价格为多少便士/公斤，便可从公式（2.3）算出每立方米复合材料中纤维的价格。

复合材料中的纤维价格英镑/米³ = $V_1 \times$ 纤维价格

便士/公斤 $\times 10 \times$ 纤维比重 (2.3)

例如：复合材料含聚丙烯纤维6%（体积），纤维价格为100便士/公斤可得出复合材料中的纤维价格为 $0.06 \times 100 \times 10 \times 0.9$ 英镑/米³，即54英镑/米³。

同样，若玻璃纤维价格为150便士/公斤，在复合材料中含玻璃纤维6%（体积），可得出其价格为 $0.06 \times 150 \times 10 \times 2.7$ 英镑/米³，即复合材料中的纤维单独价格为243英镑/米³。

从以上粗略的计算中可明显看出，在大量使用这些新材料之前，与同样的木材、钢、铝、塑料或钢筋混凝土制品价

格相比，在节省用工或运输费用方面，须更谨慎地采取一些商业性决策。

2.2 复合材料性能

复合材料的性能拟在相应的章节详述，但是读者应明了所列性能往往在很大程度上决定于所采用的测试方法。

例如，众所周知，在冲击试验中所得的“冲击强度”或“韧性”的数值往往没有意义，因为记录值完全取决于冲击物体的能量及速度、试件大小、支承的稳定性、试验形式、甚至破坏的定义等因素。

素混凝土试验采用的，慢的或“静态”的试验方法较少为人们所知，如果用这种方法得到的资料来解释纤维增强复合材料的假延性，同样能使人产生误解。因为素混凝土比较脆，在国际标准试验方法中往往将它看成是线弹性破坏，尽管这对素混凝土来说也许还可以接受，但却不适用于基体开裂后仍能承受大部分载荷的纤维混凝土。因此抗拉强度的间接试验法，如劈裂圆柱体法或弯曲折裂模数法，能导致抗拉强度的过高估计，比用直接试验法测定的数值可大100%多。

纤维水泥及纤维混凝土合适的试验方法，迄今还未被权威的国际标准学会同意。因此在下文中，往往要强调指出测定该材料性能所使用的各种试验方法的适用范围。

第三章 纤维增强单向抗拉的理论原理

3.1 概 述

纤维复合材料性能的许多最初理论研究是在纤维树脂系统进行的, 其中纤维体积往往超过50%。纤维用来增加树脂的刚度和强度, 为航天工业生产坚硬、轻质、抗拉强度高的构件。然而, 纤维用量较少, 水泥或混凝土基体的刚度较大这些特点, 使我们对纤维水泥和纤维混凝土进行理论分析时的侧重点有了变化, 因为基体开裂后韧性的提高是使用这些材料时所考虑的主要因素。

在水泥浆及混凝土中采用纤维配筋有着某些不利条件, 为将纤维配筋力学置于完整的理论基础之上, 必须首先明了水泥浆及混凝土的一些主要特点。

主要的不利条件是:

(a) 抗拉极限应变小 ($<500 \times 10^{-6}$)。

(b) 弹性模量较高 ($7 \sim 40 \text{GN/m}^2$), 尽管这在工程结构中对于控制挠度是有利的, 但直到基体开裂时纤维的承载能力没得到充分发挥。

(c) 纤维掺入的容量有限 (在水泥浆中一般小于10% 体积, 在集料体积分数已达70%的混凝土中, 纤维的体积量小于2%)。