

[1965~1999]

# 纤维水泥制品行业 论文选集

叶启汉 主编

中国建材工业出版社

# 纤维水泥制品行业论文选集

(1965~1999)

叶启汉 主编

中国建材工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

纤维水泥制品行业论文选集/叶启汉主编.-北京:中国建材工业出版社,2000.6  
ISBN 7-80159-009-0

I. 纤… II. 叶… III. 纤维增强水泥-中国-1965~1999-文集 IV. TQ172.79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 27804 号

## 纤维水泥制品行业论文选集

(1965~1999)

叶启汉 主编

\*

中国建材工业出版社出版

(北京海淀区三里河路 11 号 邮编: 100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市艺辉印刷有限公司 印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24 字数: 614 千字

2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 38.00 元

ISBN 7-80159-009-0/TU·007

## 本书编委会

名誉主任委员：**吴中伟**

中国工程院资深院士、清华大学教授（著名无机非金属材料科学家暨水泥混凝土专家，我国水泥基复合材料科学技术研究与开发事业的奠基者之一。中国建筑材料科学研究院原副院长兼总工程师、博士生导师。曾担任中国硅酸盐学会常务理事、1980年起担任美国出版的国际性刊物《水泥混凝土研究》编委、1997年后改任荣誉编委、担任《硅酸盐学报》主编32年）

主任委员：**曹永康**

教授级高工（中国建筑材料科学研究院原副院长、中国硅酸盐学会常务理事兼混凝土水泥制品分会理事长、北京市政府专家顾问团顾问、中国无机建材协会GRC分会理事长）

副主任委员：**叶启汉**

教授级高工（国家建材局苏州混凝土水泥制品研究院原副总工程师、东南大学兼职教授、中国硅酸盐学会混凝土水泥制品分会纤维水泥制品专业委员会主任委员、全国水泥制品标准化技术委员会秘书长、中国无机建材协会GRC分会副理事长、全国建材工业混凝土水泥制品情报信息网纤维水泥制品分网网长）

委

员：**沈荣熹**

工学博士、教授级高工（中国建筑材料科学研究院水泥与新型建材研究所高级技术顾问、东南大学客座教授、中国土木工程学会混凝土与预应力混凝土分会理事、国家建材局科教委委员、国际聚合物混凝土组织（ICPIC）国际顾问组成员）

**胡文蛟**

教授级高工（国家建材局武汉建材工业设计研究院原总工程师、院长）

**汤关祚**

教授级高工（国家建材局苏州混凝土水泥制品研究院原院长、全国水泥制品标准化技术委员会常务副主任委员、中国钢结构协会钢—混凝土组合结构协会副理事长）

**徐燮中**

教授级高工（国家建材局武汉建材工业设计研究院原院长、总工程师）

**杨春荣**

高级工程师（沈阳新型建材厂原总工程师）

**朱家振**

高级经济师（江苏爱富希新型建材有限公司董事长、苏州市劳动模范、苏州市仲裁委员会仲裁员、吴江市工业经济联合会副会长）

**赵仲全**

高级经济师（四川嘉华集团股份有限公司董事长、党委书记、全国劳动模范、中国水泥制品工业协会纤维水泥制品专业委员会主任委员）

**周文桔**

高级工程师（湖南株洲纤维水泥制品厂原厂长）

**朱连荣**

高级工程师（湖北华新纤维水泥制品厂原总工程师）

## 编者的话

中国硅酸盐学会混凝土水泥制品分会纤维水泥制品专业委员会与全国建材工业混凝土水泥制品情报信息网纤维水泥制品分网组织承办《纤维水泥制品行业论文选集》(以下简称《论文选集》)的汇编工作,经过大家共同努力,已编辑加工完成。现奉献给读者的这本《论文选集》共计90篇,其中68篇是从1982~1998年举行的第一届至第五届《全国石棉水泥制品学术、标准、信息经验交流会》被评为优秀论文112篇中选用的;9篇是从60~70年代行业研究、开发与生产应用方面的论文中选用的;此外,还选用了由单位或编委推荐反映近年来行业科技进步和发展的论文9篇;中国工程院资深院士吴中伟教授生前在四次《全国石棉水泥制品学术、标准、信息经验交流会》上作的导向性学术报告4篇也收入《论文选集》中。

该书主要包括石棉水泥制品、混合纤维增强水泥及其制品(含非石棉水泥制品)、纤维增强硅酸钙及其制品的行业现状、发展动向的综述;基础理论;新技术、新材料、新工艺、新装备、新产品开发与应用技术;标准与质量控制等方面。全书总结了20世纪60年代以来,我国非金属纤维水泥及其制品行业科研、设计、开发、生产与应用等方面的成果,基本反映出行业的综合水平和发展趋势,并展望了纤维增强水泥基复合材料及其制品的发展前景。

众所周知,石棉水泥制品生产与使用已有100年历史了,在国际上最先形成工业化生产能力,实现商品化。它是一种性能优良,用途很广的一种纤维增强的水泥复合材料。但正如吴中伟院士在“纤维增强——水泥基材料的未来”导向性学术报告中指出:“自从十多年来石棉致癌问题提出后,性能优良的石棉水泥受到很大影响,但石棉水泥的工艺与装备在混凝土、水泥制品工业中是最先进的,以此为基础,开拓思路,努力创新,将各种纤维与优质的水泥基材料(如HPC、UHPC等)结合起来,进行新的复合化,使水泥基材料的缺点得到改进,性能大幅度提高,创造新的绿色建材,扩大用途,造福人类。”这对我们行业有很大启发和指导意义。我们必须结合国情,从行业现实出发和建设发展需要,走多层次复合技术路线,充分发挥我们行业生产工艺和装备的优势,积极开发功能好、用途广、多样化的纤维水泥制品。尤其是应积极研究开发可持续发展的绿色混合纤维增强混凝土与水泥制品,以满足国家建设发展的需求,为进入国际市场创造条件,无疑,纤维增强水泥基材料及其制品是大有作为的。

这本《论文选集》是我们行业的一份珍贵财富,并以此对一直关心和指导我们行业技术进步和发展的中国工程院资深院士吴中伟深切的缅怀。深信通过这本《论文选集》的广泛交流,会对行业技术进步与发展起到一定推动作用。寄希望于行业同仁、广大科技工作者、生产经营者和职工,以十五届四中全会精神为指导,坚定信心,同心同德,奋力拼搏,振兴行业,以新的姿态迈入21世纪,创造辉煌的未来。

该书由叶启汉教授级高工任主编,张明勇高工、陈桂琴高工、李才珩副编审、罗晓真高工以及方冬林工程师分别参与了部分编辑或校对工作。该书得到了编委大力支持和帮助。

该书在出版过程中,得到了江苏爱富希新型建材有限公司、江苏张家港第二建材机械厂、河北省吴桥天马纤维水泥制品有限公司、四川嘉华集团股份有限公司、天津太平洋机电技术设备有限公司、江苏省吴江天平工业用呢厂、南京兴兴玻璃纤维厂等企业的大力支持。中国建材工业出版社也给予了极大支持。

在此，特向为该书提供帮助与支持的单位、编委、论文作者、中国建材工业出版社及有关参与编辑和审校人员等表示敬意和谢忱。

在编辑过程中，由于时间仓促，水平有限，不足或差错处，敬请读者不吝批评指正。

该书读者对象为建设和建材等部门的科研、设计、生产、施工人员使用，质检、大专院校等单位的领导、工程技术人员、师生以及有关管理人员。

叶启汉

2000. 5. 30

# 目 录

石棉水泥材料的发展前景 .....	吴中伟	(1)
特高强纤维水泥基材料 .....	吴中伟	(3)
依靠科技进步 挖掘纤维水泥的巨大潜力 .....	吴中伟	(6)
纤维增强——水泥基材料的未来(提要) .....	吴中伟	(8)

## 第一篇 绪 论

纤维水泥制品工业的现况、动向及展望 .....	沈荣熹	(13)
墙改、节能和 GRC 板 .....	曹永康	(20)
关于装饰材料市场、问题、发展主攻方向的思考 .....	王少南	(25)
利用当前墙改的大好形势 加快行业发展 .....	孙福刚	(31)

## 第二篇 石棉水泥制品

我国石棉水泥制品行业现状与对今后发展的几点意见 .....	叶启汉	(37)
石棉水泥制品行业发展动态分析与对策(摘要) .....	方庆平 江运祥	(45)
扬长弥短 广开材路 .....	沈荣熹	(48)
再论多种纤维组合增强水泥基材效应(摘要) .....	杨春荣	(53)
论石棉在制品中的作用和纤维排列方向与质量的关系 .....	刘光明	(55)
试论我国石棉水泥波板配料计算公式的设计途径 .....	雒鸿吉	(59)
生产石棉水泥制品用的水泥初探 .....	杨洪杰 王福孝	(61)
对利用水泥水化热促进石棉水泥瓦硬化的初步探讨 .....	戴少文	(66)
高效絮凝剂对石棉水泥料浆絮凝效果的影响 .....	由永玺 江锦秀	(70)
中波瓦无垫板辊压工艺的试验和机理的探讨 .....	胡文蛟 周 行	(73)
纤维水泥制品生产中的新技术——匀浆工艺 .....	张 枫	(76)
浅谈纤维水泥平板干缩问题的对策 .....	史志强	(78)
论影响纤维水泥平板加压工艺的因素——兼谈加压工艺参数的选择 .....	史志强	(81)
石棉水泥小波瓦垫布失效分析及改进实践 .....	江运祥	(84)
扣压毛毯使用方法的改进 .....	周铭森	(87)
对纤维水泥制品厂生产用水闭路循环的研讨 .....	伍国瑞 雒鸿吉	(89)
闭路循环、节约资源、保护环境——浅谈生产石棉水泥瓦的回水治理方法 .....	夏洪光 李坤荣 曾佳祥	(93)
不等弧形波瓦的设计与强度效益 .....	刘志惇	(96)
流浆法生产技术 .....	徐 征 龚荣加 胡利明 黄仕隆	(101)
流浆法波瓦、平板生产中料坯厚度均匀性的探讨 .....	江 竟 庄若骥	(110)
加压砂质纤维水泥平板的研制 .....	罗晓真 张明勇 赵德存	(115)

纤维水泥注浆成型工艺原理性试验研究 .....	叶启汉	罗晓真	陈桂琴	(120)
波瓦真空成型工艺及设备 .....	徐燮中	马 骏	高德荣	黄仕隆 (125)
纤维水泥板加压设备的选择 .....			徐燮中	(127)
新型超高压石棉水泥板液压机的设计与制造 .....			朱勉学	(129)
浅论纤维水泥瓦、板液压机设计的技术关键 .....			朱勉学	(135)
500 型高压水射流切割机 .....			贾会明	(138)
纤维增强水泥制品预拌泵注新工艺设备及其控制系统的研究 .....	祁振庆		蒋云强	(140)
高效纤维松解机 .....			朗培坤	(145)
LKY 料坯控制仪在抄取法、流浆法生产线上的应用 .....	王 平		刘绍庄	(148)
抄取法石棉水泥制管机取消上毛布技术简结 .....	任景武	刘再恒	李连兴	(151)
石棉水泥耐油性能的研究 .....	叶启汉	方春霖	冯文澜	(154)
石棉水泥管管壁结构对透气性的影响 .....	沈荣熹		叶启汉	(159)
纤维水泥加压板通风管的研究 .....			杨作用	(164)
石棉水泥压力管湿差和温差的控制 .....			钱继忠	(168)
大口径石棉水泥管级别的选择及接头套管强度的计算方法 .....			张明勇	(169)
纤维水泥管在农业排灌中的应用与研究 .....			喻有根	(172)
采用干法静压成型石棉水泥异形管件 .....	王更生	梁永熙	张志华	(174)
振动挤压制造 45° 石棉水泥弯管 (摘要) .....			冯文澜执笔	(175)
φ125~150mm76 型钢筋混凝土法兰柔性接头试验总结 (摘要) .....			汪有端执笔	(176)
石棉水泥套管滑动圆形胶圈柔性接头试制总结 .....			汪有端执笔	(177)

### 第三篇 代用材料、混合纤维增强水泥及其制品

论混合纤维在石棉水泥制品工业化生产中的应用价值 .....			杨春荣	(181)		
维纶纤维对混合纤维水泥物理力学性能影响的研究 .....	叶启汉	陈桂琴	罗晓真	(184)		
改性维纶代替部分石棉制成的混合纤维水泥制品耐久性试验研究 .....	叶启汉	陈桂琴	杨作用	(189)		
混合纤维水泥喷灌管的研究与应用 .....			国家建材局苏州混凝土水泥制品研究院、湖北水利厅农水处等	(198)		
推广云母代石棉对技术进步作贡献 .....			周文桔	江运祥 (202)		
海泡石代替部分石棉可能性的探讨 .....			何雨龙	(204)		
掺加云母代替部分石棉研制与生产混合纤维水泥管 .....			朱连荣	刘华钢 (206)		
硅灰石代替部分石棉、纸浆生产中波瓦的研究 .....			朱连荣	刘华钢	代能礼	夏向阳 (210)
用云母鳞片代替部分石棉生产石棉水泥小波瓦的研究 .....			董连增	张书亭	孔慧芳	甄福德 (214)
在石棉水泥中以麻纤维代替部分石棉的研究 .....			吴卫平	(217)		

### 第四篇 非石棉纤维增强水泥制品与应用

墙体现状与发展要点浅析 .....			蔡建明	(221)
生态 (绿色) 建材发展现状及迈入 21 世纪对策 .....			朱家振	(225)



无石棉维纶纤维水泥板的工艺原理与特性 .....	沈荣熹 杨瑞珊 崔 琪 崔玉忠	(229)
无石棉轻质纤维水泥平板的研究 .....	崔玉忠 崔 琪 凤 海	(236)
海泡石纤维水泥电缆管的研究 .....	任景武	(241)
玻璃纤维增强氯氧镁水泥强度性能研究 .....	韩敏芳 吕 锋	(246)
BA 型耐碱被覆料与玻纤网格布的研究 .....	由永玺	(249)
被覆玻纤网增强普通硅酸盐水泥及其制品的开发与应用 .....	由永玺执笔	(253)
加玻纤网格布的 GRC 轻质多孔墙板设备的开发及生产应用 .....	李 巍	(258)
均质纤维石膏板的生产与应用 .....	蒋志全	(261)
可用于灾区房屋重建的无骨架纤维水泥墙板 .....	沈荣熹	(265)
YS 涌水复合板的开发与应用 .....	俞福运	(269)
纤维增强水泥内墙板与幕墙板 .....	伍国瑞	(272)
采用改性聚丙烯纤维提高混凝土抗裂性的研究 .....	方冬林 罗晓真 张明勇	(276)

## 第五篇 纤维增强硅酸钙及其制品

硅酸钙板现状及发展前景 .....	吴卫平	(283)
硅酸钙形成机理与影响其强度因素的研究 .....	窦丹若	(287)
硅钙板及硅钙质体系有关板材的试制和研究 .....	马 骏 龚荣加 胡利民 蒋志全	(298)
混合纤维配筋硅钙制品性能试验研究 .....	叶启汉 张明勇	(303)
硅酸钙板流浆法成坯工艺初探 .....	章锦安 林加智	(307)
硅酸钙板定厚辊压生产工艺初探 .....	章锦安	(310)
无石棉硅酸钙板 .....	曾文之	(311)
节能型轻质板材——粉煤灰硅酸钙板 .....	张 枫	(315)
粉石英硅酸钙板 .....	曾文之	(320)
瓷土硅酸钙板 .....	曾文之	(325)

## 第六篇 标准与质量控制及其他

我国石棉水泥制品标准化工作概况 .....	叶启汉	(333)
严格执行国标 促进行业发展 .....	冯立平	(338)
论质检工作对于现代企业的重要作用 .....	田 华	(341)
纤维水泥制品的验收条件浅析 .....	张明勇	(346)
石棉水泥制品的质量控制 .....	杨洪杰	(349)
微机应用于石棉水泥制品生产质量检测与控制的试验研究 .....	冯伟祥 孙惠农 李志明	(352)
增强竞争意识 提高职工素质 .....	张志忠	(356)
附录 1 《中国建材报》刊登有关《全国石棉水泥制品学术、标准、信息经验交流会》 的信息 .....		(358)
附录 2 历届《全国石棉水泥制品学术、标准、信息经验交流会》会议纪要、简况 以及部分代表随感赋诗选登 .....		(359)
附录 3 历届《全国石棉水泥制品学术、标准、情报(信息)经验交流会》征集 论文数目与评选结果 .....		(368)

附录 4	历届《全国石棉水泥制品学术、标准、情报（信息）经验交流会》论文 评选推荐（小组）委员会 .....	(369)
附录 5	支持单位简介 .....	(370)

# 石棉水泥材料的发展前景

中国硅酸盐学会常务理事兼水泥制品专业委员会主任委员  
中国建筑材料科学研究院原副院长

吴中伟 教授

**【编者按】** 本文为吴中伟教授于1982年9月在首届《全国石棉水泥制品学术、标准、技术情报交流会》上作的导向性学术报告。

## 一、水泥基复合材料(cement-based composite materials)

### 1. 复合是材料的一个重要发展方向

材料向复合材料发展,古已有之,如草筋泥、三合土、桐油或糯米汁石灰等。近代的水泥混凝土、钢筋混凝土、聚合物混凝土、纤维增强材料都是复合材料。玻璃纤维增强塑料即玻璃钢(GRP)更显示出复合材料的巨大优越性,因此发展十分迅速。1980年美国国家材料顾问委员会(NMAB)首先提出“水泥基复合材料”(缩写为CBCM)这一名词,它包括一切以水泥为基材的复合材料。从水泥石、砂浆,各种混凝土,钢筋混凝土,预应力混凝土,钢丝网水泥到各种纤维、聚合物增强的水泥石和混凝土。

### 2. 高效复合材料的四个要素

(1)增强材(中心质)——应具有优良的性能如高的强度和耐久性等;(2)基材(介质)——应具有高的强度和良好的稳定性;(3)界面粘结性能好,稳定性好;(4)增强材与基材的最优配合。

以玻璃钢为例,玻纤与树脂各具特点,当复合成玻璃钢时各自的性能得到相互补充。由于使用了各种硅烷偶联剂,纤维浸润剂以及合适的工艺,界面粘结问题得到了圆满的解决,它才成为高效能复合材料,得到越来越大的发展。

复合材料的科学思路是:中心质与介质相互补充,使各自的优点得以充分发挥,从而掩盖和克服各自的缺点,达到所谓“1+2=6”的叠加效果。

按照上述四要素来衡量,任何水泥基复合材料几乎无一可与石棉水泥相媲美。

(1)增强材的强度。温石棉抗拉强度高达3000MPa,经松解后虽受损伤,强度仍达500~700MPa(1MPa=10kg/cm<sup>2</sup>)。

(2)基材。近代波特兰水泥已具有较高的强度。但用于石棉水泥,还有提高和选择的必要。例如水泥的组成和细度应适合于抄取等工艺。压蒸砂质水泥能够减少水泥石中Ca(OH)<sub>2</sub>结晶的含量,调整孔分布并生成托勃莫来石,使耐久性和强度进一步提高。采用真空、加压等工艺也能够较多地改善石棉水泥中基材的性能。

(3)界面粘结性能。首先由于石棉纤维对水泥浆的物理、化学、物化作用超过其他任何纤维和中心质。此次学术讨论会上有好几篇报告也提到这一点。将在下节详细讨论。

(4)增强材在基材中合理分布与排列。抄取法制得石棉水泥中石棉含量可高达20%左右,并使纤维均匀分布,取向排列,起到有效地承受荷载与阻裂等作用。根据不同成型工艺制度下的粘结强度与纤维抗拉强度的关系,可计算纤维合理的长径比为50~100之间。如果进一步提高界面粘结力,则合理的长径比还能减小,更有利于短棉资源的充分利用。

国内外资料提出纤维排列方向与有效利用系数的关系如下表所列。

夹 角	0°	30°	45°	60°
利用系数	1	0.620	0.428	0.310

如果利用层叠法,可以进一步改变纤维排列,从而得到最合理的配筋方案。例如双向受力板可用两层夹角 45°的坯层,反向叠压而成;两向不等受力的板可用夹角 60°或 30°的坯层进行叠压等。当纤维效应圈的作用得到深入的研究后,通过改变纤维的体积率与排列方式,有可能使石棉水泥成为最经济合理和耐久的高强薄壁结构材料,不仅在水泥基复合材料中居首位,并将超过其他建筑材料。

## 二、石棉水泥材料中的界面与效应圈

这是当前水泥基复合材料科学中急需研究的问题。只有解决了效应圈的问题,通过改进效应圈的组成、结构和性能,才有可能使这类材料的性能得到大幅度的提高,才能充分发挥材料的潜力,使石棉水泥材料的缺点,包括吸水翘曲、收缩开裂、脆性、抗拉强度低等问题,也能得到相应解决。

中心质与介质的界面外都存在一个过渡层。在过渡层中,组分、结构以及性能不同于层外的介质。过渡层的形成可粗浅地认为是中心质和介质中可溶性成分进入中心质外水膜层的结果。实际上,这是中心质与介质之间化学、物理、物理化学多种作用的结果。其范围还能扩大到中心质边缘部分,因而也影响这部分中心质的组成、结构和性能。

在绝大多数水泥基复合材料中,由于过渡层中氢氧钙石(CH)结晶和其他水化产物如 AFe、CAH 等结晶与孔体较大,结构疏松,以及晶面间的开裂滑移,过渡层常常被认为是薄弱环节(如图 1)。裂缝、渗透、腐蚀多由此处开始或进入。

氢氧钙石是水泥水化物中最不稳定的组分,既容易被溶失,也容易沿其晶面开裂滑移。在石棉水泥中,由于石棉纤维具有很大的比表面与较强的吸附作用,加上抄取、真空、加压等工艺的影响,水膜层的厚度大为减小,CH 的数量也大为减少,既能减少晶界开裂的机会,又能加速 C<sub>3</sub>S 等的水化,得到致密的过滤层,改善了孔结构(减少有害的大孔);还有一些新的水化生成物能够进入石棉纤维的界面,更提高了界面的结合能力。所以石棉纤维与水泥石的粘结强度要高出一倍。所以石棉纤维与水泥石的粘结强度要高出一倍。所以石棉纤维与水泥石的粘结强度要高出一倍。

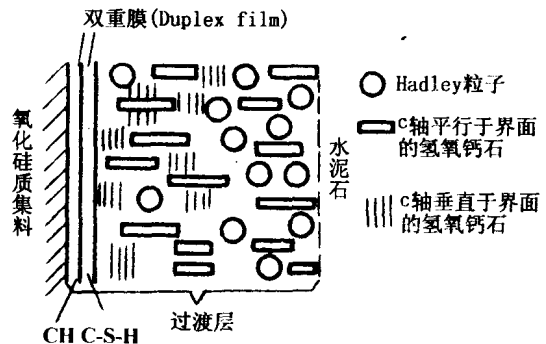


图 1 硅质集料界面过渡层结构示意图  
(根据 Barnes 等的研究)

上述优良的界面作用,产生了性能较好的过渡层或效应圈。扩大这种效应圈材料中的范围,能够提高材料的整体性能。扩大效应圈范围的有效方法是增加中心质(石棉纤维)的数目,以减少中心质的间距,使效应圈不仅布满全部介质中,并且取得效应叠加的作用。如图 2。

参加长径比合适的短棉,就能达到增加中心质的目的。为了发挥短纤维的阻裂作用,理论计算的长径比 50~100 应乘以 2,即以 100~200 为宜。

综上所述,石棉水泥材料科学的研究应该引起大家的重视。十多年来,我国在石棉水泥制品的品种、工艺、设备、应用技术以及材料与结构的宏观性能研究等方面进行了不少工作,取得了显著成绩;今后应该加强材料科学的理论研究,为发展石棉水泥这种高效能复合材料

开辟道路。

### 三、材料的发展在于比较与“竞争”

当材料具有下列条件时,便能够得到大的发展。因此作者认为石棉水泥作为建筑材料具有广阔的发展前景。

- (1)在资源充足,成本与能耗较低,技术可行等有利条件下,能够满足多种用途的要求;
- (2)具有某些特性,能够开发某些重要的新用途;
- (3)能够不断提高性能,并且稳定可靠;
- (4)形状尺寸准确,并且容易保证。石棉水泥能够作为 3mm 厚的尺寸,是其他水泥基复合材料所不及的;
- (5)能够与其他材料相组合使用;
- (6)能够利用废渣,例如采用压蒸工艺,可掺加粉煤灰等。

今后建筑材料将面临越来越严峻的挑战,不仅在能耗与成本方面,而且在性能和用途上。例如在海底、地下、严寒、高温、腐蚀、冲刷等环境中应用。由于近年建筑物倒塌或损坏事故时有发生,人们十分重视材料的耐久性,石棉水泥中的增强材与基材均是耐久性好的材料,为金属材料与高分子材料所不能比拟,因此在耐久性方面应该处于优势地位。

当一种材料为社会所必需时,人们就会设计克服困难去取得它。石棉粉尘危害很大,在科技发达的今天,采用自动化技术,密封技术,机械手操作来改善工人的劳动条件是完全可能的。但在没有实现之前,我们必须十分重视劳动保护,加强经常性教育与采取切实措施。这不仅为了石棉水泥工业的发展,而且也是我们社会主义国家的性质所决定的责任。

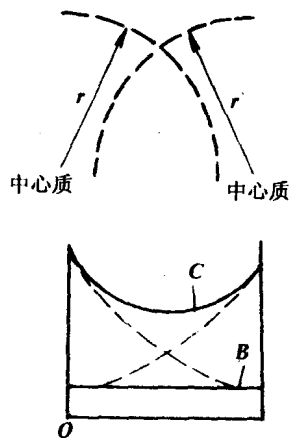


图2 效应圈叠加示意图  
 $r$ —效应圈半径; $B$ —介质平均性能曲线; $C$ —界面效应叠加后的性能提高曲线

## 特高强纤维水泥基材料

中国工程院院士 吴中伟 教授

**【编者按】** 本文为中国工程院院士吴中伟教授于1992年5月在第三届《全国石棉水泥制品学术、标准、信息经验交流会》上作的导向性学术报告。

### 一、水泥基材料向高强、特高强的方向发展

1980年美国首先提出水泥基复合材料(Cement-based Composite Materials,简称水泥基材料)这个名词,包括一切以水泥为主要胶结材的各种混凝土、钢筋混凝土、纤维增强水泥以至各种特种混凝土。掺加纤维、聚合物的高强、特高强纤维水泥基材料是今后的发展方向。

高强水泥基材料一般以抗压强度50MPa为低限。特高强水泥基材料则可根据下列三原则与高强水泥基材料分界。

- (一)抗压强度大于100MPa。
- (二)制作工艺与传统工艺有明显差别。
- (三)压拉比小于4。

### 二、特高强纤维水泥基材料

为了大幅度提高抗拉、抗折、韧性、抗冲和耐疲劳等性能,必须加入各种增强纤维如钢纤

维、石棉纤维、聚合物纤维、碳纤维等。最早的特高强水泥基材料创始于英国帝国化学公司与牛津大学,称为无宏观缺陷水泥(MDF),是由90%以上的铝酸盐水泥(或高标号硅酸盐水泥)、1%~8%的水溶性聚合物(如聚乙烯醇、聚丙烯酰胺)、适量超塑化剂和极少量水( $W/C=0.1\sim 0.2$ )经特制设备拌合辊压成均匀的捏塑体,用4~10MPa的成型压力成型,保压一定时间;也可用挤出或注模成型。MDF可达到下列性能指标:抗压300MPa,抗折150~200MPa,抗拉140MPa,静弹性模量50GPa。还可加入特种填料(如不锈钢屑等)取得各种特殊功能,如声学、电磁、抗渗等特性。

当加入适量纤维后,断裂能可提高数十倍,普通水泥石约 $20\sim 50\text{Jm}^{-2}$ ,无纤维增强的MDF为 $200\sim 500\text{Jm}^{-2}$ ,加入15%维纶纤维可达 $45000\text{Jm}^{-2}$ 。抗冲能力特高,与有机玻璃接近,可用作装甲防弹材料。

MDF生产能耗低,只有陶瓷的1/20,钢的1/70,但在用途上可代替陶瓷、钢、铝等用于多种特殊场合,因此是一种十分有发展前途的高效能材料。除MDF以外美国等还发展一种叫“微粒密实水泥(DSP)”和一种叫化学结合陶瓷(CBC),都是特高强水泥基材料,也都有特高的强度指标和某些特殊性能。

近10年来欧美、日本等国十分重视特高强水泥基材料的研究开发。例如美国国家科学基金会于1989年建立高强水泥基材料科技中心,投资一千万美元,由几十所大学与科研院所协作攻关,日本一些大公司也进行了风险投资,并已取得进展。我国也有几所大学开始研究。

MDF等的研究指导思想,均以微粒、高密实性为基础,严格限制大孔的尺度和数量。例如MDF创始人认为消除Griffith临界尺度的孔缝就可能得到特高的强度。后来的研究者又提出增大临界应力强度因子 $K_{Ic}$ 也能提高强度,例如 $K_{Ic}=3\text{MNm}^{-1.5}$ 时,孔缝长度小于 $15\mu\text{m}$ ,强度也能达到180MPa。增强凝胶本身的强度或增加聚合物的交联作用,就能提高 $K_{Ic}$ 值。

作者认为改善界面结构或强化界面区是提高特高强水泥基材料,尤其是特高强纤维水泥基材料所必需,其重要性至少不亚于密实性和孔结构。作者在50年代为了提高混凝土性能提出的中心质假说,也可能作为特高强纤维水泥基材料组成结构的研究原则。

中心质假说将水泥基材料的组成为分散相与连续相两类,前者为中心质,后者为介质;又按尺度划分为大、次、微三个等级,各级中心质分散于同级的介质之中。纤维、集料等是大中心质,水化前的熟料、活性填料和水溶性聚合物是次中心质,结晶度好的水化产物为微中心质,水化物凝胶以及结合水为微介质,水和空气留下的气孔则称为大中心质 $P$ 。中心质与介质之间的界面也分成三个层次,以便于进行研究。见图示。

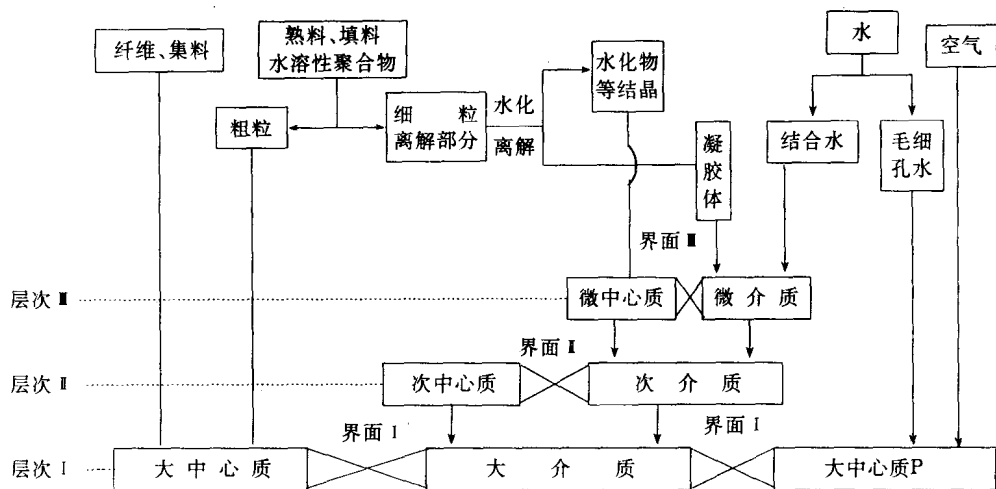
### 三、特高强纤维水泥基材料结构模型

根据中心质假说提出下列结构模型,可以用来描述、解释和改进纤维水泥基材料的性能,达到特高强和高功能的目的。

1. 各级中心质(分散相)以最佳状态分散在各级介质之中。在中心质与介质的界面两侧存在过渡性的界面区(又名过渡带),属于渐变的非匀质的过渡结构。故纤维水泥基材料中,以中心质——界面区——介质的顺序排列。

2. 网络化是中心质的特性,以纤维为主的大中心质,网络化现象尤其突出。各层次的中心质网络构成纤维水泥基材料的骨架;各级介质填充其间。强化的网络骨架,尤其是大中心质网络骨架,是高强、特高强的必要条件。

3. 界面区保证着中心质与介质的连续性,并保证着中心质效应的充分发挥。强化界面区是高强、高功能的纤维水泥基材料的又一必要条件。



中心质假说中的组成结构图解

4. 孔缝也是分散相, 尺度较大的孔(如毛细孔)对强度等性能有害, 应加以限制。

下面对中心质网络化、界面区组成结构与中心质效应作简单说明:

1. 中心质网络化 各种增强纤维在水泥基材料中分散形成网络, 是大中心质网络, 也是材料的主要骨架。水溶性聚合物则形成次中心质网络; SEM 观察 MDF 可见到熟料粒子间充满聚合物与水泥水化物相互交错的网状物。水泥水化物晶体形成微中心质网络。三个层次的中心质网络形成纤维水泥基材料的空间骨架。石棉纤维的优良吸附性能有利于大中心质——微中心质网络的形成; 不同品种、性质、尺度的纤维混杂参加, 有可能得到最优化的网络结构, 取得特高强纤维水泥基材料的优异性能。

2. 界面区的组成结构 用普通工艺制作的水泥基材料中的界面区, 常因多孔、水化物结晶的形貌、尺寸、分布和取向排列等缘故成为薄弱部分, 也不利于中心质效应的传递。必须强化界面区, 在组成结构方面加以改善。石棉纤维具有优良的表面性能和分散性, 有利于界面区的强化。

3. 中心质效应 首先是大中心质效应, 它能改善大介质的某些性能, 使在效应范围内的大介质得到强化。纤维和其他细丝微粒均有利于大中心质效应的发挥。

当中心质间距小于有效效应距时, 由于效应圈的叠加作用, 使界面区和大介质得到进一步强化。可用三个量来描述中心质效应, 称为中心质效应三要素: 效应程度; 效应梯度  $r = dl/dx$ ; 有效效应距  $x_0$ 。应通过研究来提高中心质效应。

#### 四、特高强纤维水泥基材料的应用问题

国外研究者根据特高强水泥基材料的优异性能, 提出用来代替钢、铝、陶瓷等用于某些特殊用途; 例如机械工业的模具、垫片、低温容器等, 电子工业的电源屏障、超导元件等, 军工的装甲、防弹等, 医药工业的人造骨骼、牙齿等, 以及声阻尼材料与防震、耐磨材料等。

以上均属小量特种用途。大量应用应该在土建工程中去开发。作者提出用作镶嵌部件, 利用其高强度、高抗冲性、耐久性等特殊性能来弥补混凝土等大宗结构材料之不足, 以期大幅度提高建筑物的耐久性和功能。但是土建结构和构件常有稳定性、刚度、配置钢筋和埋件、防止钢筋锈等要求, 因此有最小尺度的限制, 而特高强水泥基材料受到工艺和成本等制约, 长宽不宜大于 2~3m, 厚度则小于 1~3cm。所以近期内只能用作表层镶嵌。当混凝土表面得到特高强纤维水泥基材料镶嵌件的保护后, 常见的破坏因素如冻融循环、渗透、磨损、化学腐蚀、冲击、疲劳

以至钢筋锈蚀均能有效地防止。既能大幅度增加安全使用期限,减少维修费用,又能提高使用功能,增加美观。所得到的经济效益将超过镶嵌部件的费用。

我国石棉水泥工业已开始配备 7000~9000t 压机,有条件开发特高强纤维水泥基材料镶嵌部件。应根据用途,进行部件设计,充分利用材料的优越性能,并积极研究解决镶嵌、粘接、锚固等技术。特高强纤维水泥基材料有着很好的开发前景。

## 依靠科技进步 挖掘纤维水泥的巨大潜力

中国工程院院士 吴中伟 教授

**【编者按】** 本文为中国工程院院士吴中伟教授于 1995 年 9 月在第四届《全国石棉水泥制品学术、标准、信息经验交流会》上作的导向性学术报告。

今年 5 月,党和政府作出“关于加速科学技术进步”的决定,召开全国科技大会,掀起“科教兴国”的战略热潮,加速把经济建设转移到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上,这对我们科技人员来讲既是挑战也是机遇。十多年来经济发展速度加快,但经济增长的代价很高,依靠科技进步不多,因此效益不高,缺少竞争力,对于国计民生是十分不利的,必须在科技上加速进步,增加科技进步的贡献率。我们水泥制品行业也是如此。下面就如何挖掘纤维水泥的潜力来推动我们行业的发展,提出意见供参考。

### 一、复合化

从历史上看,复合化是材料科技进步的一条重要途径,从新石器时代的草筋泥到 1900 年工艺就已趋成熟的抄取法石棉水泥,1930 年的预应力钢筋混凝土,1940 年前后的玻璃钢,直到 1990 年发表的超高强度水泥基材料,贯穿着复合化在水泥材料方面的不断发展与应用,使水泥基材料达到现代的较高水平,并且还将有更大更快的发展,因此复合化应是挖掘纤维水泥巨大潜力的主要努力方向。

1. 复合化的科学思路(或哲学)是超叠加效应(Synergerticeffect),其表达式为:

$$1+2 \gg 3 \sim 100 \text{ 以上}$$

即通过复合,整体材料的性能比组分材料性能之和要大得多,而并非二者或三者之叠加,要超过叠加之总和以至若干倍。1992 年在九江市第三届全国石棉水泥制品学术、标准、情报经验交流会上,我讲了“特高强纤维水泥基材料”,在 MDF 中加入适量纤维,断裂能提高数十倍,如水泥石为  $20 \sim 50\text{J/m}^2$ ,MDF 不加纤维为  $200 \sim 500\text{J/m}^2$ ,如加入 15% 维纶纤维,则可高达  $45000\text{J/m}^2$ 。玻璃钢以至钢管混凝土都是很好的证明。我们应很好地运用这一思路来进行科技创造与开发。

2. 中心质效应 50 年代我为了提高混凝土的性能,挖掘各种混凝土的潜力,提出中心质假说,在 1992 年九江会议上曾作了介绍。在纤维水泥中纤维是大中心质(其微粒可看作为次中心质),中心质对周围介质(水泥石)起着中心质效应,即影响介质的性能(如抗裂性、抗渗性、强度、变形性等),其中变形性更为明显,即在纤维四周一定范围内(效应圈)水泥石的韧性有所提高,其实这是一种假韧性,由于变形分布得均匀,延迟了裂缝(可见的或较大的)出现,似乎韧性和抗裂性得到改善,这种改善和提高在技术上与应用上具有很大的实际价值。



中心质效应是通过纤维水泥石的界面区(过渡层)来起作用,因此要发挥中心质效应必须要改善界面区的结构(在此未考虑偶联剂的采用,现在还未很好解决水泥与现用的几种纤维的偶联剂,将来会得到解决,那时纤维水泥的性能将又有更大的提高),因此要挖掘纤维水泥材料的潜力就要保证纤维与界面区都要提高性能。

改进和提高界面区结构与性能的办法有:

(1)减水 以减少孔隙率,改进孔结构,如减水剂、真空、挤压等已有不少办法。

(2)掺加活性细掺料 如硅灰、优质粉煤灰、矿渣、沸石粉等几种掺料的复合,也很有效。

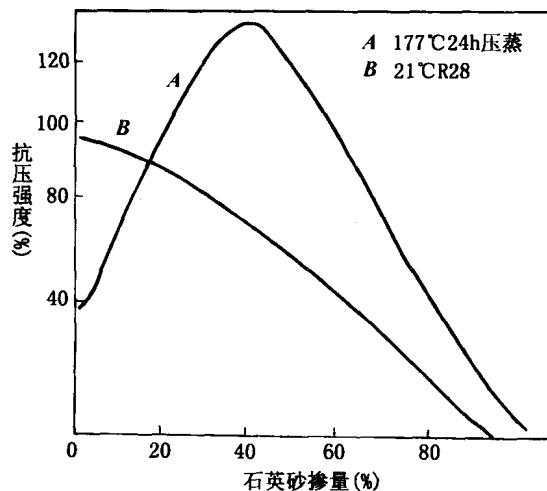
(3)掺加聚合物乳液 这是国内外较新的研究成果,在经济合理的情况下可以选用。

现在国内外用得较好的聚合物乳液有丙烯酸酯共聚乳液(南京水利科学研究所,国外有荷兰等),其特点有:①减水作用,可达30%以上;②增加抗裂性,当聚灰地 $>10\%$ 时,可提高极限延伸率1倍以上;③减少干缩率,对纤维水泥制品应用性能有利;④提高与纤维的粘结力;⑤耐老化性、耐腐蚀性、抗冻性均有显著提高。现荷兰 Delft 大学与我国铁道部门正研究轨枕防裂问题,用聚丙烯酸酯共聚乳液加入钢纤维水泥与玻璃纤维水泥。其他聚合物掺加入纤维水泥也可研究开发。

## 二、压蒸工艺

在湿热条件下水泥加速水化,使强度等性能提前达到出厂要求。蒸汽养护或其他加热养护已普遍采用。苏联在50年代就用高压蒸汽养护,后来又用砂质水泥作石棉水泥制品。用石英砂代替部分水泥在压蒸条件下取得良好效益。

早在1912年就有人提出压蒸混凝土,到30年代中叶 C. A. Mengce 进行了压蒸材料的系统研究,并提出掺入石英砂代替30%~40%的水泥,强度比纯水泥高,密实性与耐久性也较好。近20年来不少水泥化学家对压蒸水化产物进行了大量研究,得出:由于生成大量11 Å 托勃莫来石晶体,在水泥石中得到晶体与胶体的合理比例乃是压蒸得到高性能的原因(高强度与体积稳定)。掺加石英砂还能加快 $C_3S$ 与 $C_2S$ 的水化作用,使强度加速增长。当石英砂掺量合适时,静停2h,升温1.5h,恒温 $175^\circ\text{C}$ (9~10气压)8h,降温1.5h,可达到纯水泥常温28d强度的1.2倍(见图)。



掺磨细石英砂对压蒸强度的影响

最佳晶胶比随孔隙率而异,孔隙率高时,凝胶量多,则强度较低;反之晶体多则强度较高。