



纤维加筋水泥土 固结强化机理

Consolidation Strengthening Mechanism of
Fiber Reinforced Cement-Soil

吕祥锋 / 著



科学出版社

国家自然科学基金面上项目(编号: 51774048)

国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 51504029)

北京市优秀人才培养资助青年拔尖个人项目(编号: 2017000021223ZK04)

纤维加筋水泥土固结强化机理

**Consolidation Strengthening Mechanism of Fiber
Reinforced Cement-Soil**

吕祥锋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了作者在新型纤维加筋水泥土补强理论、方法和机理方面的研究成果,并结合国内外相关方面的研究成果,对不同纤维加筋水泥土固结强化过程、规律及机理进行较系统和全面的论述。书中详细介绍了纤维加筋水泥土固化补强的发展水平,分析了国内外目前在纤维加筋水泥土理论、方法和机理方面存在的主要问题,研究了不同组分纤维、纤维含量和细长比对纤维加筋水泥土固结强度的影响规律,揭示了纤维加筋水泥土固结强化机理。研究成果为地下病害原位快速加固提供了新材料、新方法。

本书可供土木建筑工程、岩土工程、地下工程等领域从事科研、设计、施工人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

纤维加筋水泥土固结强化机理=Consolidation Strengthening Mechanism of Fiber Reinforced Cement-Soil / 吕祥锋著. —北京:科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-060701-0

I. ①纤… II. ①吕… III. ①加筋土-水泥土-固结(土力学)
IV. ①TU411.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第039566号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:王萌萌
责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京鹰诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年4月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年4月第一次印刷 印张:8 3/4

字数:203 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,城市地下空间工程发展迅速,地下工程建造和运营过程中地层病害发生严重,影响交通通行和人民生命安全。对地层病害预处理是防治地层塌陷、塌孔、沉降的有效途径,然而,固结强化纤维加筋土材料研究成为地层病害预处理的关键难题,已引起了岩土工程相关科研人员和技术人员的广泛关注。纤维加筋水泥土作为一种新型的加固土体,与传统加固材料相比,因其良好的抗拉、抗压等力学性能,受到国内外广泛关注,众多学者也对其进行了多方面、多层次的研究,然而对其理论研究还不够深入、成熟,存在诸多需要讨论的问题。纤维材料虽价格低廉,但其难降解的性质对环境的影响值得众多学者警惕;另外纤维加筋水泥土固结强化过程中的微观形变特征及催化基质晶格移动规律缺乏具有充分理论支撑的明确认识;对于纤维加筋水泥土强度变化的微观原理及其应力-应变关系特征的研究,特别是对土体本构模型的确立还缺乏较统一的计算模型,同时对于纤维加筋水泥土的残余强度及细观形变受纤维的含量、物理尺寸及性状影响规律缺乏有力的试验及研究成果。总之纤维加筋水泥土作为非均质体,其强度、韧性、刚度受纤维的含量、组分等众多因素影响,多因素影响下的微观机理、宏观表现成为现在研究的重点、热点问题。

笔者长期从事地下空间工程灾害发生理论及动态控制技术相关工作。依托国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年科学基金项目 and 北京市优秀人才培养资助青年拔尖个人项目,系统研究不同纤维加筋水泥土固结强化过程、规律及作用机理,结合前人研究,采用宏观-细观-微观多尺度实验相结合的方法,对五种纤维(棉麻纤维、锦纶纤维、玄武岩纤维、涤纶纤维和丙纶纤维)的物理-化学-力学性质差异进行实验研究,同时获取差异性纤维微观形貌特征与界面特征,并进行对比;对不同种类的纤维加筋水泥土固化机理特征和力学性能改善效果进行对比分析,从而得到强度增长机理。为城市地下空间工程灾害快速修复提供了新材料和新方法。本书的出版得到了北京服装学院龚龔副教授的指导,部分研究内容得到课题组和实验室各位同事的

大力支持帮助。在研究过程中，得到了北京市市政工程研究院周宏源硕士研究生、张硕硕士研究生和杨晓辉硕士研究生的帮助。在此，对他们表示诚挚的感谢。

书中不妥之处，敬请读者批评指正。

吕祥锋

2019年1月

目 录

前言

第 1 章 纤维加筋水泥土强度研究现状	1
1.1 纤维加筋土国内外研究现状	1
1.2 纤维加筋水泥土国内外研究现状	2
1.3 纤维加筋水泥土固结强化发展趋势	3
1.4 项目研究内容和技术路线	4
第 2 章 不同基质纤维微观形貌差异研究	6
2.1 棉麻纤维微观形貌特征	6
2.1.1 水泥土的制备	6
2.1.2 水泥土微观结构分析	7
2.1.3 棉麻纤维微观催化晶格形变分析	8
2.2 锦纶纤维微观结构分布规律	10
2.3 玄武岩纤维微观形态特征	11
2.4 涤纶纤维微观尺度特性研究	14
2.5 丙纶纤维微观结构形态规律	16
2.6 不同基质纤维微尺度及组分差异分析	18
第 3 章 纤维加筋水泥土细观力学特性研究	21
3.1 棉麻纤维加筋水泥土固后细观力学特征	21
3.1.1 水泥固化砂土衍射光谱分析	21
3.1.2 不同含量棉麻纤维衍射光谱分析	22
3.1.3 棉麻纤维应力-应变关系理论分析	25
3.1.4 强度变化规律分析	29
3.1.5 残余强度变化规律	30
3.1.6 刚度系数变化规律	33
3.2 锦纶纤维加筋水泥土固后细观力学规律	35
3.2.1 锦纶纤维相变衍射光谱分析	35
3.2.2 破坏模式与应力-应变关系	38

3.2.3	峰值应力与峰值应变变化规律	39
3.2.4	峰值应力-应变关系分析	42
3.2.5	残余强度研究	47
3.2.6	刚度系数和脆性指数变化规律	50
3.3	玄武岩纤维加筋水泥土固后细观力学特性	52
3.3.1	破坏模式与应力-应变关系	55
3.3.2	峰值应力与峰值应变变化规律	56
3.3.3	残余强度变化规律	61
3.3.4	刚度系数与脆性指数变化规律	62
3.4	涤纶纤维加筋水泥土细观力学特征	65
3.4.1	单轴破坏模式与应力-应变关系	67
3.4.2	峰值应力与峰值应变变化规律	68
3.4.3	三轴破坏模式与应力-应变关系	70
3.4.4	残余强度变化规律	72
3.5	丙纶纤维加筋水泥土细观力学规律	76
3.5.1	单轴破坏模式与应力-应变关系	79
3.5.2	峰值应力与峰值应变变化规律	80
3.5.3	三轴破坏模式与应力-应变分析	83
3.5.4	抗剪强度参数变化规律	84
3.5.5	残余强度变化规律	85
3.5.6	残余抗剪强度参数变化规律	87
3.5.7	脆性指数变化规律	89
3.6	不同基质纤维加筋水泥土细观力学分析	90
3.6.1	典型应力-应变曲线	90
3.6.2	强度参数内在联系	91
第 4 章	纤维加筋水泥土固结强度规律研究	93
4.1	纤维含量对加筋水泥土强度影响研究	93
4.1.1	不同纤维含量加筋水泥土细观力学规律	93
4.1.2	不同纤维含量加筋水泥土微观形貌研究	98
4.2	纤维细长比对加筋水泥土强度改变的研究	100
4.2.1	不同细长比加筋水泥土细观力学规律	100
4.2.2	不同细长比加筋水泥土微观形貌研究	101
4.3	纤维加筋水泥土固结强度影响研究	103

第 5 章 纤维加筋水泥土固结强化机理研究	105
5.1 纤维组分影响的加筋水泥土强化规律	105
5.1.1 纤维组分影响的力学强度变化规律	105
5.1.2 纤维组分转化规律	109
5.2 纤维含量和细长比对加筋水泥土强度的影响	112
5.2.1 纤维含量和细长比对加筋水泥土强度的影响	112
5.2.2 纤维含量和细长比对加筋水泥土变形的影响	115
5.3 纤维加筋水泥土强化作用机理	118
5.3.1 纤维加筋水泥固化砂土固结机制	118
5.3.2 纤维加筋水泥固化砂土界面作用	119
5.3.3 纤维含量和细长比对强度和变形的影响机理	120
第 6 章 结论与展望	122
6.1 主要研究结论	122
6.2 展望	123
参考文献	125

第 1 章 纤维加筋水泥土强度研究现状

1.1 纤维加筋土国内外研究现状

1966 年, Vidal^[1]提出在土体中加入加筋材料, 依靠土体和加筋材料之间的摩擦阻力, 当土体受到垂直方向作用力时, 摩擦阻力能很好地限制土体的侧向变形, 土体的有效围压显著增强, 改善了土体的抗剪强度。自此, 加筋土作为一种新型高强抗剪复合土工材料, 在建筑材料研究领域掀起热潮, 并迅速应用于公路、铁路、边坡及大坝等工程领域之中。对于加筋土的研究, 除探究加筋土结构的基本性状、完善计算理论外, 针对拓宽填料、加筋材料的应用范围和方式, 许多国家的研究者也做了大量的研究。

Gray 和 Ohashi^[2]通过对含有不同纤维材料的砂土进行直接剪切试验, 研究纤维角度的不同对应力、应变的影响。Temel 和 Omer^[3]分析了随机分散的纤维加筋砂土的剪切强度特性。Park 和 Tan^[4]分别将纤维用于挡墙和路基填料中, 并对这种混合材料的工程性质进行了系统性研究。Lovisa 等^[5]研究了含水量对纤维加筋砂土抗剪强度的影响, 试验表明纤维能显著提高干燥状态下砂土的黏聚力。Yetimoglu 和 Salbas^[6]经研究发现向土体中掺入纤维能增加土体的残余剪切强度。Diambra 等^[7]基于复合材料力学中的混合物原则, 建立了三轴试验受力条件下的纤维加筋土本构模型, 其中纤维相采用线弹性模型, 基本相采用简单的理想弹塑性莫尔-库仑模型, 并进一步考虑了纤维材料分布方向的影响。Gao 和 Zhao^[8]基于姚仰平的统一硬化模型建立了纤维加筋土强度模型, 模型中通过引入偏应力张量不变量和纤维分布张量定义的各向异性变量来量化纤维分布方向, 可以预测纤维分布各向异性时的纤维加筋土强度。Mcgowan 等^[9]对铝网加筋砂进行了试验, 认为加筋土限制土体变形, 能够抑制内部和边界变形。Areniez 和 Choudhury^[10]研究条带状金属纤维在随机分布条件下对土体的强度改善情况。

20 世纪 90 年代初期, 我国岩土科研人员也开始对纤维加筋土的基本构成及应用特性等性状进行研究, 并取得了一定的成果。王德银等^[11]开展了非饱和黏土在不同含水率和干密度条件下的直剪试验, 发现低含水率和高密实

度条件均有助于发挥纤维自身的加筋效果,在一定程度上能提高纤维对土体强度的贡献,增强效果则取决于纤维-土界面力大小,并且剪切面上的纤维在剪切过程中呈现拔出和拉断两种失效模式。介玉新等^[12]通过离心模型试验得出纤维加筋能提高土质边坡稳定性的结论。施利国等^[13]通过开展三轴试验研究了纤维掺量和灰土比对灰土的三轴特性影响,试验结果表明,聚丙烯加筋灰土的峰值应力和抗剪强度均大于普通灰土的峰值应力和抗剪强度。闫宁霞等^[14]及闫宁霞和娄宗科^[15]研究发现,在一定范围内,掺加聚丙烯纤维可明显提高固化土的抗压强度。在试验所用黄土中掺入聚丙烯纤维,当纤维掺量从 0kg/m^3 增加到 0.9kg/m^3 时,固化土的抗剪强度随之不断增大,并且当聚丙烯纤维的掺加量为 0.9kg/m^3 时,固化土抗剪强度较不掺纤维的固化土提高了29%,加筋效果明显。何光春和周世良^[16]对于加筋土技术的应用和进展研究表明:21世纪以来,国内外学者和工程技术人员开展了大量的加筋土试验研究,使得加筋土的计算理论、作用机理和施工技术得到了较快发展,也对理论发展落后实践的现状有所改变,而且在加筋材料的性能和优化研究方面也取得了较大突破。综上所述,在加筋材料配比选择及加筋水泥土性能方面研究还较少,应该是今后研究的重点。

1.2 纤维加筋水泥土国内外研究现状

纤维加筋水泥土作为一种新型的加固土体,目前对其强度的理论计算还不成熟,计算理论成果也不多。纤维加筋水泥土是一种复合材料,纤维与土体之间的作用力只表现为内力。因为纤维加筋水泥土并非是均质体,所以其强度、韧性、刚度受纤维含量、组分等因素影响较大。对于其数值模拟的理论计算、作用机理类的研究仍吸引着大量科研工作人员。

张旭东等^[17]对纤维加筋水泥土进行了系统研究,发现水泥土的抗压强度随纤维含量的增加而增强,而且相同条件下,纤维加筋水泥土的抗压强度要高于纯粹的纤维加筋素土和纯粹的水泥土之和。唐朝生等^[18]将不同纤维含量的丙纶纤维(聚丙烯纤维)分别掺入素土、水泥土和石灰土中,试验结果表明其无侧限抗压强度都随纤维含量的增加而增大,但在素土中掺入纤维对无侧限抗压强度的提高效果没有在石灰土和水泥土中掺入等量的纤维明显。Cai等^[19]在水泥土中加入丙纶纤维,试验结果表明试样的无侧限抗压强度随纤维含量的增加而增强,但石灰掺量超过某个值后会导致无侧限抗压强度的降低。

Bazant^[20]假设基体为塑性, 纤维为弹性, 研究脆性材料与不同尺寸的纤维间的相互作用, 得出脆性材料与纤维的界面强度存在着尺寸效应, 界面在小尺度纤维的拔出破坏过程中符合强度模型, 在大尺度纤维的拔出破坏过程中符合能量模型, 在过渡尺度范围内的界面行为不适合以上两种模型。李旭东等^[21]运用 von Mises 应力公式, 得出界面结合强度的提高有助于应力传递, 加大了纤维与水泥土之间的锚固效应。Bartos^[22]首先提出了纤维拔出理论的图形化理解, 通过在给定剪切刚度和最大剪应力的情况下, 引出三个重要的长度参数: 关键长度、最小拉断长度、最大完全脱黏长度, 绘出最大拔出力 q_r 和纤维埋置长度 L 之间的关系来表示不同的破坏类型, 从而得出纤维拔出与众多因素有关, 最重要的是纤维埋置长度、纤维的强度、界面的摩擦阻力, 这些参数与纤维加筋的关系非常复杂。Laws^[23]给出了纤维伸长解, 包括脱黏前和脱黏后两种情况, 将纤维脱黏和拔出解应用到基体的裂纹扩展问题中, 获得了最小裂缝间距, 最小裂缝间距与体积分数比有关, 其解决办法与钢筋混凝土结构中关于平均裂缝间距的解释相同。Kelly 和 Tyson^[24]基于简化的剪滞理论, 假设其模型为轴对称模型, 得出单纤维断裂试验在纤维断面处的 3 种损伤模式: ①即纤维断裂, 基体没有开裂, 界面没有脱黏; ②纤维断裂, 基体开裂, 但界面没有脱黏; ③纤维断裂, 界面脱黏, 基体已开裂或基体未开裂。

1.3 纤维加筋水泥土固结强化发展趋势

从国内外的研究现状可知, 目前纤维加筋水泥土的研究还存在以下问题。

(1) 目前工程中的纤维加筋水泥土所选用的纤维多为丙纶纤维, 尽管丙纶纤维造价较低, 但丙纶纤维属于非环保材质, 过多地使用会对环境造成一定程度的污染, 且丙纶纤维加筋水泥土的强度相对较差^[25]。

(2) 对于纤维加筋水泥土固结强化过程中的微观形变特征及催化基质晶格移动规律缺乏明确的认识。

(3) 目前对纤维加筋水泥土强度变化的原理及其应力-应变关系特征的研究还不够深入, 特别是对土体本构模型的确立还缺乏统一的认识。

(4) 对于纤维加筋水泥土的残余强度及微观形变受纤维的含量及物理尺寸及性状(粗糙度和细长比等)影响规律缺乏有力的试验及研究成果。

在今后对于纤维加筋水泥土的研究中,应更加注重其他绿色环保类型的纤维的试验研究;对纤维加筋水泥土固化过程中纤维的晶格形变基质运移等微观现象进行深入细致研究。在对纤维加筋水泥土进行抗拉、抗压等强度检测试验时,应着重对比纤维的物理性状(种类、含量、粗糙度和细长比)对水泥土的强度及应变等性质的影响。

1.4 项目研究内容和技术路线

本书在结合前人研究的基础上,收集和查阅大量文献资料,通过采用宏观-细观-微观多尺度实验相结合的方法,对棉麻纤维、锦纶纤维、玄武岩纤维、涤纶纤维、丙纶纤维,总计五种纤维的物-化-力性质差异进行实验研究。利用电镜扫描技术(SEM),获取不同纤维微观形貌特征,对比分析不同纤维的界面特性;探讨掺不同种类的纤维加筋水泥土的固化机理特征,以及纤维对水泥土性能改善的微观作用,通过分析对比,找出强度增长的机理。通过室内单轴压缩试验及三轴直剪试验分析不同种类的纤维加筋水泥土在不同纤维含量、不同组分及粗糙度条件下的细观力学规律。通过控制纤维加筋水泥土的纤维含量及其细长比,分析纤维加筋水泥土的应力-应变关系及残余抗剪强度的变化曲线,确立纤维水泥土的本构关系,分析纤维含量和细长比对加筋水泥土强度的影响。主要研究内容如下。

(1)利用电镜扫描技术,获取棉麻纤维、锦纶纤维、玄武岩纤维、涤纶纤维、丙纶纤维,总计五种纤维的微观形貌特征,对比分析不同纤维的界面特性;借助X射线衍射技术(XRD),得到不同纤维的物相组成,对比分析不同纤维的结构性差异及催化后晶格移动规律。

(2)借助布鲁克D8 ADVANCE型X射线衍射仪和扫描电子显微镜,在不同纤维(棉麻纤维、锦纶纤维、玄武岩纤维、涤纶纤维、丙纶纤维)、不同纤维含量(0.0%、0.5%、1.0%、1.5%)条件下,开展纤维-水泥-砂土复合材料物相分析试验,研究纤维掺入对纤维-水泥-砂土复合材料水泥水化产物的影响,得到纤维相变激励下纤维-水泥-砂土复合材料水泥固化规律及凝胶形变特征。

(3)进行了室内直剪试验,研究不同纤维含量下,纤维土的应力-应变关系;分析纤维含量对黏聚力和内摩擦角的影响规律,进而得到不同纤维含量对抗剪强度的影响关系式,并根据黏聚力、内摩擦角及残余抗剪强度与纤维量的关系曲线,获取纤维加筋水泥土中纤维含量的最优配比。

(4) 在同等围压、不同纤维长度(6mm、9mm)、不同纤维含量(0.0%、0.5%、1.0%、1.5%)条件下对纤维加筋水泥土进行单轴压缩试验及三轴直剪试验,分析纤维加筋水泥土的微观变形特征、应力-应变关系、残余抗剪强度变化规律及抗拉强度曲线变化特征,得出不同纤维含量、不同长细比对纤维加筋水泥土强度的耦合影响规律。

第 2 章 不同基质纤维微观形貌差异研究

2.1 棉麻纤维微观形貌特征

2.1.1 水泥土的制备

采用棉麻纤维对水泥土(水泥固化砂土)进行改良,在水泥土中掺入一定含量的棉麻纤维来提高水泥土的抗拉、抗剪强度、无侧限抗压强度及黏聚力等力学性质。采用 KYKY—2800B 型扫描电子显微镜(图 2.1)观察棉麻纤维样品在固结前后的微观形貌,着重分析棉麻纤维催化后纤维微观晶格的变形特征。

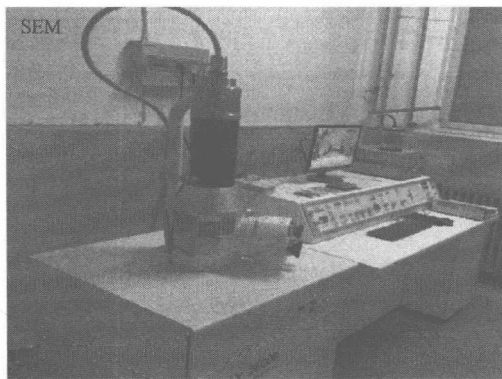


图 2.1 扫描电子显微镜

试验所选用的砂土是采用钻孔取心方法,在北京市延庆区北京世界园艺博览会综合管廊工程现场地下 4.4~4.8m 范围内钻取试验所用砂土,砂土物理指标如表 2.1 所示,筛分曲线如图 2.2 所示。试验前,使用振动筛筛除砂土中粒径大于 2mm 的颗粒组分,风干后用于试验。

表 2.1 砂土物理指标

砂土指标	C_u	C_c	e_{\max}	e_{\min}	$\gamma_{d,\max} / (\text{kN}/\text{m}^3)$	$\gamma_{d,\min} / (\text{kN}/\text{m}^3)$	G_s	$w / \%$
数值	2.25	0.92	0.85	0.51	1.82	1.61	2.65	10

注: C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数; e_{\max} 为最大孔隙比; e_{\min} 为最小孔隙比; $\gamma_{d,\max}$ 为最大干重度; $\gamma_{d,\min}$ 为最小干重度; G_s 为土粒比重; w 为含水率。

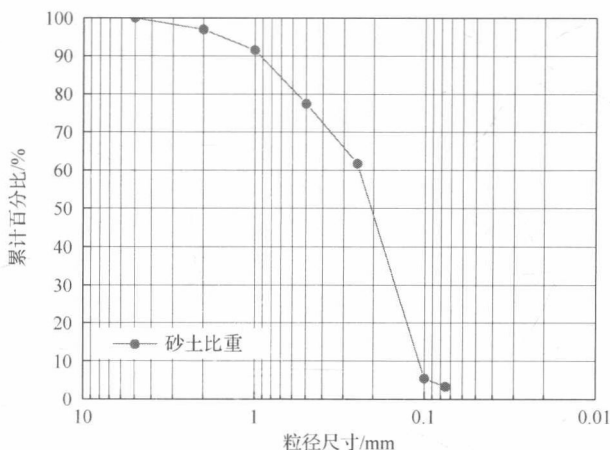
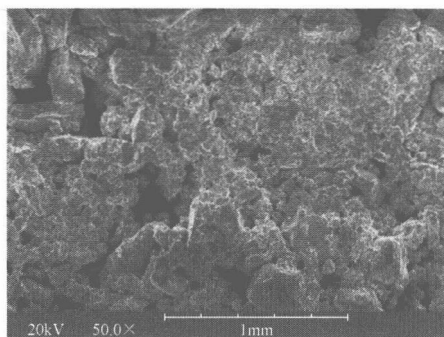


图 2.2 砂土粒径分布曲线

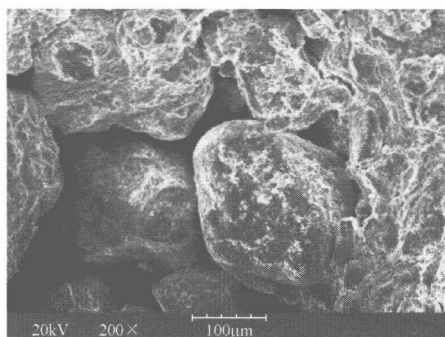
试验用水泥为波特兰二号水泥，其主要成分包括： $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。由 ASTM C 187^[26]测得水泥的相对重度为 3.08，水灰比为 0.485。参照 ASTM C 109-08^[27]和 ASTM C 190-85^[28]，测得该水泥 7 天抗压强度为 19.2MPa、抗拉强度为 1.6MPa，28 天抗压强度为 42.5MPa、抗拉强度为 2.22MPa。

2.1.2 水泥石微观结构分析

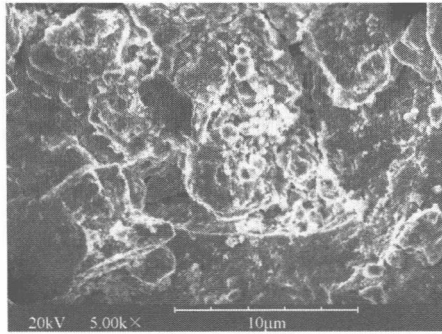
图 2.3 为不同放大倍数下不含纤维的水泥石的微观结构。实验时，工作电压 20kV，按需调整聚光镜、电对中、对比度、亮度等参数。50 倍的微观显微镜下可以清楚地看到水泥石砂砾成团聚状，表面布有较多的孔洞，且空洞直径



(a) 整体特征



(b) 未填充空洞



(c) 微小孔洞

图 2.3 水泥土微观结构

较大，直径在 $10\mu\text{m}$ 以上的孔洞占主要部分。将显微镜调整到 200 倍，更加直观地看到，颗粒在水泥及添加剂的胶结作用下变成了粒径较大的团粒结构，同时团粒之间的空隙也变得很大。在 5000 倍镜片下可以看到有许多丝状、网状的胶结结构覆盖在颗粒之间，在颗粒之间仍密布着很多直径在 $1\sim 2\mu\text{m}$ 或小于 $1\mu\text{m}$ 的微小空洞。

2.1.3 棉麻纤维微观催化晶格形变分析

本章节选用的棉麻纤维的基本物理力学参数如表 2.2 所示，在 KYKY-2800B 型扫描电子显微镜下，纤维束外形完整紧凑，无松散分丝现象，纤维束表面整体光滑，有少量胶质状杂质附着(图 2.4)。

表 2.2 棉麻纤维基本物理力学参数

种类	相对密度	单丝直径/mm	平均吸水率/%	弹性模量/GPa
棉麻纤维	1.35	0.40	15.6	0.0295

使用 SBJC-1600T 型纤维切断机 Fiber Cutter (中国丹东) 将纤维切割成 $5\sim 10\text{mm}$ 小段，按照纤维含量为 0.75%、水泥含量为 3.0%、含水率为 15.5%、相对密度为 0.70 及干密度为 $1.62^{[29,30]}$ ，制成纤维加筋水泥土，在温度 $(25\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ ，湿度 90% 以上的条件下，使用混凝土养护箱养护 7 天 (ASTM D 1632)。养护结束后将试块模型放置在微观显微镜下进行观察。显示结果如图 2.5 所示。棉麻纤维嵌入水泥土基体中，有明显的屈折分丝现象。从微观显微镜下能清楚地看到棉麻纤维以插入或者嵌入的方式与水泥土基体相结合，极大地增强了水泥土自身的抗拉强度与黏聚力。

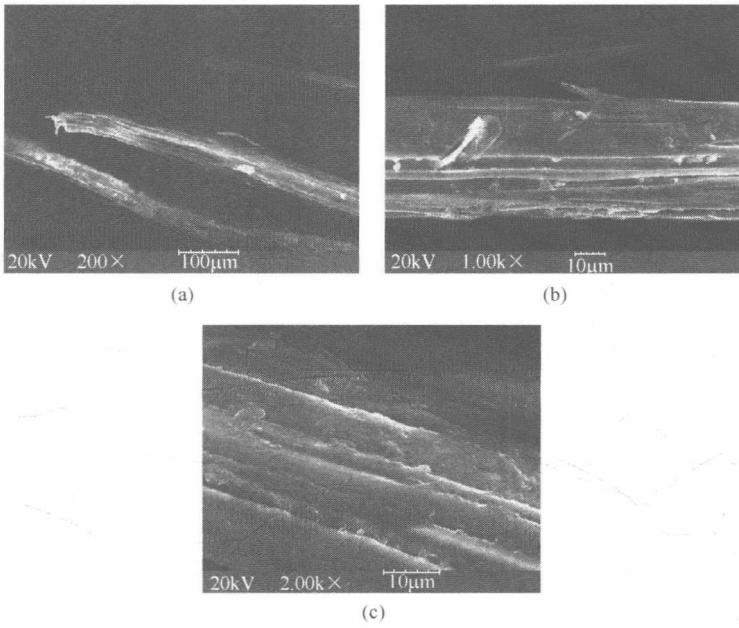


图 2.4 棉麻纤维微观形貌

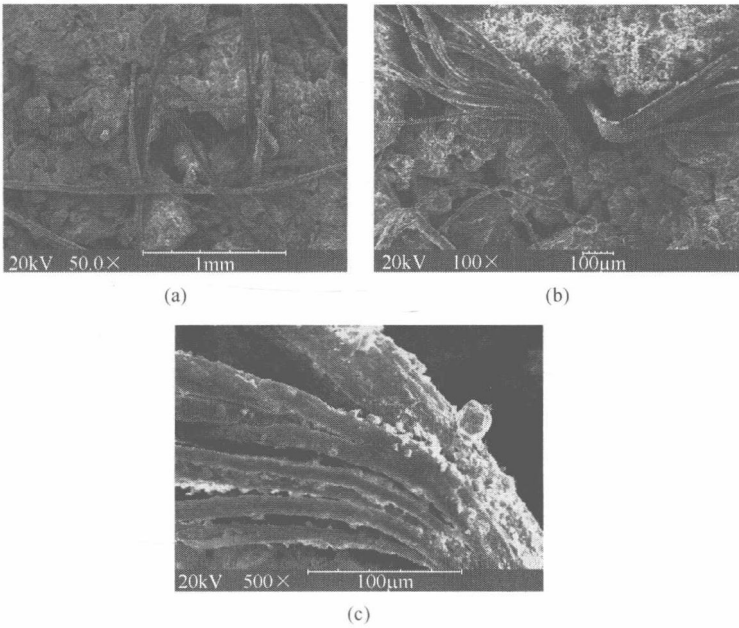


图 2.5 棉麻纤维加筋土催化后微观形貌