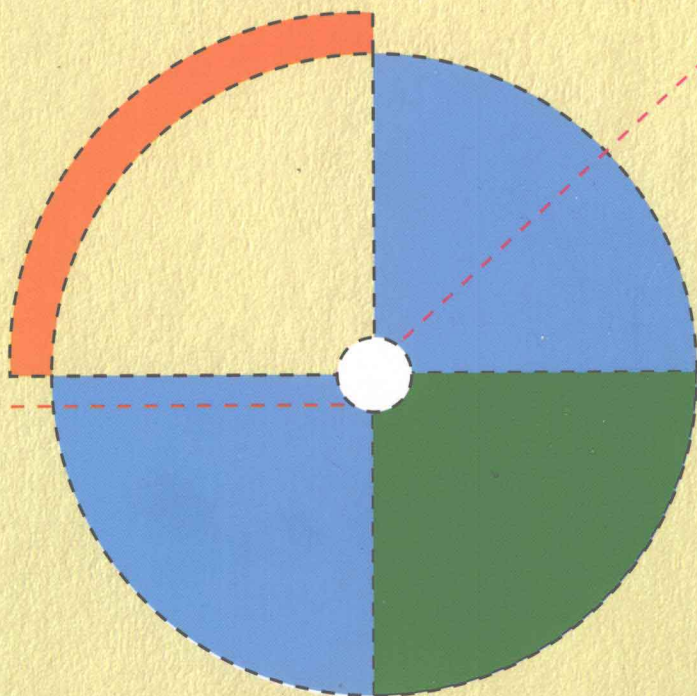


粉体表面改性

FENTI BIAOMIAN GAIXING

(第三版)

郑水林 王彩丽 编著



中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

粉体表面改性/郑水林,王彩丽编著. —3版. —北京:中国建材工业出版社,2011.9

ISBN 978-7-80227-982-7

I. ①粉… II. ①郑…②王… III. ①粉体—表面改性
IV. ①TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 176126 号

内 容 提 要

本书在 2003 年出版的《粉体表面改性》(第二版)的基础上根据近年来粉体表面改性技术的新进展修订而成。主要内容涉及粉体表面改性的原理方法、工艺设备、表面改性剂、无机粉体的表面有机改性、粉体的无机表面改性与复合、层状结构粉体的插层改性以及粉体表面改性的表征方法。全书包括绪论、粉体的表面物理化学性质、粉体表面改性方法与工艺、表面改性设备、表面改性剂及其应用、无机粉体的表面有机改性、粉体的无机表面改性与复合、粉体插层改性、表面改性样品的检测与表征 9 章。

本书可供从事矿物加工与矿物材料、粉体加工、化工、轻工、高分子材料、复合材料、无机非金属材料、纳米粉体加工与应用以及涂料、颜料、油墨、化妆品、无机填料等领域的工程技术人员及大专院校师生参考。

粉体表面改性(第三版)

郑水林 王彩丽 编著

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街6号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:21.5

字 数:385千字

版 次:2011年9月第3版

印 次:2011年9月第1次

书 号:ISBN 978-7-80227-982-7

定 价:53.00元

本社网址:www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

序

本书是在《粉体表面改性》(第二版)的基础上,根据近年来粉体表面改性技术的发展修订而成。

2003年出版的《粉体表面改性》(第二版)至今已有八年。八年来在粉体加工技术领域,粉体表面改性是研发最为活跃,发展最快的技术之一。主要体现在粉体表面改性原理、方法、工艺、设备、表面改性剂及各种粉体的表面改性实践的研究以前所未有的速度向深度和广度推进,申报的发明专利和发表的论文逐年增多;表面改性粉体在塑料、橡胶、胶粘剂、功能化纤等高聚物基复合材料,功能涂料和涂层材料,吸附、催化和环保材料,生物化工材料及无机复合材料等领域中的应用也日趋广泛;粉体表面改性技术已成为与现代高新技术和新材料发展密切相关的功能粉体原料及非金属矿物材料重要深加工技术之一。同时,伴随近年来纳米粉体与纳米材料制备及应用技术的发展,纳米粉体的表面处理、粉体材料的无机纳米复合以及层状结构粉体材料的插层改性也已成为研究开发的热点。

基于上述背景,新版《粉体表面改性》从结构和内容上对《粉体表面改性》(第二版)进行了修订。结构上由11章修订为9章。将原第6、7、9、10四章合并为“无机粉体的表面有机改性”和“粉体的无机表面改性及复合”两章。内容上第1章修订了粉体表面改性的目的和粉体表面改性技术的发展趋势;第3章修订了表面改性方法与改性工艺,补充了层状结构粉体的插层改性以及表面改性方法选择与工艺设计的内容;第4章增加了SLG连续粉体表面改性机国家“十一五”科技支撑计划研究成果;第5章增加了对国产表面改性剂的介绍及表面改性剂配方的选择方法;第6章与第7章分别从表面有机改性、无机改性及复合两个方面系统介绍了粉体的改性方法、工艺、设备、配方、影响因素和表面改性实例。将原版填料的表面改性、颜料的表面改性、吸附与催化材料的表面改性以及纳米粉体的表面改性的相应内容分类归入这两章,同时根据这几年的研究进展和技术发展补充了新内容和新的研究成果;第8章根据近几年的研究进展进行了修订,特别是补充了无机柱撑膨润土与黏土层间化合物;第9章增加了吸油值、比表面积和孔径分布以及纳米粉体团聚度等表征内容。目的是使新版《粉体表面改性》除了原有的科学和实用外,内容更新,能更好地满足广大

读者的需要。

本版的第1~5章及第8章由中国矿业大学(北京)郑水林编写,第6、7、9章由太原理工大学王彩丽编写,由王彩丽整理参考文献和附录内容,郑水林统一定稿。作者在编著和修订过程中参阅了大量国内外相关学科专家学者和工程技术人员的著作和论文以及表面改性剂和改性设备生产厂家的产品样本,在《粉体表面改性》(第三版)出版之际,一并致以诚挚的谢意!

虽然在《粉体表面改性》(第三版)的编著过程中,作者酝酿了较长时间,也尽了最大努力,但肯定还存在不足甚至错误之处,一如既往地恳请专家学者和广大读者批评斧正!

作者

2011年3月于北京

修订说明

自1995年初版以来,《粉体表面改性》一直是较受粉体行业、非金属矿加工行业、化工、材料等行业领域工程技术人员欢迎的技术类著作,而且一直用做中国矿业大学(北京)及其他相关院校研究生课程的教学参考书。2003年出版的《粉体表面改性》(第二版)至今已有八年。八年以来,在粉体加工技术领域,粉体表面改性技术是研发最为活跃,发展最快的技术之一,因此,书中的一些内容需要修改和增补。

本书修订的指导思想是在原有结构和内容的基础上根据近几年的学术和技术发展,本着先进、科学、适用原则对结构进行适当调整,对主要内容进行修订,包括内容调整、删减和增补,但不增加原书的篇幅。

本书的主要修订内容如下:

(1) 结构

由《粉体表面改性》(第二版)的11章修订为9章,用一条主线贯穿全书主体内容,这就是原理、方法、工艺、设备、改性剂及其应用。将填料的表面改性、颜料的表面改性、吸附与催化材料的表面改性以及纳米粉体的表面改性归纳为“无机粉体的表面有机改性”和“粉体的无机表面改性与复合”。因此,新版不再保留这四章的目录结构,将这四章的结构调整为“无机粉体的表面有机改性”和“粉体的无机表面改性与复合”。

(2) 内容

① 第1章绪论。根据表面改性粉体新的应用领域和技术发展修订“粉体表面改性的目的”和“粉体表面改性技术的发展趋势”。

② 第3章内容。由于胶囊化改性属于“造粒”,本次修订改性方法时删除;而层状结构粉体的插层改性是近年来兴起的主要方法之一,将其补充;同时,根据这几年的研究进展修订改性方法、改性工艺的内容;并补充表面改性方法选择与工艺设计方面的内容。

③ 第4章内容。根据这几年表面改性设备的技术进展修订,特别增加SLG连续粉体表面改性机国家“十一五”科技支撑计划研究成果。

④ 第5章内容。国内表面改性剂生产技术近几年有较大进步,品种规格增

加显著,本章增加对国产表面改性剂的介绍及表面改性剂配方的选择方法。

⑤ 第6章与第7章内容。从表面有机改性、无机改性与复合两个方面介绍粉体表面改性技术的应用。从一般方法、工艺、设备、配方、影响因素和表征出发到具体的无机粉体的表面改性实例进行系统介绍。将原版第6章填料的表面改性、第7章颜料的表面改性、第9章吸附与催化材料的表面改性以及第10章纳米粉体的表面改性的相应内容分类归入这两章,同时根据这几年的技术发展修订相关内容,特别是近几年快速兴起的表面无机改性与复合的技术成果,包括国家“十一五”科技支撑计划研究成果。

⑥ 第8章内容。插层改性是近年来研究最为活跃的领域,根据近几年的研究成果修订相关内容,包括增加无机柱撑膨润土;修订有机膨润土的内容和黏土层间化合物的内容。

⑦ 第9章内容。增加了吸油值、比表面积和孔体积以及纳米粉体粒度分布与团聚度等表征内容。

作 者

2011年3月于北京

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 粉体表面改性的目的	(1)
1.2 粉体表面改性的研究内容	(4)
1.3 粉体表面改性技术的发展趋势	(5)
第2章 粉体的表面物理化学性质	(8)
2.1 比表面积与表面能	(8)
2.1.1 比表面积	(8)
2.1.2 表面能	(9)
2.2 表面润湿性	(9)
2.3 表面吸附特性	(11)
2.3.1 概 述	(11)
2.3.2 粉体对气体的吸附	(12)
2.3.3 粉体在溶液中的吸附	(15)
2.4 表面电性	(18)
2.5 表面化学性质	(20)
第3章 粉体表面改性方法与工艺	(23)
3.1 表面改性方法	(23)
3.1.1 化学包覆	(23)
3.1.2 沉淀反应	(28)
3.1.3 机械力化学	(31)
3.1.4 物理涂覆	(32)

3.1.5 粉体颗粒插层改性	(35)
3.1.6 高能表面改性	(36)
3.2 表面改性工艺	(36)
3.2.1 干法工艺	(36)
3.2.2 湿法工艺	(38)
3.2.3 复合工艺	(39)
3.3 表面改性方法选择与工艺设计	(40)
第4章 表面改性设备	(43)
4.1 干法表面改性设备	(43)
4.1.1 SLG型粉体表面改性机	(43)
4.1.2 高速加热式混合机	(47)
4.1.3 高速冲击式粉体表面改性机	(50)
4.1.4 PSC型粉体表面改性机	(53)
4.1.5 卧式桨叶混合机	(54)
4.1.6 机械融合改性机	(56)
4.1.7 流态化床式改性机	(57)
4.1.8 多功能表面改性机	(58)
4.2 湿法表面改性设备	(59)
4.3 表面改性设备的选择	(61)
第5章 表面改性剂及其应用	(62)
5.1 概 述	(62)
5.2 有机表面改性剂	(62)
5.2.1 偶联剂	(62)
5.2.2 表面活性剂	(95)
5.2.3 有机硅	(100)
5.2.4 不饱和有机酸及有机低聚物	(103)
5.2.5 超分散剂	(105)
5.2.6 水溶性高分子	(108)
5.3 无机表面改性剂	(118)
5.4 表面改性剂的选择	(119)

第 6 章 无机粉体的表面有机改性	(120)
6.1 概 述	(120)
6.1.1 无机粉体表面有机改性的方法	(120)
6.1.2 无机粉体表面有机改性的配方	(121)
6.1.3 无机粉体表面有机改性的工艺与设备	(124)
6.1.4 无机粉体表面有机改性效果的表征	(124)
6.1.5 影响无机粉体表面有机改性效果的主要因素	(125)
6.2 无机粉体的表面有机改性各论	(125)
6.2.1 碳酸钙	(125)
6.2.2 高岭土	(135)
6.2.3 硅灰石	(144)
6.2.4 滑 石	(149)
6.2.5 云 母	(153)
6.2.6 硅质微粉	(156)
6.2.7 氢氧化镁和水镁石粉	(159)
6.2.8 叶蜡石	(163)
6.2.9 氢氧化铝	(165)
6.2.10 海泡石和凹凸棒土	(166)
6.2.11 粉煤灰	(168)
6.2.12 白云石	(170)
6.2.13 玻璃纤维	(171)
6.2.14 其 他	(174)
第 7 章 粉体的无机表面改性 with 复合	(184)
7.1 概 述	(184)
7.1.1 粉体表面无机改性 with 复合方法	(184)
7.1.2 粉体表面无机改性 with 复合工艺及设备	(189)
7.1.3 粉体表面无机改性 with 复合粉体的表征	(190)
7.1.4 影响粉体表面无机改性 with 复合粉体性能的主要因素	(191)
7.2 粉体无机表面改性 with 复合各论	(192)
7.2.1 珠光云母 with 着色云母	(192)
7.2.2 无机复合阻燃填料	(216)

7.2.3	纳米 TiO ₂ /无机多孔材料复合粉体	(224)
7.2.4	二氧化钛颜料的表面无机包覆改性	(234)
7.2.5	无机包覆硅灰石	(239)
7.2.6	高岭土粉体的无机包覆	(245)
7.2.7	无机催化剂	(249)
第8章	粉体插层改性	(253)
8.1	概 述	(253)
8.2	膨润土(蒙脱石黏土)的插层改性	(253)
8.2.1	有机膨润土	(254)
8.2.2	聚合物插层纳米蒙脱土复合材料	(266)
8.2.3	无机柱撑膨润土	(276)
8.3	石墨层间化合物	(279)
8.3.1	石墨层间化合物的分类	(279)
8.3.2	石墨层间化合物的结构	(281)
8.3.3	石墨层间化合物的生成机理	(281)
8.3.4	石墨层间化合物的制备方法	(283)
8.4	高岭土的插层改性	(285)
8.4.1	概 述	(285)
8.4.2	插层剂	(285)
8.4.3	插层反应机理	(286)
8.4.4	插层方法	(287)
8.4.5	插层改性高岭土的特征	(288)
8.5	蛭石插层改性	(289)
8.5.1	蛭石的无机柱撑	(290)
8.5.2	蛭石的有机插层	(291)
第9章	表面改性样品的检测与表征	(294)
9.1	表面润湿性	(294)
9.2	活化指数	(296)
9.3	表面能	(298)
9.4	溶液中的分散稳定性	(298)
9.5	吸油值	(300)

9.6 吸附类型、包覆量与包覆率	(300)
9.6.1 吸附类型	(301)
9.6.2 包覆量与包覆率	(301)
9.7 粒度分布与团聚度	(303)
9.8 颗粒形貌	(306)
9.9 比表面积与孔分布特性	(307)
9.9.1 比表面积	(307)
9.9.2 孔体积与孔径分布	(307)
9.10 表面结构和成分	(309)
9.11 其 他	(310)
9.11.1 热重分析法	(310)
9.11.2 浸润热测定法	(310)
附录 常用聚合物缩写词	(311)
参考文献	(320)

第1章 绪 论

粉体表面改性 (Surface modification or Surface treatment of powder) 是指用物理、化学、机械等方法对粉体材料表面进行处理, 根据应用的需要有目的地改变粉体材料表面的物理化学性质, 如表面组成、结构和官能团、表面能、表面润湿性、电性、光性、吸附和反应特性等, 以满足现代新材料、新工艺和新技术发展的需要。

1.1 粉体表面改性的目的

在塑料、橡胶、胶粘剂等高分子材料工业及高聚物基复合材料领域中, 无机填料占有很重要的地位。这些无机填料, 如轻质碳酸钙 (PCC) 和重质碳酸钙 (GCC)、高岭土、滑石、氢氧化铝、氢氧化镁、硅微粉、硅藻土、白炭黑、云母、硅灰石、叶蜡石等, 不仅可以降低材料的生产成本, 还能提高材料的硬度、刚性或尺寸稳定性, 改善材料的力学性能并赋予材料某些特殊的物理化学性能, 如耐腐蚀性、耐候性、阻燃性和绝缘性等。但由于无机填料与基质, 即有机高聚物的表面或界面性质不同, 相容性较差, 因而难以在基质中均匀分散, 直接或过多地填充往往容易导致材料的某些力学性能下降以及易脆化等缺点。因此, 除了粒度和粒度分布的要求之外, 还必须对无机填料表面进行改性, 以改善其表面的物理化学特性, 增强其与基质, 即有机高聚物或树脂等的相容性和在有机基质中的分散性, 以提高材料的力学性能及综合性能。表 1-1 所列为部分无机填料经过表面化学改性后的应用及功能。由此可见, 表面改性是无机填料由一般增量填料变为功能性填料所必须的加工手段之一, 同时也为高分子材料及有机/无机复合材料的发展提供了新的技术方法, 这是粉体表面改性最主要的目的之一。

表 1-1 经表面化学改性后的部分无机填料的应用和功能

无机填料	主要用途	主要功能
氢氧化铝	电线、电缆、PVC、PE、PP、EPDM 等	阻燃，改善工艺性能
氢氧化镁	电线、电缆、PVC、PE、PP、EPDM 等	阻燃，降低烟密度
碳酸钙	PVC、PE、PP、不饱和聚酯等	提高填充量以及材料的刚性、模量等
高岭土	橡胶、电线电缆、EPDM、PE、PP 等	改善填料的电绝缘、力学、气密等性能并提高填充量
硅灰石	尼龙、PP 等	改善和提高填料的填充性能、物理性能，部分替代玻纤
云母	聚烯烃（PP、PE）	提高填料及填充材料的力学性能、电绝缘性能和耐腐蚀性等
硅微粉	环氧树脂、不饱和聚酯	提高材料的耐磨性、电绝缘性、模量、耐腐蚀性等
滑石	塑料（PP、PE）	改善填料的填充性能（物理性能、力学性能）、电性能

提高涂料或油漆中颜料的分散性并改善涂料的光泽、着色力、遮盖力和耐候性、耐热性、抗菌防霉性和保色性等是粉体表面改性的第二个主要目的。涂料的着色颜料和体质颜料，如钛白粉、锌钡白、氧化锌、碳酸钙、碳酸钡、重晶石、硅微粉、白炭黑、云母、滑石、高岭土、氧化铝等多为无机粉体，为了提高其在油漆或涂料基质中的分散性，要对其进行表面改性，以改善其表面的湿润性，增强与基质的结合力。在新发展的具有电、磁、声、热、光、抗菌防霉、防腐、防辐射、特种装饰等功能的所谓特种涂料中的填料和颜料不仅要求粒度超细，而且要求具有一定的“功能”。因此，必须对其进行表面处理。此外，为提高某些颜料的耐候性、耐热性以及遮盖力和着色力等，用一些性能较好的无机物包覆之，如用氧化铝、二氧化硅包覆二氧化钛或钛白粉可改善其耐候性等性能。

在成为当今流行化趋势之一的环保型水性建筑装饰涂料中，除了与其他组分的相容性和配伍性之外，还要求无机颜料和填料具有较长时间的分散稳定性和良好的流变性，这也是水性涂料中应用的颜料和填料必须要进行表面改性或表面处理的原因之一。

当今许多高附加值产品要求有良好的光学效应和视觉效果，使制品更富色彩。这就需要对一些粉体原料或填料进行表面处理，使其赋予制品良好的光泽和装饰效果。如白云母粉经氧化钛、氧化铬、氧化铁、氧化钴等金属氧

化物进行表面改性后用于化妆品、塑料制品、浅色橡胶、油漆、特种涂料、皮革等的颜料，以赋予这些制品珠光效应及显著提高品质和价值。

在无机/无机复合新材料中，无机组分之间的分散性对于材料的最终性能有很大的影响。特别是当小组分陶瓷颜料在大组分陶瓷坯料中分散（如在彩色陶瓷地砖中添加的陶瓷颜料）时，其分散性的好坏直接影响陶瓷制品色彩的均匀性和产品的档次。使用分散性能好的陶瓷颜料不仅可以使最终产品的色泽好，而且可减少价格昂贵的颜料的用量。因此，用于无机复合体系颜料的表面处理对无机/无机复合材料的发展具有重要意义。

在许多层状晶体结构的粉体材料中，利用晶体层之间较弱的分子键连接或层间离子的可交换性而进行的插层改性，可制备新型的层间插层矿物材料，如黏土层间化合物和石墨层间化合物。这些层间化合物具有原矿物所不具有的新的物化性质或功能。如石墨经过插层间改性后的层间化合物，其性质显著优于石墨，具有耐高温、抗热震、防氧化、耐腐蚀、润滑、密封、储能性等优良性能或功能，是制备新型导电材料、电极材料、储氢材料、柔性石墨、密封材料的重要材料，其应用范围已扩大到冶金、石油、化工、机械、航空航天、原子能、新型能源等领域。膨润土经有机插层改性后制取的有机膨润土在非极性和弱极性溶剂中具有良好的膨胀、吸附、触变和粘结等特性。

对于吸附和催化材料，为了提高其吸附和催化活性以及选择性、稳定性、机械强度等性能，也需要对其进行表面处理或表面改性。例如，在活性炭、硅藻土、氧化铝、硅胶、海泡石、沸石等粉体表面通过浸渍法负载金属氧化物（如纳米 TiO_2 ）、碱或碱土金属、稀土氧化物，以及 Cu、Ag、Au、Mo、Co、Pt、Pd、Ni 等金属或贵金属。

纳米粉体是在微米粉体基础上发展的一种新的粉体材料，具有良好的应用前景。但是纳米粉体的比表面积大，表面原子数多，表面能高，在制备、储运和使用过程中很容易团聚形成二次、三次或更大的颗粒，从而不能发挥其应有的纳米效应。表面改性或表面处理是防止纳米粒子团聚和提高其分散性的主要方法之一，对改善和提高纳米粉体的应用性能、加速其工业应用具有至关重要的意义。

此外，对某些公认的对健康有害的原料，如石棉进行表面处理，用对人体无害和对环境不构成污染、又不影响其使用性能的其他化学物质覆盖、封闭其表面的活性点，以维持其在未来矿产品的位置；对某些用作精细铸造、油井钻探等石英砂进行表面涂敷以改善其粘结性能；对用作保温材料的珍珠岩等进行表面涂敷以改善其在潮湿环境下的防水和保温性能；对煅烧高岭土

进行有机表面改性以提高其在潮湿环境下的电绝缘性能；对化肥、农药、灭火剂等进行表面有机处理（在其表面包覆表面活性剂、偶联剂、有机高分子材料等）以降低表面极性、减少从空气中吸附水，防止团聚并改善其流动性；对造纸填料，如滑石、碳酸钙、硅灰石进行表面处理以提高其留着率和纸张强度，并降低加入时的粉尘污染，等等。

综上所述，虽然粉体表面改性的目的因应用领域的不同而异，但总的目的是改善或提高粉体材料的应用性能或赋予其新的功能以满足新材料、新技术发展或新产品开发的需要。

1.2 粉体表面改性的研究内容

粉体表面改性或表面处理与诸多学科，如粉体工程、物理化学、表面与胶体化学、有机化学、无机化学、高分子化学、无机非金属材料、高分子材料、复合材料、结晶学与矿物学、化学工程、矿物加工工程、环境工程与环境材料、光学、电学、磁学、微电子、现代仪器分析与测试技术等学科密切相关。可以说，粉体表面改性是粉体工程或颗粒制备技术与其他众多学科，特别是材料学科相关的边缘学科。笔者认为，粉体表面改性主要包括以下四个方面的内容。

(1) 表面改性的原理和方法

粉体表面改性的原理和方法是粉体表面改性技术的基础。它主要包括：①粉体（包括改性前后的粉体）的表面与界面性质及与应用性能的关系；②粉体表面或界面与表面改性处理剂的作用机理和作用模型，如吸附或化学反应的类型，作用力或键合力的强弱，热力学性质的变化等；③表面改性方法的基本原理或理论基础，如粉体表面改性处理过程的热力学和动力学以及改性过程的数学模拟和化学计算等。这是粉体表面改性或表面处理最主要的研究内容之一。

(2) 表面改性剂

多数情况下，粉体表面性质的改变或新功能的产生是依靠各种有机或无机化学物质（即表面改性剂）在粉体粒子表面的包覆（吸附或反应）来实现的。因此，从某种意义上来说，表面改性剂是粉体表面改性技术的关键所在。此外，表面改性剂还关系到粉体改性（处理）后的应用特性，它的选用还与应用领域或应用对象密切相关。表面改性剂的研究内容涉及表面改性剂的种类、结构、性能或功能及其与颗粒表面基团的作用机理或作用模型；表面改性剂的分子结构、分子量大小或烃链长度、官能团或活性基团等与其性能或

功能的关系；表面改性剂的用量和使用方法；经表面改性剂处理后粉体的应用特性（如表面改性填料对塑料或橡胶力学性能等的影响，改性颜料对其湿润性、分散稳定性及对涂料遮盖力、耐候性、抗菌性、耐热性和光学效果等的影响）以及新型、特效表面改性剂的制备或合成工艺。

（3）表面改性工艺与设备

工艺与设备是最终实现按应用需要改善粉体表面性质的关键因素之一。其主要研究内容包括：不同类型和不同用途粉体表面改性的工艺流程和工艺条件；影响表面改性效果的主要因素；表面改性剂的配方（品种、用量、用法）；设备类型与操作条件；高性能表面改性设备的性能与应用及其研制，等等。表面改性工艺与设备是互相关联的，先进的表面改性工艺必然包括高性能的表面改性装备。

（4）表面改性过程的控制与产品检测技术

该研究领域涉及表面改性或处理过程温度、浓度、酸度、时间、表面改性剂用量等工艺参数以及表面包覆量、包覆率或包膜厚度等结果参数的监控技术；表面改性产品的湿润性、分散性、团聚特性、表面形貌、比表面能、表面改性剂的吸附或反应类型、表面包覆量、包覆率、包膜厚度、表面包覆层的化学组成、晶体结构、电性能、光性能、热性能等的检测方法；此外，还包括建立控制参数与主要技术指标或性能之间的对应关系以及改性过程的计算机仿真和自动控制等。

1.3 粉体表面改性技术的发展趋势

虽然早在20世纪50年代，研究人员就已注意到，对无机颜料，如钛白粉，用二氧化硅或三氧化二铝等进行表面复合或包膜处理可以改善其保光性和耐候性。但是，在更广泛的范围内和更深程度上认识粉体表面改性的意义并将其作为一种重要的粉体深加工技术来进行研究开发则是20世纪80年代以后的事情。背景是现代高新技术和新材料，尤其是功能性复合材料、新型高分子材料、特种涂料、生物化学材料、电子信息材料、吸附环保材料和催化材料、纳米材料等的发展。材料功能化不仅与其体质性能有关还与其表面性质密切相联。在热塑料复合材料和热固体复合材料中，各种组分的表面性质及其相容性，特别是有机高聚物基料与无机填料的相容性对材料的综合性能或某一方面的功能有至关重要的影响。现代各类新型复合材料或功能材料的“设计”离不开粉体材料表面性质的“设计”——即表面改性或表面处理技术。

无机填料的表面改性（处理）满足了现代高分子材料及高聚物基复合材料、胶粘材料、功能化学纤维、涂料提高综合性能的需要，将成为粉体表面改性的一个重要的应用领域之一。据估计，仅仅在塑料工业中，经过表面改性处理的无机填料的用量今后将以每年约 8% 以上的速率增长，其增长速度将显著高于普通无机填料^[1,2]。粒径微细化、表面活化性、结构复杂化被认为是无机填料发展的三大方向，因此“复合”处理工艺，即将结构复杂（复合）化、粒径微细（超细粉碎）化、表面活性（表面改性）化在同一工艺过程或系统中完成将成为未来无机填料加工技术的主要发展趋势。

颜料是表面改性的另一个用量呈上升趋势的重要应用领域。颜料的表面处理显著提高了涂料的外观效果、光泽、耐候性、化学稳定性、涂膜的强度以及环境友好功能，并赋予涂层特殊功能，如吸波、隔热、阻燃、抗磨、抗辐射等，适应了当代涂料、涂层材料及特种漆料发展的要求。新一代的云母珠光颜料赋予制品多彩和高雅的外观，已成为汽车高档面漆、高档塑料和皮革制品、高级化妆品的重要颜料之一，发展前景看好。

插层化合物或层间化合物是表面或界面改性另一个重要的发展领域。插层改性技术赋予层状结构硅酸盐矿物及石墨粉体材料全新的功能，可以根据高技术、新材料、新能源以及催化和环保等领域应用的要求有目的地设计生产层间（插层）化合物，发展前景广阔^[3]。

表面处理或表面改性是吸附和催化粉体材料所必须的加工技术之一。表面处理技术为高性能吸附和催化材料的发展提供了新的技术手段和开发领域。这些吸附和催化粉体材料广泛用于石油、化工、医药等的生产以及环境保护，具有良好的发展前景。通过表面改性提高吸附和催化材料的吸附和催化活性、选择性、稳定性、机械强度等性能以及降低其生产成本将成为吸附和催化材料的主要发展方向之一。

光催化材料是在环保、新能源领域具有良好应用前景的新型催化材料，这是以纳米 TiO_2 为代表的纳米金属氧化物材料，但是，近 20 多年来对这类材料的性能、制备、应用进行了大量的基础研究和产业开发，但由于实用中难以分散和回收以及生产和使用成本高等原因，至今尚未得到大规模商业化应用，通过采用无机表面改性技术将这类纳米氧化物包覆到多孔矿物材料，如硅藻土、蛋白土、凹凸棒土、多孔二氧化硅等粉体表面制备的负载型复合光催化材料，如纳米 TiO_2 /硅藻土复合材料，兼具高效吸附与光催化两种功能，不仅分散好、可以重复使用，而且生产成本和使用成本较纯纳米 TiO_2 显著降低。这种复合光催化材料为纳米 TiO_2 等光催化材料的生产和应用开辟了一条