

微颗粒黏附力测试技术研究进展

钟剑, 吴超

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为了解微颗粒黏附力测试技术的研究进展, 以 Particle、Adhesion、Measurement 为主题词, 在 Ei Compendex, Ei Inspec 和 Elsevier Science 数据库中检索了 2001—2010 年收录的文献, 共检索出 150 余篇有关微颗粒黏附力测试技术的文献。根据这些文献的发表时间、作者所属的国家和所研究的测试技术进行了统计分析。对各种微颗粒黏附力测试技术 (AFM 分离技术、微机械分离技术、离心分离技术、静电场分离技术、振动分离技术和激光分离技术) 进行了分析和优缺点比较, 并展望了该领域发展的前沿方向。

关键词 微颗粒; 黏附; 清除; 测试技术

中图分类号 X513

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.011

Progress in Micro-particle Adhesion Force Measurement Techniques

ZHONG Jian, WU Chao

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The adhesion and removal of micro-particles are very important for the quality control of many industrial processes. They are also directly related to the environmental pollution and occupational health. The study on micro-particle adhesion force measurement techniques is helpful to control micro-particles adhesion pollution and remove micro-particles on the surface. In order to understand the progress in the micro-particle adhesion force measurement techniques, the studies on this area are reviewed. Based on the databases (Ei Compendex, Ei Inspec, and Elsevier Science), three subject words (Particle, Adhesion, and Measurement) are used and about 150 papers in the area published in the years from 2001 to 2010 are found from the search results. The statistics analysis on the publication time, authors' countries, and topics of measurement techniques is conducted. Various micro-particle adhesion force measurement techniques including the AFM detachment technique, the micromechanical detachment technique, the centrifugal detachment technique, the electrostatic detachment technique, the vibration detachment technique, and the laser detachment technique are discussed. The advantages and disadvantages of those micro-particle adhesion force measurement techniques are compared with each other. In the end, the development directions on this field are pointed out.

Keywords micro-particle; adhesion; removal; measurement technique

0 引言

微颗粒的黏附和清除对很多工业过程的质量控制是至关重要的, 微颗粒黏附作用会给各种工业过程带来负面影响。在微电子工业中, 粒径极小的微颗粒黏附会给电子设备带来污染进而对其功能造成严重影响, 生物传感器、生物芯片和实验单晶片等需要防止表面微颗粒的侵入^[1]。微颗粒的黏附作用在材料气动传输、静电印刷、制药生产、食品加工、半导体制造、气溶胶形成、涂料制造^[2-6]、过滤与干燥、细微颗

粒的流态化、微封装以及矿物加工中颗粒的团聚^[7]、表面压缩、表面涂层、表面抛光和表面清洗^[8-9]等过程中起到重要作用。微颗粒的黏附也与环境污染和职业卫生直接相关, 逐渐成为很多领域的重要科研课题。微观界面黏附作用的测试需要先进的技术和试验设备, 开展微颗粒黏附力测试技术研究有助于更好地理解微颗粒黏附与清除作用的影响因素, 有助于对已经建立的微颗粒黏附与清除力学模型进行修正与完善, 有助于微颗粒黏附污染的控制和表面微颗粒的清除。

收稿日期: 2011-06-29; 修回日期: 2011-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50974132)

作者简介: 钟剑, 博士研究生, 研究方向为安全与环境保护, 电子信箱: zhongjian6739@sina.com; 吴超 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E520001585M), 教授, 研究方向为安全与环境保护, 电子信箱: wuchao@mail.csu.edu.cn

1 近 10 年微颗粒黏附力测试技术研究成果检索与分析

以“Particle Adhesion Measurement”为主题词,在 Ei Compendex、Ei Inspec 和 Elsevier Science 数据库中检索 2001—2010 年收录的文献,共检索出有关微颗粒黏附力测试技术的文献 150 余篇。从文献内容来看,其测试技术侧重点各不相同。

为了解近 10 年来微颗粒黏附力测试技术领域的最新研究动态,将检索所得的文献按照发表时间进行统计分析。统计结果如图 1 所示,可以看出,(1) 2001—2006 年,该研究领域的论文数量基本上逐年增加;(2) 2006—2010 年,该研究领域的论文数量尽管存在一点波动,但仍然维持在较高的水平。形成上述发展趋势的原因包括 3 方面:首先,兴起和发展的各种新技术越来越多地应用到微颗粒黏附力测试领域,这极大地促进了该领域的发展;其次,随着各种精密仪器的日益增多,为保障仪器或元件的精确度,在制造过程中需要防止外来微颗粒的影响,从而使其测试技术的需求越来越大;再者,随着工业的发展,对环境健康造成的压力越来越大,人们迫切要求有良好的生活环境,关于粉尘微颗粒污染方面的研究也相应增多,更先进的测试技术研究也在进一步深化。

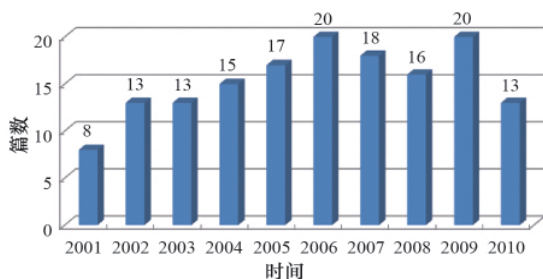


图 1 微颗粒黏附力测试技术论文发表的时间分布

Fig. 1 Distributions of papers on micro-particle adhesion force measurement techniques based on published time

按照作者所属的国家,对检索文献进行统计,结果如图 2 所示。可见,美国发表的微颗粒黏附力测试技术论文最多,其次为德国、日本和英国,这 4 个国家作者发表的论文约占检索文献总数的 68.6%。越是发达的国家越关注微颗粒黏附力

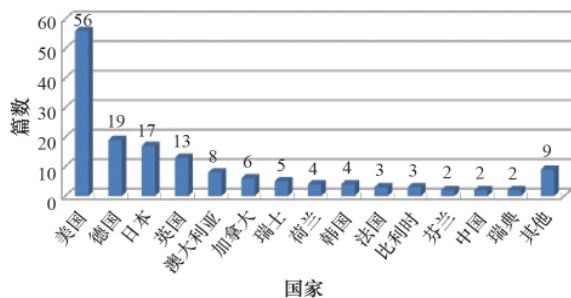


图 2 微颗粒黏附力测试技术论文作者的国别分布

Fig. 2 Distributions of papers on micro-particle adhesion force measurement techniques based on authors' countries

测试技术研究工作,这是因为发达国家拥有先进的技术,有更好的条件对微观世界进行研究,同时这也是先进技术进一步发展的需求。图中“其他”国家包括土耳其等 9 个国家,每个国家作者发表的论文均为 1 篇。中国在该领域的研究还比较滞后,需要进一步加深相关研究,逐渐与世界先进测试技术接轨。

对检索出的 150 余篇文献进行详细分析,根据其不同研究内容进行统计(表 1)。分析发现,采用原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)分离技术的文献所占比重最大,约占文献总数的 83.0%;其次是离心分离技术、微机械分离技术和静电场分离技术;再次是振动分离技术和激光分离技术。这是因为新显微观测技术(如 AFM)的迅速发展极大地推动了微纳米科技的进程,促使人类进入了微纳米时代。AFM 起初用于扫描材料的表面形态,因其高空间精度、高灵敏度、最小的样品消耗、低试验误差和小的环境限制而得到快速发展。同时,AFM 也提供了一种方便的方法来精确测量颗粒与材料表面的黏附力,AFM 力-距离曲线已经成为表面科学、生物化学和材料科学领域的基础工具^[9]。而传统的技术(如离心分离技术、静电场技术等)虽仍具有一定的活力,但远不如新型测试技术的应用广泛。

表 1 根据不同研究内容对论文的统计

Table 1 Statistics of papers based on different research topics

技术领域	数量/篇	占检索文献总数的比例/%
AFM 分离技术	127	83.0
微机械分离技术	8	5.2
离心分离技术	8	5.2
静电场分离技术	7	4.6
振动分离技术	2	1.3
激光分离技术	1	0.7

2 各种微颗粒黏附力测试技术分析

2.1 AFM 分离技术

1986 年,美国斯坦福大学 G. Binnig 及 C. F. Quate 和 IBM 公司 C. Gerber 合作发明的原子力显微镜^[11-12]逐渐成为分子和原子级显微测试工具,在表面特征的说明和微颗粒黏附力测试方面都得到了越来越广泛的应用。

基于 AFM 分离技术的微颗粒黏附力测试装置如图 3 所示^[13],将对极微弱力极敏感的微悬臂梁的一端固定,另一端设有微小探针,采用显微操纵技术将微颗粒黏附在探针上^[14-16];将样品衬底表面安放在压电驱动器上,通过在压电驱动器上施加电压可以实现样品表面在纳米尺度的上下移动,同时记录微悬臂梁的变形,微悬臂梁的变形通常采用光学手段来测量(从激光二极管中发射出来的光束聚焦在微悬臂梁的末端背面,为了增强反射性,其背面常涂有 1 层薄黄金层^[17],并且通过分裂光电二极管来探测其位移)。当压电驱动器向上移动到一定程度时,微颗粒就会黏附在样品衬底表面;当压电驱动器向下移动时,微颗粒先继续黏附在样品衬底表面,等

悬臂梁产生足够大的回复力时从衬底表面脱离。以使微颗粒刚好脱离衬底表面的回复力来表示微颗粒与衬底表面之间的黏附力。

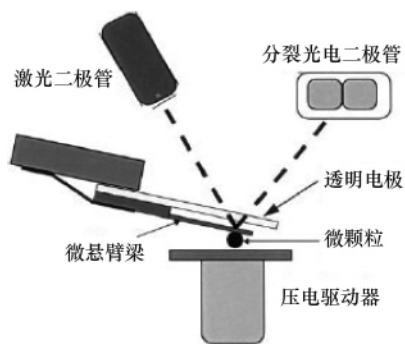


图3 AFM 分离技术测试装置示意

Fig. 3 Scheme of measurement apparatus for the AFM detachment technique

采用 AFM 分离技术测试微颗粒黏附力,得到的典型力-距离曲线(力等于探针变形量 δ 乘以微悬臂梁的弹性系数)见图 4^[18](图中 z 为压电驱动器的位移)。当微颗粒远离衬底表面时,探针变形量为 0,此时作用力也为 0;当压电驱动器逐渐向上运动时,随着微颗粒和衬底表面的靠近,探针会在某一时刻开始变形,进入“跳入”阶段,接着微颗粒会突然跳至与衬底表面接触的状态(称为突然接触^[19]), F_{at} 为“跳入力”;微颗粒与表面接触后实现加载,压电驱动器继续向上移动,使得探针向上变形,探针变形将会由向下变形恢复至 0,然后开始向上变形, d_j 为“跳入距离”;压电驱动器向上移动到一定程度后开始撤离,微颗粒与衬底表面保持接触直至达到某一临界值时突然跳离(称为突然脱离^[19]),此时的作用力即为微颗粒与衬底表面的黏附力 F_{ad} 。一般情况下,黏附力大于跳入力,这是因为提升衬底表面的功以微颗粒和衬底表面之间的黏附能的形式储存着(表面结构的改变、电荷状态和离子层等);在净作用力相互排斥的情况下,曲线可能不会出现跳入力 F_{at} 的阶段。

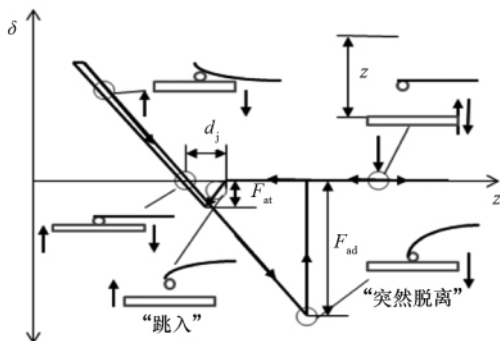


图4 AFM 的典型力-距离曲线

Fig. 4 Typical force-displacement curves of AFM

2.2 微机械分离技术

微机械分离技术的原理如下:将微颗粒黏附在固定的手持式操纵器的玻璃纤维悬臂梁上,将不锈钢样品安装在高精度操纵器的试样夹上;高精度操纵器可以自由移动,先加以一定的预载荷使不锈钢样品与微颗粒接触到一定程度;将微颗粒刚分离时高精度操纵器的位移记录下来,用数字视频显微镜来跟踪黏附在低弹性系数梁悬臂上微颗粒的运动情况,其黏附力取决于位移与悬臂梁的弹性系数的乘积。

基于微机械分离技术的测试装置如图 5 所示^[20]。其中,图 5(a)为 2 个操纵器的初始位置;图 5(b)中高精度操纵器向下移动,不锈钢样品表面加载预载荷给微颗粒;图 5(c)中高精度操纵器向上移动,微颗粒与不锈钢样品表面分离;图 5(d)中测量微颗粒与不锈钢样品表面分离时的位移 δ (即玻璃纤维的变形量)。采用微机械分离技术测试微颗粒与材料表面的黏附力以微颗粒与微颗粒之间黏附力的测量原理^[21-23]为基础。

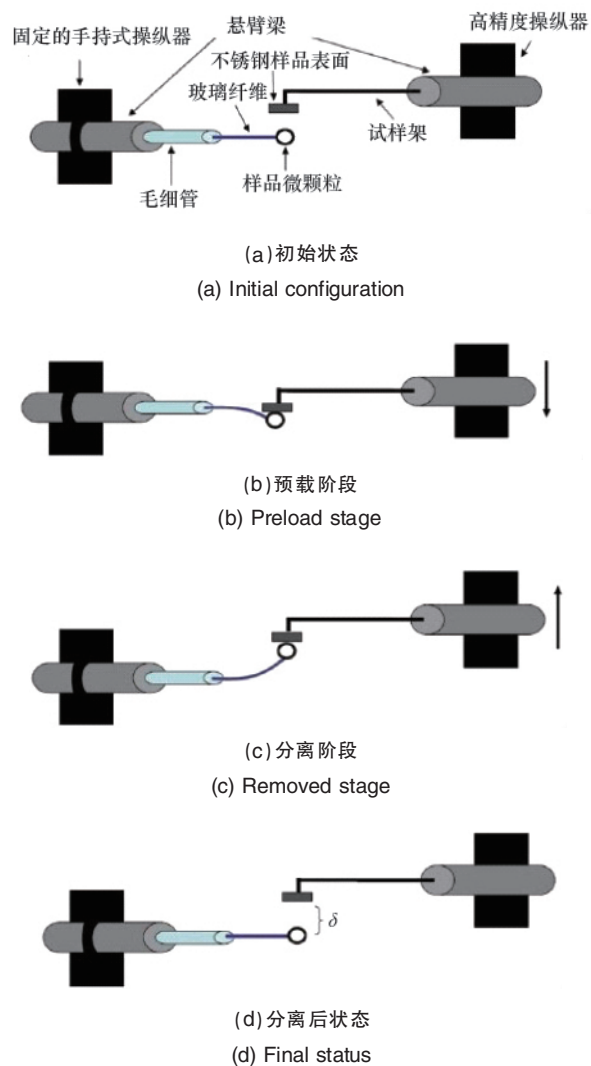


图5 微机械分离技术测试装置示意

Fig. 5 Scheme of measurement apparatus for the micromechanical detachment technique

2.3 离心分离技术

离心分离技术的原理如下:将微颗粒黏附在旋转的转子表面上,当转子转动时,微颗粒受到离心分离力的作用,且该作用随着转子旋转角速度的增大而增大;当黏附在表面的微颗粒所受到的离心分离力达到一定程度时,微颗粒就会克服与转子表面之间的黏附力而发生脱离^[24];此外,相对于黏附力,微颗粒重力的影响很小且可以忽略,因此可用微颗粒刚从转子表面分离时的离心分离力来间接衡量黏附力的大小。

基于离心分离技术的测试装置由限位器、测试圆盘、适配器和金属管构成(图6)。样品微颗粒黏附在测试圆盘表面上,测试圆盘安装在适配器上。金属管和适配器采用轻质且抵抗性强的材料(如铝)制造,可达到高转速;测试圆盘采用不锈钢为制造材料,既对微颗粒具有很高的抵抗性又能达到很高的抛光程度。测试前,对测试圆盘表面进行抛光,用水或酒精漂洗样品,使表面粗糙度尽可能小;测试时,转子角速度逐渐增大,采用高精度 CCD 摄像机来观察并分析某一区域的微颗粒分离情况。微颗粒在不同转速下的离心分离情况如图7所示^[25]。不同微颗粒脱离圆盘表面的情况一般不同,随着衬

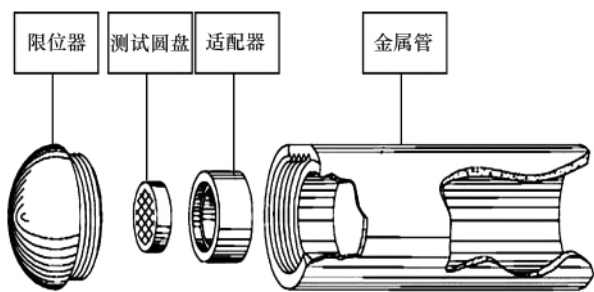
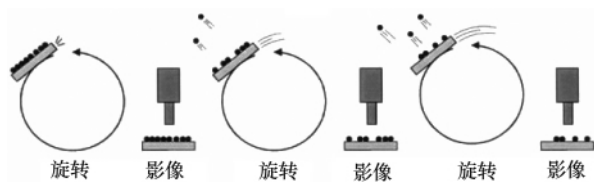


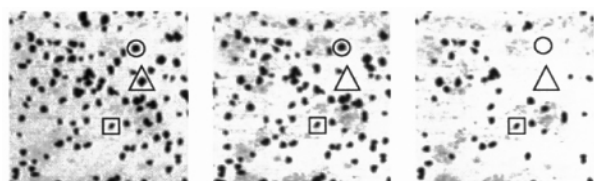
图6 离心分离技术测试装置示意

Fig. 6 Scheme of measurement apparatus for the centrifugal detachment technique



(a) 旋转示意图

(a) Scheme of rotation



(b) 旋转前后圆盘表面的影像图

(b) Images of the disk surface before and after rotation

图7 采用离心分离技术时的微颗粒分离情况

Fig. 7 Micro-particle detachment status with the centrifugal detachment technique

底表面加速度的不断提高,在每个加速阶段会有不同的微颗粒脱离,而且黏附力小的微颗粒先脱离表面。图7(b)中三角形内的微颗粒最先脱离圆盘表面,这表明其黏附力最小;其次是圆形内的微颗粒;正方形内的微颗粒最后脱离,其黏附力最大。

2.4 静电场分离技术

静电场分离技术的原理如下:将带有微颗粒的衬底表面样品置于平行电极板中,加上可以调节的外电场,随着外加电场强度增大到一定程度时,微颗粒所受到的电场力会克服其黏附力而脱离衬底表面。又由于微颗粒的重力相对于黏附力来说影响很小,可以忽略,所以可用微颗粒分离时所受到的电场力来间接衡量黏附力的大小。

基于静电场分离技术的测试装置如图8所示^[26],采用电流计来监测微颗粒的分离情况,在2个平行电极之间加上直流电压,且可以某个设定的电压增加速率不断增加,这样在2个平行电极板间就会产生1个逐渐增加的静电场。样品衬底表面分散有微颗粒,放置在下电极板上,随着电压的增大,微颗粒所受的静电力不断增大,当静电力增大到一定程度时微颗粒脱离下极板而飞向上极板。微颗粒不断地向上极板运动会使电流产生,电流的流动情况可以通过回路中的电流计来测量。采用数据采集卡采集电压的输出情况,再用信号调节器和高压放大器将数据采集卡上的低压信号放大,得到相应的微颗粒黏附力情况。

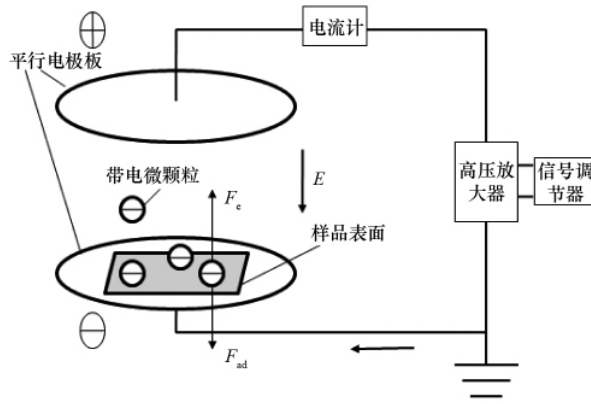


图8 静电场分离技术测试装置示意

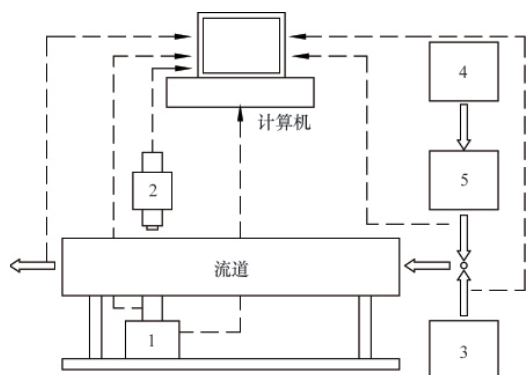
Fig. 8 Scheme of measurement apparatus for the electrostatic field detachment technique

2.5 振动分离技术

振动分离技术的原理如下:在垂直于黏附微颗粒的衬底表面的方向上加以正弦振动的加速度,这样就会产生相应的惯性力作用于微颗粒上,当振动的加速度达到一定程度时,在惯性力作用下微颗粒就会克服黏附力的作用而从衬底表面分离,用微颗粒刚从表面分离时的惯性力来间接衡量黏附力的大小。

基于振动分离技术的测试装置如图9所示,其中虚线部分表示输入电脑的相关参数。衬底表面的正弦振动是用超声

波压电驱动器来驱动的,该驱动器可调节频率和激发电压,同时也可作为温度传感器,被测试的衬底安装在与驱动器连接的适配器上。驱动器提供的最大频率取决于驱动器的温度及其上安装的衬底质量,衬底正弦振荡加速度是通过以一定的频率发射的激光振动计所产生的激发电压和驱动器的温度来校准的。衬底放置在流道的交叉口,当衬底加速度增加到一定程度时,惯性分离力就会超过黏附力,微颗粒脱离衬底表面,该过程可以通过显微镜、CCD 摄像机和影像分析软件连续、实时地进行记录和观测。微颗粒脱离后,被流道中的层流空气流带走,所选用的压缩空气为干空气,其相对湿度要尽可能低。随着正弦振动加速度的逐渐增加,衬底表面的微颗粒所对应的分离状况,如图 10 所示^[27]。随着正弦加速度的增大,部分微颗粒从衬底表面脱离;加速度继续增大后,微颗粒全部脱离。



1—连接衬底的振动系统;2—显微镜的光学单元和 CCD 摄像机;
3—压缩空气;4—层流箱;5—空气暴露试验箱

图 9 振动分离技术测试装置示意

Fig. 9 Scheme of measurement apparatus for the vibration detachment technique

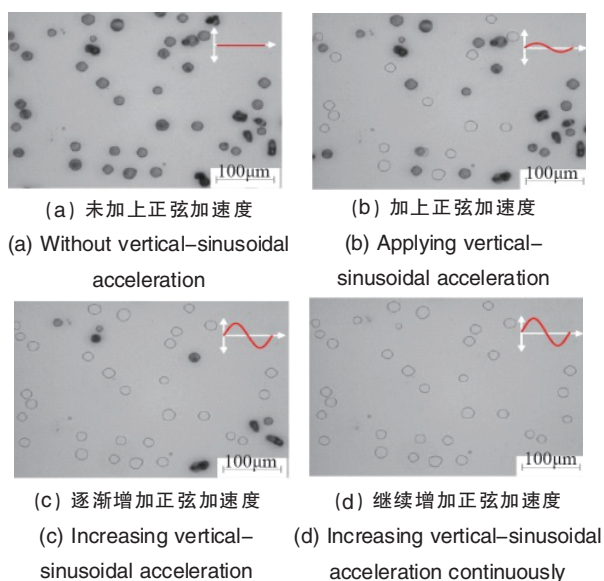


图 10 采用振动分离技术时的微颗粒分离情况

Fig. 10 Micro-particle detachment status with the vibration detachment technique

2.6 激光分离技术

激光分离技术的原理如下:脉冲激光技术可以使光能量在很短的时间内聚集,这个瞬时的力(也即光压)可用来克服微颗粒的黏附力,且黏附力的大小可由微颗粒分离时脉冲光的光压来间接度量。

基于激光分离技术的测试装置如图 11 所示^[28]。从 Nd:YAG 激光器发射出来的脉冲光入射到样品上,利用其产生的强大光压来克服样品微颗粒与衬底表面的黏附力。光路中的石英玻璃片分出 1 束光,用来监测脉冲光的能量。在样品盒上方用一物镜配合 CCD 组成 1 套显微系统,并连接到计算机以监测衬底表面样品的分布情况;将试样放置于样品盒内,样品盒是用 2 片蓝宝石玻璃装配起来的小室。在测试前,将一定粒径的样品微颗粒小球清洗并过滤,烘干后用高倍显微镜观察,发现微颗粒小球大小均匀后再用高压气流将微颗粒小球吹到干净的蓝宝石玻璃表面;在 He-Ne 激光器的辅助下将 Nd:YAG 单脉冲激光对准所要观察的样品,并使之与显微镜视场相一致。在比较低的单脉冲能量下观察不到微颗粒小球的移动,随着脉冲能量的逐渐增加,不断有微颗粒从蓝宝石玻璃表面脱离,且黏附力小的微颗粒将先从表面分离。

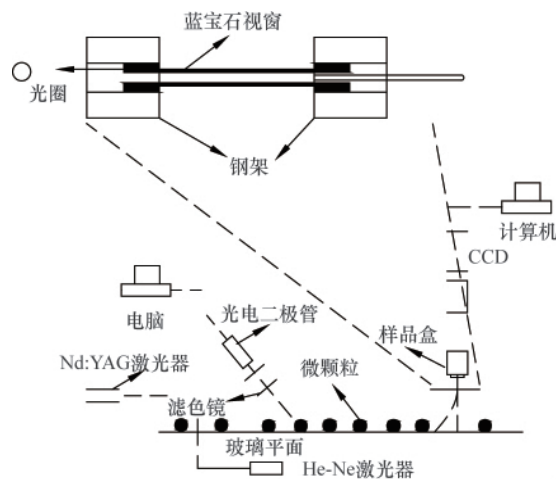


图 11 激光分离技术测试装置示意

Fig. 11 Scheme of measurement apparatus for the laser detachment technique

3 各种测试技术的比较及发展的前沿方向

3.1 各种测试技术比较

微颗粒黏附力测试技术可以概括为接触技术和非接触技术 2 类^[29]。接触技术如 AFM 分离技术、微机械分离技术;非接触技术如离心分离技术、静电场分离技术、振动分离技术和激光分离技术。对各种测试技术的优缺点进行比较分析,如表 2 所示。

3.2 微颗粒黏附力测试技术发展的前沿方向

微颗粒的黏附作用很复杂,高新技术的发展及应用为微颗粒黏附力的测试提供了更加广泛的途径。目前,很多测试技术及试验装置可用来测试微颗粒黏附力,这方面的研究也

表 2 微颗粒黏附力测试技术的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of various micro-particle adhesion force measurement techniques

类型	优点	缺点
AFM 分离技术	操控精度高,悬臂梁与衬底表面间的间距可准确控制;可进行不同独立变化条件下的专门测量,理解各因素对黏附作用的影响;在模型测试和修正方面有广泛用途;更适合于测试不带电微颗粒的黏附力;同一微颗粒可用于一系列的试验且之后可扫描微颗粒表面形态	对带电微颗粒,悬臂梁的轻微导电性和水的作用可带走、转移或抵消部分电荷而产生一定的误差;只能测试单个微颗粒的黏附,由于微颗粒的形态各异,测试结果不足以表征所有微颗粒的黏附情况;单个微颗粒黏附在探针上的显微操作过程要求的精度高,不同微颗粒不能在同一个试验中进行比较研究
微机械分离技术	操作快捷且计算方便、直接的测试方法;可分析不同预载荷情况下微颗粒的粒径、粗糙度、接触时间和相对湿度对微颗粒黏附的影响	对显微操纵器的精度要求较高;对位移的测量和悬臂梁弹性系数的校核有一定的要求;只能测试单个微颗粒的黏附,不能测试微颗粒黏附的整体特性
离心分离技术	能测试带电或不带电、有机性或无机性、规则或不规则以及聚、分散性微颗粒的黏附力;可测试多个微颗粒的黏附力及其分布情况;可测试同种材料微颗粒的粒径、电荷等对黏附力的影响;可测试不同材料的微颗粒黏附力及对分布情况的影响	得到相应的测试数据需要相当长的时间;只能获得微颗粒的平均黏附力,对试验条件(如粗超度和湿度)及材料要求较高;粒径相对大的微颗粒所要求的转速越高;一般对粒径太小的微颗粒,离心力将不足以克服黏附力的作用而使微颗粒脱离
静电场分离技术	可测试多个微颗粒的黏附力及其分布情况;能够很快地获取相应测试数据,能说明不同类别微颗粒的平均黏附状况;可以建立许多材料的黏附情况数据库并确定材料种类对微颗粒黏附作用的影响	所测试的微颗粒必须是带电且非传导性的,对非带电的微颗粒需进行荷电预处理,对荷电性能较弱的微颗粒的测试效果不佳;当微颗粒的黏附作用较强时,需要很高的外加电压;如果不在真空环境中,则易发生电离
振动分离技术	一种微颗粒黏附力及其分布测试的实用方法,可以测量多个微颗粒的黏附力并可以形成对比分析;可分析微颗粒的粒度、粗糙度、接触时间和相对湿度等对黏附力及分布的影响	得到试验数据需要一定的时间;对试验条件(如控制相应层流的雷诺数)有一定要求;测试在光学显微镜下进行,因此不能用于纳米尺度的微颗粒
激光分离技术	可以测出众多微颗粒的黏附力及其分布情况,并可对不同微颗粒分离表面进行对比;得到试验数据所需时间比较短	样品微颗粒的处理要求比较严格;激光以一定夹角斜着照射且假设激光作用在微颗粒小球表面的功率密度均匀,但实际并非如此,存在误差

取得了一定成果。但随着所测试微颗粒粒径的不断减小及各种黏附作用因素的耦合影响,微颗粒黏附力测试技术迎来了新的挑战。微颗粒黏附力测试技术的前沿方向主要包括以下方面。

(1) AFM 分离技术仍会进一步发展。AFM 分离技术作为一种直接测试微颗粒黏附力的方法,虽然在实际测试过程中取得了很好的效果,但在自身参数(如悬臂梁弯曲程度及弹性系数的校正、探针参数、压电驱动器的位移)确定、外界因素的影响机制以及更优化的黏附模型的改进等方面还需要进行深入的研究。AFM 分离技术在黏附模型的修正与发展,特别是在模型黏附影响因素参数的确定方面有着巨大的发展潜力。

(2) 传统的测试技术(如离心分离技术和静电场分离技术等)仍具有一定的应用前景。这些经典的测试技术一直得到研究者的青睐,在除尘技术中,离心除尘器和静电除尘器等的应用比较广泛。施加外界力场对微颗粒黏附作用的影响机制,以及测试后微颗粒的清除机制还需进一步的探究。

(3) 可以考虑在现有微颗粒黏附力测试技术的基础上,不断修正和完善其中的限制影响因素,对相应的测试装置进行改装,采用技术集成的方式将几种测试技术组合集成为新

型的复合测试技术,拓展其功能及应用范围。

(4) 需要进一步探究测试装置设计的原理,使用何种高精密仪器及部件,如何实施、达到何种效果,使用何种微颗粒及何种表面衬底,通过何种方式使得微颗粒从固体表面脱离,分析有何种影响因素,有何种意义。

(5) 需要进一步结合微颗粒测试技术与微颗粒黏附模型,比较试验结果与模型预测结果,得到各种黏附影响因素的作用机制,不断修正模型参数,完善模型。在研究单个微颗粒黏附的基础上进行拓展应用,研究群体颗粒团体系复合作用的力学行为和混沌力学作用体系,建立微颗粒群黏附体系的复合力学模型,发展相应的测试技术。

(6) 需要将微颗粒的清除技术与微颗粒黏附力测试技术相结合,进一步研究如何用微颗粒黏附力测试技术来优化相应的微颗粒清除力学模型,把握好微颗粒测试和清除的关系。

4 结论

对近 10 年微颗粒黏附力测试技术领域研究成果的统计分析表明,该领域越来越受到人们的重视,并且正逐步发展。有关微颗粒黏附力测试技术的论文,中国较美国、德国、日本

和英国等发达国家要少得多,该领域的研究还比较滞后,需要进一步加深研究,逐渐与世界先进测试技术接轨。新型 AFM 分离技术在微颗粒黏附力测试中的应用最为广泛,其次为微机械分离技术、离心分离技术、静电场分离技术、振动分离技术和激光分离技术。各种微颗粒黏附力测试技术的原理不同,各有其相应的优势和不足,需要进一步进行探讨和研究。随着新技术的进一步发展和传统技术的不断完善,该领域将会有更大的发展。

参考文献 (References)

- [1] Desa J, Zhong Q, Ergezen E, *et al.* Microparticle manipulation on the surface of a piezoceramic actuator [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(10): 1–13.
- [2] Felicetti M A, Salazar-Banda G R, Coury J R, *et al.* Influence of particle size, applied compression, and substratum material on particle-surface adhesion force using the centrifuge technique [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(2): 877–887.
- [3] Xing M, Zhong W, Xu X L, *et al.* Adhesion force studies of nanofibers and nanoparticles[J]. *Langmuir*, 2010, 26(14): 11809–11814.
- [4] Strathmann S C, Murphy M A, Goeckner B A, *et al.* Forces between insulin microspheres and polymers surfaces for a dry powder inhaler[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009, 372(1–2): 147–153.
- [5] Thomas G, Ouabbas Y, Grosseau P, *et al.* Modeling the mean interaction forces between powder particles. Application to silica gel-magnesium stearate mixtures[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(17): 7500–7507.
- [6] Davies M J, Brindley A, Chen X Y, *et al.* A quantitative assessment of inhaled drug particle-pulmonary surfactant interaction by atomic force microscopy[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2009, 73(1): 97–102.
- [7] Farshchi-Tabrizi M, Kappal M, Cheng Y J, *et al.* On the adhesion between fine particles and nanocontacts: An atomic force microscope study[J]. *Langmuir*, 2006, 22(5): 2171–2184.
- [8] Ding W, Zhang H, Cetinkaya C. Rolling resistance moment-based adhesion characterization of microspheres [J]. *The Journal of Adhesion*, 2008, 84(12): 996–1006.
- [9] Burtovyy R, Liu Y, Zdyrko B, *et al.* AFM measurements of interactions between CMP slurry particles and substrate [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007, 154(6): 476–485.
- [10] Xu L P, Pradhan S, Chen S W. Adhesion force studies of Janus nanoparticles[J]. *Langmuir*, 2007, 23(16): 8544–8548.
- [11] Binnig G, Quate C F, Gerber C. Atomic force microscope [J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56(9): 930–933.
- [12] Camila A R, Lay-Theng L, Fernando G. Surface mechanical properties of thin polymer films investigated by AFM in pulsed force mode[J]. *Langmuir*, 2009, 25(17): 9938–9946.
- [13] Mizes H, Ott M, Eklund E, *et al.* Small particle adhesion: Measurement and control [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 165(1–3): 11–23.
- [14] Motoyuki I, Motoyasu Y, Tadashi T, *et al.* Direct measurement of interactions between stimulation-responsive drug delivery vehicles and artificial mucin layers by colloid probe atomic force microscopy [J]. *Langmuir*, 2008, 24(8): 3987–3992.
- [15] Michael K, Hans-Jürgen T. The colloidal probe technique and its application to adhesion force measurements [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2002, 19(3): 129–143.
- [16] Dejeu J, Bechelany M, Philippe L, *et al.* Reducing the Adhesion between surfaces: Using surface structuring with PS latex particle[J]. *Applied Materials & Interfaces*, 2010, 2(6): 1630–1636.

- [17] Tykhoniuk R, Tomas J, Luding S, *et al.* Ultrafine cohesive powders: From interparticle contacts to continuum behaviour [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(11): 2843–2864.
- [18] Tang Y, Liu Y, Sampathkumaran U, *et al.* Particle growth and particle-surface interactions during low-temperature deposition of ceramic thin films[J]. *Solid State Ionics*, 2002, 151(1–4): 69–78.
- [19] 柳冠青, 李水清, 姚强. 微米颗粒与固体表面相互作用的 AFM 测量 [J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(5): 803–806.
Liu Guanqing, Li Shuiqing, Yao Qiang. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(5): 803–806.
- [20] Nicholas J W, Dieker L E, Sloan E D, *et al.* Assessing the feasibility of hydrate deposition on pipeline walls—Adhesion force measurements of clathrate hydrate particles on carbon steel [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 331(2): 322–328.
- [21] Taylor C J, Dieker L E, Miller K T, *et al.* Micromechanical adhesion force measurements between tetrahydrofuran hydrate particles [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 306(2): 255–261.
- [22] Dieker L E, Aman Z M, George N C, *et al.* Micromechanical adhesion force measurements between hydrate particles in hydrocarbon oils and their modifications[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(12): 5966–5971.
- [23] Yang S O, Kleehammer D M, Huo Z X, *et al.* Temperature dependence of particle-particle adherence forces in ice and clathrate hydrates[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 277(2): 335–341.
- [24] Nguyen T T, Rambanapasi C, Boer A H, *et al.* A centrifuge method to measure particle cohesion forces to substrate surfaces: The use of a force distribution concept for data interpretation[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2010, 393(1–2): 88–95.
- [25] Salazar-Banda G R, Felicetti M A, Goncalves J A S, *et al.* Determination of the adhesion force between particles and a flat surface, using the centrifuge technique [J]. *Powder Technology*, 2007, 173(2): 107–117.
- [26] Hu B, Freihaut J D, Bahnfleth W P, *et al.* Measurements and factorial analysis of micron-sized particle adhesion force to indoor flooring materials by electrostatic detachment method [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2008, 42(7): 513–520.
- [27] Ripperger S, Hein K. Measurement of adhesion forces in air with the vibration method[J]. *China Particology*, 2005, 3(1–2): 3–9.
- [28] 范建国, 夏宇兴. 微米颗粒粘附力的光学测量法 [J]. *中国激光*, 2003, 30(11): 1023–1026.
Fan Jianguo, Xia Yuxing. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(11): 1023–1026.
- [29] Ding W Q. Micro/nano-particle manipulation and adhesion studies[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008, 22(5–6): 457–480.

(责任编辑 孙秀云,代丽)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。