



中华人民共和国国家标准

GB/T 25915.9—2018/ISO 14644-9:2012

洁净室及相关受控环境 第9部分：按粒子浓度划分表面洁净度等级

Cleanrooms and associated controlled environments—
Part 9: Classification of surface cleanliness by particle concentration

(ISO 14644-9:2012, IDT)

2018-06-07 发布

2018-10-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	Ⅲ
引言	Ⅳ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 分级体系	2
6 符合性的证实	5
附录 A (资料性附录) 表面特性	7
附录 B (资料性附录) 特定粒径范围描述符	10
附录 C (资料性附录) 影响 SCP 分级的参数	12
附录 D (资料性附录) 按粒子浓度确定表面洁净度的测量方法	14
参考文献	21

前 言

GB/T 25915《洁净室及相关受控环境》包含 10 个部分：

- 第 1 部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级；
- 第 2 部分：证实持续符合 GB/T 25915.1 的监测和定期测试技术条件；
- 第 3 部分：检测方法；
- 第 4 部分：设计、建造和启动；
- 第 5 部分：运行；
- 第 6 部分：词汇；
- 第 7 部分：隔离装置（洁净风罩、手套箱、隔离器、微环境）；
- 第 8 部分：按化学物浓度划分空气洁净度等级；
- 第 9 部分：按粒子浓度划分表面洁净度等级；
- 第 10 部分：按化学物浓度划分表面洁净度等级。

本部分为 GB/T 25915 的第 9 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 ISO 14644-9:2012《洁净室及相关受控环境 第 9 部分：按粒子浓度划分表面洁净度等级》。

本部分由全国洁净室及相关受控环境标准化技术委员会(SAC/TC 319)提出并归口。

本部分起草单位：中天道成(苏州)洁净技术有限公司、深圳市吉隆洁净技术有限公司、苏州安泰空气技术有限公司、苏州工业园区嘉合环境技术工程有限公司、苏州净化工程安装有限公司、中国电子工程设计院、中电投工程研究检测评定中心、中国电子学会洁净技术分会、深圳市亿天净化技术有限公司、北京世源希达工程技术公司、中国工程物理研究院八所、深圳新科特种装饰工程公司。

本部分主要起草人：姜皓遐、殷晓冬、王大千、黄吉辉、金真、袁晓东、蒋乃军、王尧、张利群、夏群艳、苏钢民、吴晓媛、石小雷、邝绍同。

引 言

洁净室及相关受控环境按照对污染敏感的作业所适用的水平提供污染控制。受益于污染控制的产品和工艺包括航空航天、微电子、光学、核能和生命科学(制药、医疗器械、食品、医疗)等工业。

GB/T 25915.1—2010 ~ GB/T 25915.8—2010 是专门针对悬浮粒子和化学污染的, GB/T 25916.1—2010 和 GB/T 25916.2—2010 是针对生物污染的。在洁净室及其他受控环境的设计、技术条件、运行和控制中,除了表面洁净度分级外,还应考虑许多因素。这些因素在 GB/T 25915 和 GB/T 25916 的其他部分中有详细说明。

本部分是通过测定粒子浓度表示表面洁净度分级。本部分还列出了测定表面粒子浓度的步骤和一些测试方法。

若监管机构有相关规定或指南,可对测试步骤予以适当修改。

洁净室及相关受控环境

第9部分:按粒子浓度划分表面洁净度等级

1 范围

GB/T 25915 的本部分阐明了在洁净室及相关受控环境中,按粒子浓度来划分固体表面洁净度等级。附录 A~附录 D 中给出了关于表面特性的信息以及推荐的检测和测量方法。

本部分适用于洁净室及相关受控环境中的所有固体表面,如墙壁、顶棚、地板、生产环境、工具、设备和产品。按粒子浓度划分的表面洁净度等级(SCP)限于粒径 $0.05\ \mu\text{m}$ ~ $500\ \mu\text{m}$ 的粒子。

本部分对以下事项未予考虑:

- 特定工艺的洁净度及适合性要求;
- 表面的清洁步骤;
- 材料特性;
- 涉及相互结合力或通常与时间和工艺过程有关的事项;
- 分级和测试统计方法的选择和使用;
- 粒子的其他特性,如静电电荷、离子电荷、微生物等状况。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 25915.6—2010 洁净室及相关受控环境 第6部分:词汇(ISO 14644-6:2007, IDT)

3 术语和定义

GB/T 25915.6—2010 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

特定粒径范围描述符 **descriptor for specific particle size ranges**

区分特定粒径范围 SCP 水平的描述符。

注:此描述符可用于特别关注的或在分级体系之外的粒径范围,并可单独说明或作为 SCP 等级的补充。

3.2

直接测量法 **direct measurement method**

没有任何中间步骤的测量污染方法。

3.3

间接测量方法 **indirect measurement method**

带有中间步骤的测量污染方法。

3.4

固体表面 **solid surface**

固体与另一相之间的界面。

3.5

表面粒子 surface particle

离散分布并粘附在所关注表面上的固体或液体物质,不包括覆盖整个表面的薄膜类物质。

注:表面粒子是通过化学和(或)物理相互作用而粘附的粒子。

3.6

表面洁净度 surface cleanliness by particle concentration; SCP

表面粒子浓度方面的状况。

注:表面洁净度是由材料与型式特点、各种应力负荷(作用于表面上负荷的复杂性)以及起主导作用的环境条件和其他因素所决定的。

3.7

表面洁净度等级 surface cleanliness by particle concentration class

SCP 等级 SCP class

每平方米表面关注粒径粒子浓度最大允许值的级别(SCP1 级至 8 级)。

3.8

表面洁净度分级 surface cleanliness by particle concentration classification

SCP 分级 SCP classification

以 ISO SCP N 级表示的代表每平方米中关注粒径的表面粒子最大允许浓度(或测定水平的过程)。

3.9

表面粒子浓度 surface particle concentration

关注的表面区域单位面积离散粒子的数目。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AFM:原子力显微法(atomic force microscopy)

CNC:凝聚核计数器(condensation nucleus counter)

EDX:能量色散 X 射线光谱法(energy dispersive X-ray spectroscopy)

ESCA:化学分析电子能谱法(electron spectroscopy for chemical analysis)

IR:红外(吸收式光谱法)[infrared(absorption spectroscopy)]

OPC:光学粒子计数器(optical particle counter)

PET:聚乙烯苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate)

SCP:按粒子浓度划分表面洁净度(surface cleanliness by particle concentration)

SEM:扫描电子显微镜法(scanning electron microscopy)

UV:紫外线(光谱仪)[ultraviolet(spectroscopy)]

WDX:波长色散 X-射线光谱(wavelength-dispersive X-ray spectroscopy)

5 分级体系

5.1 ISO-SCP 分级公式

在洁净室及相关受控环境中,按粒子浓度划分的表面洁净度级别(SCP)以等级数字 N 表示,它规定了表面上所关注粒径粒子的最大允许浓度。 N 由式(1)确定,它表示某一关注粒径(D)粒子每平方

米表面所允许的最大总浓度： $C_{SCP,D}$ 。

$$C_{SCP,D} = k \frac{10^N}{D} \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：
- $C_{SCP,D}$ ——每平方米表面上大于或等于所关注粒径粒子的最大允许总浓度， $C_{SCP,D}$ 保留不多于 3 位非零有效数字，修约到最近的整数；
- N ——SCP 分级数字，限于 SCP 1 级～SCP 8 级；SCP 分级数字 N 所对应的是以微米为单位的被测粒径 D ；
- 注： N 表示的是基准粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 的粒子浓度以 10 为底的指数。
- D ——关注粒径，单位为微米(μm)；
- k ——常数 1，单位为微米(μm)。

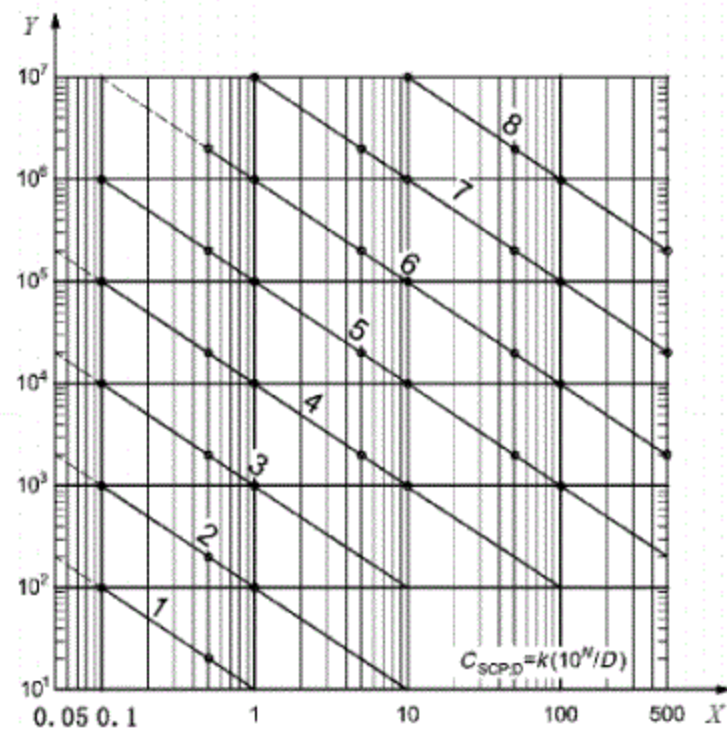
注 1：由于粒子生成和传输的动态特性，依据粒子浓度的 SCP 等级是可依时间和工艺而定的值。

注 2：由于统计评估的复杂性及众多参考资料，GB/T 25915 本部分中未说明对分级和测试统计方法的选择与应用。

依式(1)导出的浓度 $C_{SCP,D}$ 应作为确定值使用。表 1 显示的是所选定的 SCP 等级和关注粒径对应的表面最大允许累积浓度。

表 1 洁净室及相关受控环境所选定的 SCP 等级 单位为粒子数每平方米

SCP 等级	粒径								
	$\geq 0.05\ \mu\text{m}$	$\geq 0.1\ \mu\text{m}$	$\geq 0.5\ \mu\text{m}$	$\geq 1\ \mu\text{m}$	$\geq 5\ \mu\text{m}$	$\geq 10\ \mu\text{m}$	$\geq 50\ \mu\text{m}$	$\geq 100\ \mu\text{m}$	$\geq 500\ \mu\text{m}$
SCP 1 级	(200)	100	20	(10)					
SCP 2 级	(2 000)	1 000	200	100	(20)	(10)			
SCP 3 级	(20 000)	10 000	2 000	1 000	(200)	(100)			
SCP 4 级	(200 000)	100 000	20 000	10 000	2 000	1 000	(200)	(100)	
SCP 5 级		1 000 000	200 000	100 000	20 000	10 000	2 000	1 000	(200)
SCP 6 级		(10 000 000)	2 000 000	1 000 000	200 000	100 000	20 000	10 000	2 000
SCP 7 级				10 000 000	2 000 000	1 000 000	200 000	10 000	20 000
SCP 8 级						10 000 000	2 000 000	1 000 000	200 000
表中的值是每平方米表面上大于或等于关注粒径的粒子浓度及 SCP 等级($C_{SCP,D}$)。									
括号内的数字，其对应的粒径不宜用于分级；选择其他粒径进行分级。									
测试所用最小面积应在统计学上对关注表面具有代表性。									
注：对较低 SCP 级别的分级，要有大量的测量结果以确立有效值。									



说明:

X ——关注粒径, $D(\mu\text{m})$;

Y ——表面上粒径 $\geq D$ 的粒子浓度, $C_{\text{SCP},D}$ (个/ m^2);

1 ——SCP 1 级;

2 ——SCP 2 级;

3 ——SCP 3 级;

4 ——SCP 4 级;

5 ——SCP 5 级;

6 ——SCP 6 级;

7 ——SCP 7 级;

8 ——SCP 8 级。

图 1 SCP 等级

图 1 上的分级实线是用于分级,虚线不可用于分级。

注: 表面上的粒子分布一般不呈正态分布,而是受到各种因素,如粗糙度、孔隙度、静电电荷、沉降机理等的影响(参见附录 A)。

举例: SCP 5 级($1\ \mu\text{m}$)表示每平方米表面上关注粒径 $\geq 1\ \mu\text{m}$ ($D=1$) 的粒子最多可有 10^5 个。SCP 5 级($10\ \mu\text{m}$)表示每平方米表面上每平方米关注粒径为 $\geq 10\ \mu\text{m}$ ($D=10$) 的粒子最多可有 10^4 个。所测得的任何其他粒径 ($D=x$) 的粒子,如浓度在相应的 SCP 等级线以下,则均处于 SCP 5 级 ($x\ \mu\text{m}$) 的标准内。

处于分级体系之外的粒径,或仅关注很窄的粒径范围、个别粒径时,可使用描述符(参见附录 B)。

5.2 表示方法

SCP 等级的表示方法如下: SCP N 级 ($D\ \mu\text{m}$)。

洁净室及相关受控环境 SCP 等级的表示方法,还应包括下列内容:

- 所测表面的类型;
- 所测表面的面积;
- 所用测量方法。

所用测量方法的详细情况,包括采样技术和测量装置,应包含在测试报告中。

关注粒径应由需方和供方商定。

要依所测粒子的直径说明 SCP 的分级。

例 1 SCP 2 级($0.1\ \mu\text{m}$);晶圆片或玻璃基底,表面积 $310\ \text{cm}^2$;表面粒子计数器。

例 2 SCP 5 级($0.5\ \mu\text{m}$);瓶子内壁,表面积 $200\ \text{cm}^2$;液体扩散-液体粒子计数器。

5.3 按粒子浓度划分表面洁净度的一般性信息

空气悬浮粒子的浓度与表面粒子浓度一般是有关的。其关系由许多因素决定,如气流紊流、沉降量、沉降时间、沉降速度、空气中的浓度,以及静电电荷等表面特性(见 A.2.4)。为按粒子浓度测定表面洁净度,应考虑到影响测试的各种参数(参见附录 C)及表面特性(参见附录 A)。

6 符合性的证实

6.1 概述

与需方商定的 SCP 等级要求的符合性,需经过测试并提供测试条件和测试结果的报告来证明。

证实其相符性的细节(见 6.3)要由需方和供方在测试前商定。

6.2 测试

符合性的验证测试应以经过校准的仪器和适用的测试方法在受控环境内进行。

附录 D 中给出的直接和间接测试法可用来证实符合性。目录中所述的常用测试方法并非全部,经商定可采用具有等效精度的其他方法。

注:即便正确应用不同的测量方法,也会产生不同的结果,而其有效性是相同的。

建议采用重复测量。

测试方法及测试环境应由需方和供方商定。

因静电电荷会增加粒子向表面的沉降,应事先采取措施降低测试区周围的静电电荷,如表面是非导电的,也未接地或中和电荷,就可能产生静电电荷(参见附录 A)。从而可能改变测试结果。

6.3 测试报告

每个表面的测试结果要予以记录,以综合报告的形式提交,并说明与规定的 SCP 等级相符或不相符。测试报告至少应包括下述各项:

- a) 基本数据:
 - 测试日期和时间。
 - 测试单位的名称和地址。
 - 测试人员姓名。
- b) 参照的文件:
 - 标准。
 - 指南。
 - 规定。
 - 本部分出版时的编号,即 GB/T 25915.9—2018。
- c) 环境数据:
 - 采样环境条件(即温度、湿度、洁净度)。

- 测量时的环境条件(即温度、湿度、洁净度)(对直接法非必需)。
- 测量所在位置(房间等)。
- d) 样本:
 - 对测试对象的清楚识别。
 - 对测试对象的说明。
 - 测试样本的图样和草图。
- e) 测试方案:
 - 对测试方案进行说明的照片和(或)草图。
 - 对操作参数的说明。
 - 对测量点的说明。
 - 对所用硬件的说明。
- f) 测量装置:
 - 仪器和装置及当前的校准证书。
 - 测量范围。
 - 对校准证书的说明。
- g) 测试:
 - 所用测试方法的相关详情,以及对偏离测试方法的可用数据的说明(如商定)。
 - 采样前的表面条件(如清洁后,包装后,处于大气或真空环境)。
 - 规定的检测和测量步骤/方法。
 - 采样及测量期间的占用状态。
 - 规定的检测方法。
 - 所有商定的文件(如原始数据、背景粒子浓度、图片、图形、清洁和包装)。
 - 采样持续时间、地点和位置(对直接法非必需)。
 - 测量持续时间、地点和位置(对直接法必需)。
 - 采样(测量)期间值得注意的观测结果(如适用)。
 - 所进行的测量次数。
 - 所测表面的明确位置和面积,并注明表面具体坐标。
- h) 结果与分析:
 - 如适用,在测量前和测量后目检被测表面。
 - 测量值和对测量值的分析。
 - 数据质量说明。
 - 关注粒径范围。
 - 所进行的全部测试的结果,包括给定粒径粒子浓度数据。
 - 按粒子浓度级别划分的表面洁净度,以 SCP N 级表示。
 - 洁净表面的验收标准,如需方和供方有商定。

附录 A
(资料性附录)
表面特性

A.1 对表面的说明

确定表面特性一般是按表面构造(如粗糙度、孔隙率)、机械特性(如硬度)以及物理化学特性(如表面静电电荷和表面张力)。应在考虑了每种特性后,再选择表面洁净度分级测试方法,或作为对测试结果的辅助说明。

A.2 表面特性

A.2.1 粗糙度

A.2.1.1 说明

表面粗糙度对表面的许多物理特性都有影响,表面粗糙度既不易以单个参数来描述,也不是表面固有特性。粗糙度存在于两个基本平面:与表面成直角的平面,其特性可用高度描述;表面所在的平面,视为“质地”,其特性由波紋度描述。表面粗糙度可用机械的或光学的方法测定。

A.2.1.2 测试

测定粗糙度常用的机械方法是使用触针式仪器(例如,见 ISO 4287 或 GB/T 10610—2009/ISO 4288:1996)。

测定粗糙度和有孔表面结构常用的光学方法是显微镜法(光学、共聚焦、干涉法、有或没有隧道效应、斜切截面)。

A.2.2 孔隙率

A.2.2.1 定义和说明

孔隙率是对材料内中空空间的量度,表示为 0~1 之间的小数,或是 0%~100%之间的百分数。

——有效孔隙率(也称开孔率)系指总体积中流体能够有效地在其中流过的那部分体积(不包括有一端不相连的空孔或空穴)占总体积的比率。

——大孔系指直径大于或等于 50 nm 的孔。流体流经大孔是以体相扩散描述的。

——介孔系指直径大于或等于 2 nm 但小于 50 nm 的孔。

——微孔系指直径小于 2 nm 的孔。微孔中的运动属于活性扩散。

A.2.2.2 测试

对给定材料或称为材料基体的混合材料的孔隙率,可有几种估算方法。

体积/密度法既快准确度又高(一般在实际孔隙率的±2%以内)。测量材料的体积和质量,用材料质量除以材料密度即得出减去孔的容积后材料所应占据的体积。因此,孔的容积即等于总体积减去材料体积,或直接表述为:(孔容积)=(总体积)−(材料体积)。

水饱和法稍难些,但更准确,更直接。取已知体积的材料和已知体积的水。将材料慢慢地倾倒入水中,在此过程中使材料饱和。让材料在水中浸泡几个小时,保证材料充分饱和。然后将未被饱和的剩余水从水桶上部倒出,并测量其体积。水桶中原来水的体积减去剩余水的体积即为孔的容积,或直接表述为:(孔容积)=(水的总体积)−(剩余水的体积)。

压汞法(压汞孔隙度仪)需要将样本置于可将样本排空的特殊加注装置内,随后导入液体汞。再测量与所施压力成函数关系的汞包的尺寸。施加的压力越大,汞能进入的孔就越小。一般情况下,这种方法用于 $300\ \mu\text{m}\sim 0.003\ 5\ \mu\text{m}$ 的孔径范围。因为对使用汞的安全问题的担心越来越大,所以已经研发出几种非汞压入技术,宜作为替代方法予以考虑。

氮气吸附法用于测定材料中的精细孔隙率。氮气可冷凝在孔径小于 $0.090\ \mu\text{m}$ 的孔壁上。该冷凝量可用体积或质量测量。

A.2.3 硬度

测量各类型材料硬度有许多国家的和国际的标准。硬度测量常以球状或针状金刚石的穿透力、硬物体的压痕或冲击器的回弹特性来表示。

ASTM E18-07 中有测量金属硬度的洛氏法、布氏法、肖氏法、维氏法。在测试开始时,根据样本的厚度、金属成分及预期硬度,选择几何形状及压力。

A.2.4 静电

A.2.4.1 定义和说明

静电的定义为,材料表面上电子不平衡所产生的电荷。这种电子不平衡产生的静电场,会影响对物体表面洁净度的测定。静电放电(ESD)的定义是,电荷在具有不同电位物体间的转移。

材料的任何相对运动及物理分离,或是固体、液体或携带有粒子的气体的流动,都可产生静电电荷。常见的静电放电(ESD)源包括人、普通聚合物材料制成的物品及加工设备。与静电源的直接接触而产生的 ESD,或因带电物体发出的电场而发生的 ESD,可损害零部件。

带电表面会吸引并捕获粒子污染物。如所选的表面洁净度测定方法是对表面粒子的(见 D.2.3.3.5)间接检测,则其测量结果可能因粒子剥离量的不足而不准确。所以,应采取措施降低 ESD 效应,采用间接测量法时尤其如此。

A.2.4.2 测试

测定样本表面 ESD 特性或有助于评估其对表面粒子剥离效率的影响(如 IEC 61340-5-1, ISO 10015, IEST RP-CC022.2, SEMI E43-0301, SEMI E78-0706)。

A.2.5 表面张力

A.2.5.1 定义

表面张力是增加一个表面面积单位所需的能量。通常定义为 γ ,以焦每平方米(J/m^2)表示,或牛每米(N/m)表示。

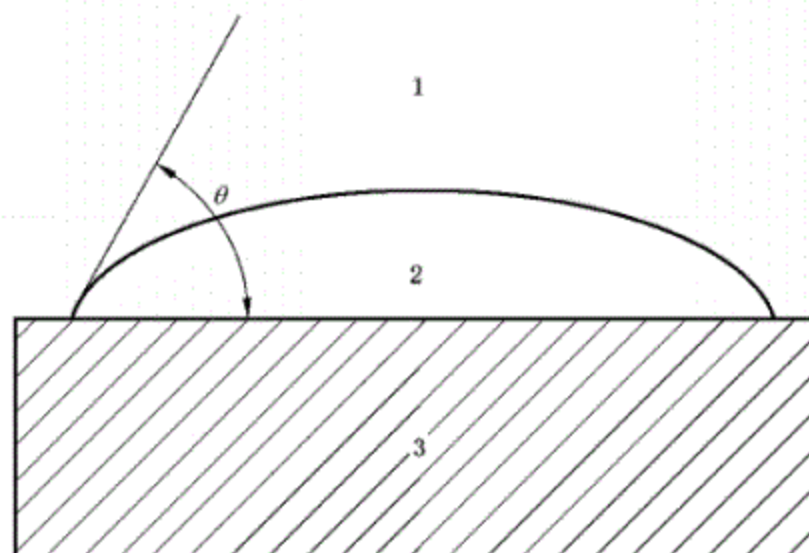
A.2.5.2 测试

最著名的方法是用“液滴法”测量接触角(见参考文献中的[22])。

当液滴与平的固体表面接触时,其形状取决于液体分子力的内聚力或液体和固体之间的粘附力。

以液体和固体之间的接触角作为表面张力指数(见图 A.1)。通常发现,表面张力低的液体易于润湿更多的固体的表面,接触角近于零。固体和液体之间的分子粘附力大于液体分子间的内聚力。

测量接触角是采用光学方法将平坦固体表面上的液滴剖面放大($\times 10 \sim \times 50$)。



说明:

1——气体;

2——液体;

3——固体。

图 A.1 接触角 $\theta < 90^\circ$ 时液滴与固体表面接触的形状

附录 B

(资料性附录)

特定粒径范围描述符

B.1 应用

处于分级体系范围之外的粒径,可使用描述符。该描述符也可用于特别关注的特定粒径范围。在这类情况下,采用 SCP 分级后,还可另加上描述符。

B.2 表面特定粒径范围的描述符

特定粒径范围的 N_{ss} (特定粒径范围的粒子数量浓度) 描述符可单独列出或作为 SCP 等级的补充说明列出。描述符可用于特别关注的任何粒径范围。

粒径范围 D_L 和 D_U 内的表面粒子浓度 C_s 是一个差别值。

单一粒径范围的 N_{ss} 以式(B.1)表示:

$$N_{ss}(C_s; D_L; D_U)a; b \quad \text{..... (B.1)}$$

式中:

C_s ——所规定粒径范围的表面最大允许总浓度,以每平方米表面的粒子数表示;

D_L ——所规定粒径范围的下限,单位为微米(μm);

D_U ——所规定粒径范围的上限,单位为微米(μm);

a ——测定规定范围内粒径所用的测量方法;

b ——所关注的表面。

示例 1:

金属表面上 $1\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ 粒径范围的粒子浓度,所要求的值为 $10\ 000\ \text{个}/\text{m}^2$ ($1.0\ \text{个}/\text{cm}^2$),采用的是光学显微镜测量粒子浓度,表示为:

$$N_{ss}(10\ 000; 1; 5)\text{光学显微镜;金属表面}$$

如采用两个或更多的粒径范围,使用式(B.2)。式中 N_{ss} 表示为:

$$N_{ss} \begin{pmatrix} C_{s1}; D_{L1}; D_{U1} \\ C_{s2}; D_{L2}; D_{U2} \\ \dots \\ C_{si}; D_{Li}; D_{Ui} \\ \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1; b \\ a_2; b \\ \dots \\ a_i; b \\ \dots \end{pmatrix} \quad \text{..... (B.2)}$$

式中:

C_{si} ——第 i 个粒径范围的表面最大允许总浓度,以每平方米表面的粒子数表示;

D_{Li} ——第 i 个粒径范围下限,单位为微米(μm);

D_{Ui} ——第 i 个粒径范围上限,单位为微米(μm);

a_i ——测定第 i 个范围内粒径所使用的测量方法;

b ——所关注的表面。

示例 2:

测量玻璃板上的粒子浓度,使用散射光扫描仪对 $0.1\ \mu\text{m} \sim 0.5\ \mu\text{m}$ 粒径范围的粒子进行测量,同时使用光学显微镜,对 $5\ \mu\text{m} \sim 20\ \mu\text{m}$ 粒径范围的粒子进行测量,所得值分别为 $9\ 000\ \text{个}/\text{m}^2$ ($0.9\ \text{个}/\text{cm}^2$) 和 $500\ \text{个}/\text{m}^2$ ($0.05\ \text{个}/\text{cm}^2$), 分别

小于 10 000 个/m² 和 500 个/m² 的最大允许限值。

$$N_{ss} \begin{pmatrix} 10\,000; 0.1; 0.5 \\ 500; 5; 20 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{散射光扫描仪; 玻璃板} \\ \text{光学显微镜; 玻璃板} \end{matrix}$$

当对测量方法或特定表面预先没有规定, 或非必需说明时, 可在表示法中省略 a 和 b 。此时, 描述符表示见式(B.3):

$$N_{ss}(C_s; D_L; D_U) \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

C_s ——规定粒径范围内表面最大允许总浓度, 以每平方米表面的粒子数表示;

D_L ——规定的粒径范围下限; 单位为微米(μm);

D_U ——规定的粒径范围上限; 单位为微米(μm)。

如关注粒径只有一个, 经由需方和供方商定, 可用式(B.3)中的下限和上限框定关注粒径。

示例 3:

粒径为 5 μm , 所规定的值为 200 个/m² (0.02 个/cm²)。 D_L 可设为 4.5 μm , D_U 可设为 5.5 μm 。表示为:

$$N_{ss}(200; 4.5; 5.5)$$

当对测量方法或特定表面预先没有规定, 或非必需说明时, 可在表示法中省略 a 和 b 。两个或更多粒径范围的描述符表示见式(B.4):

$$N_{ss} \begin{pmatrix} C_{S1}; D_{L1}; D_{U1} \\ C_{S2}; D_{L2}; D_{U2} \\ \dots \\ C_{Si}; D_{Li}; D_{Ui} \\ \dots \end{pmatrix} \dots\dots\dots (B.4)$$

示例 4:

粒径范围 0.1 μm ~0.5 μm 之间以及 5 μm ~20 μm 之间的粒子浓度, 所测得的值分别为 9 000 个/m² (0.9 个/cm²) 和 500 个/m² (0.05 个/cm²)。它们都分别处于最大允许限值 10 000 个/m² 和 500 个/m² 之内。表示为式(B.5):

$$N_{ss} \begin{pmatrix} 10\,000; 0.1; 0.5 \\ 500; 5; 20 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (B.5)$$

附 录 C
(资料性附录)
影响 SCP 分级的参数

C.1 背景

C.2 中说明了可能影响表面测试和测量的因素。所提供的该项信息既非全部,也无主次之分。附录 D 中给出了测量方法和表面特性方面更详尽的资料。

C.2 因素

C.2.1 物理/化学特性

- 表面能量状态。例如,表面的内聚/粘附特性和(或)亲水/疏水特性,可能会影响对粒子的吸引和剥离。
- 表面的孔隙率。在多数情况下,孔隙率越高,表面疵病和粒子探测之间的区别就越复杂。
- 表面可清洁性。若表面难于清洁,表面疵病和粒子探测之间的区分就复杂。
- 表面光学特性。在采用直接测试法时,待测表面不同的光学特性将产生不同的测量结果。用间接测试法时未发现这种差别。
- 表面静电特性。表面静电特性将影响对(带静电)污染物的吸引和剥离。
- 表面磁特性。表面磁特性将影响对带磁性材料的吸引和剥离。

C.2.2 表面及粒子的形状

- 粒子的外貌(圆形、扁平、椭圆形、尖形等)和表面的形态都将影响测量结果。
- 表面条件(已清洁、挤压的、抛光的等)。粒子的附着力依表面情况而异。这种差别也影响对粒子的剥离效率以及对粒子、粗糙度和孔隙率的辨别能力。
- 表面的粗糙度/孔隙率/波纹度。粗糙度、孔隙率和波纹度对间接法剥离粒子的效率有影响。
- 粒子的外形/几何形态。粒子的形状也会影响测量结果。例如,从表面剥离出来的长粒子和很圆的粒子,其光学粒子计数器测值可以相同,但其重力值却完全不同。一般情况下,将长宽比大于或等于 10 的粒子认作为纤维。

C.2.3 测量/分析能力以及粒子分析适用统计学

测量的次数应导致统计上的显著结果。因此,对各个测量结果的频次分布,应采用适当的统计学方法评估其置信度。

- 测量/分析能力。测量装置对样本的可达性决定实施测量的可行性。
例如,在孔中或微管中实施的测量。
- 粒子检测能力(直接法或间接法)。对表面沉降粒子和表面的疵病的辨别能力(直接法),或表面沉降粒子的可剥离性(间接法),将影响 SCP 分级。
- 待测的几何尺寸/表面面积。应依据待测表面面积的几何尺寸选择不同的方法。在大多数情

况下,应分别确定待采样本数目的统计法以及如何分析测量值。

- 系列能力。为了统计显著性应进行多次测量。对测量可再现性的影响随多次系列测量而降低。
- 各测量的频次分布。
- 待测粒径。
- 表面面积上粒子分布。

C.2.4 粒子来源

材料的摩擦、退化、悬浮粒子沉降或气体物质与表面的化学反应等,可在表面上生成粒子,并形成固体或液体的产物。

举例: $2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

附录 D

(资料性附录)

按粒子浓度确定表面洁净度的测量方法

D.1 按粒子浓度划分表面洁净度

为获取表面洁净度的量化信息,应选择适用的测量方法。有些情况下,若不能确定表面的量化信息,至少可能获得定性的结果。定性结果不能用于第5章所规定的按粒子浓度划分表面洁净度。

D.2 按粒子浓度测量表面洁净度的方法

D.2.1 概述

只要粒子污染是可探测到的,就能划分表面洁净度级别。

作为表面洁净度评估和分级的量化标准,应测定所粘附的所有多余物质的粒子数目。应能测定受污染表面区域(表面粒子污染)的尺寸和数量。

注:对织物和多孔表面的洁净度分级还要考虑样本可能散发出的粒子。

D.2.2 测量方法的要求

选择测量方法基本上是依据待测表面情况及其特性。下面归纳了一些最主要的要求:

- 粒子特性方面的信息(如粒径、浓度、粒径分布、物质、形状、位置);
- 可行的测量部位(便携测量装置,即可用于大型固定表面的装置);
- 不受表面特性约束的测量(如粗糙度、波状、部件形状);
- 测试速度和涉及的工作量(即采用随机采样还是系列测试);
- 灵活性(即该方法是否可以在不同部件的各种表面上快速应用);
- 测量方法不会或极少使表面有所改变(即被冲洗液体润湿后表面无变化)。

基于上述要求,可将D.2.3中所描述的测量方法分类,并限于各项应用。

D.2.3 测量方法

D.2.3.1 概述

测定表面洁净度的理想情况是,待测表面的粗糙度低,所选定的测量装置可抵近测量。一般来说,以下方法可用于测量表面洁净度:

- 直接法;
- 间接法。

在大多数情况下,宜优先选用无需采样的直接法。一般情况下,这类方法的测量工作量较少,差错较少,所以比间接法给出的可再现结果更多。不过,受限于部件和制造要求(部件形状复杂,表面粗糙),为确定表面洁净度,间接法经常是唯一可行的替代方法。

D.2.3.2 直接法

在受测表面上对粒子进行直接记录和测量。部件表面及其上面的粒子都不应因测量而变化或受到

影响。如需将受测表面运送到测量装置处,其运送(搬运、包装)作业应防止表面另受污染。

在表 D.1 中列出了这些方法,并标出了各个方法在满足检测要求方面的特点和局限性。

表 D.1 直接检测表面粒子的测量方法比较

方法	检测限值	测定浓度	粒径分布	材料分析	形状分析	测定位置	可移动性	表面的独立性	可达性	测试速度	灵活性	对表面的影响
目检	$>25\ \mu\text{m}$	+	+	+	+	+	++	+	+	++	++	++
光学显微镜 (带图像处理)	$>1.0\ \mu\text{m}$	++	++	+	++	++	+	+	+	++	++	++
斜光、掠光、 侧光系统 (带图像处理)	$>0.5\ \mu\text{m}$	++	++	+	+	++	++	+	+	++	++	++
散射光扫描仪	$>0.07\ \mu\text{m}$	++	++	—	++	++	—	—	—	++	—	++
扫描电子显微镜 SEM	$>0.01\ \mu\text{m}$	+	+	++	++	++	—	—	—	—	+	+
原子力显微镜 AFM	$>0.01\ \mu\text{m}$	+	+	++	+	++	+	+	+	—	+	+
说明:++高度适用,+部分适用,—不适用/不可用。 对非理想圆形的粒子,宜按最长轴实施测量。												

如再使用对特定材料(如具 UV 活性、IR 活性)具有效应的合适光源,就可增强光学法检测表面粒子的效果。例如使用 UV 灯,就将在更好的对比度下,检测出物理上具 UV 活性的粒子。

在可见光谱内,可利用粒子的色彩/反射强度进一步辨明粒子污染。

D.2.3.3 间接法

D.2.3.3.1 概述

由于物体或测量方法的原因,经常无法在关注表面上直接计数,宜在检验前准备样本。将待记录的粒子从被测表面上剥离(采样),置于另外的基底/介质上(中)。然后采用适合于该基底/介质的技术测量粒子(见 IEST-STD-CC1246D)。

如间接法不能将沉降在受测表面上的所有粒子都剥离出来,测量效率将降低。

由于物理/化学效应,如粘附力/内聚力、静电力等,剥离粒子的力可能不充分,以致降低表面粒子污染的测量效率。所以,尽可能采用直接测量。

如采用更具破坏性的方法剥离表面上的粒子,则应注意这类方法可能损坏表面,从而形成更多的粒子。因此对这类方法应进行评估。

在采用间接法时,应了解中间介质(如冲洗介质)的粒子污染背景。

D.2.3.3.2 剥离技术

在部件形状复杂且难以接近其表面的情况下,获取携有被剥离粒子的样本通常是按粒子浓度评定表面洁净度的唯一方法。粒子越小,某些表面力(如静电、内聚、粘附、毛细作用)越大,越难于从表面剥离。

- 胶粘。用清洁的胶粘性基底(胶带或胶纸)将待记录的粒子剥离出来(见 ASTM E 1216-06),再直接进行测量(见 ASTM F312-08)。
- 冲洗。用清洁的冲洗介质,如气体或液体,将待记录的粒子冲刷下来(见 ASTM F24-09)。然后用适当的测量装置(如对气体用光学粒子计数器)对测量介质中含有的粒子进行检测;或是把介质中所含的粒子沉降到另一基底上(用过滤、冲击),再行测量。

在各种采样情况下,应注意保证样本不会被所用的装置、介质或人员所污染,因这种污染会影响测量结果。由环境、工艺和检验过程所用材料带来的污染,应低于相关粒径假定的或规定的粒子数目的10%,计算的各个数值都舍为整数(见 ISO 16232-2, ISO 16232-3, ISO 16232-4, ISO 16232-5)。另外,所选定的采样方法应能将所需要的粒子从被测表面上完全可靠地剥离。对采样设备进行的冲洗应能确保将存在于其上的粒子完全转移到测量介质内或替换表面上。为优选采样方法,可以用空白样本(即在洁净表面上采样)或在以规定方法污染的表面采样。

D.2.3.3.3 剥离表面沉降粒子所用介质的测量

剥离表面沉降粒子时所用的气体或液体冲洗介质中的粒子,可用合适的光学粒子计数器直接测量(见 D.2.7.4)。光学粒子计数器流率低,不能测量大体积冲洗时的全部介质。因此,应从冲洗液中取一代表性的样本。特别是在大粒子的情况下($>3\ \mu\text{m}$),应注意避免粒子被分离出去或有沉降,使测量结果不准确。至于相关的采样过程、采样设备和管材,在测量冲洗介质时都要保持清洁。

D.2.3.3.4 采集方法

从被测表面剥离下来的粒子存在于气体或液体冲洗介质中,为测量粒子数目,先将它们沉积在一个表面上,然后将该基底表面送入相应的测量系统进行检测。下面的方法和装置可用于粒子采集:

- 过滤系统。(用抽吸滤网使液体流过过滤膜,或把液体倒进一过滤介质)。引导冲洗介质流经孔径适合于待测粒径的过滤膜,然后使含有粒子的过滤器干燥并用称重法(见 D.2.7.7)或显微镜法(见 D.2.6.2 和 D.2.7.2)进行分析。
- 撞击器。粒子从气体冲洗介质中沉积在撞击板上后,用显微法对撞击板进行分析。所有与采集过程有关的装置和运送步骤,都要符合相应的高洁净度要求。宜用空白样本表明该洁净度的水平。

D.2.3.3.5 最常用间接法(见表 D.2)

就可剥离粒子的粒径/效率而言,用间接测量法从表面剥离较小的粒子(小于约 $1\ \mu\text{m}$)更难。将粒子从表面剥离时,给定方法的效率不仅与粒径有关,还与下面的参数有关:

- 粒子的形状和物质;
- 存在的表面力(如静电力、内聚力、粘附力、毛细作用);
- 剥离方法(如超声波、兆声波、冲洗、吹洗、吹扫、抽吸)。

由于克服粒子与表面之间各种力的方法不同,以及这类因素间的相互作用,使剥离粒子的效率差别很大。因此,无法给出间接法效率的独立值。

为从间接法得到更多的信息,可用如 ESCA、EDX、Raman(拉曼光谱法)、UV 或 IR 谱法来确定粒子的特性。

表 D.2 间接检测表面粒子测量方法比较

方法 ^a	剥离方法 限值	测量方法 限值 估计值	浓度 测定	粒径 分布	材料 分析	形状 分析	位置 测定	可输 送性	对表面 无依 赖性	可接 近性	测试 速度	灵活 性	对表面 的影响
用消光粒子计数器检验冲洗 介质(液体/气体) (>1 μm)	0.2 μm	>1 μm	++	++	-	-	-	++	++	++	+	++	-
对冲洗介质过滤或 撞击,并进行显微分析 (>0.5 μm)	0.2 μm	>1 μm	++	++	+	++	-	+	++	++	-	++	-
用 OPC 检验冲洗液体 (先冲洗出表面的粒子, 然后将其吸过 OPC) (>0.05 μm)	0.2 μm	>0.2 μm	++	++	-	-	-	++	++	++	+	++	-
用 OPC 检验冲洗气体 (先吹出表面的粒子, 然后将其吸过 OPC) (>0.05 μm)	0.3 μm	>0.3 μm	++	++	-	-	-	++	++	++	+	++	-
过滤冲洗介质, 并进行重量分析 (>0.1 mg)			++	-	-	-	-	++	++	++	-	++	-
说明:++ 高度适用,+ 部分适用,- 不适用/不可用。 注:如采用显微或重量分析,则由过滤器上发现的粒子总数目决定过滤器是否可以用显微或重力分析,粒径不是决定性的因素。按经验确定的参照值:过滤器表面上大于 3 mg 的污染物是不能用显微分析的(47 mm 标准过滤器规格)(见 ISO 16232-2,ISO 16232-3,ISO 16232-4,ISO 16232-5)。重量分析不适用于 SCP 等级的划分,因为测量不到离散的单个粒子。重量分析是测定从被测表面上剥离出来的所有污染物的总质量。													
^a 括号内的数字是测量装置的探测限值。													

D.2.4 测定样本数目

测量点的数目和检查的总表面决定测量结果在统计上的确定性。因为一般情况下,测量结果是由不同的影响参数(如具体表面特性,选用的测量方法,环境洁净度)决定的,所以测量点的数目和测量的重复次数应由需方和实施测量的供方商定。

为达到具有统计确定性的测量结果,并以此确定所取样本的数目,在这方面有些相关标准或准则可能会对测量有所裨益(如 ISO 5725-2;ISO/TS 21748;ISO 10576-1)。

D.2.5 测试样本的包装

D.2.5.1 进行粒子检测的样本包装

在原区域之外进行粒子评定的样本应按如下包装:

- 应由穿着正确洁净服的人员在原区域内进行样本准备工作。
- 应由双手佩戴新的清洗过的洁净室用丁腈手套或乳胶手套的人员运送样本。
- 当采用了清洗工艺(工序)后,基本要求是使样本冷却并干燥后,再置于包装内或袋中。

- d) 使用在洁净室中生产的镀金属聚酯袋,应比样本的预期要求至少高一个洁净级别。其最小厚度宜为 $80\ \mu\text{m}$,以防撕裂。
- e) 每个样本都应使用 d) 中所述型式的内、外两个袋子分隔包装。
- f) 也可使用如晶片盒或真空热塑成型容器等定做的密封盒,它们也要比样本高出一个洁净级别。
- g) 每个样本宜使用 d) 中说明的袋子,单独包装并放入定做的盒子中,防止因摩擦或接触而丢失粒子。
- h) 内袋宜折叠并用胶带密封,以防随后剪开时有粒子丢失,其外部还应贴一识别标签。
- i) 外袋宜密封并压焊以防受损。宜贴上适当的标签,以防其在受控环境之外开启。
- j) 如采用 f) 中描述的那类定做的包装盒,则还要求有如 d) 中所述洁净度的两个聚乙烯薄膜外袋。内薄膜袋可用胶带封住或用压焊,外薄膜袋宜压焊住。

D.2.5.2 从包装中取出样本

外袋应在即将进入受控测试环境时取下。

内袋不应在进入受控测试环境前取下。

在处理内包装时应穿戴全套洁净室工作服,包括头套和面罩。

检验样本时应使用新清洗过的洁净室用丁腈手套或乳胶手套。

D.2.6 测量方法

D.2.6.1 目检

有些应用中,特别是当表面洁净度低时,对表面洁净度水平进行目检可能就足够了。可用简单的辅助工具,如带有标线板或带反差照明的放大镜,协助肉眼目检,可记录下 $25\ \mu\text{m}$ 的粒子。对复杂的部件可进行快速的定性检验,用这种方法得不到粒径及其分布方面的定量信息。

D.2.6.2 光学显微镜

光学显微镜经济且应用范围广。其确定污染物特性是按外貌,按光学特性:如吸光性、光折射性或双折射性,或用带加热装置的显微镜测定其耐热性(如软化或融化特性)。粒径大于和等于 $1.0\ \mu\text{m}$ 的粒子可在固体样本上及液体样本内检测到(如按 ASTM F303-08 采集样本并按 ASTM F312-08 方法进行分析)。如粒子与表面的对比度不够,可用暗场照明来提高观察效果。这种方法给出定性的结果。用自动采样台和自动图像分析可检验样本或部件表面的区域。

D.2.7 其他测量系统

D.2.7.1 斜光、掠光和侧光测量系统

与使用光学显微镜相同,可在具备所要求的放大倍率的数码相机上描绘表面的图像。如采用平行光斜入射表面,使表面自身的结构只是被最低限度照亮。这种情况下,只有少量光线被表面所散射并进入相机,洁净表面呈暗色。但如表面上有粒子,它们就会被斜入射光线所完全照亮,并产生相应量的散射光。在相机图像中,可看到暗背景上的亮点,可用简单的图像分析算法来分析点的形态(貌)。

D.2.7.2 扫描电子显微镜(SEM)

如光学显微系统的分辨率无法满足要求、表面又特别粗糙时,可用 SEM。SEM 在高放大倍数时的景深小,对粗糙表面的研究(探测)超过光学显微系统的限度。不过,由于表面遭受电子束轰击时会带电,结果使图像变形,用 SEM 难于检验非导电表面。为避免此问题,应先在非导电表面溅射一层(多数情况是金属的)薄膜使其导电。这里存在一个风险,即表面境况会改变。另外,电子束会使粒子带电,并

将其驱离表面。因为进行 SEM 测试,需要将被测表面或部件置于高真空中,所以要注意确保部件在真空中不会改变或损坏。如 SEM 与图像分析装置组合使用,可对表面进行自动检验。

D.2.7.3 能量色散测量法(EDX)

粒子材料的元素构成可用波长色散(WDX)或 EDX 测量法测定。如 EDX 与校准复合物一起使用,不仅可获得定量信息,还可获得定性信息。

D.2.7.4 光学粒子计数

引导介质(空气、气体和液体)流过激光束,如介质中存在粒子,粒子通过激光束时会产生散射光。散射光可被光探测器记录下来并进行分析。由散射光的强度能够导出触发光脉冲粒子的粒径,依据圆形乳胶粒子获得的校准曲线可推导出这些粒径。但得到的直径等于散射光脉冲(强度),而非实际粒径。测量结果给出在规定测量容积内的粒径分布情况。在空气和气体中进行测量,可用不同的传感器测量小至 $0.05\ \mu\text{m}$ 、大至 $2\ 500\ \mu\text{m}$ ($2.5\ \text{mm}$) 的粒子。传感器的测量范围由其光学设计所决定。用凝聚核计数器(CNC)可以记录较小的粒子。在测量前,粒子因凝聚了液体而被扩大。用 CNC 可记录小至 $0.005\ \mu\text{m}$ 的粒子。但因凝聚有液体,所以不能测定粒子的分布。在使用 CNC 测量液体中的粒子时,粒径探测限值为 $>0.05\ \mu\text{m}$ 。一般情况下,对离散粒子使用 OPC 进行测量。

D.2.7.5 消光粒子计数

检测粒子的两种方法(消光和散射光)中,探测器测量到的光强变化转换为电信号。消光法对大于或等于 $1\ \mu\text{m}$ 的粒子有用。用此方法,探测器直接对准光源,并测量粒子经过光束时其“影子”的大小。

D.2.7.6 散射光表面扫描装置

散射光扫描仪专门用于检验粗糙度非常低的表面(如硅晶片、玻璃)。聚焦的激光以规定的光束角扫描部件表面。从表面直接反射的光被导入光陷阱并消失。在表面上存在的粒子引起激光的漫散射。散射光被光电倍增器记录下并被放大。依据检测出的散射光强度和散射光的大小,用随后的分析用电子器件,可导出粒子的粒径和形状。使激光的实际位置与散射光同步,以确定表面粒子的分布情况。散射光扫描仪的探测粒径限值为 $>0.05\ \mu\text{m}$ 。

D.2.7.7 称重测定法

表面上的或被测物体上的粒子负荷由分析过滤器的质量增量来测定(差重)。为此,在分析过滤器过滤冲洗液之前和之后,分别用精密天平为分析过滤器计重。称重测定法提供粒子负荷的总质量,但不能说明分析过滤器上粒子粒径的分布情况。为实施这种精密的计重程序,应对分析过滤器进行非常认真的准备和干燥。为防止环境的变化影响结果,环境温度、湿度、空气洁净度和操作步骤都应保持恒定,并用规定的方法实施操作步骤。用称重测定法无法记录单一的粒子,所以这种方法主要用于测定大尺寸或形状复杂的部件上的粒子负荷。每个分析过滤器的测量限值约为 $0.1\ \text{mg}$ 。

D.2.7.8 用原子力显微法进行分析(AFM)

原子力显微法是一种分辨率非常高的扫描探头显微法,经证实其分辨率达几分之一纳米,比光学衍射限值高 $1\ 000$ 倍以上。AFM 由一根微尺度悬臂构成,其端部为一个锐利的尖针(探头),用于扫描样本表面。当尖针接近到样本表面附近时,尖针和样本之间的力造成悬臂偏转。一般以悬臂顶部反射到光电二极管阵列的激光点来测量该偏转。最后得到该区域的形态图来反映样本的形态。

D.2.7.9 测量结果分析

当需方和供方相互商定任务(测量范围)或结果后,待实施的采样方法和测量方法应由需方和供方

共同规划、同意、分析、记录在案。应按照以粒子浓度水平划分表面洁净度的方法对表面进行分级,特别是当与其他的位置和系统进行比较或与类似的测量方法(气溶胶、水溶胶)进行测量结果比较、需要涵盖更多方面的内容时,更是如此。

D.3 按粒子浓度划分表面洁净度的文件编制

文件应包括 6.3 中所述的所有必要信息,如洁净度状况和洁净室的相适性,以保证粒子测量的可再现性。

参 考 文 献

- [1] GB/T 10610—2009 产品几何技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法/(ISO 4288:1996, IDT)
- [2] ISO 4287:1997, Geometrical Product Specifications(GPS)—Surface texture: Profile method—Terms, definitions and surface texture parameters
- [3] ISO 5725-2:1994, Accuracy(trueness and precision) of measurement methods and results—Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method
- [4] ISO 10015:1999, Quality management—Guidelines for training
- [5] ISO 10576-1:2003, Statistical methods—Guidelines for the evaluation of conformity with specified requirements—Part 1: General principles
- [6] ISO 16232-2:2007, Road vehicles—Cleanliness of components of fluid circuits—Part 2: Method of extraction of contaminants by agitation
- [7] ISO 16232-3:2007, Road vehicles—Cleanliness of components of fluid circuits—Part 3: Method of extraction of contaminants by pressure rinsing
- [8] ISO 16232-4:2007, Road vehicles—Cleanliness of components of fluid circuits—Part 4: Method of extraction of contaminants by ultrasonic techniques
- [9] ISO 16232-5:2007, Road vehicles—Cleanliness of components of fluid circuits—Part 5: Method of extraction of contaminants on functional test bench
- [10] ISO/TS 21748:2004, Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation
- [11] IEC 61340-5-1:2007, Electrostatics—Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena—General requirements
- [12] ASTM E18-07, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
- [13] ASTM E1216-06, Standard Practice for Sampling for Particulate Contamination by Tape Lift
- [14] ASTM F312-08, Standard Test Methods for Microscopical Sizing and Counting Particles from Aerospace Fluids on Membrane Filters
- [15] ASTM F24-09, Standard Method for Measuring and Counting Particulate Contamination on Surfaces
- [16] ASTM F303-08, Standard Practice for Sampling for Particles in Aerospace Fluids and Components
- [17] CLC/TR 61340-5-2:2008, Electrostatics—Part 5-2: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena; User guide
- [18] IEST-RP-CC022.2-2004, Electrostatic charge in cleanrooms and other controlled environments
- [19] IEST-STD-CC1246D, Product Cleanliness Levels and Contamination Control Program
- [20] SEMI E43-0301, Guide for Measuring Static Charge on Objects and Surfaces
- [21] SEMI E78-0706, Guide to Assess and Control Electrostatic Discharge(ESD) and Electrostatic Attraction(ESA) for Equipment
- [22] Adamson, A.W. Physical Chemistry of Surfaces, John Wiley & Sons, New York, 1976.