

团 体 标 准

T/CMES XXXX. 3—202X

超洁净条件摩擦磨损试验方法 第3部分： 颗粒物测试方法

Test method for friction and wear under ultra-clean
conditions—Part 3: Particulate matter test methods

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
3.1 摩擦发尘 particle emission due to friction.....	1
3.2 空间颗粒物 airborne particle.....	1
3.3 表面颗粒物 surface particle.....	2
3.4 底噪颗粒浓度 background particle concentration.....	2
3.5 空白试验 blank test.....	2
3.6 粒径通道 particle size channel.....	2
3.7 采样体积 sample volume.....	2
3.8 表面颗粒密度 surface particle density.....	2
3.9 粒子发射率 particle emission rate.....	2
4 符号.....	2
5 测试原理.....	3
5.1 一般原理.....	3
5.2 空间颗粒物测试.....	3
5.3 表面颗粒物测试.....	3
6 测试要求.....	3
6.1 一般要求.....	3
6.2 测试类型选择.....	3
6.3 环境与底噪控制.....	4
6.4 采样与收集配置.....	4
6.5 洁净操作与污染控制.....	4
7 测试设备.....	4
7.1 一般要求.....	4
7.2 空间颗粒物测试设备.....	4
7.3 表面颗粒物测试设备.....	5
7.4 辅助测试设备.....	5
8 测试方法.....	5
8.1 一般要求.....	5
8.2 空间颗粒物测试.....	5
8.2.1 测试准备.....	5

8.2.2 底噪和空白试验..... 5

8.2.3 试验过程中测试..... 5

8.2.4 试验后测试..... 6

8.2.5 真空/气氛环境下的测试..... 6

8.3 表面颗粒物测试..... 6

8.3.1 测试准备..... 6

8.3.2 底噪和空白试验..... 6

8.3.3 颗粒收集与测量..... 6

8.3.4 试验后表征..... 6

8.4 测试有效性和重复测试..... 6

9 数据处理..... 7

9.1 一般要求..... 7

9.2 空间颗粒物数据处理..... 7

9.3 表面颗粒物数据处理..... 7

9.4 统计和结果表达..... 8

10 测试报告..... 8

附 录 A（资料性附录） 颗粒物测试记录与结果汇总推荐格式..... 9

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

《超洁净条件摩擦磨损试验方法》拟由以下3个部分构成：

- 第1部分：大气环境；
- 第2部分：真空环境；
- 第3部分：颗粒物测试方法。

本文件为《超洁净条件摩擦磨损试验方法》的第3部分。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：西南交通大学、武汉材料保护研究所、清华大学、华为技术有限公司。

本文件主要起草人：XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX。

本文件首次发布。

中国机械工程学会标准征求意见稿

引 言

在半导体制造、精密光学、航天精密机构及其他高洁净装备中，摩擦副产生的颗粒污染可能引起表面缺陷、光学性能退化、运动精度下降或功能失效。超洁净条件下的摩擦磨损评价除关注摩擦系数和磨损量外，还需要对摩擦过程中产生、迁移并悬浮于试验空间的颗粒以及沉积或附着于规定表面的颗粒进行可重复、可比较的测试。

为统一《超洁净条件摩擦磨损试验方法》第1部分和第2部分中的摩擦发尘测试，本文件规定空间颗粒物和表面颗粒物的测试原理、测试要求、测试设备、测试方法、数据处理和测试报告。空间颗粒物结果与表面颗粒物结果反映不同的颗粒行为，应分别测试、处理和报告。

超洁净条件摩擦磨损试验方法 第3部分：颗粒物测试方法

1 范围

本文件规定了超洁净条件摩擦磨损试验中颗粒物测试的原理、测试条件、测试设备、测试方法和数据处理要求。

本文件适用于 T/CMES XXXX.1—202X 和 T/CMES XXXX.2—202X 规定的摩擦磨损试验中空间颗粒物和表面颗粒物测试，其他受控超洁净环境下摩擦磨损产生颗粒物的测试可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 8170—2008 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- GB/T 25915.1—2021 洁净室及相关受控环境 第1部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级
- GB/T 25915.2—2021 洁净室及相关受控环境 第2部分：洁净室空气粒子浓度的监测
- GB/T 25915.3—2024 洁净室及相关受控环境 第3部分：检测方法
- GB/T 25915.9—2018 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
- GB/T 25915.13—2022 洁净室及相关受控环境 第13部分：达到粒子和化学洁净度要求的表面清洁
- GB/T 25915.14—2022 洁净室及相关受控环境 第14部分：按粒子浓度评估设备适用性
- GB/T 29024.4—2017 粒度分析 单颗粒的光学测量方法 第4部分：洁净间光散射尘埃粒子计数器
- T/CMES XXXX.1—202X 超洁净条件摩擦磨损试验方法 第1部分：大气环境
- T/CMES XXXX.2—202X 超洁净条件摩擦磨损试验方法 第2部分：真空及可控气氛环境

3 术语和定义

GB/T 25915.1—2021、GB/T 25915.9—2018 和 T/CMES XXXX.1—202X 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 摩擦发生 particle emission due to friction

[来源：T/CMES XXXX.1—202X，3.3]

3.2 空间颗粒物 airborne particle

[来源：T/CMES XXXX.1—202X，3.4]

3.3 表面颗粒物 surface particle

[来源：T/CMES XXXX.1—202X，3.5]

3.4 背景颗粒浓度 background particle concentration

在摩擦副不发生被测相对运动、且测试系统按正式试验规定状态运行时测得的颗粒浓度。

3.5 空白试验 blank test

在不产生被测摩擦发尘的条件下，按照与正式试验相同或等效的设备运行、环境控制、采样或收集程序进行的试验。

3.6 粒径通道 particle size channel

粒子计数设备按照规定粒径阈值或粒径范围对颗粒进行分级统计的通道。

3.7 采样体积 sample volume

一次空间颗粒物测量过程中通过粒子计数设备的气体体积。

3.8 表面颗粒密度 surface particle density

单位面积规定表面上颗粒的数量。

3.9 粒子发射率 particle emission rate

单位时间内由被测摩擦副释放并进入规定测试边界的颗粒数量。

4 符号及单位

i ——按照粒径尺寸进行分组的通道编号；

A ——表面颗粒物有效测量或收集面积，单位为： m^2 ；

C_i ——第 i 个粒径通道的实测颗粒浓度，单位为： $\text{个}/\text{m}^3$ ；

$C_{0,i}$ ——第 i 个粒径通道用于修正的背景或空白平均颗粒浓度，单位为： $\text{个}/\text{m}^3$ ；

$C_{n,i}$ ——第 i 个粒径通道的净颗粒浓度，单位为： $\text{个}/\text{m}^3$ ；

E_i ——第 i 个粒径通道的粒子发射率，单位为： $\text{个}/\text{s}$ ；

N_i ——第 i 个粒径通道的颗粒数量；

Q ——能够代表规定测试边界颗粒排出的有效体积流量，单位为： m^3/s ；

σ_i 、 $\sigma_{0,i}$ 、 $\sigma_{n,i}$ ——第 i 个粒径通道的实测、背景和净表面颗粒密度，单位为： $\text{个}/\text{m}^2$ ；

n ——独立测量或平行试验次数。

5 测试原理

5.1 一般原理

颗粒物测试应与摩擦磨损试验同步策划，并根据颗粒在摩擦界面释放后的悬浮、迁移和沉积特征，选择空间颗粒物测试、表面颗粒物测试或两者组合。空间颗粒物和表面颗粒物结果表征不同的颗粒行为，应分别测试、处理和记录。

5.2 空间颗粒物测试

空间颗粒物测试宜采用光散射空气粒子计数器，获得各粒径通道的颗粒数量、浓度及其随时间的变化。真空或可控气氛环境宜采用与目标压力和气氛相容的原位、在线或经验证的采样方法。

5.3 表面颗粒物测试

表面颗粒物测试通过在规定位置设置收集面并在规定暴露时间后进行测量，获得各粒径通道的颗粒数量和表面颗粒密度。测试应明确有效面积、位置、暴露时段以及转移和测量条件。

6 测试条件

6.1 一般要求

颗粒物测试应与摩擦磨损试验同步规划。大气环境试验的环境控制和试验程序应分别与 T/CMES XXXX.1—202X 第 5 章和第 8 章协调；真空及可控气氛环境试验应分别与 T/CMES XXXX.2—202X 第 5 章和第 8 章协调。同一组对比试验中，测试类型、采样或收集位置、粒径通道、采样/暴露时间、采样流量及背景/空白修正方法应保持一致。

6.2 测试类型选择

评价试验空间中悬浮颗粒水平或动态发尘特征时，应采用空间颗粒物测试；评价颗粒沉积、表面污染或颗粒残留时，应采用表面颗粒物测试。需要同时评价颗粒释放与沉积行为时，可组合采用两类测试。

6.3 环境底噪控制

测试开始前应确认试验环境和颗粒物测试系统达到稳定状态。大气环境空气洁净度的确认和监测应符合 GB/T 25915.1—2021 和 GB/T 25915.2—2021；相应检测方法可按 GB/T 25915.3—2024 执行。真空或可控气氛状态不应采用空气洁净度等级直接分级，应通过规定压力/气氛条件下的背景颗粒浓度或空白试验结果表征测试背景。

6.4 采样与收集

6.4.1 大气环境颗粒物测试

采样探头应布置在能够表征摩擦副颗粒释放特征的位置，不得干涉摩擦副运动、改变接触状态或显著扰动局部气流。用于结果比较时，应采用可重复定位方式。与颗粒接触的管路应采用低析出、低吸附、易清洁材料，长度应尽可能短，并减少急弯、缩扩径和不必要的连接；必要时应评价管路传输损失。

6.4.2 真空/气氛环境颗粒物测试

真空/气氛环境下应优先采用不破坏目标压力和颗粒场的原位或在线测试方式。采样接口、阀门、管路和传感器应与目标压力及气氛相容，并避免显著释气或发尘。采用主动采样或旁路采样时，应验证采样流量不会对腔体压力、局部流场和颗粒输运产生不可接受的影响。受控破真空后测试应按 T/CMES XXXX.2—202X 的 8.7 执行。

6.4.3 表面颗粒物测试

收集面或评价表面的材料、位置、有效面积和暴露时段应预先规定。收集面应低发尘、易转移且与试验环境相容；需要转移测试时，应使用洁净、密闭容器，并控制从取样到测量的暴露时间。

6.5 洁净操作与污染控制

与试样、夹具、采样探头、收集面及腔体内部接触的工具和容器应满足洁净操作要求。试样和

收集面处理应符合 GB/T 25915.13—2022 的有关规定；测试设备在洁净环境中的适用性应按 GB/T 25915.14—2022 评估。发生非计划开舱、触碰收集面、采样管路脱落或明显外来污染时，应停止测试并评估结果有效性。

7 测试设备

7.1 一般要求

测试设备及辅助测量设备应处于有效校准或检定状态，其量程、分辨力、准确度和适用环境范围应覆盖规定的粒径、浓度、流量、压力和环境参数范围，并具有满足测试要求的计量溯源性。

7.2 空间颗粒物测试设备

7.2.1 大气环境粒子计数器

大气环境宜采用符合 GB/T 29024.4—2017 要求的光散射空气粒子计数器。设备的粒径通道应覆盖评价所需范围，采样流量应稳定并可监测，且应能够输出各粒径通道的原始计数和可换算的颗粒浓度数据。

7.2.2 真空环境粒子计数器

真空粒子计数设备应适配试验压力和气氛范围，具有可靠的真空接口，并能够在目标工况下完成颗粒计数和粒径分级。设备自身释气和发尘不应测试背景产生显著影响；粒径通道、检测效率和重复性应满足评价目的并经校准或验证。

7.3 表面颗粒物测试设备

表面颗粒测试设备应能够确定有效测量面积，并具有与评价要求相匹配的颗粒识别、计数和粒径分级能力。采用直接光学扫描或成像方法时，扫描区域、步长、阈值和曝光等参数应可重复设置；需要表面洁净度等级判定时，应满足 GB/T 25915.9—2018 的有关要求。

7.4 辅助测试设备

流量、压力、温度、相对湿度和时间等辅助测量设备的量程和准确度应与规定条件相匹配，并处于有效校准状态。

颗粒收集面、采样卡及其他转移器具应低发尘、低析出、易清洁，并与试验环境和后续分析方法相容。使用前应确认其初始洁净状态；重复使用的器具应规定清洗和洁净确认程序。

8 测试方法

8.1 一般要求

颗粒物测试通常按测试准备、背景/空白试验、摩擦磨损过程测试或收集、试验后测试或收集、数据处理和结果记录的顺序进行。空间颗粒物和表面颗粒物测试可单独实施；组合实施时，应确认两类测试相互之间不产生不可接受的干扰。

8.2 空间颗粒物测试

8.2.1 测试准备

应确认测试环境、摩擦磨损试验装置和粒子计数设备状态正常，设置粒径通道、采样流量、采样周期及采样位置，并记录采样管路长度和主要连接形式。大气环境采样位置应结合气流方向设置在具有代表性的位置；用于对比试验时，位置和方向应保持一致。

8.2.2 底噪和空白试验

背景颗粒浓度应在摩擦副不发生被测相对运动、且供气/排气、真空泵组、驱动系统及其他辅助设备处于正式试验规定状态时测量，至少获得 3 个连续有效采样周期。可能存在装置自身发尘且其影响不可忽略时，应进行空白试验；用于定量修正的空白试验应采用与正式试验相同或等效的运行和采样程序，并不少于 3 次。若空白试验已包含环境背景，不应再重复扣除背景颗粒浓度。

8.2.3 试验过程中测试

颗粒物数据与摩擦力、载荷、位移/速度等摩擦磨损数据应采用可对应的时间基准。连续采样时应完整保存时间序列；间歇采样时，各采样周期的时长和间隔应按试验方案保持一致。用于比较稳定摩擦阶段颗粒水平时，应预先规定统计区间。

8.2.4 试验后测试

摩擦运动停止后，可按规定继续采样，以评价颗粒沉降、残留或环境恢复过程。终止条件应预先规定，可采用达到规定采样时长、连续若干周期恢复至背景范围或其他经验证的判据；同一组对比试验应采用相同判据。

8.2.5 真空/气氛环境下的测试

真空或可控气氛环境宜优先采用原位或在线测试。底噪测试和正式试验应在相同的目标压力、泵组状态及适用的气氛条件下进行。采用受控破真空后测试时，应按 T/CMES XXXX.2—202X 的 8.7 恢复压力，并记录破真空气体、压力变化过程和静置时间；该结果仅表征受控破真空后的可检测颗粒，不应与真空状态下的原位结果直接等同。

8.3 表面颗粒物测试

8.3.1 测试准备

应规定评价表面或收集面的材料、位置、有效面积、粒径通道、暴露时段和检测参数。用于收集的采样卡或收集面应在使用前确认洁净状态，并记录其初始颗粒水平或采用同批次空白收集面作为背景。

8.3.2 底噪和空白试验

直接扫描试样表面时，应测定设备本底并确认其满足测试要求；采用收集面时，应测定未暴露收集面的背景颗粒密度。装置自身可能造成颗粒沉积时，应设置空白试验，空白收集面的材料、位置、暴露时间和转移程序应与正式试验一致。

8.3.3 颗粒收集与测量

应按预定时段暴露收集面或在规定时间内节点测量评价表面。试验结束后应采用洁净工具封装或转移，避免吹扫、擦碰和非受控暴露。测量时应采用与背景/空白相同的扫描区域、粒径阈值和数据处理参数，并记录从收集结束到测量的时间。

8.3.4 试验后表征

需要进行颗粒形貌、成分或污染源分析时，可采用光学显微、扫描电子显微、能谱或其他适用方法。需要判定表面洁净度等级时，应使用未经背景扣除的实测结果，并按 GB/T 25915.9—2018 执行。

8.4 测试有效性和重复测试

设备故障、采样流量异常、采样/收集位置改变、环境条件失控、非计划开舱、收集面污染或其他可识别的非试样因素导致结果失真时，应判为无效并记录原因。用于材料或工况比较时，每个试验条件的有效独立试验数量不应少于 3 次。

9 数据处理

9.1 一般要求

应保存各粒径通道的原始计数、采样体积或有效面积、背景/空白数据和修正结果。背景与空白试验的选用原则应在试验前规定；空白数据已包含环境背景时，不应进行重复扣除。采用累计粒径通道时，不应将不同粒径阈值通道的计数直接相加。数值修约应按 GB/T 8170—2008 执行。

9.2 空间颗粒物数据处理

9.2.1 背景平均颗粒浓度

第 i 个粒径通道用于修正的背景或空白平均颗粒浓度 $C_{0,i}$ 按式 (1) 计算：

$$C_{0,i} = (1/n) \sum C_{0,ij} \quad (1)$$

式中， $C_{0,ij}$ 为第 i 次背景或空白试验的颗粒浓度。

9.2.2 单通道净颗粒浓度

第 i 个粒径通道的净颗粒浓度 $C_{n,i}$ 按式 (2) 计算：

$$C_{n,i} = C_i - C_{0,i} \quad (2)$$

用于发尘量的非负表达时，修正结果小于 0 可按 0 计，但应保留原始实测值及未经截断的修正差值。

9.2.3 粒子发射率

当有效体积流量 Q 能够代表规定测试边界的颗粒排出流量，且已验证管路传输损失和系统滞后对结果影响可接受时，可按式 (3) 计算粒子发射率 E_i ：

$$E_i = C_{n,i} \times Q \quad (3)$$

不满足上述条件时，不应由局部采样浓度直接换算粒子发射率。

9.3 表面颗粒物数据处理

9.3.1 单通道表面颗粒密度

第 i 个粒径通道的表面颗粒密度 σ_i 按式 (4) 计算：

$$\sigma_i = N_i / A \quad (4)$$

9.3.2 净表面颗粒密度

第 i 个粒径通道的净表面颗粒密度 $\sigma_{n,i}$ 按式 (5) 计算:

$$\sigma_{n,i} = \sigma_i - \sigma_{0,i} \quad (5)$$

背景或空白修正结果小于 0 时, 其处理原则应与 9.2 一致。直接测量试样表面且无法获得试验前同一区域背景时, 应记录实测颗粒密度, 不应进行无依据的背景扣除。

9.4 统计和结果表达

应分别记录各独立试验的单次结果, 并计算同组试验的算术平均值和标准差。结果应注明粒径通道采用累计阈值还是区间分组; 空间颗粒物应至少记录原始颗粒浓度、修正基线和净颗粒浓度, 符合 9.2 条件时可记录粒子发射率; 表面颗粒物应记录有效面积、实测颗粒密度和适用时的净表面颗粒密度。

10 测试报告

测试数据应真实、完整、可追溯。报告至少应包括下列内容:

- a) 本文件编号及采用的颗粒物测试类型 (空间、表面或两者);
- b) 摩擦磨损试验所依据的 T/CMES XXXX.1—202X 或 T/CMES XXXX.2—202X 及相应试验编号;
- c) 测试环境状态, 包括空气洁净度或真空/可控气氛条件, 以及测试发生在原位状态还是受控破真空后状态;
- d) 颗粒物测试设备和辅助测量设备的型号、编号及校准或检定状态;
- e) 粒径通道、采样位置、采样流量、采样体积/时间、采样管路配置, 或表面收集面材料、位置、有效面积和暴露时间;
- f) 背景颗粒浓度或空白试验的方法、次数、结果及选用的修正基线;
- g) 各粒径通道的原始结果、修正结果和统计结果; 符合 9.2 条件时, 还应给出粒子发射率及有效体积流量 Q ;
- h) 表面颗粒物测试的转移、封装和测量条件, 以及需要时的形貌或成分表征结果;
- i) 测试过程中出现的异常情况、无效试验判定及其处理。

附录 A

(资料性附录)

颗粒物测试记录与结果汇总推荐格式

表 A.1 和表 A.2 给出了空间颗粒物和表面颗粒物测试结果的推荐汇总格式。粒径通道可根据评价目的和测试设备能力调整；不计算粒子发射率或单位行程发射指数时，可删除相应列。

表 A.1 空间颗粒物测试结果推荐汇总格式

粒径阈值/ μm	采样体积/ m^3	背景颗粒浓度 /(个/ m^3)	空白试验颗粒浓 度/(个/ m^3)	试验颗粒浓度 /(个/ m^3)	净颗粒浓度/(个 / m^3)	粒子发射率/(个 /s, 适用时)
≥ 0.1	—	—	—	—	—	—
≥ 0.3	—	—	—	—	—	—
≥ 0.5	—	—	—	—	—	—
≥ 1.0	—	—	—	—	—	—
≥ 5.0	—	—	—	—	—	—
其他: —	—	—	—	—	—	—

注：仅在满足9.2规定的流量代表性和系统验证条件时计算粒子发射率；不满足条件时可报告净颗粒浓度或累计颗粒数。

表 A.2 表面颗粒物测试结果推荐汇总格式

粒径阈值/ μm	有效面积/ m^2	背景颗粒密度 /(个/ m^2)	空白试验颗粒 密度/(个/ m^2)	试验后颗粒密度 /(个/ m^2)	净颗粒密度/(个 / m^2)	测量/收集方法
≥ 0.1	—	—	—	—	—	—
≥ 0.3	—	—	—	—	—	—
≥ 0.5	—	—	—	—	—	—
≥ 1.0	—	—	—	—	—	—
≥ 5.0	—	—	—	—	—	—
其他: —	—	—	—	—	—	—

注：采用累计粒径通道时，不应对不同阈值通道进行直接求和；表面颗粒密度单位应在同一组对比试验中保持一致。