

团 体 标 准

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

Test method for friction and wear under ultra-clean
conditions—Part 1: Atmospheric environment
(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 超洁净大气环境 ultra-clean atmospheric environment 1

 3.2 摩擦副 tribopair 1

 3.3 摩擦发尘 particle emission due to friction 1

 3.4 空间颗粒物 airborne particle 2

 3.5 表面颗粒物 surface particle 2

4 试验原理 2

5 试验条件 2

 5.1 一般要求 2

 5.2 空气洁净度 2

 5.3 温度和相对湿度 2

 5.4 气流与压差控制 2

 5.5 洁净操作 2

6 试样 3

 6.1 一般要求 3

 6.2 几何形状和加工 3

 6.3 清洗、储存和转移 3

7 试验装置及测量设备 3

 7.1 摩擦磨损试验装置 3

 7.2 洁净试验腔体与气路 3

 7.3 颗粒物测试设备 4

 7.4 辅助测量设备 4

8 试验方法 4

 8.1 试验前准备 4

 8.2 试样装夹 4

 8.3 环境稳定与背景确认 4

 8.4 试验参数设置 4

 8.5 试验运行和监测 4

 8.6 摩擦发尘测试 4

 8.6.1 一般要求 4

8.6.2 空间颗粒物测试	5
8.6.3 表面颗粒物测试	5
8.7 试验终止和试样取出	5
8.8 试验后表征	5
8.9 有效性和重复试验	5
9 数据处理	5
9.1 摩擦系数	5
9.2 磨损质量和磨损体积	5
9.3 磨损率	6
9.4 摩擦发尘	6
9.5 结果统计和表达	6
10 试验报告	6
附录 A（资料性附录）超洁净大气环境摩擦磨损试验装置结构示例	8
附录 B（资料性附录）试验结果记录表示例	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1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、武汉理工大学、华为技术有限公司、杭州德望纳米科技有限公司。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX。

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、精密光学及其他高洁净制造领域，运动部件和功能表面长期处于严格受控的洁净环境。摩擦副在接触和相对运动过程中产生的磨损不仅改变摩擦学性能和几何精度，还可能形成颗粒污染源，影响精密制造过程、产品良率和设备可靠性。

为统一超洁净条件下摩擦磨损试验的环境控制、试样处理、试验实施和结果报告要求，本系列标准分别规定大气环境、真空及可控气氛环境以及颗粒物测试方法。本文件规定大气环境下的摩擦磨损试验方法；颗粒物测试按 T/CMES XXXX.3—202X 执行。

中国机械工程学会标准征求意见稿

超洁净条件摩擦磨损试验方法 第1部分：大气环境

1 范围

本文件规定了超洁净（GB/T 25915.1—2021 规定的 ISO Class 6 级以上）大气环境下材料、表面处理层和零部件摩擦磨损试验的试验原理、试验条件、试样、试验装置及测量设备、试验方法、数据处理和试验报告要求。

本文件适用于半导体制造、精密光学及其他高洁净制造领域中各类材料、表面处理层和零部件在大气环境下的摩擦磨损性能评价。需要评价摩擦过程中产生的颗粒污染时，测试类型选择、测试方法、数据处理和测试报告应按 T/CMES XXXX.3—202X 执行。

本文件不适用于半固态、流体润滑工况下的超洁净摩擦磨损试验。

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 17754—2012 摩擦学术语

GB/T 2611—2022 试验机通用技术要求

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 25915.13—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

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

3 术语和定义

GB/T 17754—2012 和 GB/T 25915.1—2021 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 超洁净环境 ultra-clean environment

空间悬浮粒子浓度达到 GB/T 25915.1—2021 规定的 ISO Class 6 或更高洁净水平，并对温度、相对湿度等影响试验结果的环境参数进行控制的试验环境。

3.2 摩擦副 tribopair

由两个相对运动并发生摩擦相互作用的单元构成的最小系统。

[来源：GB/T 17754—2012，4.4，有修改]

3.3 摩擦发尘 particle emission due to friction

摩擦副在相对运动过程中因材料去除、转移、剥落或摩擦化学作用等产生并释放颗粒的现象或过程。

3.4 空间颗粒物 airborne particle

摩擦发尘中进入试验空间并以悬浮状态存在的颗粒。

3.5 表面颗粒物 surface particle

摩擦发尘中沉积或附着于试样、规定收集面或其他指定表面的颗粒。

4 试验原理

在受控的超洁净大气环境中，将规定的摩擦副按选定的接触形式（点接触、线接触、面接触）安装，施加法向载荷，并按与实际服役工况相匹配的运动方式（滑动、滚动、微动等）、位移或速度、频率以及持续时间进行摩擦磨损试验。试验过程中记录摩擦力、法向载荷、运动参数和环境参数；试验结束后测定磨损量并按需要开展形貌、成分等表征。

需要评价摩擦发尘时，测试类型应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.2 选择，测试方法和数据处理应分别按其第 8 章和第 9 章执行。

5 试验条件

5.1 一般要求

试验条件应根据被测材料或零部件的实际服役状态、产品标准或技术协议确定。同一组对比试验中，接触形式、环境条件、试样制备和清洗方法以及颗粒物测试配置应保持一致。

5.2 空气洁净度要求

试验有效区域的空气洁净度应达到 GB/T 25915.1—2021 规定的 ISO Class 6 或更高洁净水平。对背景粒子敏感的试验，宜采用 ISO Class 4 或更高洁净水平。洁净度的确认和监测应符合 GB/T 25915.1—2021 和 GB/T 25915.2—2021 的规定。

5.3 温度和相对湿度

除被测件测试标准或技术要求另有规定外，试验环境温度应为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度应为 $(50 \pm 10)\%$ 。同一组对比试验应采用相同的温度和相对湿度设定值，并记录试验过程中的实际范围。

5.4 气流与压差控制

应通过洁净气体供给、排气或其他措施，防止未经处理的外部空气进入试验有效区域，并使试验过程中气流状态保持稳定。腔体外部环境洁净度低于腔体内部时，宜采用微正压控制；采用正压控制时，腔体相对外部环境的压差宜为 $5\text{ Pa} \sim 15\text{ Pa}$ 。

当腔体处于非密闭状态，且位于相同或更高洁净等级的环境中，经验证不存在外来颗粒侵入时，可不规定独立的正压指标。开展空间颗粒物测试时，采样位置、采样管路以及气流和排气配置应符合 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.4.1，并在同一组对比试验中保持一致。

5.5 洁净操作

与试样、夹具和腔体内部接触的工具、手套及容器应满足 GB/T 25915.13—2022 的有关要求。应避免裸手接触试样工作表面，并减少纤维、油污、静电吸附和外来颗粒对试验的影响。

6 试样

6.1 一般要求

被测试样应记录材料牌号和材料状态，涉及表面处理层时，还应记录处理层材料、厚度、制备工艺及其他与试验结果相关的参数。

用于材料或工况比较时，每个试验条件的有效平行试样数量应不少于 3 个。需要进行统计推断或材料离散性较大时，应根据统计分析要求增加试样数量。

6.2 几何形状和加工

试样的几何形状和尺寸应与试验装置及所模拟的接触形式相匹配，并确保在规定载荷和运动范围内不发生非预期变形（塑性变形、翘曲变形等）、松动或边缘干涉。应记录关键尺寸、形位公差和接触几何参数。

在材料级对比试验中，除另有规定外，被测试样工作表面粗糙度 R_a 宜不大于 $0.2\ \mu\text{m}$ ；当表面粗糙度为评价变量或试样需保持实际服役表面状态时，应测量并记录实际值。

试样被测试区域不应存在影响试验的毛刺、崩边、划伤、凹坑等缺陷。必要时应对非工作棱边进行倒角或倒圆。

6.3 清洗、储存和转移

试样应采用与材料和表面状态相匹配的清洗方法去除加工残留、油污和附着颗粒。采用超声清洗时，应确认不会引起表面损伤、处理层脱落或材料结构变化。对表面粒子或化学洁净度有明确要求时，试样表面清洁应符合 GB/T 25915.13—2022 的相应规定。

清洗后的试样应在洁净环境下干燥，并置于洁净密闭容器中。试样转移和装夹过程中应使用洁净工具，避免污染被测试表面。

7 试验装置及测量设备

7.1 摩擦磨损试验装置

摩擦磨损试验装置（简称“试验装置”）应能够实现规定的接触形式、法向载荷和相对运动，并在试验过程中保持稳定。试验装置通用性能应符合 GB/T 2611—2022 的有关规定：力、位移、速度或转速等测量通道应处于有效校准或检定状态，量程和准确度应满足试验要求。

试验装置配置的驱动电机、轴承、导轨、丝杆、风扇等潜在发尘部件宜布置在试验有效区域之外；无法避免时，应采取隔离、局部密封或空白对照试验等措施排除其影响。试验装置在规定洁净环境中的适用性应按 GB/T 25915.14—2022 进行评定。

典型的试验装置结构原理参见附录 A。

7.2 洁净试验腔体与气路

需要控制试验空间或开展空间颗粒物测试时，摩擦副宜布置在洁净试验腔体内。腔体材料应低发尘、易清洁，内部结构应减少积尘和难清洁区域，并设置洁净气体入口、排气或采样口以及必要的机械和电气接口。

气路应具备稳定供气和流量调节能力。开展空间颗粒物测试时，与颗粒接触的采样管路材料、长度和布置应符合 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.4.1。

7.3 颗粒物测试设备

开展摩擦发尘测试时，测试设备应符合 T/CMES XXXX.3—202X 第 7 章，测试程序和数据处理应分别符合其第 8 章和第 9 章。

7.4 辅助测量设备

温度、相对湿度、压差和流量测量设备应具有与规定控制范围相匹配的量程和准确度，并处于有效校准状态。

8 试验方法

8.1 试验前准备

试验前应确认试验装置和测量设备工作正常，需校准或检定的设备处于有效状态；完成试验腔体、夹具和工具的清洁，并记录试样编号和初始状态。

8.2 试样装夹

根据摩擦磨损试验运行形式和接触方式要求，使用洁净工具安装试样，确保定位可靠、接触均匀、接触面无外来污染。应检查接触对中、夹持状态和运动范围，避免试样与非设计部位发生干涉。

8.3 环境稳定与底噪确认

启动洁净气体供给和必要的排气，使试验区域达到 5.2~5.4 规定的环境条件。试验开始前，应确认连续 3 个监测周期的空气洁净度满足规定且无持续恶化趋势。

开展空间颗粒物测试时，应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 8.2.2 进行底噪颗粒浓度测量和必要的空白试验；开展表面颗粒物测试时，应按其 8.3.2 进行底噪和空白试验控制。

8.4 试验参数设置

试验参数应根据实际服役工况、产品标准或技术要求确定，并至少记录下列内容：

- a) 摩擦副：接触形式、材料或表面处理层、表面状态及关键接触几何参数；
- b) 运动和加载：运动模式、法向载荷及加载方式、位移幅值、速度/转速、频率、总循环次数或持续时间；
- c) 环境控制：空气洁净度等级、温度、相对湿度；

8.5 试验运行和监测

按规定方式施加法向载荷并启动相对运动。试验过程中应同步记录摩擦力、法向载荷和主要运动参数；需要获得动态摩擦力曲线时，采样频率应不低于运动特征频率的 10 倍。

空气洁净度、温度、相对湿度以及适用时的压差和流量应连续或周期记录，周期记录间隔宜不大于 30 min。颗粒物测试的采样或收集周期应按 T/CMES XXXX.3—202X 第 8 章的相应规定执行。

试验过程中不得开启腔体或触碰试样。出现试样松动或断裂、载荷或运动控制失效、环境条件超出规定范围、颗粒物测试系统故障或其他影响试验结果的异常时，应及时终止试验并记录。

8.6 摩擦发尘测试

8.6.1 一般要求

摩擦发尘测试类型应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.2 选择，空间颗粒物测试和表面颗粒物测

试应分别按其 8.2 和 8.3 执行。

同一组对比试验应采用相同的测试类型和配置。两类测试结果应分别处理和记录，未经验证不应直接相互换算。

8.6.2 空间颗粒物测试

空间颗粒物测试应覆盖试验前底噪、摩擦磨损过程以及必要的试验后恢复阶段。采样与管路配置、测试程序及数据处理应分别符合 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.4.1、8.2 和 9.2。采样装置不应显著改变摩擦副附近的气流和接触状态。

8.6.3 表面颗粒物测试

表面颗粒物测试应明确收集面或评价表面的材料、位置、有效面积和暴露时段。收集与转移配置、测试程序及数据处理应分别符合 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.4.3、8.3 和 9.3。收集装置不应干涉摩擦副运动或改变试验工况。

8.7 试验终止和试样取出

达到规定的循环次数、持续时间或其他终止条件后，应先停止相对运动，再卸载法向载荷。开展颗粒物测试时，空间颗粒物试验后采样和表面颗粒物收集应分别按 T/CMES XXXX.3—202X 的 8.2.4 和 8.3.3 执行。

完成颗粒物测试后方可开启腔体，使用洁净工具取出试样，避免触碰磨痕和颗粒沉积区域；需要后续形貌或成分分析时，应将试样置于洁净密闭容器中转移。

8.8 试验后表征

根据试验目的测量磨损质量或磨损体积。需要分析磨损机制、材料转移或污染来源时，可开展二维或三维形貌、光学显微、扫描电子显微、能谱或其他适用的成分分析。

8.9 有效性和重复试验

由于设备故障、试样装夹不当、环境条件失控、误操作或其他可识别的非试样因素导致的结果应判为无效，并采用新的试样重新试验。

9 数据处理

9.1 摩擦系数

摩擦系数按式（1）计算：

$$\mu = F_t / F_n \dots\dots\dots (1)$$

式中：

μ ——摩擦系数；

F_t ——切向摩擦力，单位为 N；

F_n ——法向载荷，单位为 N。

应记录摩擦系数随时间、循环次数或行程变化的曲线，并按预先规定的稳定区间计算平均值；需要时可同时记录最大值、最小值和标准差。稳定区间的选取原则应在同一组对比试验中保持一致。

9.2 磨损质量和磨损体积

采用质量法时，磨损质量按式（2）计算：

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad (2)$$

式中：

Δm ——磨损质量，单位为 g；

m_0 ——试验前试样质量，单位为 g；

m_1 ——试验后试样质量，单位为 g。

当材料密度已知且不存在明显材料转移、吸附或反应增重时，可按式（3）由质量损失计算磨损体积：

$$\Delta V = \Delta m / \rho \quad (3)$$

式中：

ΔV ——磨损体积，单位为 mm^3 ；

Δm ——磨损质量，单位为 g；

ρ ——试样材料密度，单位为 g/mm^3 。

存在材料转移、表面处理层局部堆积、氧化增重或质量变化接近天平分辨力时，宜采用三维轮廓等适用方法测量磨损体积。

9.3 磨损率

需要进行不同载荷或行程条件的比磨损率分析时，可按式（4）计算比磨损率 k ：

$$k = \Delta V / (F_n \cdot L) \dots\dots\dots (4)$$

式中：

k ——比磨损率，单位为 $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ；

L ——摩擦副相对运动总行程，单位为 m。

9.4 摩擦发尘

空间颗粒物和表面颗粒物的数据修正、结果计算和统计表达应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 9.2~9.4 执行。

9.5 结果统计和表达

试验后应记录各平行试样的单次结果，并计算同组试验所有结果的算术平均值和标准差。数值修约应与测量分辨力相适应，并按 GB/T 8170—2008 执行。

10 试验报告

试验报告至少应包括下列内容：

- a) 本文件编号及采用的试验配置；
- b) 试验单位、试验日期、试验人员和报告审核信息；
- c) 受试材料或零部件的名称、牌号、来源、批次、材料状态以及表面处理层等信息；
- d) 试样数量、几何形状、关键尺寸、工作表面状态、粗糙度以及清洗、干燥、储存和转移方法；
- e) 摩擦副接触形式、法向载荷、主要运动参数、总循环次数或持续时间以及平行试验次数；
- f) 试验前及试验过程中的空气洁净度、温度、相对湿度；
- g) 摩擦磨损试验装置及主要辅助测量设备的型号、编号、量程、准确度及有效校准或检定状态；
- h) 摩擦发尘测试类型（空间、表面或两者）、T/CMES XXXX.3—202X 第 8 章规定的测试方法与配置，以及按其第 9 章处理后的结果；
- i) 摩擦力或摩擦系数曲线、稳定区间及统计结果；

- j) 磨损质量、磨损体积和比磨损率等计算结果。
试验记录可采用附录 B 给出的推荐格式。

中国机械工程学会标准征求意见稿

附录 A

(资料性附录)

超洁净大气环境摩擦磨损试验装置结构示例

图 A.1 给出了超洁净大气环境摩擦磨损试验装置的典型功能组成。图示装置包括洁净气体供给与流量控制、洁净试验腔体、加载与驱动机构、摩擦力/位移测量单元、环境参数监测以及颗粒物测试接口。图示结构仅用于说明功能关系，不限定具体接触形式、驱动方式和颗粒物检测原理。

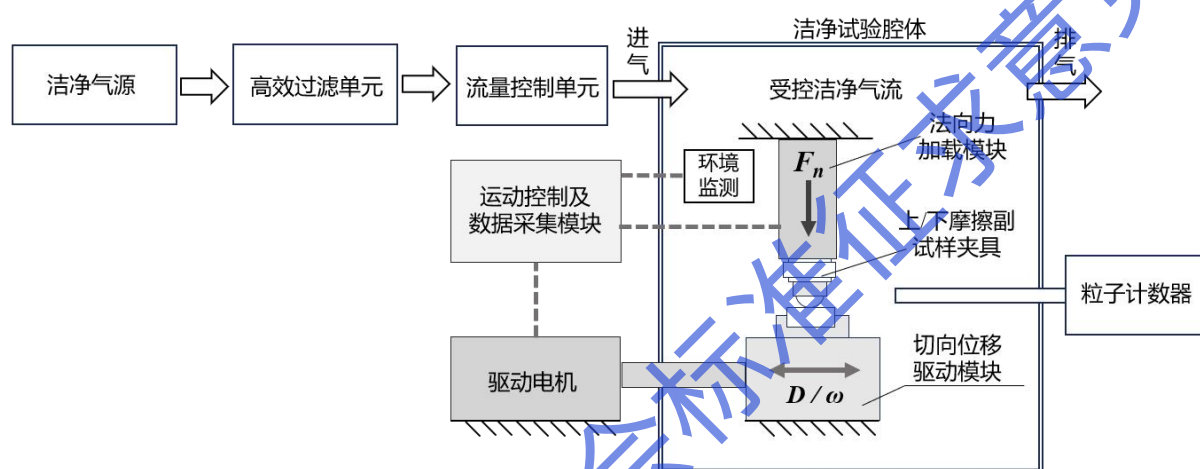


图 A.1 超洁净大气环境摩擦磨损试验装置结构原理图

（注：洁净试验腔体与气路包括洁净气源、高效过滤单元、流量控制单元，以及进气和排气通道，以实现 5.4 节中规定的气流与压差控制）

开展空间颗粒物测试时，可设置空间采样接口；

开展表面颗粒物测试时，可设置规定收集面或评价表面。

颗粒物测试接口和测试系统应分别满足 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.4 和第 7 章要求。

附 录 B
(资料性附录)
试验结果记录表示例

标准编号	T/CMES XXXX.1—202X			记录编号			
试验单位				试验日期			
试样名称				试样编号			
材料/表面处理层				批次号			
对摩材料				平行试验数			
试验人员				审核人员			
空气洁净度	ISO Class ____			温度/°C			
相对湿度/%				洁净气体/流量			
压差/Pa (适用时)				接触形式			
法向载荷/N				运动类型			
位移幅值/mm				频率/Hz 或速度			
总循环次数/持续时间				工作表面 Ra/ μm			
清洗方法/介质				干燥与转移方式			
颗粒物测试类型	☐ 空间 ☐ 表面 ☐ 两者			试验装置校准状态			
测量系统校准状态				备注			
序号	试样编号	稳定摩擦系数	标准差	磨损质量 /mg	磨损体积 /mm ³	比磨损率 /[mm ³ /(N·m)]	颗粒物状态
1							
2							
3							
4							

注：颗粒物测试记录和结果汇总可采用T/CMES XXXX.3—202X附录A给出的推荐格式。

中国机械工程学会标准征求意见稿