

团 体 标 准

T/CMES XXXX. 2—202X

超洁净条件摩擦磨损试验方法

第 2 部分：真空环境

Test method for friction and wear under ultra-clean
conditions—Part 2: Vacuum 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。

在本标准实施过程中，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 号主楼国际 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

4 试验原理 2

5 试验条件 2

 5.1 一般要求 2

 5.2 环境洁净度要求 2

 5.3 温湿度控制 3

 5.4 洁净气体要求 3

 5.5 可控气氛要求 3

 5.6 真空度要求 3

 5.7 洁净操作要求 4

6 试样 4

 6.1 一般要求 4

 6.2 外观和尺寸 4

 6.3 清洗、储存和转移 4

7 试验装置及测量设备 4

 7.1 超洁净真空及可控气氛环境摩擦磨损试验装置 4

 7.2 真空控制系统 5

 7.3 可控气氛控制系统 6

 7.4 颗粒物测试设备 7

 7.5 辅助测量设备 7

8 试验方法 7

 8.1 试验前准备 7

 8.2 试样清洁及装夹 7

 8.3 腔体洁净 7

 8.4 试验环境抽真空 7

 8.5 可控气氛环境设置 8

8.6 摩擦磨损试验设置 8

8.7 腔体破真空 8

8.8 试验终止和试样取出 8

8.9 摩擦发尘量测试 9

8.10 试验后表征 9

8.11 有效性和重复试验 9

9 试验数据处理 9

10 试验报告内容 10

附 录 A （资料性附录） 超洁净真空及可控气氛环境摩擦磨损试验设备总成结构示例 11

附 录 B （资料性附录） 试验结果记录表 12

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2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、中国科学院兰州化学物理研究所、上海交通大学、华为技术有限公司。

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

本文件首次发布。

引 言

在半导体高端设备、航空航天精密机构及精密光学等尖端制造领域，关键零部件必须在真空、极低发尘量、低释气的超洁净环境下实现长期稳定运行。然而部分摩擦副在服役过程中仍面临高频重载、微动滑移等复杂工况，材料的接触去除不仅导致配合精度下降，更会诱发磨屑颗粒在真空或气氛环境中的自由迁移与静电吸附，严重影响器件功能与系统可靠性。

真空及可控气氛条件会改变摩擦界面的表面反应、磨屑迁移与沉积行为。为统一此类环境下的试验条件、试样处理、试验流程和结果报告要求，本文件规定真空及可控气氛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2部分：真空及可控气氛环境

1 范围

本文件规定了超洁净真空及可控气氛环境下材料、表面处理层和零部件摩擦磨损试验的试验原理、环境条件、试样制备、试验方法、数据处理和试验报告等要求。

本文件适用于半导体制造、航空航天精密机构、精密光学及其他高洁净装备中材料、表面处理层和零部件在真空或可控气氛环境下的摩擦磨损性能评价。需要评价摩擦发生时，测试类型选择、真空环境空间颗粒物测试、表面颗粒物测试和数据处理应分别按 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 3163—2024 真空技术 术语

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 25915.9—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 32218—2015 真空技术 真空系统漏率测试方法

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.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、GB/T 3163—2024、T/CMES XXXX.1—202X 和 T/CMES XXXX.3—202X 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 真空环境 vacuum environment

压力低于周围大气压力的气体环境。试验时应以腔体实测压力表征真空状态，并按试验目的规定目标工作压力及允许偏差。

3.2 可控气氛环境 controlled atmosphere environment

在真空/可控气氛腔体中充入的、成分和压力受控的气体环境，用于模拟特定服役气氛或控制摩擦化学反应。

3.3 破真空 vacuum break

试验结束后，向真空/可控气氛腔体内缓慢充入洁净气体，使腔体压力由真空状态恢复至常压的过程。

3.4 极限压力 ultimate pressure

真空系统在规定条件下充分抽气并达到稳定状态后能够达到的最低压力。

3.5 真空/可控气氛腔体 vacuum/controlled atmosphere chamber

能够承受内外压差并实现真空/可控气氛密封的腔体，用于为摩擦磨损试验提供受控的真空或气氛环境。

4 试验原理

在受控的超洁净真空及可控气氛环境中，应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，并应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。试验过程中应记录摩擦力、法向载荷、运动参数、真空度和环境参数；试验结束后应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；真空环境空间颗粒物测试、表面颗粒物测试和数据处理应分别按其 8.2.5、8.3 和第 9 章执行。测试配置应与目标压力和气氛条件相容。

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、载荷与运动参数、真空压力或气氛组成及压力、温度条件、试样制备与清洗方法以及颗粒物测试配置应保持一致。

试验前应确定目标压力或气氛条件、允许偏差、稳定时间、试验持续时间以及失效/终止判据。除另有规定外，目标值应在试验报告中明确给出，实际值应全程记录。

试验装置应避免腐蚀性气体、强电磁干扰等因素对试验结果的影响。试验设备应定期校准，校准证书应在有效期内。

5.2 洁净度要求

试验装置所在洁净环境的空气洁净度应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 5.2；对底噪颗粒敏感的试验，应根据评价目标规定更严格的洁净度等级。

洁净度的确认和监测应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 5.2，并记录试验前及试验过程中的实测结果。

抽真空前及破真空后，应确认腔体洁净状态。处于真空或规定可控气氛状态的腔体不应采用空气洁净度等级直接分级；需要评价颗粒底噪时，应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.3 和 8.2.5 进行表

征。

5.3 温湿度控制

试验装置所在洁净环境的温度和相对湿度应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 5.3。腔体温度另行控制时，应规定设定值及允许偏差，并记录试验过程中的实际范围。

5.4 洁净气体要求

用于腔体清洁、破真空的气体应满足下列要求：

- a) 气体应为满足试验要求的洁净气体，使用点颗粒洁净度应与试验环境相匹配；当以 ISO Class 等级规定时，应明确适用的测试条件和采样位置；
- b) 气体应经末端过滤，过滤等级应与评价粒径下限和洁净度要求相匹配；过滤器规格、安装位置及完整性验证情况应记录；
- c) 气体中的水分、油分、颗粒物及其他可能影响试验结果的污染物含量应满足试验要求；
- d) 气体供气系统应避免回流污染。气源、管路、过滤器和接口在使用前应完成洁净处理并保持密封。

5.5 可控气氛要求

可控气氛气体用于在抽至目标真空压力后建立规定的气氛组成和压力，以模拟特定服役环境或控制摩擦化学反应。气体种类、纯度、混合比例、压力和允许偏差应根据试验目的、材料特性及实际服役工况确定。

可控气氛气体应满足下列基本要求：

- a) 气体不应与试样、对磨件或腔体材料发生预期之外的有害化学反应。确需使用易燃、助燃、有毒或腐蚀性气体时，应制定相应的安全控制措施，并经技术和安全评估后使用；
- b) 气体颗粒洁净度应满足试验要求，并经与评价粒径下限相匹配的末端过滤；
- c) 气体纯度及特定杂质限值应根据试验目的和材料敏感性规定；高真空或表面反应敏感试验还应规定可能影响结果的关键杂质指标；
- d) 对水分敏感试验，应规定露点或含水量；具体指标应以试验对象的水分敏感性和目标气氛确定。

采用两种或多种气体混合时，应明确各组分体积分数（或质量分数）及允许偏差；混合气体应在进入腔体前充分混合均匀，并采用浓度或分压测量手段验证腔体实际组成。

采用氧气等助燃性气体时，不应直接套用惰性气氛的安全要求，应结合氧浓度、总压力、材料反应性和设备安全等级单独规定。

试验报告应记录气体种类、纯度、各组分比例、目标压力、实际压力范围以及气氛组成实测结果。

5.6 真空度要求

真空系统的极限压力应低于目标工作压力，并具有满足压力稳定控制和试验持续时间要求的能力裕量。抽气时间和稳定时间应根据腔体有效容积、材料释气、泵组能力及目标工作压力确定，并在试验方案中规定。

工作压力应根据试验目的和实际服役工况确定，并规定允许偏差。真空系统漏率允许值应根据目标工作压力、腔体有效容积和允许压力变化确定；需要定量测定漏率时，应按 GB/T 32218—2015 执行并记录测试方法和结果。

试验过程中腔体压力应保持在规定允许偏差内；同一组对比试验应采用相同的压力控制判据。

腔体压力应连续或周期记录，记录频率应能够反映抽气、稳定和试验过程的压力变化；关键阶

段宜连续记录。

真空系统中涉及的真空计、流量计等测量仪器应处于有效校准和检定状态。

5.7 洁净操作要求

洁净操作应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 5.5；进入真空/可控气氛腔体的工具、容器和辅助材料还应与目标压力和气氛相容，避免产生不可接受的释气和颗粒污染。

6 试样

6.1 一般要求

试样的一般要求应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 6.1。用于真空或可控气氛试验时，还应确认试样及其表面处理层在目标压力和气氛下无影响试验结果的挥发、析出或异常反应。

6.2 外观和尺寸

试样的几何形状、尺寸、表面状态及外观要求应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 6.2。存在盲孔、夹层或其他易形成滞留气体结构时，应评估其对抽气、释气和试验稳定性的影响。

6.3 清洗、储存和转移

试样的清洗、储存和转移应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 6.3。清洗介质、干燥方法和储存容器还应与目标真空或气氛相容，不应残留易挥发或可能参与摩擦化学反应的污染物。

7 试验装置及测试设备

7.1 真空及可控气氛环境摩擦磨损试验装置

真空及可控气氛环境摩擦磨损试验装置应由真空/可控气氛腔体、摩擦磨损试验装置、真空控制系统、可控气氛控制系统及必要的测量设备组成。典型结构原理参见附录 A。

7.1.1 真空/可控气氛腔体

真空/可控气氛腔体应设置抽气、破真空、可控气氛输入、气氛排放或回收以及必要的颗粒物测试接口，内部应有足够空间设置摩擦磨损模块和温度、压力、颗粒物等传感器。

a) 腔体密封应采用与目标压力、温度及气氛相容的结构。腔体及连接系统的漏率应满足 5.6 规定的压力稳定要求；需要定量测定时，应按 GB/T 32218—2015 进行；

b) 颗粒物测试接口应根据空间颗粒物或表面颗粒物测试方式设置，采样管路应尽量短、内壁光滑、低吸附，并避免产生明显弯折、死角和二次污染；

c) 用于清洁腔体及破真空的气体管路应与真空抽气管路和特殊气氛管路合理隔离，必要时设置独立阀门和过滤器；

d) 腔体宜采用不锈钢或其他经验证的低释气、易清洁材料制造，内表面抛光便于清洁并减少颗粒滞留。设置观察窗时，其材料及密封结构应满足目标压力、温度和气氛要求；

e) 腔体应具备超压保护措施。对于存在助燃、有毒或腐蚀性气体的试验，还应配置相应的泄漏监测、联锁和尾气处理措施。

7.1.2 摩擦磨损试验装置

摩擦磨损试验装置的接触形式、加载与运动能力以及力、位移、速度或转速等测量要求应符合

T/CMES XXXX.1—202X 的 7.1 节规定；装置集成于真空/可控气氛腔体内或通过密封接口与腔体连接时，还应满足目标压力和气氛的相容性要求。

a) 置于真空/可控气氛腔体内的运动部件、绝缘件、粘接剂、润滑材料和传感器材料应与目标真空和气氛相容，释气和颗粒产生不应应对试验结果造成不可接受影响；

b) 运动部件应满足低发尘要求。不可避免的运动副自身发尘应通过结构隔离、防护、独立抽气或其他措施与被测摩擦副区分，并在试验前测定本底发尘量；

c) 真空/可控气氛腔体内线缆应采用低释气、真空兼容材料，并固定敷设，避免线缆移动、摩擦和绝缘材料析出造成污染；

d) 数据采集系统应同步记录摩擦力、法向载荷、运动参数、腔体压力、温度以及适用时的气体流量和气氛组成。各通道应采用统一时间基准，同步误差应显著小于所分析过程的最小特征时间尺度；原始数据应可追溯。

7.2 真空控制系统

真空控制系统应由真空泵组、管路回路、真空计、控制阀门、压力控制装置及控制系统组成，应能实现抽气、稳压、隔离、破真空和安全联锁。

7.2.1 真空泵组

真空系统的极限压力和工作压力范围应满足 5.6 规定的目标工作压力及稳定性要求，并留有适当能力裕量。

泵组可由机械泵、干式前级泵、分子泵或其他适用泵组合构成，其抽速应与腔体有效容积及目标压力匹配。

抽气系统应经空载性能确认，并应考虑腔体放气、密封件、运动部件和材料释气对压力稳定时间的影响；系统能力应结合极限压力、抽气过程、压力稳定性和漏率综合评价。

7.2.2 管道回路

管道回路应包括抽气管路、破真空管路以及按需设置的气氛输入、排放或回收管路。管路应采用不锈钢等低释气材料，内壁应清洁、光滑并避免死角和不必要的长距离布设。

真空管路连接应采用可靠的真空密封接头，抽气管路应根据流导需求合理选择直径和长度，关键位置宜配置隔离阀和测压点。

7.2.3 控制阀门

应配备抽气阀、隔离阀和破真空阀，必要时设置气氛输入阀和回收阀。阀门应采用与目标真空和气氛相容的型号。

破真空时充气速率应可控，并应避免气流直接冲击摩擦副、采样探头或规定收集面。对颗粒沉积、表面污染或材料剥落敏感的试验，应通过预试验或技术方案规定压力上升速率。

7.2.4 真空计

真空测量系统应根据试验压力范围配置相匹配的真空计组合，并保证各量程之间有合理的覆盖和重叠。可采用电阻式、电容薄膜式、热传导式、电离式等适宜的真空计。

真空计的测量范围、准确度和稳定性应满足试验要求。用于定量比较的试验，测量不确定度或最大允许误差宜明显小于试验规定的压力允许偏差。真空计应定期校准，校准证书应在有效期内。

真空计安装位置应能代表试验腔体工作区域的压力状态，必要时评估压力梯度和抽气口附近压力差对测量结果的影响。

7.2.5 控制系统

控制系统应能实现抽气、稳压、隔离、破真空及安全联锁的手动和自动控制，自动监测并记录真空压力。

系统应具备超压/异常升压报警、泵组联锁和紧急停机功能；关键压力、阀门状态和报警事件应带时间戳记录。

7.3 可控气氛控制系统

可控气氛控制系统应能实现气氛成分和压力的控制，由气源、气体纯化装置、质量流量控制器、必要的混合单元、压力传感器、气氛浓度/分压传感器和控制系统组成。

系统应能够完成抽真空、充气、配比、稳压、监测和安全排放或回收，并与真空控制系统联动。

- a) 应设置与所用气体相容的专用进气、排气或回收管路；
- b) 应配备能够验证气氛组成的浓度或分压测量装置，其量程和准确度应满足允许偏差判定；
- c) 两种或多种气体混合时，应能实现按规定比例供气，并通过腔体侧实际测量确认组成达到稳定；
- d) 应能够在规定压力范围内进行稳压控制，并连续记录流量、压力、气氛组成等参数。
- e) 管路应设置独立的可控气氛接口，与抽气、破真空和颗粒物测试管路合理隔离，避免交叉污染。

7.3.1 气源

气源应采用合格的瓶装气体或气体发生器，气体纯度和成分应符合试验要求。气源出口应设置与气体相容的减压和监测装置，输出压力应稳定；气瓶应固定并符合相关安全要求。

7.3.2 气体纯化装置

气体纯化装置应根据试验对象去除水分、氧、油分、颗粒物及其他可能影响摩擦化学反应的杂质。纯化能力应与气体流量和试验压力相匹配，并应建立过滤器、纯化器的更换或再生记录。

涉及高纯或高真空试验时，应根据试验目的规定露点、氧含量、总烃等关键杂质指标及其检测方法，不宜仅以单一指标判定气体适用性。

7.3.3 质量流量控制器

质量流量控制器（MFC）应根据气体种类和流量范围选型，量程应覆盖试验所需流量。控制准确度和响应时间应满足气氛建立及稳定控制要求；不同气体应按设备制造商要求分别校准和配置。

MFC 前应设置适用的过滤器，必要时在腔体侧设置流量或压力的独立校核手段。MFC 应定期校准，校准信息应纳入试验记录。

7.3.4 混合室

混合室应采用低释气、耐腐蚀材料制造，内壁应清洁光滑，避免污染物积存。两种或多种气体混合时，应验证混合均匀性及达到稳定组成所需时间。

混合室与腔体之间的连接管路应尽量短，混合单元的死体积应考虑到压力和组成响应时间对试验程序的影响。

7.3.5 控制系统

控制系统应具备手动和自动两种模式，能够完成抽真空—充气—配比—稳压—排气/回收的程序控制，并应通过闭环控制实现压力和气氛组成的稳定。

压力和气氛组成的控制准确度应与试验规定的允许偏差相匹配。

系统应具备过压保护、气体泄漏报警、紧急切断及尾气安全排放或回收功能；涉及氧气等助燃性气体时，应设置与风险相适应的氧浓度监测和安全联锁。

试验过程中应连续记录气体流量、混合比例、腔体压力 and 实际气氛组成，原则上记录间隔不宜大于 1 min；关键阶段应提高采样频率。

7.4 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 章规定；真空环境空间颗粒物测试、表面颗粒物测试及数据处理应分别符合其 8.2.5、8.3 和第 9 章。测试设备应与目标压力和气氛条件相容，并避免自身成为显著颗粒或释气源。

7.5 辅助测试设备

温度、压力、流量、气氛组成、位移、速度和载荷等测量设备应具有与规定控制范围相匹配的量程、分辨力和准确度，并处于有效校准状态。测量设备的安装位置应避免对摩擦副局部环境造成明显扰动。

8 试验方法

8.1 试验前准备

试验前应确认试验装置、真空系统、可控气氛系统和测量设备工作正常，需校准或检定的设备均应处于有效状态。

应完成试验腔体、夹具、工具及与试样接触部件的清洁，并记录试样编号、初始外观、表面状态和必要的初始质量。

应确认洁净间空气洁净度、温度、相对湿度满足 5.2 和 5.3 的要求，并记录环境参数初始值。

颗粒物测试设备、真空计、气氛组成测量设备等应按制造商规定完成预热、自检和零点/状态确认。

8.2 试样清洁及装夹

试样应按 6.3 规定完成清洗和干燥。使用洁净工具安装试样，确保定位可靠、接触面无外来颗粒和明显污染。

安装后应检查接触对中、夹持状态、运动范围和载荷加载方向，必要时进行空载或低载校正。装夹完成后不得再次接触试样工作表面。

8.3 真空/可控气氛腔体洁净

关闭腔体舱门前，应确认腔体内无遗留工具、无尘布、包装材料或其他杂物。

关闭腔体舱门后，应确认密封良好，并按试验方案采用洁净气体进行冲洗或置换。需要颗粒物测试时，底噪和空白试验应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 8.2.2、8.2.5 和 8.3.2 执行。

腔体洁净状态达到试验规定后，应记录底噪颗粒水平、清洗气体种类、冲洗时间及腔体初始状态。对高真空试验，还宜记录空载抽气过程和压力变化曲线，作为判定依据。

8.4 试验环境抽真空

关闭不参与抽气的管路阀门，按规定顺序启动真空泵组抽气。抽气过程中应避免因过快抽气造成试样松动、颗粒再悬浮或密封结构异常。

达到目标压力后，应保持规定稳定时间。除试验方案另有规定外，稳定时间不应少于 30 min，并记录压力—时间曲线。稳定判据应以连续 3 次监测的压力变化率及允许偏差为依据。

8.5 可控气氛环境设置

试验环境为可控气氛时，应先将腔体抽至规定的预设真空压力并保持稳定；随后隔离抽气通道，按照规定流量通入洁净气体或混合气体。

充气过程中应同步监测腔体压力和气氛组成，直至达到目标值及允许偏差，并保持足够时间使气氛达到稳定。稳定时间应在试验方案中预先规定。

可控气氛试验的有效环境参数应以腔体侧实测压力和气氛组成作为判定依据，不应仅以 MFC 设定值或气源配比值作为最终判定依据。

正式试验开始前，应记录目标压力、实际压力、各组分目标体积分数及实际测量值，并确认其均处于规定允许范围。

8.6 摩擦磨损试验设置

8.6.1 试验参数设置

基本摩擦磨损试验参数应按 T/CMES XXXX.1—202X 的 8.4 确定，并补充记录下列真空或可控气氛特有参数：

- a) 环境类型、目标工作压力及允许偏差，或气氛种类、各组分比例、目标压力及允许偏差；
- b) 抽气/充气程序、稳定时间以及压力和气氛组成的判定条件；
- c) 颗粒物测试状态（真空原位、可控气氛原位或受控破真空后）及测试配置；
- d) 压力、气体流量、气氛组成和颗粒物通道的采样频率及时间同步方式；
- e) 与压力、气氛组成或安全联锁相关的附加终止条件。

8.6.2 试验运行和监测

加载、相对运动及摩擦力等基本参数的运行和监测应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 8.5；真空或可控气氛试验还应同步监测腔体压力、关键位置温度以及适用时的气体流量和气氛组成。

洁净间环境参数的记录应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 8.5；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。

真空试验应连续记录腔体压力和关键位置温度；可控气氛试验还应连续记录各气体流量、压力和实际气氛组成。环境参数的记录间隔宜不大于 10 min，异常或快速变化阶段应采用更高频率。

试验过程中不得开启腔体或触碰试样。出现试样松动、断裂、异常升温、载荷或运动控制失效、压力或气氛超出规定偏差、颗粒物测试系统故障或其他影响结果的异常时，应立即停止运动并记录异常发生时间、试验状态及处理措施。

8.7 腔体破真空

试验达到规定的循环次数、总行程、持续时间或其他终止条件后，应先停止相对运动，再卸除法向载荷。若颗粒物测试要求在真空状态下完成，应在破真空前完成规定的真空态采样或封存。

破真空应通过规定的洁净气体管路进行。缓慢充入高纯氮气、干燥洁净空气或试验方案规定的其他气体，并控制腔体压力上升速率；对颗粒沉积敏感试验，宜不超过 10 kPa/s，必要时采用更低速率。

破真空过程中应记录压力—时间曲线。达到常压或规定压力后，应保持静置时间，待气流扰动衰减后再进行需要破真空后实施的颗粒物或表面表征。

8.8 试验终止和试样取出

涉及特殊气氛时，破真空前应按照安全要求对试验气体进行回收或安全排放；停止收集或排放后方可开启腔体。

使用洁净工具取出试样，避免接触磨痕、磨屑沉积区及规定收集面。需要后续形貌、成分或表面颗粒测试时，应将试样置于洁净、密闭、低释气容器中，并记录从腔体开启到封存的暴露时间。

8.9 摩擦发尘量测试

8.9.1 一般要求

颗粒物测试的环境与底噪控制、底噪/空白试验和数据处理应按 T/CMES XXXX.3—202X 执行。应明确测试发生在真空状态、可控气氛状态还是受控破真空后状态，不同状态的数据不应直接合并比较。

8.9.2 空间颗粒物测试

真空或可控气氛环境的空间颗粒物测试应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 8.2.5 执行，宜优先采用与目标环境相容的在线或原位测量方式，并与 8.6 的摩擦磨损试验同步。

采用受控破真空后测量时，应先按 8.7 完成规定的破真空并达到稳定条件，再按 T/CMES XXXX.3—202X 的 8.2.5 进行测试；应记录破真空气体、压力变化过程和静置时间。

如需在试验中途受控破真空后测量，应预先规定中途终止点。达到终止点后停止相对运动、卸载并实施受控破真空，再按 T/CMES XXXX.3—202X 的规定完成颗粒物测试；恢复真空或可控气氛后，应重新进行腔体状态确认、环境建立和试验起始条件确认，并将中断过程单独记录，不得将中断前后数据视为同一连续试验段。

8.9.3 表面颗粒物测试

表面颗粒物测试用于评价沉积或附着于规定收集面、试样或其他评价表面的颗粒。取样、收集和测量应按 T/CMES XXXX.3—202X 的 8.3.3 执行，并明确采用真空状态取样、受控破真空后取样或其他经验证的转移方式。

取样或封装过程中应避免吹扫、擦碰和非受控暴露造成颗粒丢失或二次污染。收集与转移配置、测试程序和数据处理应分别符合 T/CMES XXXX.3—202X 的 6.4.3、8.3 和 9.3。

如在试验中途进行表面颗粒物测试，应按照与空间颗粒物中途测量相同的原则规定中断点、破真空、重新建立环境和数据分段规则。

8.10 试验后表征

试验后磨损量测量应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 8.8 和第 9 章；测量方法的分辨力和测量不确定度应与磨损量级相匹配。

需要分析真空或可控气氛对磨损机制、材料转移、表面反应膜或污染来源的影响时，可在 T/CMES XXXX.1—202X 的 8.8 规定表征基础上增加适用的表面化学分析。

8.11 有效性和重复试验

试验有效性和重复试验应符合 T/CMES XXXX.1—202X 的 8.9。因压力或气氛组成失控、异常漏气、非计划破真空或安全联锁动作等非试样因素导致结果失真时，应判为无效并记录原因；异常值处理应说明依据、方法和结果。

9 试验数据处理

摩擦系数、磨损量、比磨损率及统计表达应按 T/CMES XXXX.1—202X 的 9.1~9.3 和 9.5 处理；颗粒物数据应按 T/CMES XXXX.3—202X 第 9 章处理。

10 试验报告内容

试验报告除应包括 T/CMES XXXX.1—202X 第 10 章规定的内容外，还应包括下列真空或可控气氛特有信息：

- a) 试验环境类型及试验状态；
 - b) 目标工作压力、允许偏差、实际压力范围及压力—时间记录；
 - c) 极限压力（适用时）、漏率测试方法及结果；
 - d) 可控气氛气体种类、纯度、关键杂质指标、各组分比例、气体流量和实际气氛组成；
 - e) 真空泵组、真空计、质量流量控制器及气氛组成测量设备等关键设备信息和校准状态；
 - f) 破真空用气体、压力变化过程、静置时间及其他受控破真空参数；
 - g) 颗粒物测试状态、采用的 T/CMES XXXX.3—202X 第 8 章测试方法与配置，以及按其第 9 章处理的结果；
 - h) 压力、气氛、安全联锁或破真空过程中出现的异常情况及其处理措施；
 - i) 其他可能影响真空或可控气氛试验结果的信息。
- 试验记录可采用附录 B 给出的推荐格式。

附录 A

(资料性附录)

超洁净真空及可控气氛环境摩擦磨损试验设备总成结构示例

图 A.1 给出一种超洁净真空及可控气氛环境摩擦磨损试验设备总成结构示例。试验单元由真空/可控气氛腔体与摩擦磨损测试模块组成，测试模块包括运动系统与加载系统，并配置运动控制及数据采集系统。腔体可设置颗粒物测试、真空控制和可控气氛控制接口，用于实现颗粒物在线测试、真空压力控制和气氛调节。颗粒物测试方法见 T/CMES XXXX.3—202X 的 8.2.5 和 8.3。图示结构仅说明功能关系，不限定具体接触形式、驱动方式和颗粒物检测原理。

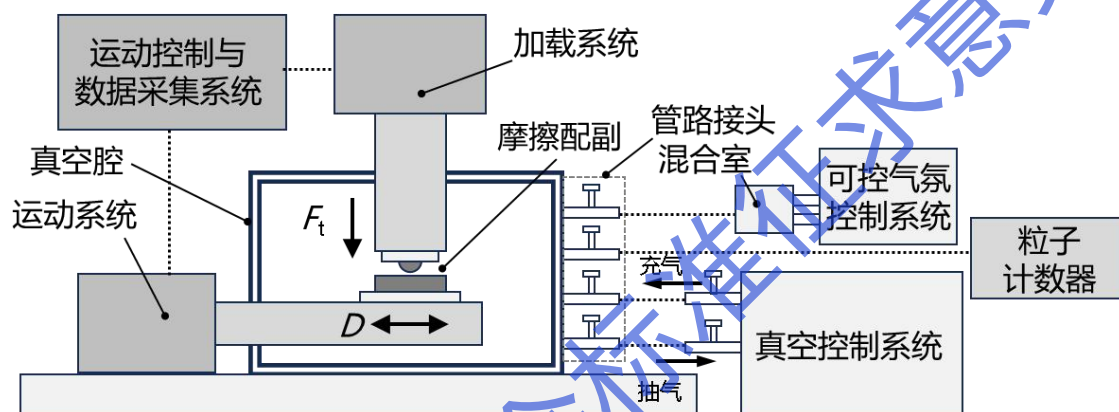


图 A.1 一种超洁净真空及可控气氛环境摩擦磨损试验设备总成结构示例

附 录 B
(资料性附录)
试验结果记录表

标准编号	T/CMES XXXX.2—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		
洁净环境等级	ISO Class ____				温度/℃；相对湿度/%		
试验环境类型	☐ 真空 ☐ 可控气氛				目标工作压力/Pa (允许偏差)		
实际压力范围/Pa 及 压力—时间记录					极限压力/Pa；漏率/ [Pa·m³/s] (适用时)		
气体种类/纯度/流量					气氛组成/比例及实测值		
接触形式					运动类型		
法向载荷/N					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、干燥与转移方式		
颗粒物测试类型	☐ 空间 ☐ 表面 ☐ 两者				颗粒物测试方法		
关键设备/测量系统及 校准状态					受控破真空参数/ 异常情况处理		
序号	试样编号	稳定摩 擦系数	标准差	磨损质量 /mg	磨损体积 /mm³	比磨损率/ [mm³/(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；压力—时间记录、气氛组成实测记录和受控破真空过程记录可作为本表附件。