

T/GMES

甘肃省机械工程学会团体标准

T/GMES 032—2025

销/球-盘摩擦磨损试验 第2部分：高温试验方法

Friction and wear test of pin/ball on disk
Part 2: Test method at high temperature

2025 - 09 - 02 发布

2025 - 09 - 02 实施

甘肃省机械工程学会 发布

目 次

前言 I

引言 II

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 试样 2

6 试验设备及仪器 2

 6.1 试验条件 3

 6.2 设备概述 3

 6.3 测力系统 3

 6.4 试样夹持 3

 6.5 测速系统 3

 6.6 测量系统 3

7 试验参数 3

 7.1 载荷 3

 7.2 转速 3

 7.3 摩擦半径 3

8 试验方法 4

9 试验结果处理 4

10 试验报告 5

前 言

本文件按照 GB/T 1.1 《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。

本文件由兰州中科凯华科技发展有限公司提出。

本文件由甘肃省机械标准化技术委员会归口。

本文件主要起草单位：中国科学院兰州化学物理研究所、兰州中科凯华科技发展有限公司、清华大学、兰州大学、西南交通大学、天津大学、浙江大学宁波理工学院、陕西科技大学、武汉材料保护研究所、西北工业大学。

本文件主要起草人：张永胜、樊恒中、王振军、张强强、苏云峰、解国新、乔旦、宋俊杰、樊小强、隋天一、陆俊杰、何乃如、陈同舟、王龙、曹文辉、高青娟。

本文件为首次制定。

引 言

在现代材料科学与工程领域,材料在高温环境下的摩擦磨损性能是衡量其可靠性和适用性的关键指标,尤其在航空航天、能源动力、冶金制造、汽车工业等高端工业领域,材料需长期承受 $35^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的高温工况,其摩擦磨损行为直接影响设备的运行效率、使用寿命及安全性。

随着高温技术的不断发展,金属、无机非金属、高分子、复合材料及高温固体润滑材料的高温摩擦学特性研究日益受到重视。然而,长期以来,高温条件下的摩擦磨损试验缺乏统一、规范的方法,导致不同研究机构的试验数据可比性差,难以形成系统的材料性能评价体系。

为此,兰州中科凯华科技发展有限公司牵头组织国内材料摩擦学领域的权威科研机构、高校及企业,共同制定本《销/球-盘摩擦磨损试验 第2部分:高温试验方法》。本文件基于铁铬铝电阻丝加热、氧化铝纤维保温与K型热电偶结合的高温试验系统,明确了球-盘、销-盘式摩擦磨损试验的原理、试样制备、设备要求、参数设置、试验流程及结果处理方法,旨在为高温环境下材料摩擦系数和磨损量的测定提供科学、统一的技术规范,推动高温摩擦学研究的标准化发展,为高性能耐高温材料的研发、应用及评价提供重要技术支撑。

销/球-盘摩擦磨损试验

第2部分：高温试验方法

1 范围

本文件规定了金属、无机非金属、高分子、复合材料等材料以及高温固体润滑材料在35°C~1000°C高温条件下，球-盘、销-盘式摩擦磨损试验的术语和定义、试验原理、试样、试验设备及仪器、试验参数、试验方法、试验结果处理、试验报告。

本文件适用于金属、无机非金属、高分子、复合材料等材料以及高温固体润滑材料在35°C~1000°C高温条件下，球-盘、销-盘式摩擦条件下摩擦系数及磨损量的测定。

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 数值修约规则

GB/T 12444 金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验

GB/T 16825.1 静力单轴试验机的检验 第1部分：拉力和（或）压力试验机测力系统的检验与校准

GB/T 17754 摩擦学术语

GB/T 19067.1 产品几何量技术规范（GPS）表面结构 轮廓法 测量标准 第1部分：实物测量标准

JJG 1134 转速测量仪

JJG 1305 线位移传感器校准规范

3 术语和定义

GB/T 12444 和GB/T 17754 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

磨痕宽度 disk scar width

在旋转摩擦磨损试验时，试样的表面经摩擦磨损后在摩擦面留下的损伤痕迹的断面宽度，单位为毫米（mm）。销/球-盘磨痕示意图见图1。

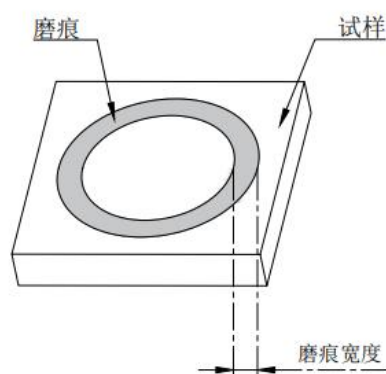


图1 销/球-盘磨痕示意图

4 试验原理

销/球-盘式高温摩擦磨损试验一般选择球（销）与盘（面）组成摩擦副，用于检测球（销）与盘（面）材料在室温~1000℃的高温环境中，一定试验条件下的相对磨损程度、摩擦系数。通常为上销/球、下盘/面的安装方式，销/球试样一般选择直径4mm~6mm，面为一定粗糙度的平整试样，可为方形、圆形以及其他不规则几何形状，有一平面用于摩擦试验。销/球试样通过球夹具/销夹具固定安装在加载杆上，盘（面）试样用样品夹具平整安装在高温炉内的旋转运动样品台上，摩擦半径可根据盘（面）试样尺寸选择合适的，一般半径为2mm~10mm，加热炉采用铁铬铝电阻丝加热，炉体及保温层填充氧化铝纤维以增强隔热效果。K型热电偶固定在靠近试样表面的炉内壁，配合红外测温进行辅助验证，通过校准修正温差，提升测温精准度。炉体外部及下端设有水冷套及循环装置，可有效阻断炉体高温向外部及下端零部件传导。避免设备因过热受损。测试时，先将加热炉升温至指定温度，随后放入加载杆，使球与面接触，通过砝码施加一定载荷，驱动电机带动旋转运动台及下试样进行旋转滑动，其摩擦轨迹为一个圆，并在同一轨迹上循环多次磨损，高温摩擦磨损试验原理图见图2。在试验过程中实时测量摩擦力、温度，计算摩擦系数，并以曲线形式实时显示。按照设定的转速和时间摩擦试验后，用接触式探针测量磨痕某一横截面曲线，并通过相关公式计算截面面积，得出磨痕的体积磨损量。

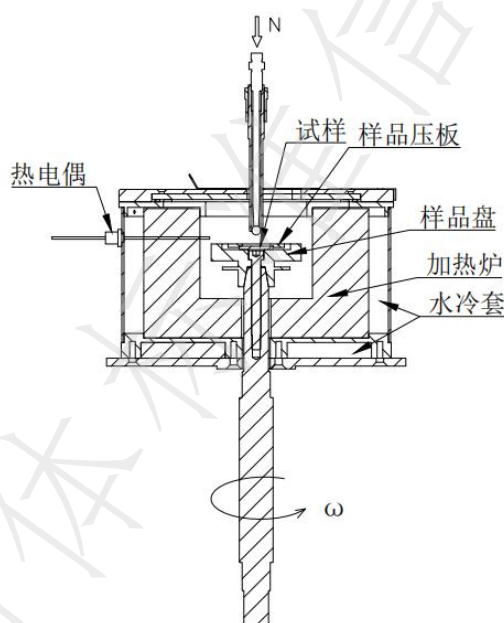


图2 高温摩擦磨损试验原理图

注： ω —旋转速度 N —荷载于球夹具及球上的法向力

5 试样

- 5.1 根据测试要求，选择合适的材料制备设备和工艺，确保试样性能稳定、可靠。
- 5.2 对试样表面凸起、变形、翘曲等缺陷进行筛分等处理，表面粗糙度不超过0.8 μm 。
- 5.3 试样对角线（直径）长在20mm~50mm之间，厚度在2mm~10mm之间。以保证制备出的下试样在试验过程中施加应力时，不能出现破坏或过度弯曲。
- 5.4 球直径宜在4mm~6mm之间，200℃以下试验材质可选用轴承钢，精度不低于G10；200℃以上选用陶瓷球，精度不低于G5。超出4mm~6mm范围，可参照执行。
- 5.5 销直径宜在4mm~6mm之间，材质可根据试验需求选择，摩擦面表面粗糙度不超过0.8 μm ，倒角0.5mm。超出4mm~6mm范围，可参照执行。

6 试验设备及仪器

6.1 试验条件

6.1.1 试验应在 35℃~1000℃范围内进行。

6.1.2 试验环境的相对湿度通常控制在 40%~60%之间,以确保在试验过程中,防止样品表面形成水膜或引起静电等问题。对于敏感性材料,湿度应控制在 40%±5%范围内,或其他较窄范围内。

6.1.3 试验环境应无振动、无强电磁干扰、无腐蚀性气体和无粉尘。

6.2 设备概述

设备采用上球/销、下盘(面)的旋转摩擦方式。加热炉采用铁铬铝电阻丝加热,炉体及保温层填充氧化铝纤维以增强隔热效果。K型热电偶固定在靠近试样表面的炉内壁,配合红外测温进行辅助验证,通过校准修正温差,提升测温精准度。炉体外部及下端设有水冷套及循环装置,可有效阻断炉体高温向外部及下端零部件传导。避免设备因过热受损。法向力通过不超过 20N 的砝码,垂直作用于摩擦球端,确保摩擦球与试样紧密贴合,并承受特定载荷力。驱动机构带动样品盘以设定的角速度匀速旋转。在摩擦过程中,样品盘的接触表面与摩擦球面之间会产生摩擦力。摩擦系数通过检测摩擦球端在旋转盘上所受的切向力进行计算,摩擦磨损原理图见图2。摩擦球端及支架与力传感器相连,以采集摩擦球端接触表面所承受的切向力。

6.3 测力系统

6.3.1 试验机的测力系统应按照 GB/T 16825.1 进行校准,其准确度等级为1级。

6.3.2 高温旋转摩擦试验机应配有摩擦力测定系统,以确定摩擦系数。

6.3.3 加载法向力校准示值相对误差不超过±0.5%F.S,示值重复性不超过1%

6.3.4 摩擦力校准示值相对误差不超过±1%F.S,示值重复性不超过1%。

6.4 试样夹持

6.4.1 对磨球安装于球夹具中,球夹具安装至加载杆上,并将对磨球顶出1/3,用于摩擦接触,且保证在摩擦过程中,球体不可滚动。球在接触时垂直于试样表面,角度相对误差不超过±1°,以确保必要的接触条件。

6.4.2 下试样用样品夹具固定于样品台上,试样保持垂直于主轴轴线,角度相对误差不超过±1°。试样夹持必须是稳定、牢固,以避免试样在试验过程中的松动。

6.4.3 加载杆应位于摩擦接触面上,加载杆可上下活动自如,以减小由滑动摩擦引起的振动。

6.5 测速系统

6.5.1 试验机的测速系统应按照 JJG 1134 进行校准,其准确度等级为0.002级。

6.5.2 主轴转动在有负载的情况下能够保持恒速,转速误差不超过±1%F.S,转速测量范围在 10r/min~1000 r/min之间。应配备转数计数器以便于记录。

6.6 测量系统

6.6.1 试验机的表面轮廓测量系统应按照 JJG 1305 进行校准,其准确度等级为0.02级。

6.6.2 测量示值相对误差不超过±0.5%F.S,示值重复性不超过1%。

7 试验参数

7.1 载荷

摩擦磨损接触处法向力值。

7.2 转速

接触面之间的相对滑动速度,以rpm/min为单位。

7.3 摩擦半径

接触面之间滑动,其滑动位置距离中心点的长度,以mm为单位。

8 试验方法

- 8.1 在试验前，试样应清洗与干燥。使用不含氯和非成膜清洗剂或溶剂清除试样表面污垢和异物，随后干燥以清除所有可能残留的清洗剂。
- 8.2 试验应在35℃~1000℃范围内进行。100℃以上试验必须有水循环，以保证设备及试验安全。
- 8.3 将球安装入球夹具中，并将球/销夹具固定于加载杆上。试样放置于样品台，用样品夹具固定。加载杆放入加载杆套中，并调整摩擦半径等，确定摩擦过程中球与样品表面的位置、加载杆高低等，保证试验过程中，球夹具运行轨迹无触碰样品夹具。取出加载杆。
- 8.4 在软件界面进行自动升温设定。（升温时间或保温时间应大于试验时间）打开水循环，炉膛加装保温盖，启动温控仪，将炉腔内及样品加热到设定温度值。
- 8.5 设定参数后，将摩擦力零点调节至 0 ± 0.001 。放入加载杆及砝码，启动试验机，驱动电机进行摩擦试验。试样在启动驱动电机时开始试验，当达到所要求的试验时间时，试验停止，试验不能被中断或重新启动。
- 8.6 试验温度、转速、时间、载荷应根据材料及工艺需要确定。
- 8.7 试验过程中实时显示摩擦系数、温度-时间曲线，并根据要求记录温度、转速、载荷、时间、摩擦力、摩擦系数。
- 8.8 清除磨痕周围的磨损碎屑，将样品安装到磨损量测试组件上，并将测量触针移动至磨痕右侧，启动磨损量测试，设备自动运行并扫描出磨痕横截面曲线。
- 注：磨损量测试需在同一磨痕均匀选择不同的三处进行测量，并按照三次测量平均值计算。
- 8.9 根据需要，在试验过程中记录磨痕曲线值。
- 8.10 取出试样，观察磨痕。

9 试验结果处理

9.1 摩擦系数

用公式（1）计算摩擦系数：

$$\mu = \frac{F}{N} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

μ ——摩擦系数；

F ——摩擦力，单位为牛顿（N）；

N ——加载试验力（法向力），单位为牛顿（N）。

9.2 体积磨损量

磨损量采用表面轮廓仪（二维或三维），并按公式（2）计算磨损量。若采用二维轮廓仪，按标准GB/T 19067 规定，则同一磨痕选择3处具有代表性的位置分别测量后，取3次平均值作为一个试验数据。将磨痕横截面进行积分可得到磨痕截面积，磨痕截面积乘以磨痕长度可得到体积磨损量。

9.3 磨痕横截面示意图见图3。用公式（2）（牛顿-莱布尼茨公式）计算磨痕横截面面积：

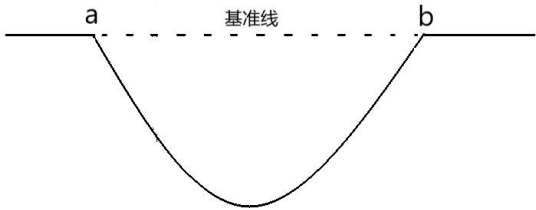


图3 磨痕横截面示意图

$$S_{\text{截}} = \int_a^b f(x) dx \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 $S_{\text{截}}$ ——磨痕横截面面积，单位平方毫米（mm²）；
 $f(x)$ ——为横截面曲线某点对应的 y 值，单位 mm；
 dx ——为某一小段的宽度，单位 mm；
 a ——磨痕横截面的前沿；
 b ——磨痕横截面的后沿。

9.4 用公式（3）计算体积磨损量：

$$V = S_{\text{截}} \times L \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 V ——旋转磨痕体积磨损量，单位立方毫米（mm³）；
 $S_{\text{截}}$ ——磨痕横截面面积，单位平方毫米（mm²）；
 L ——旋转磨痕长度，单位 mm。

9.5 试验结果数值至少保留两位有效数字，修约方法按 GB/T 8170 执行。

10 试验报告

试验完成后形成试验报告，试验报告应包含以下内容：

- a) 试验机型号；
- b) 标准编号；
- c) 试验形式、材料种类、处理工艺；
- d) 实验的载荷、转速、旋转半径及时间；
- e) 摩擦系数曲线的数据图；
- f) 磨痕曲线的数据图；
- g) 磨痕体积磨损量；
- h) 环境温度和湿度。
