



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 43853—2024

## 激光修复层高温摩擦磨损 性能试验 球-盘法

Test for high temperature friction and wear properties of laser repairing  
coatings—Ball-on-disc method

2024-04-25 发布

2024-04-25 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会



## 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 原理 .....	2
5 试验条件 .....	2
6 材料和试剂 .....	2
7 仪器设备 .....	2
7.1 球-盘法试验装置 .....	2
7.2 体视显微镜 .....	4
7.3 放大镜 .....	4
7.4 测微显微镜 .....	4
7.5 接触式轮廓仪 .....	5
8 样品 .....	5
8.1 通用要求 .....	5
8.2 球试样 .....	5
8.3 盘试样 .....	5
9 试验程序 .....	6
9.1 试验前试样准备 .....	6
9.2 磨损试验准备 .....	6
9.3 摩擦力测量 .....	6
9.4 试验后的磨痕形貌观察 .....	6
9.5 球试样磨痕测量 .....	6
9.6 盘试样磨痕测量 .....	7
9.7 试验重复次数 .....	8
10 试验结果计算 .....	8
10.1 球试样的比磨损率 .....	8
10.2 盘试样的比磨损率 .....	9
10.3 摩擦系数 .....	10
10.4 数值修约 .....	10
11 试验报告 .....	10
参考文献 .....	11



## 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。

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业联合会提出。

本文件由全国激光修复技术标准化技术委员会(SAC/TC 482)归口。

本文件起草单位：沈阳大学、沈阳大陆激光技术有限公司、湖北工业大学、沈阳航空航天大学、沈阳工业大学、中国科学院金属研究所、中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司、上海电机学院、上海交通大学、南昌航空大学、上海大陆天瑞激光表面工程有限公司、中国航发商用航空发动机有限责任公司、宝武装备智能科技有限公司、宝山钢铁股份有限公司、岳阳大陆激光技术有限公司、南京航空航天大学、西安陕鼓动力股份有限公司、泰安市质量技术监督研究院、吉林大学、国营川西机器厂、上海船舶工艺研究所。

本文件主要起草人：贺春林、陈江、谭海丰、姜德元、回丽、王维、张松、姚戈、王文、贺有年、周松、刘豫、杨光、马国峰、刘岩、吴臣亮、谢华生、李雷、冯凯、彭晓、钱余昕、陈晓文、蔡乐、赵军、史昆、陈永畅、陈国喜、樊建成、周武军、占小红、孙标、卢正杰、张志辉、凌云鹤、王超、肖久林、牛建民、王娟。

## 引 言

激光修复技术是一种先进的表面工程技术,在冶金、石化、电力和舰船等行业有广泛的应用。由于大量激光修复零部件服役工况为高温摩擦环境,如冶金领域的连铸设备、热连轧设备和动力设备等,因此激光修复层的高温摩擦磨损性能评价显得尤为重要。

球-盘配置是一种最常规的高温摩擦磨损试验机型,广泛用于科学研究和产品性能评价。但是,由于没有相关标准可依,目前采用的高温摩擦磨损试验设备、试验程序、测试参数、试验结果处理等均不尽相同,往往导致不同人员获得的试验数据相差较大,难于比较。显然,这会给有关科学研究和工程开发人员带来极大混乱,甚至造成严重的工程误判。

基于对大量高温摩擦工况应用的激光修复层(如铁、镍、钴基及其复合材料)的高温耐磨性及工程化应用研究,通过产学研合作,制定了本文件。主要目的是规范球-盘法测定激光修复层高温耐磨性的试验方法,指导企业研发人员正确地评价激光修复金属零部件的服役性能。由于激光修复层常为非均质结构(密度变化),且试验期间修复层不可避免地出现高温氧化、磨屑黏连等现象,本文件规定基于磨损体积而不是磨损质量的测量结果来表征耐磨性,以避免出现耐磨性试验数据相关性差的问题。

依据本文件获得的试验结果可为评定激光修复金属零部件在高温摩擦条件下的服役安全提供数据支撑。本文件的制定,对推动激光修复企业技术创新和产品质量体系建立、促进我国激光修复技术的发展和工程化应用具有积极作用。

# 激光修复层高温摩擦磨损性能试验 球-盘法

## 1 范围

本文件描述了激光修复层高温摩擦磨损性能试验球-盘法的试验方法。

本文件适用于 35 °C~1 000 °C 的条件下,采用球-盘法测定激光修复层间或一种激光修复层与另一种其他材料间同轴滑动接触时产生的耐磨性和摩擦力的试验。

## 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 678 化学试剂 乙醇(无水乙醇)

GB/T 686 化学试剂 丙酮

GB/T 6062 产品几何技术规范(GPS) 表面结构 轮廓法 接触(触针)式仪器的标称特性

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 17754 摩擦学术语

GB/T 19864.2 体视显微镜 第 2 部分:高性能体视显微镜

GB/T 20968 无损检测 目视检测辅助工具 低倍放大镜的选用

GB/T 29037 热喷涂 抗高温腐蚀和氧化的保护涂层

GB/T 29795 激光修复技术 术语和定义

## 3 术语和定义

GB/T 17754 和 GB/T 29795 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**激光修复层** laser repairing coating

采用激光修复技术,在损伤零部件表面形成的与基材呈冶金结合的表面覆层。

### 3.2

**磨损试验** wear test

评定滑动接触材料摩擦磨损性能的方法。

[来源:ISO 20808:2016, 3.2]

### 3.3

**比磨损率** specific wear rate

$W_s$

磨损对材料的去除率。

注:用单位法向力  $F$ (N)和单位滑动距离  $L$ (m)的磨损体积  $V$ ( $\text{mm}^3$ )表示,其关系式为: $W_s = V/(F \times L)$ ,单位为立方毫米每牛顿米 [ $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ]。

[来源:ISO 20808:2016, 3.6, 有修改]

#### 4 原理

在一定的高温气氛下,通过恒定载荷将一个球试样推到一个旋转圆盘试样上而产生滑动接触,经规定滑动距离或时间后,获得球和盘试样间的耐磨性和摩擦力。

#### 5 试验条件

5.1 试验条件宜满足以下条件。

- a) 施加载荷:典型载荷范围为 5 N~100 N,载荷宜为 50 N。
- b) 滑动速度:典型滑动速度范围为 0.05 m/s~0.5 m/s,推荐速度是 0.1 m/s。滑动圆的直径宜为 20 mm 或 30 mm,盘固定架的旋转速度由公式(1)确定:

$$n = v/2\pi R \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$n$  —— 旋转速度,单位为转每秒(r/s);

$v$  —— 滑动速度,单位为米每秒(m/s);

$R$  —— 滑动圆半径,单位为米(m)。

- c) 滑动距离:典型滑动距离范围为 180 m~1 800 m,滑动距离宜为 360 m。
- d) 试验温度:试验温度范围为 35 °C~1 000 °C,试验温度应与服役环境温度一致,在无法获得服役环境温度时,应与用户协商确定。
- e) 试验气氛:大气,也可根据用户要求选择循环气体(如:惰性气体)。
- f) 摩擦磨损试验机放置房间温度范围为 10 °C~35 °C,相对湿度范围为 20%~70%。

5.2 试验条件可根据试验过程的特殊需要进行更改。

#### 6 材料和试剂

6.1 盘试样材料为激光修复层材料,球试样材料为金属材料或陶瓷材料。

6.2 丙酮(化学纯,GB/T 686)、无水乙醇(化学纯,GB/T 678)或其他无氯、不成膜的清洗剂和溶剂(如:碳氢清洗剂、汽油)。

#### 7 仪器设备

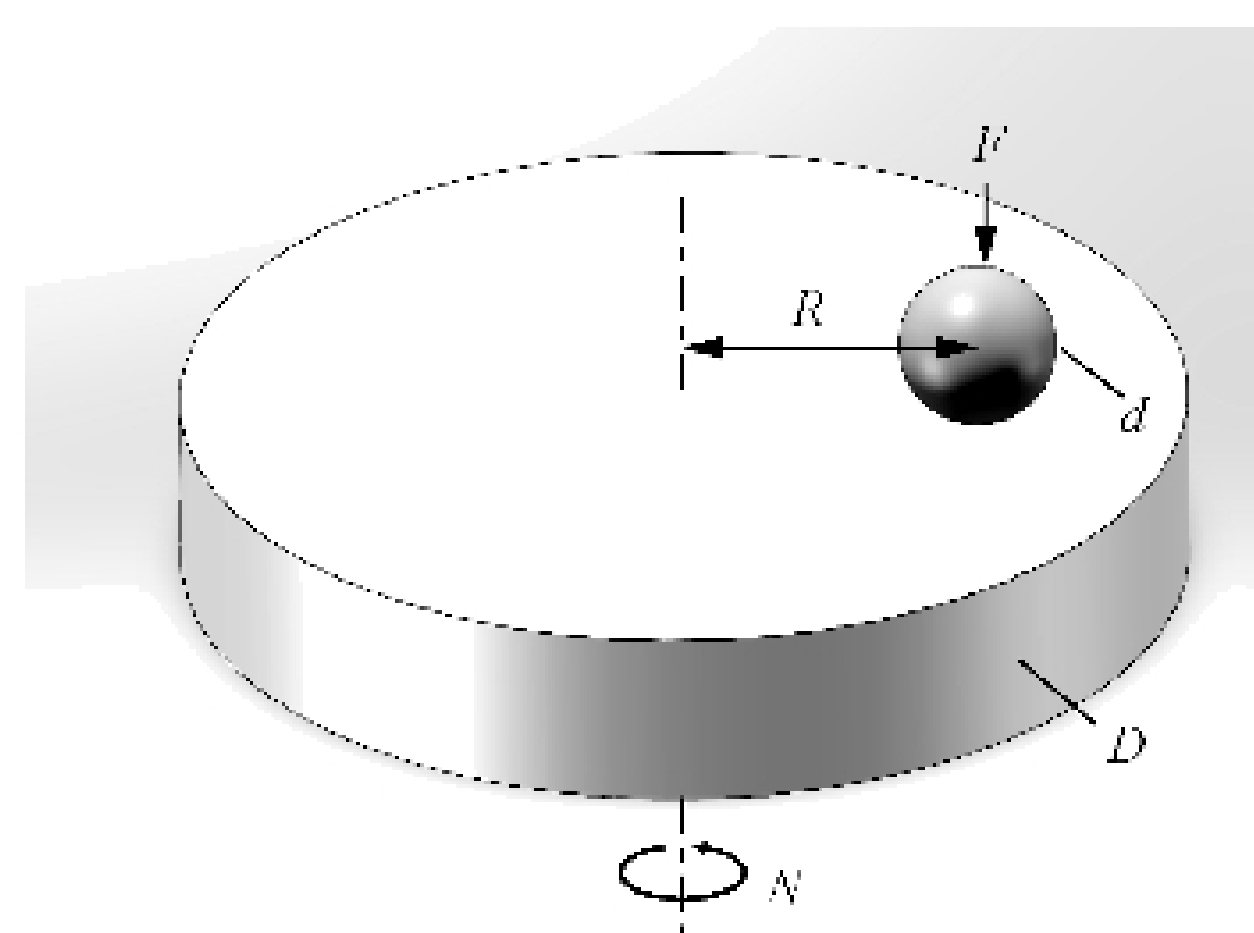
##### 7.1 球-盘法试验装置

###### 7.1.1 概述



7.1.1.1 将球-盘法摩擦磨损测试系统(见图 1)置入可控的高温气氛中,即为球-盘型高温摩擦磨损测试系统。





标引说明：

$F$  ——作用在球上的载荷；

$D$  ——盘直径；

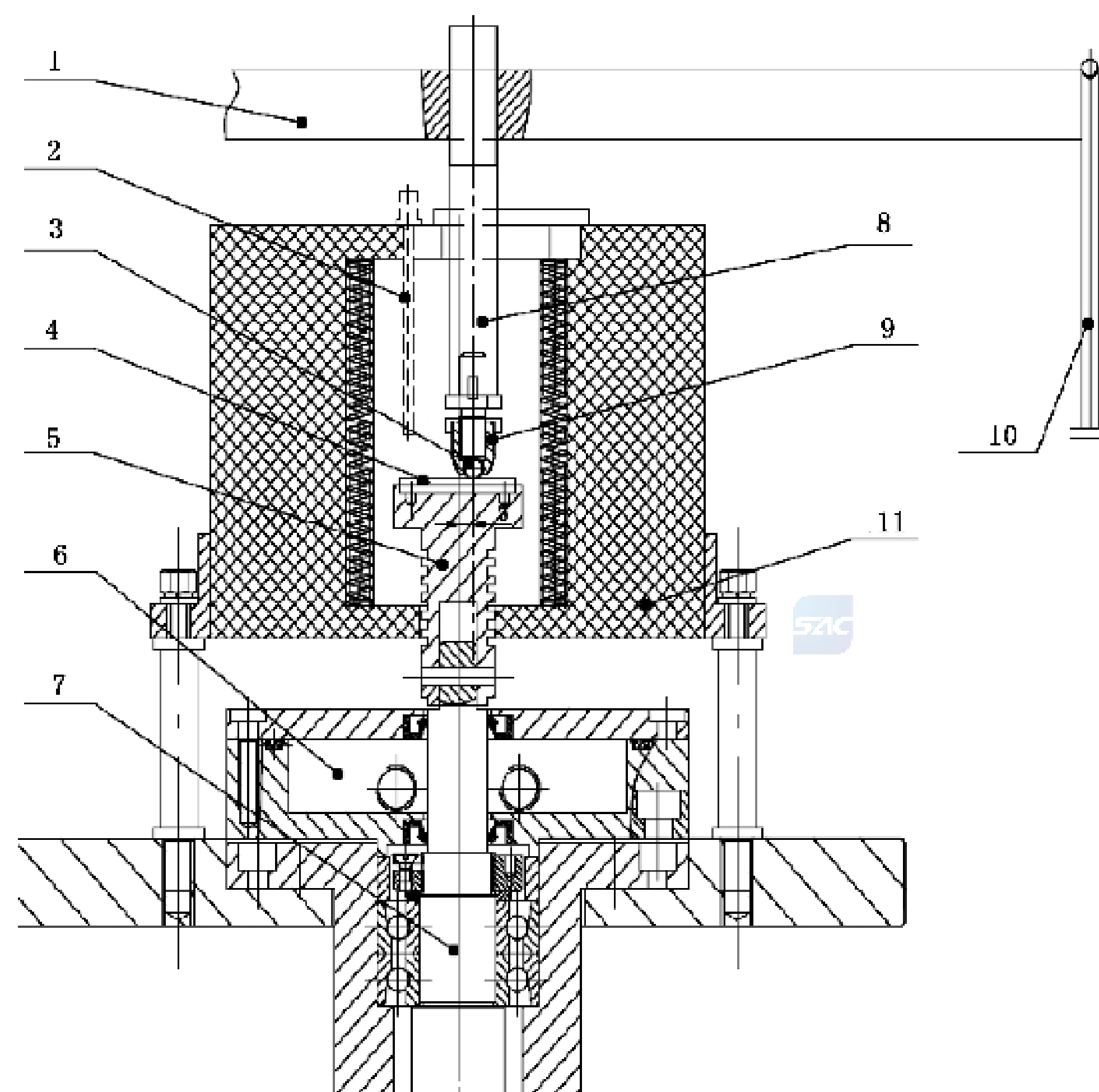
$N$  ——盘转速。

$d$  ——球直径；

$R$  ——磨痕半径；

图 1 球-盘型摩擦磨损测试系统示意图

7.1.1.2 球-盘型高温摩擦磨损试验系统(见图 2)包括一个盘驱动轴和一个盘固定架,一个用来固定球试样的装置以及将球试样推到圆盘试样上的加载装置。另一种类型的试验系统是球围绕固定的盘中心旋转。在任何情况下,盘上的磨损轨迹都是一个圆,涉及同一轨迹上的多次磨损。该系统还包括驱动系统、摩擦力测量装置、加热装置、控制和显示系统,以及上述部件的辅助装置等。



标引序号说明：

1——施力杠杆；

2——测温传感器；

3——球试样；

4——盘试样；

5——盘固定架；

6——冷却水套；

7——驱动轴；

8——施力杆；

9——球固定架；

10——砝码托盘；

11——加热炉。

图 2 球-盘型高温摩擦磨损试验系统示意图

## 7.1.2 驱动系统

7.1.2.1 驱动系统包括驱动轴和电机,用于旋转盘试样的驱动系统能在产生的摩擦力影响下提供稳定的可控滑动速度。

7.1.2.2 驱动轴转速范围为 60 r/min~600 r/min。驱动系统应配备转数计数器或类似的装置,转速精度应不超过±1%。

7.1.2.3 应配备水冷却循环装置对驱动轴进行持续降温,保证驱动轴正常运转。

## 7.1.3 盘固定架

用于固定盘试样。盘固定架应在水平或垂直平面内旋转。转轴的同轴度应小于 0.02 mm,其轴向跳动应小于 0.05 mm。盘固定架宜为高温合金材料。

## 7.1.4 球固定架

用于固定球试样。在测试温度下,球固定架不应有变形,与球试样间不应有相对运动。球固定架宜为高温合金材料。

## 7.1.5 加载装置

用于将球试样推到盘试样上。加载装置应直接或通过杠杆、液压或气动系统对球固定架施加受控载荷。

## 7.1.6 摩擦力测量装置

摩擦力通过测力传感器、板弹簧变形或转动扭矩等测量。测量不应影响摩擦条件。摩擦力测量的精度应不超过所加载荷的±1%。摩擦力测量数据使用数据记录器或其他记录设备记录。

## 7.1.7 加热装置

7.1.7.1 用于快速加热并稳定试验气氛温度,加热炉内温度通过测温传感器测量,应符合:

- a) 在试验温度不大于 600 °C 时,温度允许偏差为±3 °C;
- b) 在试验温度大于 600 °C 但不大于 800 °C 时,温度允许偏差为±4 °C;
- c) 在试验温度大于 800 °C 但不大于 1 000 °C 时,温度允许偏差为±5 °C。

7.1.7.2 炉内空间应能容纳球、盘试样及其固定架、测温传感器。

## 7.1.8 控制和显示系统

电气控制和显示系统应满足试验精度要求,界面应具有试验参数设置、数据采集、存储和显示功能。当到达预设滑动距离或试验时间后,系统应自动停止试验。

## 7.2 体视显微镜

体视显微镜应符合 GB/T 19864.2 的精度要求。

## 7.3 放大镜

放大镜应符合 GB/T 20968 规定的不小于 4 倍的放大倍数。

## 7.4 测微显微镜

测微显微镜测量精度为 0.01 mm。

## 7.5 接触式轮廓仪

接触式轮廓仪应符合 GB/T 6062 的精度要求。可采用精度更高的非接触式轮廓仪,如三维白光干涉轮廓仪。

## 8 样品

### 8.1 通用要求

8.1.1 球和盘试样应能承受测试过程中施加的应力和温度,不应出现失效(如:过度弯曲、表面过度氧化)。

8.1.2 应提供试样尺寸、表面粗糙度、修复层厚度、硬度、基材相关信息。

### 8.2 球试样

8.2.1 球试样可为球体或端部加工成球帽的销,球体或销的直径应不小于 5 mm,宜为 6 mm 或 10 mm。

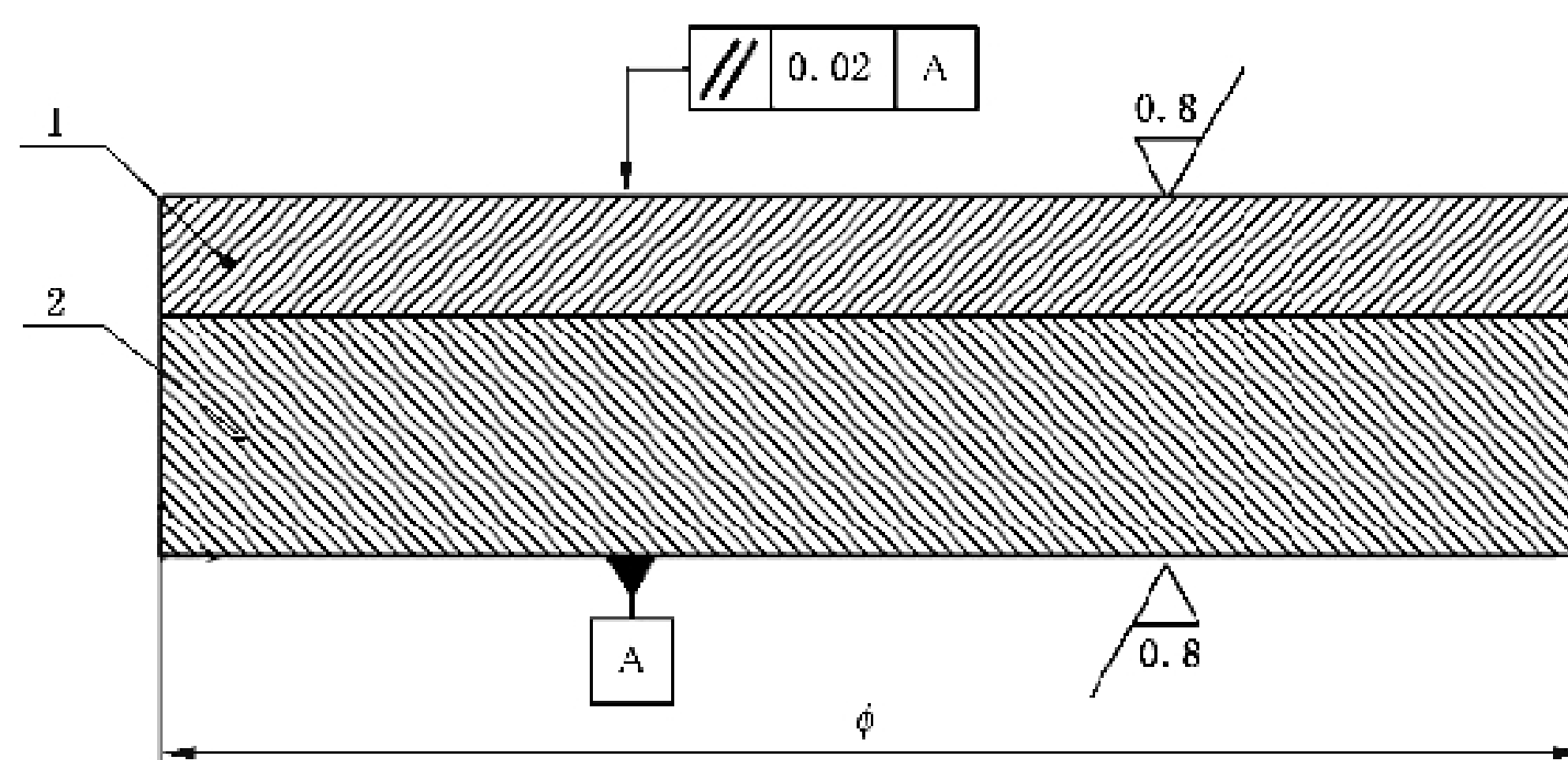
8.2.2 球试样的表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $0.8 \mu\text{m}$ 。

8.2.3 当球试样为激光熔覆修复层材料时,修复层厚度应不小于 2 mm。

### 8.3 盘试样

8.3.1 典型的盘试样直径范围为 30 mm~100 mm,厚度范围为 3 mm~10 mm,其中激光熔覆修复层厚度不小于 0.2 mm。盘试样剖面图见图 3。

单位为毫米



标引序号说明:

1——激光修复层;

2——基材。

图 3 激光修复盘试样剖面图

8.3.2 盘的表面应为平面,且上下两面的平行度公差应不大于 0.02 mm。

8.3.3 测试表面及下面基材的表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $0.8 \mu\text{m}$ 。

8.3.4 基材表面氧化膜在试验条件下不应脱落。针对可能出现的基材表面氧化严重或氧化膜脱落的情况,试验前应按照 GB/T 29037 的规定,在基材表面涂覆一层高温防护涂层。

## 9 试验程序

### 9.1 试验前试样准备

用丙酮、无水乙醇或其他无氯、不成膜的清洗剂和溶剂(6.2)超声清洗试样至少 10 min,直至试样表面清洁。对试样进行彻底干燥,消除所有可能残留在试样上的清洗液。

### 9.2 磨损试验准备

9.2.1 将盘试样牢固地固定在盘固定架(7.1.3)上。

9.2.2 将球试样牢固地固定在球固定架(7.1.4)上。

9.2.3 设定试验条件(5.1)。

9.2.4 轻轻地使球和盘接触,然后施加设定的载荷。

9.2.5 启动加热装置(7.1.7),待试验气氛温度升至设定的温度,并在 7.1.7 要求的允许偏差范围内稳定 10 min。

9.2.6 启动驱动系统(7.1.2),以设定的试验条件(9.2.3)旋转盘试样,开始试验。

### 9.3 摩擦力测量

在试验过程中,使用摩擦力测量装置(7.1.6)连续测量摩擦力并记录测量数据。

### 9.4 试验后的磨痕形貌观察

9.4.1 经规定的滑动距离或时间后,关闭驱动系统电机电源、加热装置电源。待试验气氛降至室温后,取出试样。

9.4.2 应收集盘试样上的磨屑,以便进一步分析。

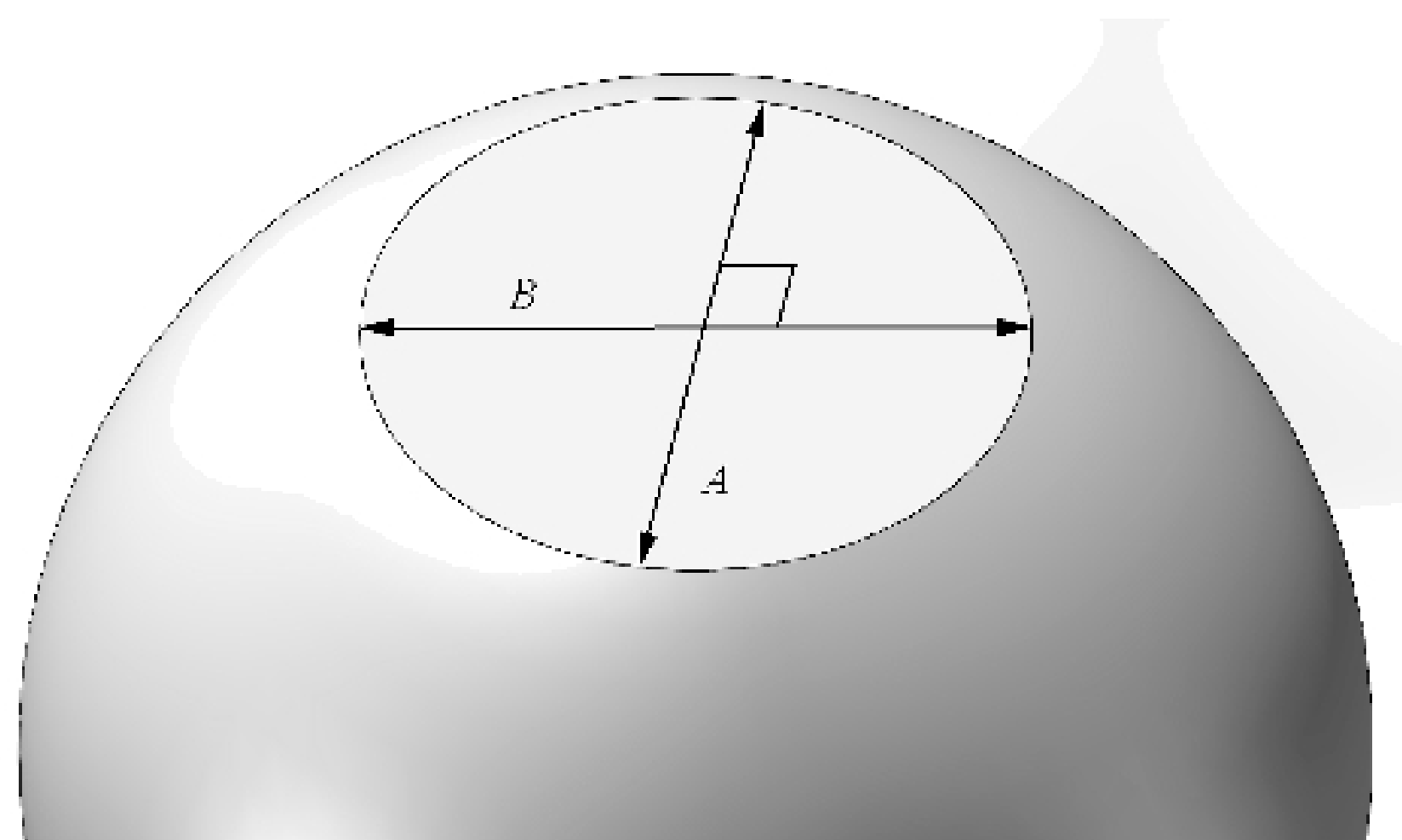
9.4.3 对试样进行与 9.1 相同的清洗处理。

9.4.4 使用体视显微镜(7.2)或不小于 4 倍的放大镜(7.3)观察磨痕形貌特征。在可能情况下,用体视显微镜对磨痕形貌进行拍照。

### 9.5 球试样磨痕测量

试验完成后,球试样上会有一个大致圆形的磨痕,如图 4 所示。用测微显微镜(7.4)测量最小直径  $A$  和与其垂直方向的直径  $B$ 。





标引说明：

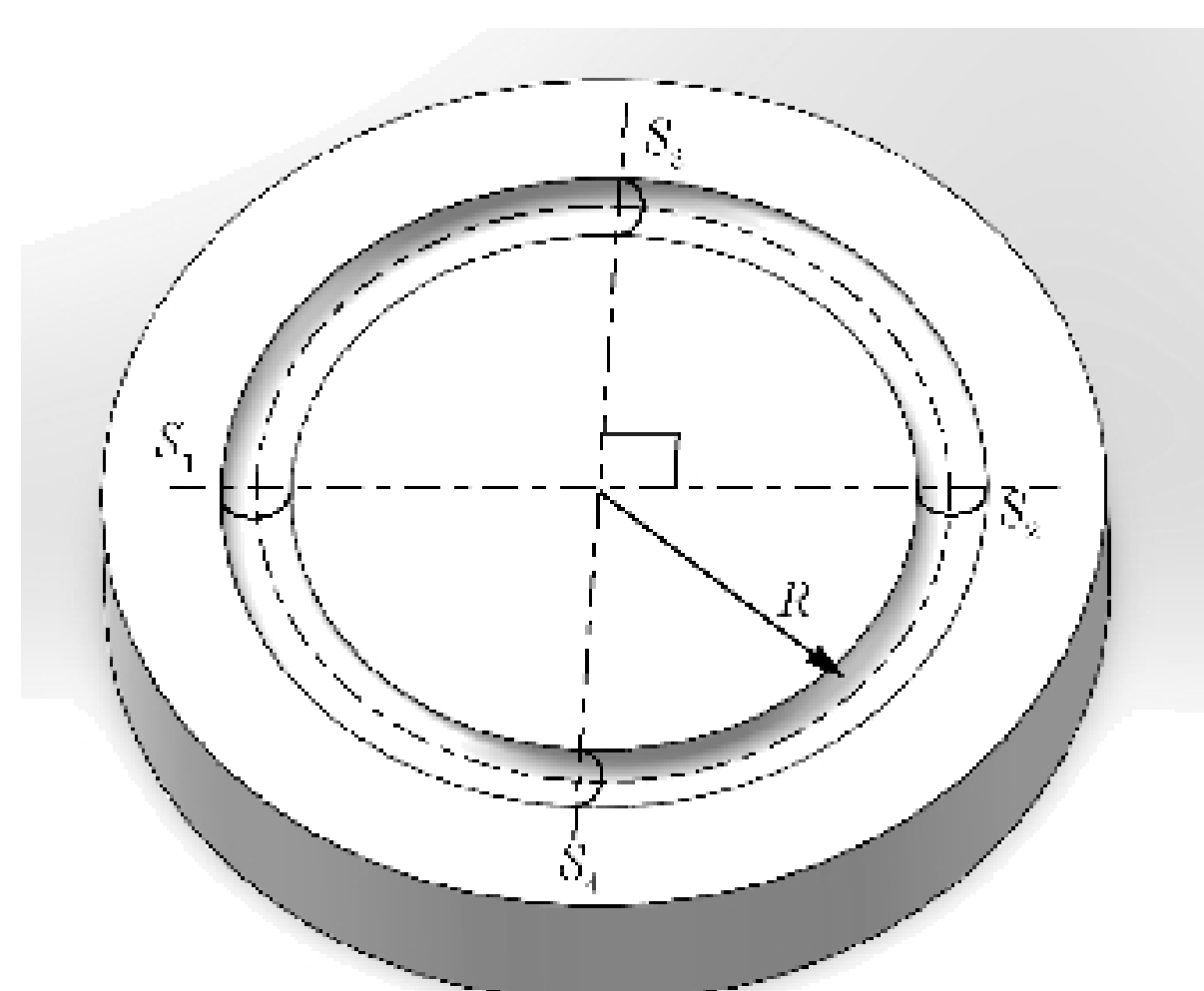
$A$ ——最小直径；

$B$ ——垂直直径。

图 4 球试样上的磨痕

#### 9.6 盘试样磨痕测量

试验完成后，盘试样上会出现一圆形磨损痕迹，如图 5 所示。使用接触式轮廓仪(7.5)或类似的仪器，以  $90^\circ$  为间隔，在四个位置测量磨痕的横截面积，并计算磨痕在每个位置的横截面面积( $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ )。图 6 为一个典型盘试样磨痕横截面轮廓，其磨损横截面积应为  $S$ 。

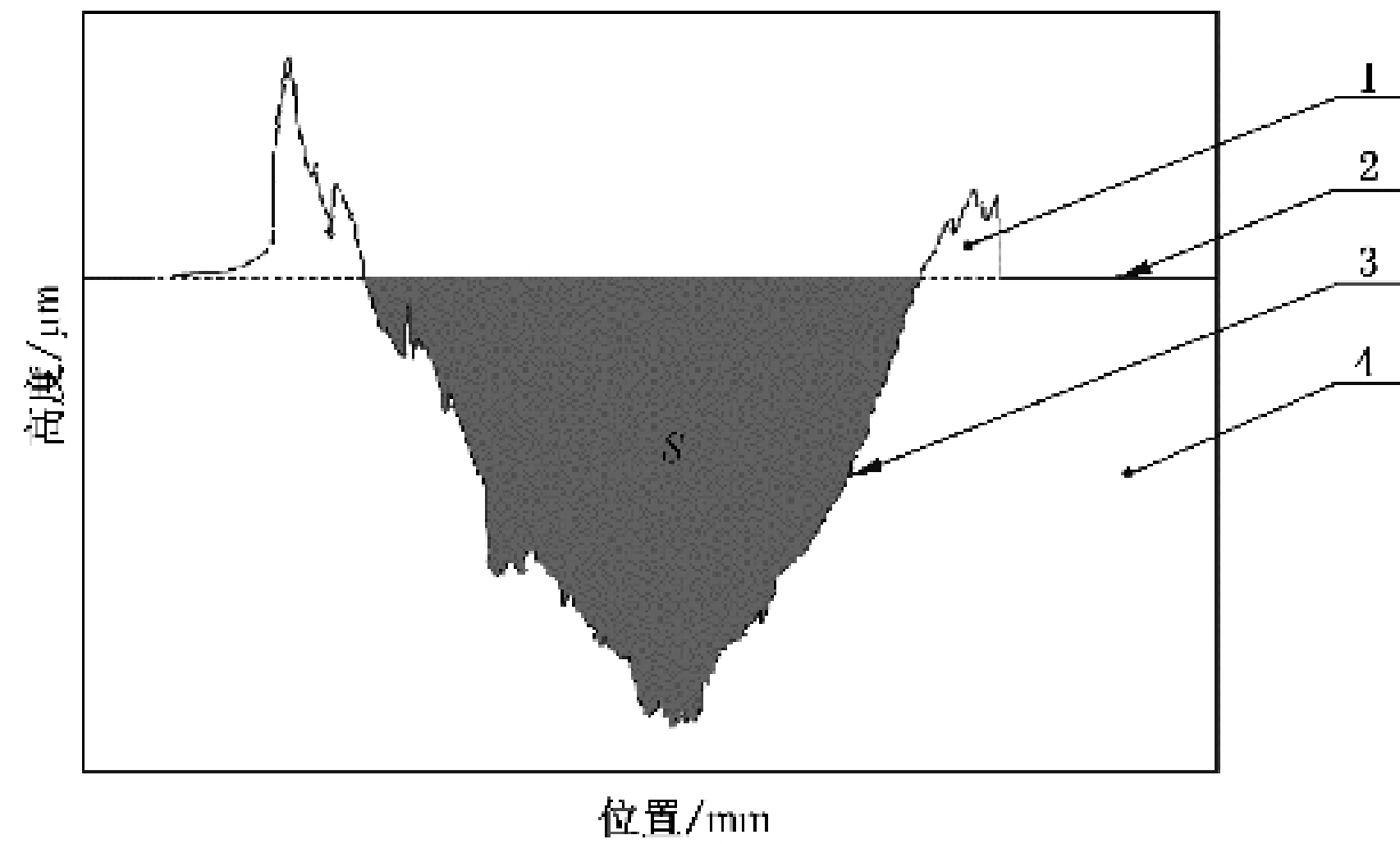


标引序号说明：

$R$  ——半径；

$S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  ——四个位置的横截面积。

图 5 盘试样磨痕



标引序号说明：

- 1——磨屑黏连；
- 2——修复层表面；
- 3——磨痕横截面轮廓；
- 4——修复层；
- S——修复层磨痕横截面积。



图 6 盘试样磨痕横截面轮廓及横截面选取

### 9.7 试验重复次数

在相同的试验条件下,至少重复三次试验。

## 10 试验结果计算

### 10.1 球试样的比磨损率

#### 10.1.1 磨损体积

##### 10.1.1.1 磨痕比较规则时的磨损体积

根据 9.5 测量的磨痕最小直径和与其垂直方向的磨痕直径,利用公式(2)计算球试样的磨损体积:

$$V_b = \frac{\pi A^3 B}{32d} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- $V_b$  ——球试样的磨损体积,单位为立方毫米( $\text{mm}^3$ );
- $A$  ——磨痕的最小直径,单位为毫米(mm);
- $B$  ——垂直于最小直径方向的直径,单位为毫米(mm);
- $d$  ——球试样直径,单位为毫米(mm)。

##### 10.1.1.2 磨痕不规则或磨痕很小时的磨损体积

当出现下列情况,应使用接触式轮廓仪(7.5)或类似仪器精确测量磨痕轮廓,得到磨痕的磨损体积。

- a) 球磨痕形状因盘试样上的磨痕较大而发生翘曲( $B > 1.5A$ );
- b) 球磨损很少,或者磨痕被任何磨损期间形成的固体膜所覆盖;
- c) 球磨损量少且磨痕不平整。

### 10.1.2 比磨损率

球试样的比磨损率由公式(2)中的  $V_b$  或用轮廓测量法测量的  $V_b$  通过公式(3)求得:

$$W_{s,b} = \frac{V_b}{F \times L} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$W_{s,b}$ ——球试样的比磨损率,单位为立方毫米每牛顿米[ $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ];

$V_b$  ——球试样的磨损体积,单位为立方毫米( $\text{mm}^3$ );

$F$  ——施加的载荷,单位为牛顿(N);

$L$  ——滑动距离,单位为米(m)。

## 10.2 盘试样的比磨损率

### 10.2.1 磨损体积

#### 10.2.1.1 磨痕横截面相近时的磨损体积

当 9.6 测量中的最大横截面积与最小横截面积之比不大于 1.5 时,采用公式(4),计算盘试样的磨损体积:

$$V_d = \frac{\pi \times R(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)}{2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

$V_d$  ——盘试样的磨损体积,单位为立方毫米( $\text{mm}^3$ );

$R$  ——磨痕半径,单位为毫米(mm);

$S_1, S_2, S_3, S_4$  ——磨痕圆上四个位置的横截面积,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ )。

#### 10.2.1.2 磨痕横截面积相差较大时的磨损体积

当 9.6 测量中的最大横截面积与最小横截面积之比大于 1.5 时,可根据磨痕宽度和/或深度,将磨痕分为  $n$  个区,分别测量第  $i$  区( $i=1, 2, \dots, n$ )内至少两个有代表性位置的磨痕横截面积  $S_{i1}, S_{i2}$  (第  $i$  区中最大横截面积与最小横截面积之比不大于 1.2) 和第  $i$  区内磨痕长度  $L_i$ , 取算术平均值, 则:

$$V_d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} [(S_{i1} + S_{i2}) \times L_i] \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

$V_d$  ——盘试样的磨损体积,单位为立方毫米( $\text{mm}^3$ );

$R$  ——磨痕半径,单位为毫米(mm);

$S_{i1}, S_{i2}$  ——磨痕圆上第  $i$  区中两个位置的横截面积,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ );

$L_i$  ——第  $i$  区内磨痕长度,单位为毫米(mm)。

### 10.2.2 比磨损率

盘试样的比磨损率由公式(4)或公式(5)中的  $V_d$  通过公式(6)求得:

$$W_{s,d} = \frac{V_d}{F \times L} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

$W_{s,d}$ ——盘试样的比磨损率,单位为立方毫米每牛顿米[ $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ];

$V_d$  ——盘试样的磨损体积,单位为立方毫米( $\text{mm}^3$ );

$F$  ——施加的载荷,单位为牛顿(N);

$L$  ——滑动距离,单位为米(m)。

### 10.2.3 不适应条件

如果被测的盘和球试样之间有明显的物质转移而没有从系统中损失,那么体积损失可能不能充分反映磨损的实际数量或严重程度。在这种情况下,不应使用这种评价耐磨性的试验方法。

### 10.3 摩擦系数

利用公式(7),由施加的载荷和摩擦力的平均值计算摩擦系数。

$$\mu = \frac{\overline{F_f}}{F} \dots\dots\dots(7)$$

式中:

$\mu$  ——摩擦系数,无量纲量;

$\overline{F_f}$  ——摩擦力的平均值,单位为牛顿(N);

$F$  ——施加的载荷,单位为牛顿(N)。

由于摩擦系数通常随滑动距离的变化而变化,因此,在可能的情况下,宜确定并报告摩擦系数的初始值、稳态值、最大值和最小值。

### 10.4 数值修约

比磨损率和摩擦系数应按照 GB/T 8170 规定,以 2 位有效数字表示。

## 11 试验报告

试验报告应包含但不限于以下信息。

- a) 试验材料的描述。
- b) 磨损试验装置规格(圆盘驱动方式、圆盘转动方向、加载方式、摩擦力检测方式、温度控制方式等)。
- c) 试验条件(载荷、滑动速度、滑动圆直径、圆盘转速、滑动距离、温度、摩擦介质或气氛等)。
- d) 每个单独试验应报告下列项目:
  - 1) 试验温度及其范围,试验机放置房间温度、湿度及其范围;
  - 2) 球和盘试样的尺寸,激光修复层厚度;
  - 3) 球试样的磨损体积,并由此计算出的比磨损率;
  - 4) 盘试样的磨损体积,并由此计算出的比磨损率;
  - 5) 初始、稳态、最大和最小摩擦系数(条件许可时);
  - 6) 试验后的试样描述,包括球和盘试样磨损情况、氧化情况以及磨痕两侧凸起、磨屑黏连等情况,磨痕照片(条件许可时);
  - 7) 其他需要说明的事项,特别是关于试验状态的描述。

若需要相同试验条件下的代表值,对于比磨损率,则应取各值的算术平均值;对于摩擦系数,则应取各稳态值的算术平均值。





参 考 文 献

- [1] ISO 20808:2016 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics)—Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method
- 





