

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.005

带有测温系统的液固两相流旋转冲蚀试验装置^{*}

李 平 彭学周

(河南理工大学 材料科学与工程学院 焦作 454000)

摘要:液固两相流冲蚀磨损过程中,固体颗粒的动能部分转化为热能,使过流部件和料浆液温度升高,冲刷磨损与摩擦热使过流部件材料的磨损速度与腐蚀速度都加快,共同加剧过流部件的损坏,在高速冲蚀磨损条件下,摩擦热效应的影响应引起高度重视。针对目前液固两相流冲蚀磨损试验装置缺乏试样温度实时测试的问题,自行设计研制了一种带有测温系统的旋转式冲蚀磨损试验装置。在被冲蚀试样表面附近、中心和背面附近位置开孔,插入热电偶,通过导线与温度传感器和计算机联接,在线测试并绘制冲蚀磨损过程中试样不同部位的温度变化曲线,具有结构简单、操作便利、数据稳定可靠、直观性好的特点。本装置可以模拟湿法冶金、化工、采矿、水电等冲蚀磨损工况条件,特别是分析测试冲蚀磨损过程中摩擦热量在试样中的产生、传递及其对试样冲蚀磨损特性的影响。

关键词:测温系统;液固两相流;冲蚀磨损;试验装置;温升;磨损率

中图分类号: TH81; TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.2010

Development of a rotary erosion-wear test apparatus with temperature measurement system for liquid-solid two-phase flow

Li Ping Peng Xuezhou

(School of Material Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: During liquid-solid two-phase flow erosion wear, part kinetic energy of solid particle convert into heat energy, it makes temperature of flow component and slurry rise, erosion wear and friction heat accelerate the corrosion rate and the wear rate of flow components material, they speed up the damage of flow component. Under the condition of high speed erosion wear, the friction heat effect should be attracted more attentions. In this paper, a rotary erosion wear test apparatus with temperature measurement system is self-designed and developed to carry out real-time measurement of sample temperature during liquid-solid two-phase flow erosion wear test. Three holes were machined near the surface, center, and near the back of the sample for erosion wear test, three thermocouples were inserted and connected to the temperature sensor as well as computer through the wires, thus it can online measure and draw temperature curve of different parts of the sample in the process of erosion wear test. The apparatus has many advantages such as simple structure, convenient operation, stable and reliable data, and good visual features. This device can simulate erosion wear working conditions of wet metallurgy, chemical, mining, hydropower and so on, especially measurement and analysis on generation and transfer of sample friction heat as well as its influence on erosion wear characteristics.

Keywords: temperature measurement system; liquid-solid two-phase flow; erosion wear; testapparatus; temperature rise; wear rate

1 引言

液固两相流(料浆)冲蚀磨损现象普遍存在于湿法

冶金、石油化工、采矿、水电及船舶等行业中^[1-7],由于冲刷磨损和腐蚀之间存在交互作用,通常其材料流失速率比纯腐蚀和纯冲刷磨损之和要大得多,其危害比单一腐蚀或单一冲刷磨损更严重,是引起各种料浆泵、阀、管道

等过流部件快速损坏的重要原因^[8]。

当料浆冲蚀速度增大时(相同冲击角度的情况下),颗粒的撞击总能量增大^[9],动能转化为摩擦热能的部分也增大,摩擦热能主要向靶材(过流部件或试样)及流体(料浆)介质传递,使靶材及介质温度升高。研究表明,在静态料浆介质中,介质温度升高,材料的腐蚀速率增大^[10]。在流动状态下,介质温度对材料的腐蚀速率和冲蚀磨损总量的影响更大;温度升高,流体介质的粘度(阻力)减小^[10],流体中固体颗粒冲刷靶材的数量和作用力增大,加剧靶材的腐蚀速度和材料表面弱化^[11],在流体(料浆液)的连续强烈冲刷作用下,材料磨损速度加快,即高速冲蚀导致料浆介质温度升高,冲刷磨损与摩擦热共同加剧材料腐蚀,使过流部件材料的腐蚀速度与磨损速度都加快^[11-12],当冲蚀速度和流体温度同时增大时,材料的冲蚀磨损总量显著增大^[13]。因此,在高速冲蚀磨损条件下,摩擦热效应的影响应引起高度重视。

冲蚀磨损装置主要有旋转式^[1, 5, 7]、喷射式^[3, 4]和管流式^[6]3种,这3种试验装置各有特色及优缺点,适用于不同多相流、两相流或单相流冲蚀磨损工况条件。其中,旋转式试验装置适用于模拟和分析料浆泵叶轮、搅拌桨等旋转部件在稀料浆或单相流体中的冲蚀磨损行为,且旋转法具有设备简单、成本低、实验周期短等优点,旋转式试验装置依据试样的安装方式主要有旋转盘、旋转轴和旋转圆筒3种^[1, 5-7]。国内外一些研究者设计制造了旋转式冲蚀磨损试验装置,对冲蚀磨损过程中腐蚀因素(电化学测试)、磨损因素、冲蚀磨损机理以及靶材优化设计等进行了系统研究,但大多试样处于旋转状态^[1, 5-7, 14-15],难以进行冲蚀磨损过程中试件不同部位温度的实时测试分析,无法揭示冲蚀磨损过程中摩擦热量产生与传递规律,以及其对试件材料的冲蚀磨损影响机制。本文设计研制了一种带测温系统的旋转冲蚀试验装置,该装置被测试样(靶材)处于静止方式,电机带动转轴旋转,利用叶轮搅动料浆对试样进行高速冲蚀,为了研究冲蚀磨损过程中摩擦热在试样中的传递规律,在试样冲蚀表面附近、中心位置和内部等处钻孔,分别插入热电偶,然后外接温度传感器,通过计算机记录不同时刻、不同部位温度的变化情况,料浆介质的温度变化也可同时测量得到。该装置可以模拟冶金、石化、煤矿和水力水电等实际工况环境,如料浆泵叶轮、管道、挡板等过流部件的冲蚀磨损,测试冲蚀过程中瞬态温度变化特性,揭示温度与冲蚀磨损之间的影响机制。

2 实验装置工作原理及其组成

2.1 设计思路

旋转式冲蚀磨损过程中,包含固体颗粒的流体(料

浆)在旋转轴(盘)的搅拌作用下,流体作高速运动,颗粒与旋转轴(盘)和料浆罐及流体间剧烈撞击,产生摩擦热和磨损效应。摩擦热传递到试样、流体、旋转轴(盘)和料浆罐中,使试样、流体、旋转轴(盘)和料浆罐的温度升高。通过测试试样、流体、旋转轴(盘)和料浆罐的温度变化,可以更好地研究摩擦热对被测试样的冲蚀磨损作用机制。摩擦热的多少取决于颗粒的动能,颗粒的动能部分转化为热能。而颗粒的动能与流体中的固体颗粒撞击次数、冲刷速度、质量有关^[9]:

$$E = \frac{Nmv^2}{2} \quad (1)$$

式中: E 为撞击到被测试样表面的固体颗粒动能, N 为单位时间内颗粒撞击试样的次数, m 为颗粒的平均质量, v 为颗粒的速率。

旋转轴(盘)的现有的旋转式冲蚀磨损试验装置,被测试样通常安装在旋转轴(盘)上,与旋转轴(盘)一起作高速运动,通过一定的试验时间后测量试样的冲蚀磨损量、观测表面磨痕,分析冲蚀磨损机理。由于试样作高速运动,在试样上安装热电偶外接导线到显示仪器上,测试表征冲蚀磨损过程中瞬态温度存在较大难度。

2.2 工作原理

包含固体颗粒的高速运动的流体与被测试样、旋转轴(盘)和料浆罐剧烈撞击过程中,部分动能转化为热能,使试样、旋转轴(盘)和料浆罐温度升高,热量从试样被撞击面向另一侧传递,形成被撞击表面高的温度梯度,通过在试样被撞击表面附近、试样心部和背面安装热电偶,然后通过导线外接到数字显示仪表上,可以检测试样不同部位的温度变化情况。

被测试样温度的变化与料浆的流速、固体颗粒质量和冲击角度等有关,通过调整电机转速可以得到不同的料浆流速,调整颗粒种类、粒度和加入量可以研究不同液固比料浆的冲蚀磨损规律,被测试样的冲击角度可以通过料浆罐盖板上的角度表盘在0°~90°内进行调整。通过改变不同实验参数研究高速冲蚀磨损过程中摩擦热的产生、传递规律,从而为研究冲蚀磨损过程中的材料损伤机理提供帮助。

2.3 装置组成

实验装置主要包括旋转控制系统(电机、驱动机构及旋转轴)、搅拌叶轮、水槽、料浆罐、循环冷却水容器,试样及保温套、测温系统和计算机,其结构如图1所示。试验装置按功能可分成旋转系统、料浆罐、试样及测试系统、冷却系统等4部分。

2.3.1 旋转系统

旋转系统主要由电机、主轴驱动、机架、旋转轴和搅拌叶轮等组成,电机设置在旋转轴的顶部,可以通过带有

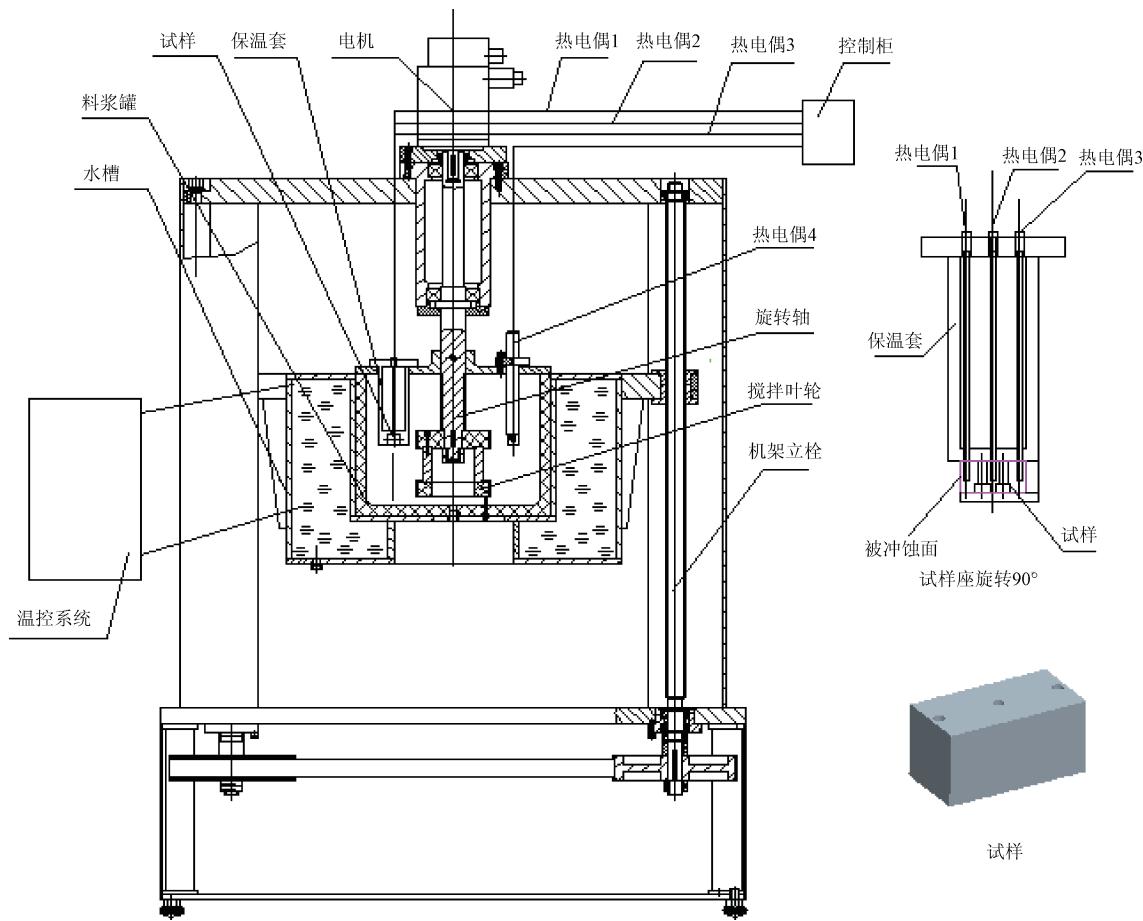


图1 冲蚀实验装置示

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

数字显示仪表的控制柜中的转速控制旋钮实现无级调速,转速、转数及试验时间可通过控制柜显示控制,通过改变旋转轴转速的方式达到改变料浆冲蚀速度的目的,在旋转电机下部的旋转轴设置了搅拌叶轮,防止固体颗粒沉降到料浆罐底部,叶轮采用耐酸碱盐腐蚀性好、耐冲刷磨损的材料,大多选用不锈钢,为减轻叶轮重量,本系统改用聚四氟乙烯材料;试样距离料浆罐底部的距离可以通过机架立柱调整。

2.3.2 料浆罐容器系统

料浆罐主要由罐体和盖板组成,料浆罐材料采用耐腐蚀不锈钢板。试验前打开盖板,将配置好的料浆液加入罐内,将被测试样安装固定在罐盖板上,放上盖板拧紧压盖固定好,实验完毕后浆罐浆液可通过罐体底部手阀放掉。

2.3.3 试样及测试系统

如图1所示,在料浆罐中放置待测试样(本文采用尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 长方体形状试样),待测试样仅一个表面($20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$)裸露在外,另外五个面均采用聚四氟乙烯隔热套密封。在待测试样的前端(距被

冲蚀表面 2 mm)、心部和后端(距待测试样后表面 2 mm)开孔,分别插入热电偶1、热电偶3和热电偶3,在料浆罐中的另一侧放入热电偶4,4个热电偶通过导线连接到带有数字显示仪表的控制柜上,测试冲蚀磨损过程中试样不同部位和料浆液的温度变化情况。

2.3.4 温控系统

温控系统可根据试验目的和要求确定是否开启。温控系统主要包括水箱、电机、温控仪组成。水箱中的水通过进水管和出水管与电机构成循环回路,实验前,向电机水槽中加入所需的循环水。试验开始后,打开出水阀和进水阀,开启循环泵,水温可以通过控制系统中的温度调整和显示仪进行调整和显示。

3 实验方法

3.1 试样材料及试样制备

本文采用2Cr13不锈钢材料试样对研制的试验装置的运行和测量可靠性进行了实验验证,2Cr13不锈钢的化学成分如表1所示。采用淬火和回火处理后的金相组

织如图2所示,组织为板条状马氏体和渗碳体。将不锈钢长条样块线切割成20 mm×20 mm×40 mm的冲蚀磨

损试样,试样被冲蚀表面依次用180~1200号砂纸打磨,然后抛光。

表1 2Cr13的化学成分
Table 1 Main chemical compositions of 2Cr13

C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Cr	Nb	Mo	Fe	(wt%)
0.177	0.93	0.50	0.023	0.001	0.29	0.022	0.14	12.25	0.008	0.016	balance	



图2 2Cr13的金相组织

Fig. 2 The microstructure of 2Cr13

3.2 试样清洗及称重

抛光过的试样采用超声波清洗机清洗烘干,然后采用精度为0.1 mg的电子分析天平称重,冲蚀磨损试验后,用同样的方法清洗然后称重,实验前和实验后的重量差值即试样的磨损失重量。

3.3 料浆的配置

料浆是由不同粒度的砂(如石英等,本文采用的是石英砂)、水和酸碱盐按一定的比例配制而成,固体颗粒石英砂在料浆中的浓度采用质量百分比浓度C来表示:

$$C = \frac{m}{M} \quad (2)$$

式中:m为石英砂的质量,M为料浆的总质量。

根据料浆罐容量,本文实验时料浆的总体积为8 L,石英砂的加入量通常采用质量百分比浓度如wt%、kg/m³或kg/L等方式。石英砂的颗粒形状和粗细也可根据需要来选取,砂的粗细通常采用平均粒径来表示^[4-5, 8, 12, 15],也可以采用各标准筛网上颗粒分布或目数如10~20目、20~40目、40~70目等方式来表^[3, 9, 13, 15]。酸碱盐大多采用摩尔浓度(mol/L)来表示,也可采用重量百分比(wt%)来表示的。

3.4 旋转系统的转速

旋转系统可以在0~1 450 r/min范围内进行无极调速,从而改变料浆对试样的冲击速度。通过改变电机转

速来研究转速(料浆冲蚀速度)对冲蚀磨损过程中试样温度和磨损率的影响,本文中选用了800、1 000、1 200 r/min三种转速进行试验。

3.5 失重法和磨损表面形貌观察

试样经过冲蚀磨损后的磨损量可以通过试样前后重量之差(失重量)来计算,试样的冲蚀磨损率定义为:

$$E = \frac{\Delta m}{At} \quad (3)$$

式中:E为试样的冲蚀磨损率,Δm为试样的冲蚀磨损量,A为试样冲蚀磨损面的面积,t为试样冲蚀磨损的时间。本文中试样的冲蚀磨损面积A为20 mm×20 mm,为一定值。冲蚀磨损试验后,试样再进行清洗,吹干,称重后,采用金相显微镜观察冲蚀磨损试验后表面的磨痕。

4 实验结果及分析

4.1 数据稳定性验证

使用研制的该装置进行冲蚀磨损过程中,可以实时监测试样的前(靠近裸露面)、中、后3个位置热电偶和料浆中热电偶温度的温度变化情况。为了验证实验装置测温系统的稳定性,采用以下条件进行了5次试验^[16]:料浆为石英砂质量百分比浓度C为0.15、石英砂粒度为20~40目、硫酸浓度为0.2 mol/L,冲蚀磨损时间t为1 h,电机转速为800 r/min。5次试验中试样前、中、后3个位置和料浆中的温度变化曲线如图3所示,由图3可以看出,虽然起始温度稍有差异,但冲蚀磨损过程中,试样的温度上升趋势基本相同。5次实验的温升情况如表2所示,5次试验的试样材料的磨损率如表3所示。采用以下方差表达式分析温升和磨损率数据的波动性^[17]:

$$\omega = \frac{\sigma}{\bar{\omega}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\omega} - \omega_i)^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n} \quad (6)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为试验的平均温升/磨损率, ω_i 为每次试验的温升/磨损率,n为试验次数, σ 为温升/磨损率的方差。

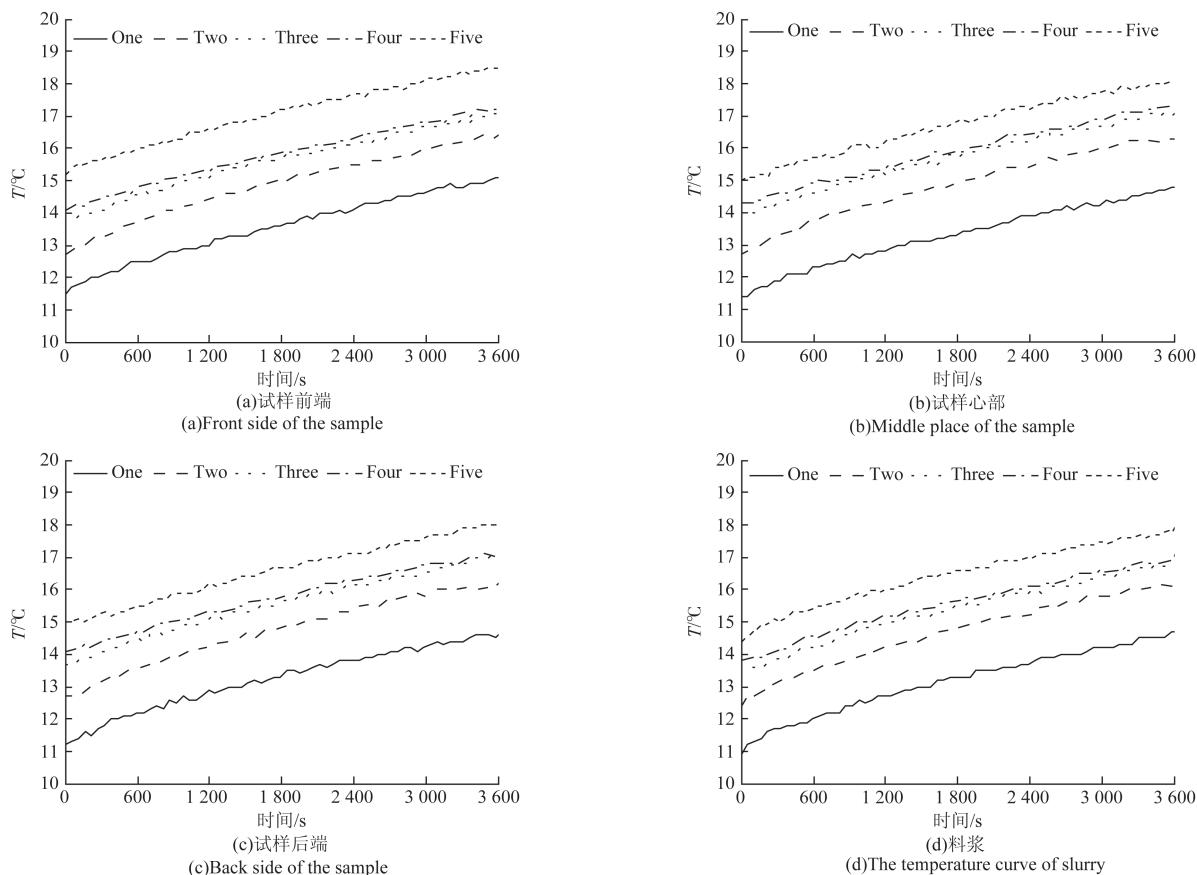


图3 5次实验的温度图

Fig. 3 The temperature curves of the five tests

表2 温升的重现性测试数据

Table 2 Reliability test results of temperature rise

	$\Delta T/^\circ\text{C}$					$\bar{\omega}/^\circ\text{C}$	$\sigma/^\circ\text{C}$	$\omega/\%$
	1	2	3	4	5			
试样前端	3.6	3.7	3.5	3.2	3.3	3.46	0.207	5.98
试样心部	3.4	3.6	3.4	3	3.1	3.30	0.245	7.42
试样后端	3.4	3.5	3.4	3	3	3.26	0.241	7.39
料浆	3.8	3.8	3.6	3.3	3.5	3.60	0.212	5.89

表3 试样的磨损率重现性试验数据

Table 3 Reliability test results of wear rate for samples

	磨损率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$					$\bar{\omega}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$\sigma/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$\omega/\%$
	1	2	3	4	5			
2Cr13	80.75	83	81.75	83.5	84.5	82.70	1.473	1.78

从表2的5次试验的试样前、中、后3个位置和料浆中的温升分析结果可以看出,温升试验相对误差在5.89%~7.42%,通常磨损试验数据的置信区间宽度小于10%即为重现性良好^[18-19],表明实验装置测温系统的稳定性高;同时可以看出,每次试验中料浆温升最高,其

次为试样靠近冲刷面处,试样中、后两个位置温升稍低。由表3可以看出,5次试验的试样材料的磨损率相对误差为1.78%,也验证了试验装置测试结果的稳定性和可靠性高、重复性好。

4.2 冲击速度对温升和冲蚀磨损率的影响

为了进一步验证试验装置的稳定性,研究了冲击速度对温升和冲蚀磨损率的影响。电机转速分别为800、1 000、1 200 r/min(料浆液配比相同,石英砂加入量C为15%、石英砂颗粒为20~40目、硫酸浓度为0.2 mol/L)。在3种不同的转速下,试样中正面、中间、背面3个测试点与料浆的温升和磨损率如图4和5所示。由图4可以看出,随着电机转速的提高,试样与料浆的温升呈明显增加的趋势,表明系统产生的摩擦热随着电机转速的提高而显著增加;由图5可以看出,随着电机转速的提高,试样的磨损率也增大,料浆对试样表面的冲蚀作用加剧。

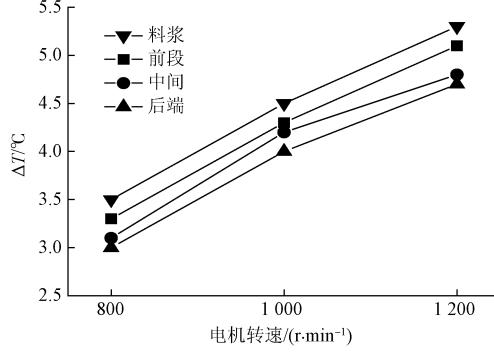


图4 冲击速度对温升的影响

Fig. 4 Effect of impact velocity on temperature rise

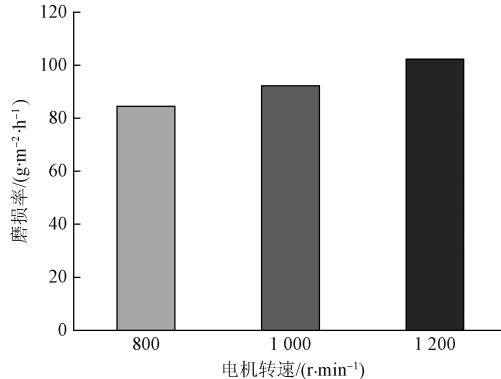


图5 冲击速度对试样磨损率的影响

Fig. 5 Effect of impact velocity on wear rate of sample

4.3 冲蚀磨损机理分析

由图3中可以看出,随着冲蚀磨损时间的推移,试样的正面、中间、背面和料浆的温度都不断上升,从表2中可以看出,经过1 h的冲蚀磨损后,料浆温升最高,其次为试样靠近冲刷面处,试样中、后两个位置温升稍低。在冲蚀磨损过程中,旋转轴带动叶轮高速转动,搅动带有固体颗粒的流体(料浆)作圆周运动,固体颗粒撞击不锈钢料浆罐与试样,动能部分转化为热能,由于试样仅20 mm×20 mm一个表面裸露在料浆液中,相对料浆罐

内表面与料浆液接触的面积来说要小得多,因此料浆中固体颗粒撞击料浆罐内表面的机会或数量(用 $N_{罐}$ 表示)比撞击试样表面的数量(用 $N_{样}$ 表示)要多得多,即式(1)中的N值: $N_{罐} \gg N_{样}$ 。由于本装置搅拌叶轮材料为聚四氟乙烯塑料材料,料浆罐材料为304不锈钢,试样为2Cr13不锈钢(除裸露一个表面外,其余均用塑料材料密封),304不锈钢的 λ 在15 W·m⁻¹·K⁻¹左右^[20-22],2Cr13不锈钢的 λ 为22 W·m⁻¹·K⁻¹左右,聚四氟乙烯的 λ 为0.2 W·m⁻¹·K⁻¹左右^[23],SiO₂砂粒的 λ 为7.6 W·m⁻¹·K⁻¹左右,水的 λ 一般为0.5~0.7 W·m⁻¹·K⁻¹(与温度、压力等有关),空气的导热系数一般为0.01~0.04 m⁻¹·K⁻¹(与温度、湿度等有关),可以看出颗粒撞击料浆罐的能量远大于颗粒撞击试样的能量,因此冲蚀磨损过程中动能转化为热能主要来自石英砂颗粒对料浆罐壁的冲刷作用,其次为砂粒间的互相撞击,再次为砂粒对试样表面的撞击,砂粒撞击料浆罐壁和砂粒间互相撞击的动能转化为热能向料浆液和罐壁外侧传递,因此料浆的温升最明显,砂粒对试样表面的撞击使试样表面温度升高,继而热量向试样内部扩散传递,因而出现图3所示试样前端温度高、中间次之,背面较低的现象。

随着冲击速度的提高,试样裸露表面收到砂粒的撞击作用增强,在旋转轴速度增加到某一值时,表面温度会急剧升高,产生非常高的瞬时温度,试样表面产生的冲蚀磨损热量部分向试样内部传递外,随着料浆液的冷却作用,表面瞬时高温随即降低,产生所谓“闪温”现象(只是由于前端热电偶1距离冲刷表面2 mm,不易测试出瞬时高温的“闪温”现象),即冲蚀磨损热量同时也向料浆液扩散,大部分热量传递到料浆液中。

5 结论

为研究液固两相流冲蚀磨损过程中的摩擦热现象,本文自行设计并研制了带有温度测试系统的旋转式冲蚀磨损试验装置。通过在被测试样冲刷表面附近、中心与背面位置及料浆罐中放置4个热电偶,热电偶通过导线连接到带有数字显示仪表的控制柜上,实时测试冲蚀磨损过程中试样不同部位和料浆的温度变化情况。

研制的该试验装置经试验测试,冲蚀磨损过程中的温度变化直观,温升试验相对误差在5.89%~7.42%,试样材料的磨损率相对误差为1.78%,试验数据稳定性高。

该试验装置可以模拟湿法冶金、化工、采矿、水电等液固两相流冲蚀磨损工况条件,特别是分析测试冲蚀磨损过程中摩擦热的产生与传递规律,研究材料冲蚀磨损机理及耐冲蚀磨损的过流部件材料的优化。

参考文献

- [1] LI P, CAI Q, WEI B. Failure analysis of the impeller of slurry pump used in zinc hydrometallurgy process [J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(6):876-885.
- [2] ARIELY S, KHENTOV A. Erosion corrosion of pump impeller of cyclic cooling water system [J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(6):925-932.
- [3] NEVILLE A, WANG C. Erosion-corrosion of engineering steels: Can it be managed by use of chemicals? [J]. Wear, 2009, 267(11):2018-2026.
- [4] ZHAO Y, ZHOU F, YAO J, et al. Erosion-corrosion behavior and corrosion resistance of AISI 316 stainless steel in flow jet impingement [J]. Wear, 2015, 328-329:464-474.
- [5] 黄伟九, 李志均, 王军军, 等. 锡黄铜在 3.5% NaCl 中的液固两相流冲蚀机理研究 [J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1):27-34.
- HUANG W J, LI ZH J, WANG J J, et al. Investigation of erosion mechanism of tin brass in 3.5% NaCl liquid-solid two phase flow [J]. Tribology, 2016, 36(1):27-34.
- [6] RAJAHRAM S S, HARVEY T J, WOOD R J K. Erosion- corrosion resistance of engineering materials in various test conditions [J]. Wear, 2009, 267(1-4):244-254.
- [7] 王勇, 邢建东, 马胜强, 等. Fe-B 合金在锌液中冲刷与腐蚀的交互作用 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7):92-97.
- WANG Y, XING J D, MA SH Q, et al. Erosion- corrosion interaction on Fe-B alloy in flowing liquid zinc [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(7):92-97.
- [8] WOOD R J K. Erosion-corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials [J]. Wear, 2006, 261(9):1012-1023.
- [9] HUSSAIN E A M, ROBINSON M J. Erosion-corrosion of 2205 duplex stainless steel in flowing seawater containing sand particles [J]. Corrosion Science, 2007, 49(4):1737-1754.
- [10] WANG Y, XING Z Z, LUO Q, et al. Corrosion and erosion-corrosion behaviour of activated combustion high- velocity air fuel sprayed Fe-based amorphous coatings in chloride-containing solutions [J]. Corrosion Science, 2015(98):339-353.
- [11] STACK M M, ABDELRAHMAN S M, JANA B D. Some perspectives on modelling the effect of temperature on the erosion-corrosion of Fe in aqueous conditions [J]. Tribology International, 2010, 43(12):2279-2297.
- [12] TIAN B R, CHENG Y F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil sand slurry. I: Effects of hydrodynamic condition [J]. Corrosion Science, 2008, 50(3):773-779.
- [13] RAJAHRAM S S, HARVEY T J, WOOD R J K. Full factorial investigation on the erosion-corrosion resistance of UNS S31603 [J]. Tribology International, 2010, 43(11):2072-2083.
- [14] 鲍崇高, 高义民, 邢建东. 水轮机过流部件材料的冲蚀磨损腐蚀及其交互作用 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11):66-70.
- BAO C G, GAO Y M, XING J D. Interaction between erosive-wear and corrosion of alloy materials for hydroturbine in hydroelectric station [J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2010, 44(11):66-70,118.
- [15] 李平, 蔡启舟, 魏伯康, 等. 时效处理温度对 17-4PH 铸造不锈钢在稀硫酸料浆中的冲刷腐蚀性能影响 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4):341-347.
- LI P, CAI Q ZH, WEI B K, et al. Effect of aging temperature on erosion-corrosion of 17-4PH casting stainless steels in dilute sulfuric acid slurry [J]. Tribology, 2006, 26(4):341-347.
- [16] 刘麟, 张志臣, 詹普杰, 等. 基于原位和 RNT 技术的摩擦试验机及其实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12):2873-2879.
- LIU L, ZHANG ZH CH, ZHAN P J, et al. Tribometer based on in-situ and radionuclide technique and its characteristic experiment study [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12):2873-2879.
- [17] 魏琪, 崔明亮, 冯艳玲, 等. 新型高温冲蚀磨损试验方法研究 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(5):21-24.
- WEI Q, CUI M L, FENG Y L, et al. Research of new test method for high temperature erosive wear [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(5):17-20.
- [18] 偶国富, 叶健, 章利特, 等. 一种旋转式液固两相流冲蚀磨损试验装置的研制 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(13):1705-1709.
- OU G F, YE J, ZHANG L T, et al. Development of a rotary apparatus for liquid-solid two phase flow erosion wear [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(13):1705-1709.
- [19] 刘春, 杜云. 基于 EMD 分解在电火花数据分析的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5):731-738.
- LIU CH, DU Y. Application of EMD-based decomposition in electric spark data analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(5):731-738.
- [20] 蔡敏, 范海林, 林喜乐, 等. 304 不锈钢复合电镀镍-膨胀石墨导热性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6):

62-69.

CAI M, FAN H L, LIN X L, et al. Thermal conductivity of Ni-expanded graphite composite plating on surface of 304 stainless steel [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6):62-69.

[21] 刘发兰,赵树森,高文焱,等.基材属性对Ni60A-WC激光熔覆涂层性能的影响[J].中国有色金属学报,2014,24(5):1319-1326.

LIU F L, ZHAO SH S, GAO W Y, et al. Effect of substrate on Ni60A-WC laser cladding coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24 (5): 1319-1326.

[22] 王厚勤,张秉刚,王廷,等.电子束定点焊接304不锈钢熔池流动行为数值模拟[J].焊接学报,2016,37(3):57-61.

WANG H Q, ZHANG B G, WANG T, et al. Numerical simulation of molten pool flow behavior in stationary electron beam welding of 304 stainless steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(3):57-61.

[23] 游媛媛,袁颖.复配偶联剂对SiO₂/聚四氟乙烯复合材料性能的影响[J].复合材料学报,2015,32(2):465-470.

YOU Y Y, YUAN Y. Influences of compound coupling agent on properties of SiO₂/polytetrafluoroethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 465-470.

作者简介



E-mail:leeping68@163.com

李平(通讯作者),1990年于河南科技大学获得学士学位,分别在2001年、2006年于华中科技大学获得硕士学位和博士学位,现为河南理工大学材料科学与工程学院教授,主要研究方向为摩擦磨损、腐蚀和断裂理论及防护,先进材料制造技术。

彭学周,2014年于河南理工大学获得学士学位,现为河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为摩擦磨损与腐蚀理论及防护。

E-mail:1449717017@qq.com

Peng Xuezhou received B. Sc. from Henan Polytechnic University in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in Henan Polytechnic University. His main research interest includes theory and protection of friction and wear.