

理论与实验研究

## C18150铜合金与H13模具钢稳态接触换热系数实验研究

赵巨涛<sup>1</sup>, 张立文<sup>1</sup>, 张驰<sup>1</sup>, 丁浩晨<sup>1</sup>, 马毅<sup>1</sup>, 运新兵<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连116024;  
2. 大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁大连116028)

**摘要:** 使用一套稳态接触换热系数实验设备, 测量了C18150铜合金与H13模具钢的稳态接触换热系数。控制热流方向由H13模具钢流向C18150铜合金, 界面平均温度为200~600℃, 接触载荷分别为1.56、6.24、10.92和15.6MPa。研究分析了界面平均温度、接触载荷、接触历史过程对稳态接触换热系数的影响规律。界面平均温度通过改变材料属性和接触表面状态进而影响稳态接触换热系数。实验结果表明, 界面平均温度为345℃、接触载荷为15.6MPa时, 稳态接触换热系数最大。不同接触历史过程下, 加载过程中测量的稳态接触换热系数小于卸载过程。实验研究可进一步提高C18150铜合金热成形过程数值模拟的精度, 进而提高成形质量。

**关键词:** C18150铜合金; H13模具钢; 稳态接触换热系数; 界面平均温度; 接触载荷

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.032

**中图分类号:** TK124; TG379 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940(2024)06-0255-05

### Experimental investigation on steady state contact heat transfer coefficient between C18150 copper alloy and H13 mold steel

Zhao Jutao<sup>1</sup>, Zhang Liwen<sup>1</sup>, Zhang Chi<sup>1</sup>, Ding Haochen<sup>1</sup>, Ma Yi<sup>1</sup>, Yun Xinbing<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** The steady state contact heat transfer coefficient between C18150 copper alloy and H13 mold steel was measured by a set of steady state contact heat transfer coefficient experimental equipment, and the direction of heat flow was controlled from H13 mold steel to C18150 copper alloy under the interface average temperature of 200–600 °C and the contact load of 1.56, 6.24, 10.92 and 15.6 MPa, respectively. Then, the influence laws of the interface average temperature, contact load and contact history process on the steady state contact heat transfer coefficient were studied and analyzed, and the steady state contact heat transfer coefficient was affected by the average interface temperature through changing the material properties and the contact surface state. The experimental results show that the steady state contact heat transfer coefficient is the largest when the interface average temperature is 345 °C and the contact load is 15.6 MPa. The steady state contact heat transfer coefficient in the loading process is smaller than that in the unloading process during different contact history processes. Thus, the experiment study can further improve the accuracy of the numerical simulation for C18150 copper alloy thermoforming process to further improve the forming quality.

**Key words:** C18150 copper alloy; H13 mold steel; steady state contact heat transfer coefficient; interface average temperature; contact load

接触换热系数是描述具有温差的接触体界面间换热能力的参数。在金属的热加工过程中, 具有一定温差的两固体表面的实际接触面积远小于名义接

触面积, 不完全接触导致界面处热流收缩产生接触热阻, 接触热阻的倒数即为接触换热系数<sup>[1]</sup>。在金属材料的轧制、锻造、冲压、连续挤压等热加工过程的数值模拟中, 坯料与模具间的接触换热系数是重要的边界条件, 对温度场、应力场等的数值模拟精度有重要影响<sup>[2]</sup>。研究界面接触换热系数对提高材料成形过程的数值模拟精度、优化热加工工艺、改善材料成形质量等具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。

接触换热系数实验研究领域起步较早, Yeh C L

收稿日期: 2023-11-24; 修订日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274375)

作者简介: 赵巨涛(1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 17634947456@163.com

通信作者: 张立文(1962-), 男, 博士, 教授

E-mail: commat@mail.dlut.edu.cn

等<sup>[6]</sup>采用稳态热流法对螺栓紧固的 6061-T6 铝合金试样进行了接触热导实验研究; Xiao Y M 等<sup>[7]</sup>同样使用稳态法研究了低温真空条件下界面温度和接触载荷对不锈钢与铝合金界面接触换热系数的影响。近年来,随着金属材料成形的要求不断提高,众多学者更加关注界面接触换热系数的研究。Ding C 等<sup>[8]</sup>通过实验测量了真空条件下不锈钢与玻璃纤维增强材料间的接触换热系数,界面接触载荷最高达到 80 MPa。Zhu Z 等<sup>[9]</sup>实验测量了高温合金 C276 与 302 不锈钢界面的稳态接触换热系数,指出界面氧化会降低界面的接触换热系数。Tang Q Y 等<sup>[10]</sup>实验研究了接触面温度为 200~350 °C 时,接触载荷为 0~150 MPa 范围内航空发动机结构材料 TC4 钛合金和 30CrMnSi 钢之间的稳态接触换热系数。Sponagle B 等<sup>[11]</sup>实验测量了不同载荷下的裸界面以及 6 种不同热界面材料的接触热导。孙静娜等<sup>[12]</sup>通过实验研究了 AZ31B 镁合金轧制界面的接触换热系数,研究表明,镁合金表面粗糙度越小,接触换热系数越大。Volke P 等<sup>[13]</sup>以冷锻成形工艺为例通过实验研究了高接触载荷下不锈钢与模具的稳态接触换热,接触载荷达到 1100 MPa,稳态接触换热系数随着接触载荷的增大而增大,同时研究了润滑剂和机械表面处理对稳态接触换热系数的影响。

在铜及其合金的接触换热实验研究领域, Tariq A 等<sup>[14]</sup>在真空环境下测量了铜及黄铜与不锈钢界面的接触热导,并将实验结果与理论模型进行了比较。沈逸等<sup>[15]</sup>研究了黄铜在液氮温区以下的接触热阻。在铜合金的连续挤压加工过程中,铜合金坯料与模具接触并伴随热量交换,可以近似为稳态接触换热过程。目前, C18150 铜合金与模具钢界面的接触换热系数研究相对有限,深入了解和实验研究 C18150 铜合金接触换热系数可以提高成形过程数值模拟精度,对成形过程工艺优化有指导意义。

本文采用了一套自主设计的实验设备,以 C18150 铜合金与 H13 模具钢为实验材料进行接触换热实验,实验配套数据采集与数据处理系统,并使用稳态热流法实验测定稳态接触换热系数。研究分析了接触历史过程、界面平均温度以及接触载荷对 C18150 铜合金与 H13 模具钢界面稳态接触换热系数的影响规律。

## 1 实验原理及设备

### 1.1 实验原理

图 1 为稳态接触换热系数的实验测定原理图。

C18150 铜合金试样为规格为  $\Phi 20$  mm $\times$ 50 mm 的圆柱,试样上分布有  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  共 4 个  $\Phi 1$  mm $\times$ 10 mm 的测温盲孔,孔间隔为 10 mm,  $L_1$  距离接触表面 3 mm。H13 模具钢试样规格为  $\Phi 20$  mm $\times$ 14 mm 的圆柱,试样上分布有  $H_1$  和  $H_2$  两个  $\Phi 1$  mm $\times$ 10 mm 的测温盲孔,孔间隔为 5 mm,  $H_2$  距离接触表面 3 mm。底部设有恒温热源,热流从 H13 模具钢流向 C18150 铜合金,实验时采集到的温度随时间变化的曲线如图 2 所示,经过足够长的时间后,各测温点采集到的温度不再随着时间的改变而发生变化,此时达到稳态接触换热。近似认为试样一维单向传热,温度为线性分布,如图 1 所示,通过线性外推法便可得到 H13 模具钢表面温度  $T_H$  与 C18150 铜合金表面温度  $T_L$ 。 $T_H$  与  $T_L$  的差值即为界面温差  $\Delta T$ 。通过接触界面的热流可通过傅里叶定律进行计算,如式 (1) 所示。

$$Q = \lambda A_c \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为通过接触界面的热流量;  $\lambda$  为材料的热导率;  $\frac{dT}{dX}$  为热流方向的温度梯度;  $X$  为试样上各测温点至接触表面的距离;  $T$  为试样上各测温点的温度;  $A_c$  为接触面的横截面积。

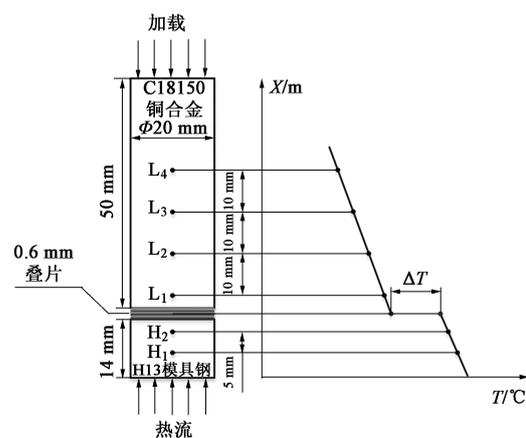


图 1 稳态接触换热系数实验测定原理图

Fig. 1 Experiment measurement principle diagram of steady state contact heat transfer coefficient

达到热平衡状态时,根据热流与界面温差所定义的稳态接触换热系数可表示为<sup>[9]</sup>:

$$h_c = \frac{Q}{\Delta T A_c} \quad (2)$$

式中:  $h_c$  为稳态接触换热系数;  $\Delta T$  为两试样界面间温差。

实验测量 C18150 铜合金与 H13 模具钢单个界

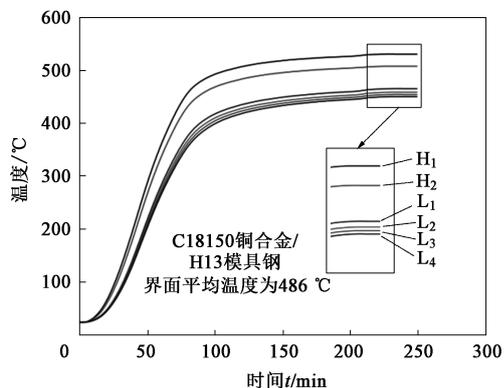


图2 测温点温度随时间变化曲线

Fig. 2 Change curves of temperature at measuring points with time

面的稳态接触换热系数时,其界面温差很小,而热电偶本身的误差为 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测量误差很大,所以,无法准确得到界面温差。因此,在两试样界面之间加入3个C18150铜合金和3个H13模具钢薄片, C18150铜合金薄片和H13模具钢薄片相互交替重叠。如图3所示,薄片直径为 $\Phi 20\text{ mm}$ ,厚度为 $0.6\text{ mm}$ 。添加薄片后由单个界面增加至7个界面,即串联了7个接触界面的接触热阻<sup>[1]</sup>,增大了总界面温差。此时,用本身误差为 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热电偶测量此温差,测量误差较小,可以准确得到界面温差。

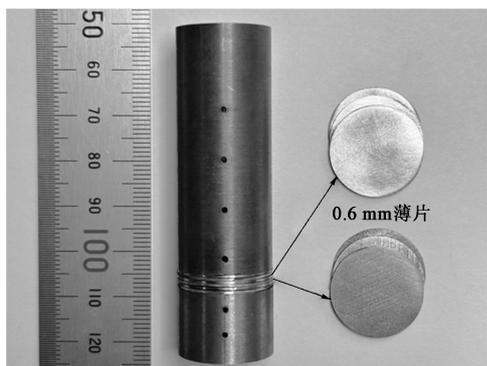


图3 实验试样

Fig. 3 Experimental specimens

## 1.2 实验设备

图4为接触换热实验设备示意图,由加热系统、加载系统、温度采集系统3部分组成。加热系统是一个功率为 $1.5\text{ kW}$ 的电阻炉,通过温度控制仪表对其进行控制,温度最高可达 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。加载系统包括砝码盘和杠杆装置,通过杠杆装置可将砝码重量放大5倍,便于对试样施加载荷。温度采集系统包括6根直径为 $\Phi 1\text{ mm}$ 的K型热电偶、终端电脑以及配套采集软件。K型热电偶连接温度控制仪表对温度进行实时显示,温度控制仪表通过RS232串口

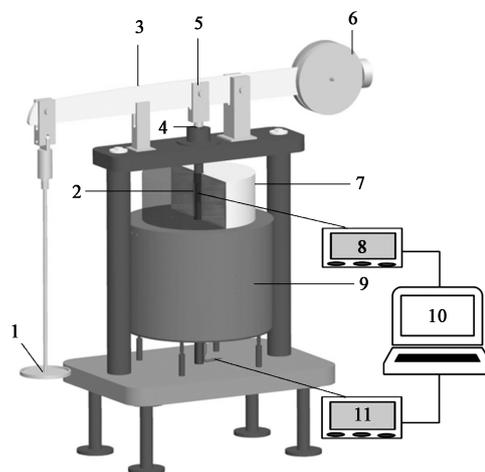


图4 接触换热设备示意图

1. 砝码盘 2. 试样 3. 加载机构 4. 定心钢球 5. 压力变向装置
6. 杠杆调平旋钮 7. 保温装置 8. 试样温度采集仪表 9. 电阻炉
10. 温度采集电脑 11. 温度控制仪表

Fig. 4 Schematic diagram of contact heat transfer equipment

通讯连接终端电脑,配套采集软件实现数据收集。

对热电偶进行校对补偿后,将K型热电偶插入试样预置的盲孔中,随后在试样周围包裹保温石棉,保温石棉外还设有保温套筒。使用石棉板和硅酸铝棉制成的保温装置包裹保温套筒,进一步增强绝热效果,从而保证试样沿一维轴向进行热传导。实验时温度采集系统对温度进行连续采集,将采集到的数据导入数据处理软件进行运算得到稳态接触换热系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 界面平均温度对稳态接触换热系数的影响

图5展示了不同界面平均温度对稳态接触换热系数的影响,其中接触载荷为 $1.56$ 、 $6.24$ 、 $10.92$ 和 $15.60\text{ MPa}$ 。界面平均温度是H13模具钢表面温度 $T_H$ 与C18150铜合金表面温度 $T_L$ 的平均值。界面平均温度在 $200\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内共设置7组实验,分别为 $250$ 、 $295$ 、 $345$ 、 $403$ 、 $435$ 、 $486$ 和 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图5可以看出,界面平均温度在 $250\sim 345\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域内时,稳态接触换热系数随着温度升高而增大,在 $345\sim 520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,稳态接触换热系数随着温度升高而降低。温度升高会改变材料本身的物理性能和力学性能,材料本身更容易发生变形。接触界面从微观上看实际上是两种材料微凸体间的接触,在一定载荷下温度升高材料表面微凸体变形程度增大,粗糙的接触表面结合更加紧密,从而使稳态接触换热系

数有增大的趋势。此外，温度升高后，接触表面的辐射传热变得更加显著，也会使稳态接触换热系数有增大的趋势。但随着温度的升高，接触表面产生的氧化问题也不容忽视，一般情况下，氧化层的硬度比基体材料大，并且氧化层的热导率要小于于基体材料，因此，当接触界面产生氧化层后会阻碍传热，使稳态接触换热系数有减小的趋势。温度对稳态接触换热系数的影响，一方面是温度改变导致材料属性改变，另一方面是温度改变了接触表面的状态，是多因素耦合作用的结果。

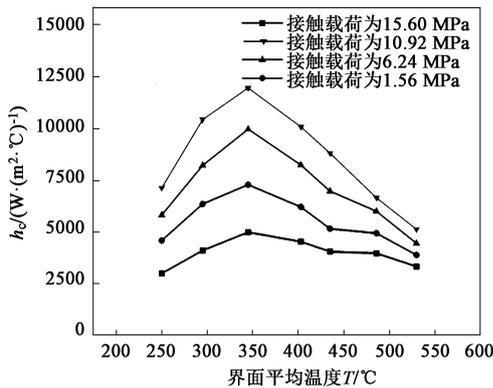


图 5 界面平均温度对稳态接触换热系数的影响

Fig. 5 Effects of interface average temperature on steady state contact heat transfer coefficient

### 2.2 接触载荷对稳态接触换热系数的影响

图 6 为界面平均温度为 345、403、435、486 和 520 °C 时，稳态接触换热系数随接触载荷的变化曲线。可以明显看出，接触载荷越大，界面稳态接触换热系数越大。这是因为：接触载荷越大，表面微凸体的变形程度就越大，从微观角度看，粗糙界面之间结合更加密实，形成更多热传导通道，提高了

表面换热能力。不难发现，界面平均温度较低时，例如界面平均温度为 345 °C 时，稳态接触换热系数随接触载荷变化曲线的斜率较大，稳态接触换热系数对接触载荷的敏感程度高。此外，稳态接触换热系数一般与接触载荷呈幂指数关系<sup>[1,9]</sup>，当接触载荷较高时，试样表面微凸体变形程度增大引起了形变强化，即使继续增大压力，对稳态接触换热系数的影响也比较有限。

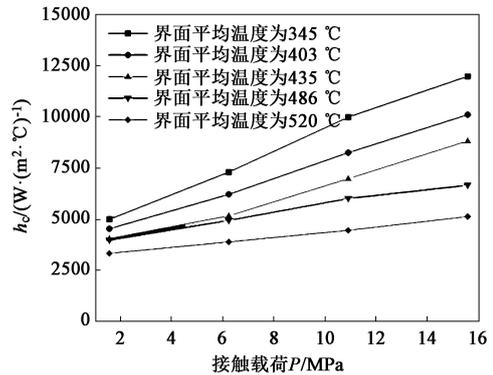


图 6 稳态接触换热系数随接触载荷变化曲线

Fig. 6 Variation curves of steady state contact heat transfer coefficient with contact load

### 2.3 接触历史过程对稳态接触换热系数的影响

不同的接触历史过程同样会对稳态接触换热系数产生影响，图 7 为相同界面平均温度下不同接触历史过程所测定的稳态接触换热系数。控制界面平均温度为 295 和 403 °C，首先测量低接触载荷下的稳态接触换热系数，随后逐渐升高接触载荷，测量加载过程中不同接触载荷下的稳态接触换热系数。卸载过程则是首先在高接触载荷条件下进行测量，随后逐渐减小接触载荷进行实验测量。可以明显看

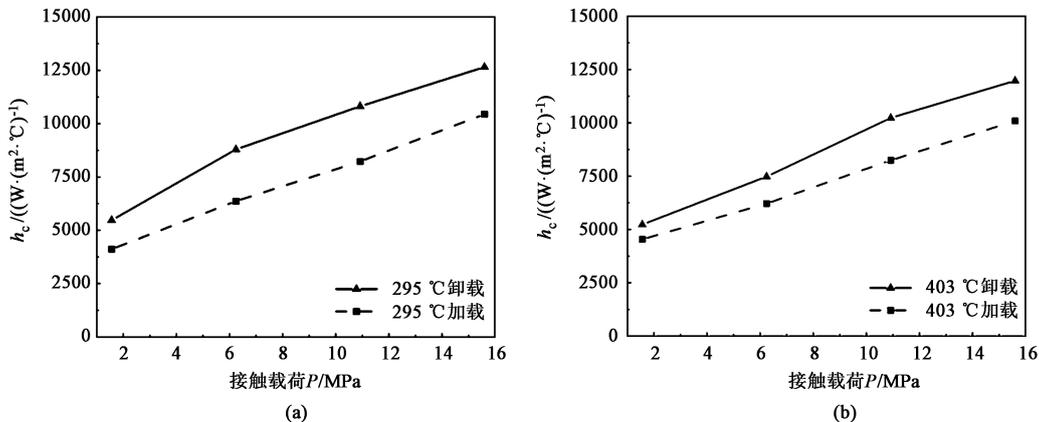


图 7 接触历史过程对稳态接触换热系数的影响

(a) 295 °C (b) 403 °C

Fig. 7 Effects of contact history process on steady state contact heat transfer coefficient

出,从某一载荷加载到目标载荷所测量的结果小于其卸载过程的测量结果。这是由于:接触表面的塑性变形和弹性变形是同时存在的,卸载过程首先是在高接触载荷条件下进行实验,此时接触界面的微凸体一部分发生弹性变形,一部分发生塑性变形,当卸载至低载荷时,发生弹性变形的微凸体可以恢复,而发生塑性变形的微凸体并未恢复。相比于直接加载至低载荷的对照组,其粗糙表面微凸体的总变形程度更大,实际接触面积更大,换热能力更强。

### 3 结论

(1) C18150 铜合金与 H13 模具钢的稳态接触换热系数随着界面平均温度升高呈现出先增大后减小的趋势,当界面平均温度为 345 °C 时,稳态接触换热系数达到峰值。温度升高使表面微凸体软化增加了接触面积,当界面平均温度大于 345 °C 时,材料表面发生氧化,阻碍了接触换热。

(2) C18150 铜合金与 H13 模具钢的稳态接触换热系数随着接触载荷的升高而增大,接触载荷增大导致接触表面间形成更多的热传导通道。此外,界面平均温度较低时,稳态接触换热系数对接触载荷的敏感程度更高。

(3) 改变接触历史过程能够影响 C18150 铜合金与 H13 模具钢的稳态接触换热系数。微凸体的塑性变形在卸载过程未恢复,使加载过程的接触面积小于卸载过程中的接触面积,导致加载过程中的稳态接触换热系数小于卸载过程中的稳态接触换热系数。

#### 参考文献:

[1] Xing L, Zhang L W, Zhang X Z, et al. Experimental investigation of contact heat transfer at high temperature based on steady-state heat flux method [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2010, 23 (2): 107-116.

[2] 齐艳阳, 刘江林, 王涛, 等. 基于 FEM 分析轧制预变形对 AZ31B 镁合金热轧板材边部损伤的影响规律 [J]. *稀有金属*, 2022, 46 (7): 873-881.

Qi Y Y, Liu J L, Wang T, et al. Edge damage of hot rolled AZ31B magnesium alloy sheets with pre-rolling based on FEM [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2022, 46 (7): 873-881.

[3] 张海成, 昌春艳, 周杰. TC18 钛合金热锻成形换热系数实验研究 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (4): 24-31.

Zhang H C, Chang C Y, Zhou J. Research on heat transfer coefficient

in hot forging of TC18 titanium alloy [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (4): 24-31.

[4] Lu B S, Wang L G, Geng Z, et al. Heat transfer characteristics of billet/die interface and measures to relieve thermal stress for hot forging die [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38 (7): 1-20.

[5] Dou R F, Ge T R, Liu X L, et al. Effects of contact pressure, interface temperature, and surface roughness on thermal contact conductance between stainless steel surfaces under atmosphere condition [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 94: 156-163.

[6] Yeh C L, Wen C Y, Chen F Y, et al. An experimental investigation of thermal contact conductance across bolted joints [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2001, 25 (6): 349-357.

[7] Xiao Y M, Sun H, Xu L, et al. Thermal contact conductance between solid interfaces under low temperature and vacuum [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2004, 75 (9): 3074-3076.

[8] Ding C, Wang R S. Thermal contact conductance of stainless steel-GFRP interface under vacuum environment [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 42: 1-5.

[9] Zhu Z, Zhang L W, Wu Q K, et al. An experimental investigation of thermal contact conductance of Hastelloy C-276 based on steady-state heat flux method [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 41: 63-67.

[10] Tang Q Y, He J J, Zhang W F. Influencing factors of thermal contact conductance between TC4/30CrMnSi interfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 86: 694-698.

[11] Sponagle B, Groulx D. Measurement of thermal interface conductance at variable clamping pressures using a steady state method [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 671-681.

[12] 孙静娜, 刘楠楠, 姚力, 等. AZ31B 镁合金轧制界面接触换热系数的实验研究 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46 (21): 101-105.

Sun J N, Liu N N, Yao L, et al. Experimental study on contact heat transfer coefficient of AZ31B magnesium alloy rolling interface [J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46 (21): 101-105.

[13] Volke P, Groche P. Interfacial heat transfer coefficients in cold forging of stainless steel [J]. *International Journal of Material Forming*, 2022, 15 (3): 1-9.

[14] Tariq A, Asif M. Experimental investigation of thermal contact conductance for nominally flat metallic contact [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 52 (2): 291-307.

[15] 沈逸, 曹家兴, 黄永华. 采用叠片法的黄铜低温接触热阻测量 [J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57 (1): 76-83.

Shen Y, Cao J X, Huang Y H. Measurement of cryogenic thermal contact resistance of brass by lamination method [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57 (1): 76-83.