



铝合金与 5CrMnMo 模具钢界面接触换热系数实验研究

张立文*, 朱德才, 邢磊, 张国梁, 韦荣选

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用自制的接触换热系数测量装置对铸造铝合金和挤压铝合金分别与 5CrMnMo 模具钢的接触换热系数进行了实验研究. 分析了铝合金与 5CrMnMo 模具钢间的接触换热系数随接触表面温度和载荷的变化, 发现接触换热系数与温度并不存在简单的正比关系, 而与载荷的指数近似成正比关系, 并且在相同的接触条件和测量条件下铸造铝合金与 5CrMnMo 的接触换热系数普遍要比挤压铝合金的小.

关键词: 接触换热系数; 铝合金; 5CrMnMo

中图分类号: TG111.3 **文献标志码:** A

0 引言

在铝合金的等温锻造成形中, 由于其锻造温度范围比较窄, 而模具与坯料之间的接触换热会直接影响到模具和坯料的温度, 能否控制好模具和坯料间的接触换热关系到零件的成形精度和模具的寿命^[1]. 另外在压力加工数值模拟中, 模具与坯料接触换热系数选取得正确与否会关系到整个金属材料固态压力加工过程数值模拟的精度. 所以金属界面间接触换热系数的测量受到了越来越多的学者和精密塑性成形企业的关注^[2].

目前国内外对接触换热系数的研究大都在空间站、卫星、电子器件和低温超导等领域. 这些领域的接触温度比较低, 一般在 300 °C 以下, 而且温度变化范围也比较小. 比较具有代表性的如徐烈等进行了接触换热系数的理论模型分析, 研究了表面形貌、反复加载对接触换热系数的影响, 双热流法测接触换热系数等^[3]. 他们对界面接触换热研究中的表面形貌和形变模型进行了具体的比较, 讨论了这些模型的优缺点, 提出了在低温下建模中需要注意的一些问题. 但是其实验的温度在 130~150 K, 压力 0~3 MPa, 即低温、小压力的情

况. 另外应济等对粗糙表面接触换热进行了理论和实验研究^[4], 但其研究主要是针对粗糙表面低温(19~47 °C)弹性接触状况进行的. 由于在塑性成形领域中, 成形温度需要在坯件的再结晶温度以上, 而且根据材料的不同, 再结晶温度也不同, 温度的变化范围比较大. 为了更好地研究材料加工过程中接触换热系数的影响因素, 本文设计一套在较高和较宽温度下接触换热系数的测量设备来研究固体界面间的接触换热系数在不同接触条件下的变化规律.

1 实验原理与装置图

测量界面接触换热系数的方法有静态热流法和动态反传热法. 目前国内外主要用静态热流法求解接触换热系数. 其测量原理如下: 两根等截面固体试样在一定压力下相互接触并传递热量时, 系统与周围绝热, 热流在试样中是沿着轴向传递的, 虽然在接触面附近的一小段区域, 由于接触面上热流线的收缩, 局部热流是三维的, 离开接触面一小段区域之外, 热流又是一维的, 因此从宏观上看, 可按照一维导热问题处理^[5].

当两固体界面接触达到热平衡状态时,根据界面处温差的大小定义界面接触换热系数为

$$h = \frac{Q}{A_a \cdot \Delta T_c} \tag{1}$$

式中: A_a 为试样截面积; ΔT_c 为接触界面处的温差; Q 为通过界面的热流。

根据定义式(1),只要测得 ΔT_c 与 Q ,即可求得接触换热系数值。热流 Q 的求解公式为

$$Q = A_a \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta L} \tag{2}$$

式中: λ 为 5CrMnMo 导热系数; ΔL 为相邻两根热电偶的距离; ΔT 为 ΔL 上两根热电偶的温差。

因为铝合金的导热系数远大于 5CrMnMo 的,所以铝合金试样上的 ΔT 值要远小于 5CrMnMo 的 ΔT 值。而热电偶存在测量误差 ($\leq 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),为了减少热电偶对测量结果的影响,选用 5CrMnMo 作为计算试样。

通过上下试样的热流 Q 可由式(2) 求出。试样接触界面的温差 ΔT_c 通过外延法^[6]求得,如图 1 所示。将热流 Q 和接触面温差 ΔT_c 代入式(1)即可求得接触换热系数 h 。试样位置和热电偶在试样上的位置如图 1 所示。

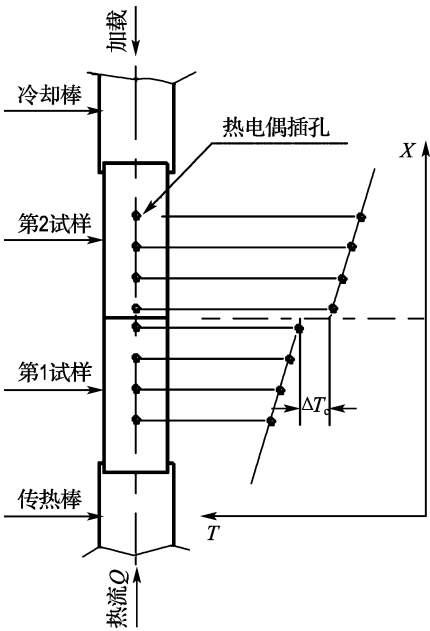


图 1 外延法原理、试样和热电偶位置

Fig. 1 The theory of epitaxy and the position of specimens and thermocouples

实验前首先用 400# 水砂纸将各试样的接触

面进行打磨处理,使各试样具有相同的表面粗糙度。本文采用 $\phi 1.0\text{ mm}$ 的铠装镍铬-镍硅热电偶,试样的尺寸为 $\phi 20 \times 50\text{ mm}$ 。

2 结果与讨论

本文利用上述实验原理针对接触换热系数的主要影响因素温度和载荷进行了实验分析。对挤压铝合金与 5CrMnMo 模具钢、铸造铝合金与 5CrMnMo 模具钢在不同接触面平均温度和不同载荷下的接触换热系数进行了测量。

2.1 测量系统误差检验

对已经进行充分氧化和变形的不锈钢试样对的接触换热系数进行了 5 次测量,以检验实验的重复性和可靠性。测量结果见图 2。

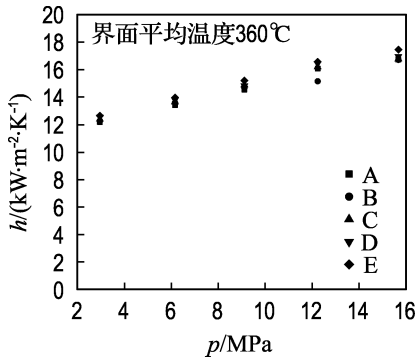


图 2 不锈钢与不锈钢接触换热系数

Fig. 2 The TCC coefficient between stainless steel and stainless steel

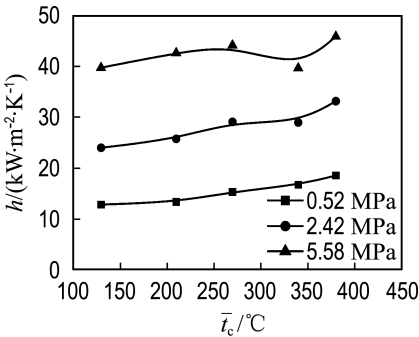
从图中可以看出,5 次测试结果基本一致。从 5 次实验结果的分析比较中得到系统的整体测量误差 $< 5\%$,说明实验的重复性和可靠性是满足测量要求的,实验装置和测试系统是可靠的。

2.2 温度对铝合金与 5CrMnMo 接触换热系数的影响

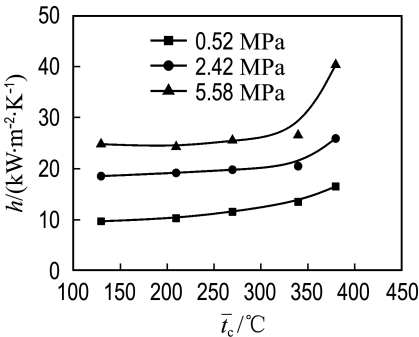
温度是接触换热系数的重要影响因素。图 3 (a)和(b)分别为挤压铝合金与 5CrMnMo 模具钢、铸造铝合金与 5CrMnMo 模具钢在不同接触面载荷下的接触换热系数与界面平均温度关系的实验结果。

从图 3 可以看出,在所测定的温度范围内接触换热系数随温度变化总的趋势是:温度越高,接

触换热系数越大,但是挤压铝合金与 5CrMnMo 模具钢在载荷为 2.42 和 5.58 MPa,界面平均温度为 300~350 ℃时的接触换热系数并没有随温度的升高而增大,相反还有所降低,超过 350 ℃后接触换热系数又继续随温度的升高而增大,如图 3(a)所示.而铸造铝合金与 5CrMnMo 模具钢在界面平均温度为 130~340 ℃时的接触换热系数则随着温度的升高缓慢增加,曲线的斜率比较小,而当温度>350 ℃时接触换热系数随温度变化的斜率有所增大,如图 3(b)所示.由此可见接触换热系数与温度的关系并不存在简单的正比关系.这与文献[7]得出的结论相符.



(a) 挤压铝合金-5CrMnMo



(b) 铸造铝合金-5CrMnMo

图 3 不同载荷下接触换热系数随接触面平均温度的变化

Fig. 3 The changing tendency of TCC coefficient in accordance with average interfacial temperature

由于随着温度的升高,接触面会生成氧化物,表面氧化层普遍存在于金属表面.氧化层的热导率一般比母体金属小 1~2 个数量级,而硬度又大

于母体金属,因而其存在将会导致接触换热系数的降低.另外随着温度的升高和接触时间的增加,铝合金和 5CrMnMo 接触面之间将相互扩散,如图 4 所示.扩散的结果导致两接触面之间的接触更加充分,有利于它们之间的接触换热.对于挤压铝合金来说,在一定的接触温度和载荷范围内,表面氧化层对接触换热的阻碍作用大于接触面扩散和其他因素对接触换热的促进作用,导致接触换热系数随温度的升高而减小,如图 3(a)所示.越过此阶段后,促进效果又大于阻碍效果,接触换热系数又随温度的升高而增大.对于铸造铝合金,氧化层的阻碍作用没有明显显现出来.在开始升温阶段,接触换热系数随温度缓慢升高,而在较高载荷和温度下接触换热系数随温度变化曲线的斜率突然增大,如图 3(b)所示.

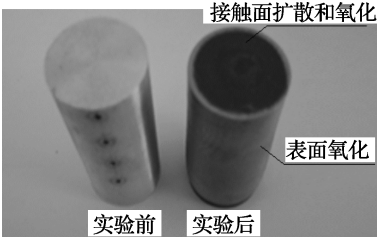


图 4 铝合金氧化和接触面的扩散现象
Fig. 4 The phenomena of aluminum alloy oxidation and interfacial diffusion

当接触面温度发生变化时,在一定载荷下接触表面产生的细观变形既有弹性变形又有塑性变形,还有蠕变.这些变形都随着温度的升高而增大,当温度和载荷达到一定程度时,试样还会被墩粗,如图 5 所示.因此温度的升高将引起接触界面



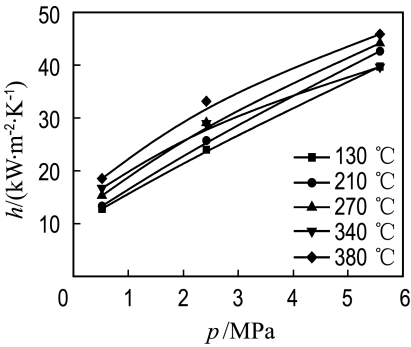
图 5 铝合金墩粗
Fig. 5 Aluminum alloy upsetting

的几何形貌和试样材料热物性改变,而这些因素直接影响接触换热系数的大小.

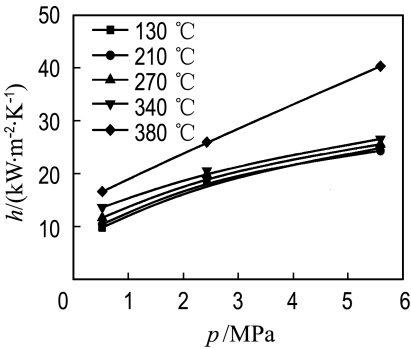
2.3 载荷对铝合金与 5CrMnMo 接触换热系数的影响

载荷是接触换热系数的另一重要影响因素,接触换热系数一般与载荷成幂律关系^[8],幂指数的大小决定了接触换热系数对载荷的敏感程度.图 6(a)和(b)为挤压铝合金和铸造铝合金分别与 5CrMnMo 在不同接触面温度下的接触换热系数与载荷关系的实验结果.

从图 6 中可以看出,改变载荷的大小会明显地改变接触换热系数的大小.接触换热系数随载荷变化的趋势是:载荷越大,接触换热系数越大.



(a) 挤压铝合金-5CrMnMo



(b) 铸造铝合金-5CrMnMo

图 6 不同温度下接触换热系数随载荷的变化

Fig. 6 The changing tendency of TCC coefficient in accordance with interfacial pressure

而且从图 6 中还可看出在所测定的载荷范围内,铝合金与 5CrMnMo 的接触换热系数在低载荷区域 0.5~2.5 MPa 时随载荷变化的斜率普遍

要比高载荷区域 2.5~5.5 MPa 时的斜率大,因此可得出在低载荷区域,接触换热系数随载荷的变化比较显著;而在高载荷区域,前者对后者的敏感性有所下降;接触换热与载荷的关系并非通常所认为的线性的结论.这是由于表面接触热传递是一个十分复杂的过程.在压力接触下,当载荷增加到一定值时,接触面上的接触点产生塑性流动,将导致相邻塑性接触点的合并而产生应力释放,因此表面发生弹性形变的比例相对于塑性接触点来说增加了.微凸体之间的弹性接触面积与载荷的关系为 $A \cdot p^{2/3}$,而塑性接触存在关系式 $A \cdot p$,因此将导致接触换热系数曲线随着载荷的增加逐渐平坦^[9].同时塑性变形会引起接触表面的加工硬化,从而使得实际表面硬度增加,载荷增加而产生塑性形变的新增微突起数量会因硬度的增加而减小,导致实际的接触面积相对减少,从而引起在较大载荷时接触换热系数对载荷的敏感性下降.另一方面,在载荷的作用下,必定会有不同程度的接触界面氧化层的破裂,从而改变实际的接触状态而引起接触换热系数的变化.

从图 3~6 的比较中还可看出,在相同的测量条件下铸造铝合金与 5CrMnMo 的接触换热系数普遍要比挤压铝合金与 5CrMnMo 的接触换热系数小,这主要是铸造铝合金与挤压铝合金的力学性能有差异所致.由于挤压铝合金的塑性比铸造铝合金好,挤压铝合金容易产生塑性变形,实际接触面积要比铸造铝合金大,因此挤压铝合金的接触换热系数也比较大.另外,挤压铝合金的实际接触面积比较大,它受表面氧化层的影响也比较大,所以在一定载荷和温度下,挤压铝合金的接触换热系数会随温度升高而下降,如图 3(a)所示.

3 结 论

(1)载荷是影响接触换热系数的重要因素,在低载荷区域,接触换热系数随载荷的变化比较显著;而在高载荷区域,因为接触已近完全,所以前者对后者的敏感性有所下降.

(2)温度也是影响接触换热系数的另一重要

因素. 其总的趋势是: 温度越高, 接触换热系数越大, 但某些材料在一定温度范围内, 接触换热系数会随温度的升高而减小.

(3) 在相同的接触条件和测量条件下, 铸造铝合金与 5CrMnMo 的接触换热系数普遍要比挤压铝合金与 5CrMnMo 的接触换热系数小.

参考文献:

[1] 张君尧. 铝合金材料的新进展[J]. 轻合金加工技术, 1998, **26**(5): 1-10

[2] ROSOCHOWSKA M, BALENDRA R, CHODNIKIEWICZ K. Measurements of thermal contact conductance [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **135**: 204-210

[3] 徐 烈, 杨 军, 徐佳梅, 等. 低温下固体表面接触热阻的研究[J]. 低温与超导, 1996, **24**(1): 53-58

[4] 应 济, 贾 显, 陈子辰, 等. 粗糙表面接触热阻的理

论和实验研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1997, **31**(1): 104-109

[5] 赵宏林, 黄玉美, 徐洁兰, 等. 常用结合面接触热阻特性的试验研究[J]. 西安理工大学学报, 1999, **15**(3): 26-29

[6] 徐 烈, 张 涛, 赵兰萍, 等. 双热流法测定低温真空下固体界面的接触热阻[J]. 低温工程, 1999, **4**: 185-189

[7] 湛利华, 李晓谦, 胡仕成. 界面接触热阻影响因素的实验研究[J]. 轻合金加工技术, 2002, **30**(9): 40-43

[8] MAROTTA E E, FLETCHER L S. Thermal contact conductance for aluminum and stainless contacts [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, **12**(3): 374-380

[9] WHITEHOUSE D J. *Handbook of Surface Metrology* [M]. Bristol: Institute of Physics, Bristol, Philadelphia, 1994

Experimental measurement on thermal contact conductance coefficient between aluminum alloys and 5CrMnMo die steel

ZHANG Li-wen*, ZHU De-cai, XING Lei, ZHANG Guo-liang, WEI Rong-xuan

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A set of self-developed thermal contact conductance (TCC) coefficient experimental system was employed in the experiments on the TCC coefficient between cast aluminum and 5CrMnMo die steel, and between extruded aluminum alloy and 5CrMnMo die steel. The changing tendency of TCC coefficient, in accordance with interfacial temperature and contact pressure between aluminum alloy and 5CrMnMo die steel is analyzed. It is found that TCC coefficient is not directly in proportion to interfacial temperature, but is roughly in proportion to contact pressure index. Besides, when they are in the same contact condition and measuring condition, the TCC coefficient between cast aluminum and 5CrMnMo die steel is generally smaller than that of the extruded aluminum alloy.

Key words: thermal contact conductance (TCC) coefficient; aluminum alloy; 5CrMnMo