

# LY12 搅拌摩擦焊接过程中搅拌针摩擦行为的研究

王希靖, 李晶, 达朝炳, 王天宇

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 搅拌摩擦焊是一种依靠搅拌头与被焊金属之间的摩擦来实现焊接的焊接方法, 二者之间的摩擦系数直接影响到最终的焊接效果。本试验对 LY12 铝合金摩擦系数随温度等因素的变化情况进行了研究, 试验结果表明: 由于温度对铝合金的表面状态的影响非常大, 所以铝合金的摩擦系数在高温下的变化也很大。通过试验数据建立了 LY12 铝合金与高速钢的摩擦系数与温度之间的关系曲线, 发现二者之间的摩擦系数随温度的增加先增大, 达到金属的熔点下限后开始减小。并且对 LY12 铝合金搅拌摩擦焊接过程中的摩擦行为进行了分析。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 摩擦机制; 摩擦系数

中图分类号: TG453

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2006)03-0018-04

## Analysis of Friction Action in LY12 Friction Stir Welding

WANG Xi-jing, LI Jing, DA Chao-bing, WANG Tian-yu

(State Key Lab. of Advanced Non-Ferrous Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Friction stir welding (FSW) is a welding method depends on the friction between welding tool and welded material. The frictional coefficient between them affects the welding quality directly. The change of the frictional coefficient of LY12 aluminum alloy along with the change of temperature was analyzed. The results show: Since the effect of the temperature on surface state of the aluminum alloy is great, the change of the frictional coefficient of aluminum alloy at high temperature is great. The relation curve of frictional coefficient between LY12 aluminum alloy and high-speed steel is established through the experimental data. It is found that the frictional coefficient between them increases along with the increase of the temperature, then, decreases along with the increase of the temperature after the temperature exceeds the melting point of the aluminum alloy. The frictional action of LY12 aluminum alloy in FSW is also analyzed in this study.

**Key words:** friction stir welding; friction mechanism; frictional coefficient

搅拌摩擦焊是一种利用摩擦热作为热源的焊接方法。在焊接过程中, 搅拌头肩部与被焊板材之间的摩擦以及搅拌针与被焊金属之间的摩擦所产生的摩擦热使被焊金属达到塑性软化状态。搅拌针旋转时与被焊金属之间的摩擦力使金属发生塑性流动。热塑性金属在搅拌针离开后冷却, 实现连接。当在理论研究中, 如数值模拟分析中, 需要应用摩擦系数时, 往往直接采用摩擦学中所提供的相关参考数据<sup>[1]</sup>。众所周知, 摩擦学与摩擦焊两个学科对摩擦的研究目标与工况是不相同的, 摩擦学研究摩擦的目的主要是为了减小摩擦, 而摩擦焊是要利用摩擦所产生的热量, 故其工作参数(正压力、摩擦温度)不同, 前者一般较低, 后者一

般较高, 同时二者所研究的工件摩擦表面状态(粗糙度)亦有较大差别。因此, 在摩擦焊接研究领域直接采用摩擦学中的摩擦系数值会带来较大误差<sup>[2]</sup>。

本文主要针对搅拌摩擦焊接过程中, 搅拌针表面与被焊金属之间的摩擦系数进行研究。因为搅拌针与被焊金属之间的摩擦力对塑性金属的流动情况影响非常大, 这将进一步影响焊接接头的质量。通过高温下测量搅拌针材料高速钢与焊接材料 LY12 铝合金的摩擦系数, 对焊接过程中的摩擦行为进行分析。

## 1 试验方法

试验所用设备为 THT07-135 型高温摩擦磨损试验机。试验中用  $\phi 3$  mm 的高速钢钢球与  $\phi 24$  mm、厚 3 mm 的 LY12 铝合金试样对磨。该试验机允许的最高试验温度为 650 , 所加载荷为 1 ~ 100 N。LY12 的熔点下限为 502 , 上限为

收稿日期: 2005-09-16

基金项目: 甘肃省科技攻关项目 (GS012-A52-069)

作者简介: 王希靖(1956-), 男, 甘肃榆中人, 教授, 博导, 研究领域为焊接设备及其自动化、搅拌摩擦焊技术以及焊接质量控制; 电话: 0931-2976706; E-mail: wangxj@lut.cn

638, 搅拌摩擦焊是一种固相焊接方法, 温度不会超过金属熔点, LY12 搅拌摩擦焊接温度一般在 350~520 之间<sup>[3]</sup>。所以试验结果可以满足搅拌摩擦焊接的试验要求。本试验中采用的试验数据如下: 载荷为 58 N, 摩擦速率 0.33 m/s, 摩擦温度 50~550 。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 摩擦机制分析

两个相对运动的表面在一定摩擦力的作用下, 表面温度升高会导致表面层发生塑性变形, 表面的污染膜、氧化膜会发生破裂, 结果新鲜金属表面裸露出来, 由于分子力的作用使两个表面发生焊合。现代摩擦理论认为, 摩擦力不仅包含有剪切接触面机械咬合所产生的阻力, 而且包含有真实接触表面分子吸附作用所产生的粘合力及切断粘接点所产生的阻力。如果外力能克服摩擦力, 相对运动的表面可以继续运动。若剪切发生在原来的接触表面上, 那就不会发生磨损, 或者叫做“零磨损”。若剪切发生在强度较低的金属一方, 则强度较高的材料表面上将粘附另一方的金属。在以后的重复摩擦过程中, 软金属粘附物将辗转于对摩擦件的表面之间, 这种现象叫做“金属转移”<sup>[4]</sup>。LY12 硬铝合金与高速钢对摩时, 剪切发生在铝合金的亚表层内, 对摩后将会有一部分铝合金粘着在高速钢的表面。所以 LY12 硬铝合金搅拌摩擦焊过程中, 被焊金属与搅拌针之间的摩擦属于粘着摩擦。根据粘着摩擦理论<sup>[5]</sup>, 摩擦系数  $f$  可描述为

$$f = SA_r / (PA) = K_A S/P$$

式中:  $A_r$  为粘着面积;  $A$  为摩擦面积;  $K_A$  为粘着面积与摩擦面积之比,  $K_A = A_r / A$ 。在实际摩擦焊接过程中, 摩擦界面之间的摩擦问题相当复杂。故从理论上求解摩擦系数是很困难的, 一般均要通过实验确定。

### 2.2 粘着摩擦的影响因素

影响粘着摩擦发生和发展的因素是很多的, 但总括起来主要是两个方面。其一是摩擦副本身的材质与特性; 其二是工作条件, 包括摩擦速率、载荷、工作温度、湿度、润滑条件等等。但从系统特性来考虑, 可以认为摩擦副本身的特性是影响摩擦程度的内部因素, 它们是决定摩擦性能的根本

因素。工作条件的作用则是通过他们来体现的。对于本研究中的 LY12 硬铝合金与高速钢在高温下对摩来说, 摩擦效应主要取决于铝合金在不同温度下的表面状态以及表面层结构。由于高速钢的硬度相对于铝合金来说很高, 而且在焊接温度范围内变化不大, 所以研究中高速钢的硬度以及表面性质的变化是可以忽略的。

### 2.3 试验结果

图 1 所示为在不同温度下测得的高速钢与 LY12 铝合金的摩擦系数。由于搅拌摩擦焊接过程中摩擦速率和载荷的变化都不是很大, 所以在本次试验中我们选用一定的摩擦速率和载荷, 主要考虑温度的变化对摩擦系数的影响。选用与摩擦头 1 050 r/min 相对应的摩擦速率  $v_f = 0.33$  m/s。所加载荷为 58 N。从图中可以看出, 两种材料之间的摩擦系数随着温度的升高而不断增大, 当温度达到金属的熔点下限(502)后, 摩擦系数开始减小。

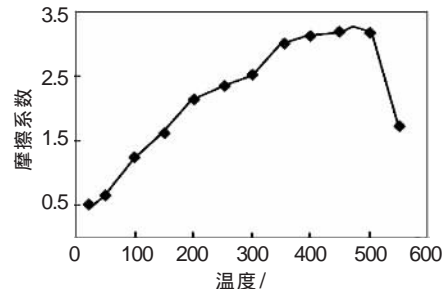


图1 摩擦系数曲线

图 2 所示为 LY12 硬铝合金试样与高速钢在给定上述试验条件下在不同温度摩擦后试样的表面状态。可见, 在 300 摩擦后, 试样表面的摩擦痕迹较浅, 痕迹的边缘较为粗糙; 400 时, 摩擦痕迹相对 300 时变深; 550 时, 小钢球留下的摩擦痕迹特别深, 而且痕迹特别粗糙。

### 2.4 试验结果分析

低温下, 铝合金试样表面的硬度较高, 此时铝合金与高速钢之间的摩擦属于两种固体之间的干摩擦。由于此时两者的硬度都比较高, 所以几乎不发生粘着现象。小钢球在铝合金试样表面摩擦后留下的摩擦痕迹很浅, 而且很光滑。随着温度的升高, 铝合金的软化程度逐步增加。铝合金试样表面的氧化层在压力的作用下开始被破坏, 这不但增

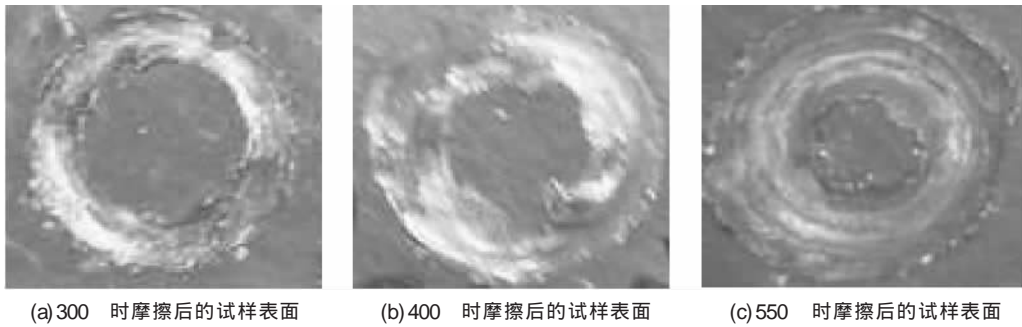


图2 高温摩擦后试样的表面状态

加了真实接触面积,而且使小钢球与铝合金接触面间分子吸附作用增强,从而导致摩擦系数有所增大。同时,温度的升高使铝合金表面开始出现一层硬度稍低的塑性金属层。塑性金属层的厚度随着温度的升高不断增加,而铝合金试样表面的硬度则随之不断降低。由于这层塑性金属层的存在,小钢球在与铝合金试样对磨时,就有大量软化了铝合金粘着在小钢球的表面。在此后的摩擦中,与铝合金对磨的不仅仅是小钢球,还包括粘着在小钢球表面的铝合金。由摩擦学原理<sup>[2]</sup>可知,金属间的摩擦是因两金属被压紧时,金属表面的微凸体相互接触,发生运动时微凸体之间相互阻碍而引起的。光滑表面的微凸体相对来说比较少而且也比较小,故光滑表面的摩擦系数也相应的比较小。而对于粗糙表面,微凸体不仅数量多而且比较大,摩擦系数自然也就比较大。从图2中可以看出,随着温度的升高,铝合金表面的摩擦痕迹越来越深,而且越来越粗糙。这是由于小钢球表面粘着的铝合金越多,表面粗糙度就越大。这样在接下来的摩擦过程中就会有更多的铝合金粘着在小钢球的表面被带走。当温度升高到铝合金的熔点下限时,铝合金局部接近熔化状态。这部分铝合金更容易被小钢球带走,如图2(c)所示摩擦区域的铝合金被带走厚厚一层,留下很深的摩擦痕迹。温度继续升高,铝合金表面的氧化皮变软,脱离铝合金基体表面,在铝合金和小钢球之间形成一个隔离层,起到润滑作用。而且502为铝合金的下限熔点,超过此温度铝合金便会开始出现轻微的熔化现象,熔化了少量铝合金在两者之间也会充当润滑剂,这都会导致两者之间的摩擦系数开始减小。

### 3 搅拌摩擦焊中的摩擦行为分析

在搅拌摩擦焊接过程中,搅拌头与被焊板材

之间的摩擦可以分为两部分:搅拌头肩部与被焊板材表面之间的摩擦和插入板材内部的搅拌针与被焊金属之间的摩擦。摩擦头肩部与被焊板材表面之间的摩擦属于两个同时存在于空气中的金属表面之间的摩擦,由于氧化层的存在,两者之间的摩擦系数相对来说较小。而插入铝合金板材中的搅拌针与被焊金属摩擦时,搅拌针表面与被焊金属基体表面接触,两接触面间的分子吸附作用较强,所以在相同的外界条件下,两者之间的摩擦系数较大。搅拌摩擦焊是一种将摩擦热作为热源的焊接方法。近期的研究发现,在搅拌摩擦焊接过程中,摩擦头肩部与被焊板材表面产生的热量 $Q_1$ 占总热量输入的80%,而搅拌针与被焊金属之间的摩擦热 $Q_2$ 仅占20%。这说明在整个搅拌摩擦焊接过程中,搅拌头肩部与被焊板材表面摩擦,主要是为了产生一定量的摩擦热,这部分热量输入焊缝将焊缝金属软化,提供实现搅拌摩擦焊接的前提条件。插入被焊板材内部的搅拌针与被焊金属摩擦,两者之间的摩擦力在焊缝金属被软化的情况下使被焊金属发生塑性流动,从而实现搅拌摩擦焊接。

图3所示为LY12铝合金搅拌摩擦焊接时的温度场瞬时分布情况。搅拌摩擦焊是一种固相连接方法,所以被焊金属应该在塑性状态下实现焊接,而不会出现熔化现象。从图3中可以看出,除了搅拌针所在位置的温度高于LY12铝合金的下

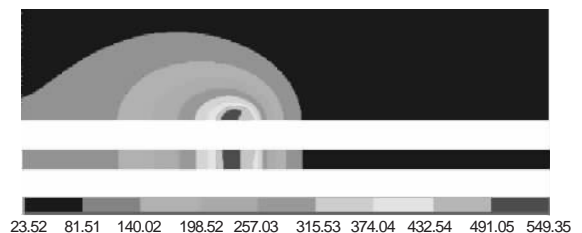


图3 焊接43s时的温度场分布

限熔点 502 , 焊缝上其余位置的焊接温度都低于合金的熔点温度, 且越靠近搅拌针表面温度越高。搅拌针外围区域金属温度为 400 到 500 之间, 刚好是摩擦系数最大的温度区间, 这里的摩擦力最大。摩擦力的作用结果使焊缝前进边的金属沿后退边流向搅拌针的后方, 后方的金属为了填补前进边金属流动留下的空腔则会流向前进一侧。但在实际焊接中, 由于搅拌头轴肩前方压力要高于后方, 并且从温度测量的结果显示其前方温度低于后方, 前进边温度低于后退边<sup>[9]</sup>, 所以塑性金属在向前流动的过程中会受到温度低处已经冷却的金属的阻碍作用而停止流动。也就是说金属向前流动所受到阻力要大于向后流动受到的阻力, 因此大部分金属还是向后流动。这种现象说明在搅拌摩擦焊接过程中, 塑性金属的流动情况是搅拌针与金属间摩擦力、搅拌头轴肩压力、温度场分布以及搅拌头旋转速度等因素共同作用的结果<sup>[7]</sup>。

## 4 结论

(1) 高速钢与 LY12 铝合金之间的摩擦系数随温度的升高而增大, 超过合金的熔点温度后开始减小。

(2) 搅拌摩擦焊接过程中的摩擦分为两部分:

搅拌头肩部与被焊板材表面之间的摩擦和搅拌针与被焊金属之间的摩擦。前者的主要作用是产生焊接中所需要的热量, 后者主要是产生摩擦力, 使被焊金属发生塑性流动。

(3) LY12 铝合金搅拌摩擦焊接过程中, 搅拌针与被焊铝合金之间的摩擦属于粘着摩擦。温度场的分布情况通过影响摩擦系数而影响到两者之间的摩擦行为。同时, 两者之间的摩擦行为又对焊接过程中塑性金属的流动造成一定影响。

## 参考文献:

- [1] Sluzalec A. Thermal Effects in Friction Welding [J]. J. Mech. Sci., 1990, 32 (6): 467-478.
- [2] 杜随更, 段立宇, 吴诗博, 等. 摩擦焊接初始阶段的摩擦机制及摩擦系数[J]. 机械科学与技术, 1997, 16(4):703-707.
- [3] 王希靖, 郭瑞杰, 阿荣, 等. 搅拌摩擦焊接头的温度检测[J]. 电焊机, 2004, 34(1):22-24.
- [4] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [5] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [6] 郭瑞杰. 搅拌摩擦焊温度场数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004.
- [7] 王希靖, 韩晓辉, 李常锋, 等. 厚铝合金板搅拌摩擦焊塑性金属不同深度水平流动状况分析研究[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(2):198-204. [1]

### 小资料

## 现代焊接技术的特征及在工业制造中的应用

1 现代焊接技术已成为最流行的连接技术  
在当今工业社会, 没有哪一种连接技术象焊接那样被如此广泛、如此普遍地应用在各个领域。而其中最主要的原因就是其极具竞争力的性价比。

2 现代焊接技术具有极高的技术含量  
在人类社会步入 21 世纪的今天, 焊接已经进入了一个崭新的发展阶段。当今世界的许多最新科研成果、前沿技术和高新技术, 诸如: 计算机、微电子、数字控制、信息处理、工业机器人、激光技术等, 已经被广泛地应用于焊接领域, 焊接已经从一种传统的热加工工艺发展到了集材料、冶金、结构、力学、电子等多门类科学为一体的工程工艺学科。这使得焊接的技术含量得到了空前的提高, 并在制造过程中创造了极高的附加值。

3 现代焊接技术已成为关键的制造技术  
焊接作为组装工艺之一, 通常被安排在制造流程的后期或最终阶段, 因而对产品质量具有决定性作用。正因为如此, 在许多行业中, 焊接被视为一种关键的制造技术。

4 现代工业离不开现代焊接技术  
在工业发达国家, 焊接被视为制造业的命脉。其主要根源就是基于这样一个事实: 许多工业产品的制造已经无法离开焊接技术的使用。如三峡水利工程、西气东输工程以及“神舟”号载人飞船, 哪个没有采用焊接结构? 以西气东输工程项目为例, 全长约 4300 公里的输气管道, 焊接接头的数量竟达 35 万个以上, 整个管道上焊缝的长度至少 1 万 5 千公里。离开焊接, 简直无法想象如何完成这样的工程。

(根据 <http://www.rjgy.com> 网站信息摘编)