影响搅拌摩擦焊金属塑性流动的因素

于勇征[1]， 罗 宇[1]， 栾国红[2]
（1. 大连铁道学院 材料科学与工程系，辽宁 大连 116028；
2. 中国搅拌摩擦焊中心，北京 100024）

于勇征

摘 要：针对 LF6/ LD10、L2/ T2 研究了搅拌摩擦焊（FSW）的金属塑性流动。通过工艺试验，分析了影响 FSW 金属塑性流动的因素。研究结果表明，被焊材料反复动态再结晶是其持续塑性流动的前提条件。影响金属塑性流动的因素主要有两个——材料的变形温度和变形速率。搅拌工具使材料保持高应变速率，并对材料快速加热，致使层错能很高的铝发生动态再结晶，促使其稳定流动。保持一定的焊接温度有利于金属动态软化，促进塑性流动，实现焊接。

关键词：搅拌摩擦焊；金属塑性流动；动态再结晶
中图分类号：TG453 文献标识码：A 文章编号：0253－360X（2004）05－117－04

0 序 言

搅拌摩擦焊（FSW）是英国焊接研究所（TWI）于 1991 年发明的一种新型焊接方法[1]。该方法具有无烟尘、无飞溅、无需添加焊丝、变形小等优点[2]。搅拌摩擦焊现已成为国内外研究的热点[3]。对 FSW 过程中的金属塑性流动的研究一直倍受关注。文中分析金属塑性流动是为了探究 FSW 的成形机理，并优化焊接工艺。

1 试验方法

试验中选取了 T2、L2、LF6、LD10 作为试验材料，皆为板材，规格为 200 mm× 50 mm× 3 mm。焊接时进行了测温。试验采用 C52 型立式铣床改装的搅拌摩擦焊设备，搅拌工具采用自制的 C 型（搅拌针根部直径 3 mm）。通过光学显微镜和扫描电镜（SEM），观察了接头的横截面。铝及其合金材料的腐蚀剂采用 Keller 试剂（150 mL H_2O，3 mL HNO_3，6 mL HCL，6 mL HF）。

2 试验结果及分析

2.1 金属的塑性流动对 FSW 接头组织的影响

在 FSW 焊接过程中，金属虽然处于固态，但是在接头区，金属的分布表现出类似于流体行为的特征——在异种材料接头的金相中金属形成了涡形层混结构（见图 1），这说明金属在焊接过程中"流动"了起来。产生此现象的原因是由于金属在一定温度下，受力而塑性变形，发生动态软化而表现出了类似于粘性液体的流动性。

图 1 异种材料（LD10/ LF6）焊接区域涡形层混结构

Fig. 1 Example of vortex structure in FSW zone for LD10Al/ LF6 Al alloy

典型 FSW 接头焊核区（Nugget）中的微观组织为精细的等轴晶（见图 2a），该区位错密度低于母材，沉淀相较少，在其上部区域，即靠近轴肩的地方，位错密度稍高些[3]。在热机影响区中原本纵向排列的晶粒在靠近焊核区的地方被转过了 90°，热机影响区中有少量的等轴晶出现（见图 2b），这里可能是焊接过程中材料温度较高的区域[3]。而在热影响区，晶粒只是在尺寸上明显变大。接头的横截面呈现不同的分区——这说明在不同区域的金属经历了不同的热与力的过程。

2.2 焊核区的组织分析

金属塑性流动主要发生在焊核区，这部分金属在焊接过程中发生了动态再结晶[4]。这是因为：（1）此处金属是由精细的等轴晶粒组成（见图3）；

收稿日期：2003－12－05

(2)在 FSW 过程中不可能发生静态再结晶;(3)焊核区中所观察到的再结晶晶粒尺寸的变化和实际焊缝中心所测得温度(L 2/L 2, 大于 0.7T_m, T_m 为热力学温度, 温度变化如图 4 所示, 焊缝中心温度为 883 K)都与动态再结晶的发生条件相符合。

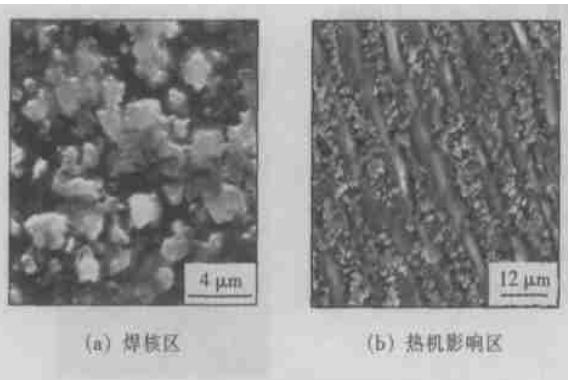

图 2 纯铝 L 2 接头 SEM 图

Fig. 2 SEM morphology of L 2 Al welded joint

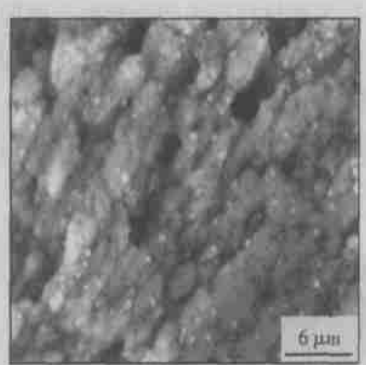

图 3 纯铝 L 2 焊核区 SEM 图

Fig. 3 SEM morphology of L 2 Al nugget

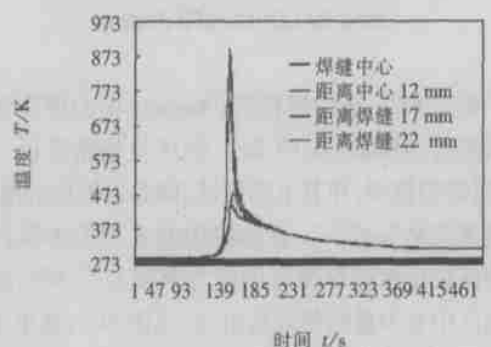

图 4 L 2(硬态)搅拌摩擦焊温度场分布

Fig. 4 Temperature of L 2 (Y2) Al during FSW

2.3 金属动态软化过程的分析

当搅拌工具插入待焊件, 轴肩与待焊件相接触后, 两者之间发生摩擦产生热量。此时建立起温度场。由于金属分别处于不同位置, 所以受到的热的影响和变形情况不同, 从而在物理性质以及力学性能上都会发生不同的变化。这时靠近搅拌针的 A 层发生了软化, 而 B 层的物理性能变化却不大(见图 5)。A 层的金属经过搅拌针(pin)的作用后经历了动态再结晶过程, 组织变成了精细的等轴动态再结晶晶粒(情形如同图 2a)。而 B 层金属由于没有达到足够的温度, 因此金属只能发生冷变形, 金属的晶粒仅仅是被拉长或挤压(情形如同图 2b 中的细长组织), 而没有发生再结晶。

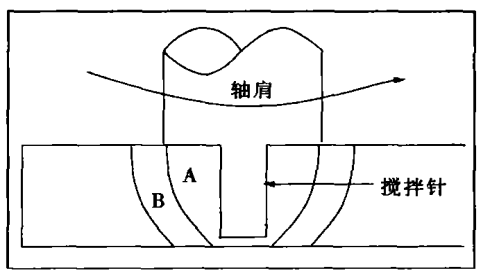

图 5 搅拌摩擦焊过程中金属动态软化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of metal dynamic soften course during FSW

2.4 搅拌摩擦焊过程中金属塑性流动行为分析

金属材料的力学性能和物理性能都与材料中的位错密度有关, 金属经历塑性变形时, 位错密度发生变化, 材料性能将相应发生变化。动态再结晶是材料在高温变形条件下, 晶粒重新形核并长大, 形成新的低位错密度晶粒的过程。该过程宏观表现是材料的变形抗力减小。

金属塑性变形时的流变应力与位错密度的方根($\sqrt{\rho}$)成正比, 所以理论上常用临界流变应力 τ_R描述动态再结晶的变形条件。影响 τ_R 的主要因素是材料的变形温度和变形程度。单位时间内的变形程度, 即是变形速率。升高变形温度和降低变形速率都可以使 τ_R 降低。高温变形的金属材料内的位错密度上升到一定值, 即当驱动力足够大时, 才会发生动态再结晶, 位错密度一般随变形量的增加而增加。动态再结晶降低了材料的流变应力而使之更易于变形。塑性变形过程中应变条件对变形抗力以及动态再结晶的影响可以从图 6 看出, 图中 ε_c表示高应变速率时, 开始发生动态再结晶的临界应变量, 流变应力在真应变为 ε_c 时达到一个临界值 σ_c, 此时再结晶刚刚开始, 加工硬化仍占上风, 故曲线继续上升, 但斜率逐渐减小。当流变应力达到极限值 σ_{max}后, 再结晶加快, 流变应力降到 σ_c 与屈服极限之间, 并保

持恒值,形成稳定流变,此时形变硬化和再结晶软化达到平衡,即开始稳定流变阶段[5]。以此可知在高应变率时,随着应变量的增加,材料在塑性变形的硬化过程中所表现出的变形抗力总会趋于一个饱和值,而搅拌摩擦焊属于是高应变率(大约≥20 ~ 50s^{-1})的加工过程,当焊接温度低于发生回复或再结晶的温度下变形时,位错密度增加,造成原子空位等格子缺陷而发生加工硬化;但在高于发生再结晶的温度下变形时,继变形之后紧接着就发生再结晶。高温下热变形使得再结晶在时间上并不落后于变形,克服了加工硬化,变形抗力减小,因而在现象上表现出粘性流动的特性。合理的焊接参数为材料的塑性流变过程提供了理想的温度和变形速率,从而使得材料能稳定的流动转移。

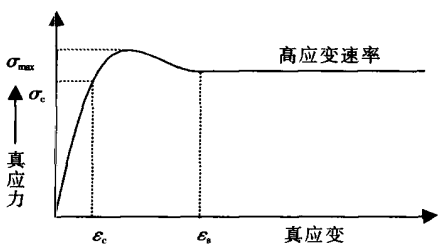

图 6　发生动态再结晶时真应力—真应变的特征曲线[5]

Fig. 6　Characteristic curse of stress and strain during dynamic recrystallization

动态再结晶包括生核和核心长大两个过程,具有反复形核有限长大的特点。已形成的核心在长大的过程中,继续经受变形,使再结晶部分位错增殖,变形储能增加,与其邻近的变形基体的能量差 ΔE_S 减小,使长大驱动力降低而停止长大,因而长大是有限的。再结晶部分的储能增大到一定程度,又会重新形成再结晶核心,如此反复,使得再结晶持续进行。焊接时,由于搅拌针对材料进行连续挤压,使得材料内部位错持续增加,保证了发生再结晶所需的能量,从而保证动态再结晶连续的进行下去,促使材料持续的流动。

以下是 FSW 过程中金属发生动态过程的具体情况。当金属位错密度迅速达到临界值并快速加热时,回复不易发生,再结晶驱动力较大,因而再结晶发生迅速[6]。铝及其合金的层错能较高,比较容易发生动态回复。而动态回复与动态再结晶之间是相互竞争的过程,决定该过程的因素主要有三个,晶粒中的位错密度、位错产生的速度、和材料的加热速度。由于搅拌针急速挤压金属,材料承受了极大的变形,其应变量和应变速率被迅速提高,晶粒的位错密度相应的急剧增加。这样就很容易达到动态再结晶的临界值,为材料发生动态再结晶提供了必要的条件。由于 FSW 是迅速加热过程(加热趋势由图 4 可知),所以铝合金在焊接时极易发生动态再结晶,而不是发生回复。搅拌针的持续旋转挤压使材料能多次再结晶。作者发现较高的旋转速度能使合金极易变形,很容易施焊,且焊后形成的流动形态很稳定。图 7 对应不同旋转速度(其它参数不变)对金属流动的影响。可见,随着旋转速度的提高,层状间混结构更加趋于稳定。这说明材料在高速变形时更易于流动。

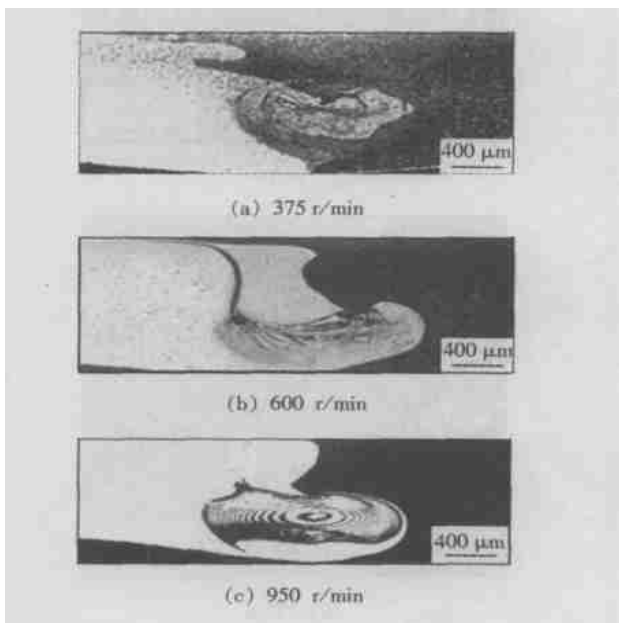

图 7　搅拌工具旋转速度对金属流动的影响

Fig. 7　Effect of spindle speed on metal flow

温度对于动态再结晶亦有决定性的影响。足够的温度才能保证发生动态再结晶所需的能量,所以只有在特定的温度范围内才会发生充分的动态再结晶,其形核与晶粒长大都受到温度的影响。根据这个特点,有研究者根据经验把金属从绝对零度到熔化温度 T_m(T_m 为绝对温度)分成了三个相应的温度区,以此来研究整个动态过程。

(1)完全硬化阶段 $T=(0\sim0.3)T_m$。

(2)部分软化阶段 $T=(0.3\sim0.7)T_m$, $0.3T_m$ 开始出现动态回复。

(3)完全软化阶段 $T=0.7\ T_m \sim T_m$, $0.6\ T_m$ 开始动态再结晶[7]。

在 1 273 K 时,纯铜T2 处于完全软化阶段,在此

温度时进行焊接，其焊核区中的晶粒是等轴晶粒(图8a)，这说明该区材料经历了充分的动态再结晶。当温度较低时(实测为 723 K)，焊核区中的晶粒的再结晶过程就很不充分，所得到的晶粒也没有充分的长大(图 8b，再结晶晶粒直径≤1 μm)，这时材料的变形抗力很大，金属很难流动，施焊非常困难。

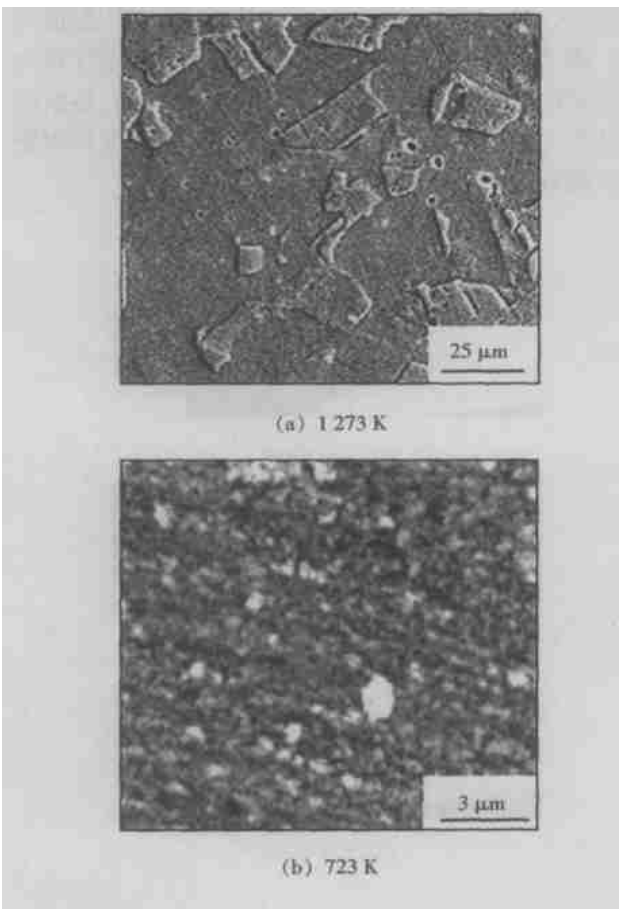

图 8 纯铜 T2 焊核区 SEM 图

Fig. 8 SEM microstructure of T2 Cu nugget

综上所述可知焊接时被焊材料必须保持较高温度和较高的变形速率。这两点对于保证材料发生充分的动态软化非常关键，这直接影响接头的性能。如果焊接温度不足时就会出现如图 9 所示的情形(T2/L2 的对接接头，右侧为 T2)，纯铝 L2 的熔点大大低于 T2，因此 L2 很容易达到完全软化的条件，此时 L2 能充分流动；而此时的温度不到 T2 之 T_m 的 1/2，所以 T2 仍然处于加工硬化阶段，T2 被整体剪切成小颗粒，不能发生如 L2 一样的塑性流动，此时两者无法一同流动并混合，因此很难形成接头。

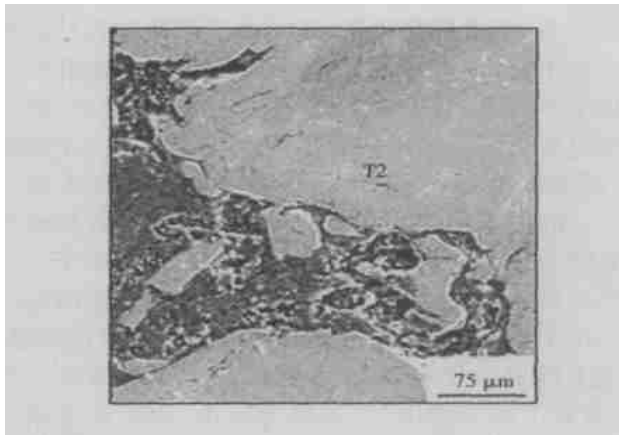

图 9 纯铜 T2 和纯铝 L2 异种材料焊接区的 SEM 图

Fig. 9 SEM microstructure of T2 Cu/ L2 Al weld zone

3 结 论

(1) 被焊材料反复进行动态再结晶是其持续塑性流动的前提条件。

(2) 影响金属塑性流动的因素主要是材料的变形速率和变形温度。搅拌工具使材料保持高应变速率，并且对材料快速加热，致使层错能很高的铝发生动态再结晶，使其能稳定流动。

(3) 保持一定的焊接温度有利于金属动态软化，因而能促进其塑性流动，易于实现焊接。

参考文献：

[1] Yingli E A, Trillo L E, Murr. Friction-stir welding of aluminum alloy 2024 to silver[J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19: 1047－1051.

[2] 栾国红，郭德伦，张田仓，等. 搅拌摩擦焊在飞机制造工业中的应用[J]. 航空制造技术，2002，(11)：20－23.

[3] Threadgill P L. Friction stir welding——the state of the art[R]. Industrial Member Report, 1999.

[4] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, *et al*. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum[C]. Scripta Materialia, 1997. 69－75.

[5] 侯增寿，卢光熙. 金属学原理[M]. 上海：上海科学技术出版社，1990. 212.

[6] 卡恩 R W. 金属与合金工艺[M]. 北京：科学出版社，1999.

[7] 周纪华，管克智. 金属塑性变形阻力[M]. 北京：机械工业出版社，1989.

作者简介：于勇征，男，1979 年 1 月出生，硕士研究生。主要从事搅拌摩擦焊方面的研究。发表论文 1 篇。

Email：yyz19790107@hotmail.com