

磁脉冲辅助半固态钎焊钎缝凝固组织的模拟研究

李雨连 黄尚宇 邓凌波 李清宁 冯 珂
(武汉理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 制备了 Zn-15Al 半固态钎料,采用磁脉冲辅助半固态钎焊方法对铜铝管进行了钎焊试验;基于 LS-DYNA 分析了钎焊过程中钎料的剪切流变行为,结合接头微观组织分析,建立了钎料剪切流变速率与初始形核密度的关系。将建立的形核模型耦合到后续冷却过程,采用 ProCAST 软件模拟分析了磁脉冲辅助半固态钎焊过程中钎缝的凝固行为,分析了钎焊温度和剪切速率对凝固微观组织的影响。结果表明,随钎焊温度升高,晶粒尺寸明显增加;剪切速率增大,形核密度增加,晶粒数量增加,尺寸减小;钎焊温度为 410 ℃ 时,能够得到良好的钎焊接头组织且钎料晶粒圆整,尺寸细小。

关键词 Zn-15Al 钎料;磁脉冲;半固态;凝固组织

中图分类号 TG454 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation of Solidification Microstructure of Brazing Seam in Semi-solid
Brazing Assisted by Magnetic Pulse

Li Yulian, Huang Shangyu, Deng Lingbo, Li Qingning, Feng Ke

(School of Material Science and Enigeering, Wuhan University of Technology)

Abstract: Zn-15Al semi-solid solder was prepared and brazing experiment of Cu/Al tube was carried out by mag-
netic pulse assisted semi-solid brazing. The shear rheological behavior of solder during brazing process was ana-
lyzed based on LS-DYNA, and the relationship between shear rate and initial nucleation density was established
combined with microstructure analysis of the joint. The nucleation model was coupled to the subsequent cooling
process, and the solidification behavior of the brazing joint microstructure in the semi-solid brazing process assis-
ted by magnetic pulse was simulated and analyzed by ProCAST software. The effects of the brazing temperature
and shear rate on the solidification microstructure were analyzed. The results indicate that the grain size is in-
creased obviously with the increase of brazing temperature. As the shear rate increases, the nucleation density is
raised, and the number of grains grows while the grain size is decreased. When the brazing temperature is 410 ℃,
desirable microstructure of the brazing joint can be obtained, and the grains become round and smaller.

Key Words: Zn-15Al Solder, Magnetic Pulse, Semi-solid, Solidification Microstructure

收稿日期:2021-05-22;修改稿收到日期:2021-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475345)

第一作者简介:李雨连,女,1996 年出生,硕士研究生,武汉(430070),E-mail:2366634701@qq.com

通信作者:黄尚宇,男,1963 年出生,教授,武汉(430070),E-mail:huangshy@whut.edu.cn

引用格式:李雨连,黄尚宇,邓凌波,等. 磁脉冲辅助半固态钎焊钎缝凝固组织的模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):238-242.

LI Y L, HUANG S Y, DENG L B, et al. Simulation of solidification microstructure of brazing seam in semi-solid brazing assisted by mag-
netic pulse[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):238-242.

双层减重窝设计,轮心减重窝为开口式减重窝,且轮辐的第一层减重窝和轮心减重窝相连接,轮辐的第二次减重窝设计在第一层减重窝内,其中黑色阴影部位为加工去料区域。

经优化设计后的车轮质量为 11.13 kg,毛坯质量为 15.21 kg,优化后的车轮金属利用率为 73.2%。优化后金属利用率大幅提高,证明了该方案的有效性。

该提高金属利用率的设计方案已经应用于实际生产,经多次生产验证,金属利用率提高了 6.2%~16.7%,且尺寸越大的车轮金属利用率提高的效果越明显。

3 结 语

在车轮设计阶段提出了低压铸造铝合金车轮的金属利用率的设计方案:①优先采用无轮唇的轮缘结构;②轮辋中段的角度 $\geq 3^\circ$;③轮辐背腔和轮心的减重窝设计为双层减重窝等,以提高金属利用率,该设计方案能将低压铸造铝合金车轮金属利用率提高到最大化,有效地降低生产成本。

参 考 文 献

[1] 宋柄材.铸造铝合金车轮的轻量化设计[J].铸造工程,2015(2): 30-32.
[2] GB/T 3487-2015.乘用车轮辋规格系列[S].

(编辑:张正贺)

铜铝管广泛应用于各工业领域,其可靠高效的连接是难点之一^[1]。在全球环境保护、节能减排和资源节约的背景下,轻量化、“铝代铜”已成为制造业的主流发展趋势^[2,3],然而由于铜铝的熔点、热膨胀系数等物理性质差异较大,采用传统的熔化焊焊接容易在接头处产生残余应力,难以形成良好的接头;其次铜铝的电负性差异较大,二者容易发生扩散,因此极易在接头中形成连续的层状金属间化合物,降低接头的力学性能。此外,铝母材表面存在一层致密的氧化膜,会阻碍铜铝的冶金结合。铜铝连接的应用需求更广泛、挑战也更严峻,迫切需要开发出一种优质高效的先进连接技术。因此,课题组先后提出了磁脉冲辅助钎焊^[4]、磁脉冲辅助半固态钎焊^[5]来连接铜铝异质管件。其中,磁脉冲辅助钎焊方法充分利用了电磁成形的特点,很好地解决了管件钎焊中的布料难题。而半固态钎料的热容量比液态要低,凝固速度更快,能够得到气孔率低、晶粒尺寸细小的铜铝接头组织。

为有效分析、评估和预测制品的组织性能,研究者结合特定铸造和焊接工艺,对制造过程中的组织凝固行为进行了大量的模拟研究^[6,7],在工艺参数优化和产品质量控制方面发挥了积极作用。本课题将针对磁脉冲辅助半固态钎焊这一特定工况,建立钎缝组织冷却凝固过程的分析模型,模拟其凝固行为,考察焊接温度和剪切速率对钎缝凝固组织及性能的影响,为该新工艺的参数优化设计、接头组织性能与品质控制以及后续的推广应用提供参考。

1 试验方案

考虑到 Zn-15Al 合金具有合适的固液区间,与 Cu、Al 均有较好的互溶性,且自身具有较高的强度,是较为合适的 Cu/Al 钎焊用钎料^[8,9],本课题采用 Zn-15Al 作为 Cu/Al 管磁脉冲辅助半固态钎焊的钎料。钎料制备分为 3 个阶段,首先按照质量比称取 Zn 和 Al,放入已经预热的坩埚中,待其全部熔化后搅拌均匀,将炉温降至预设的浇注温度,静置并保温约 10 min,用不锈钢网罩进行扒渣,然后将坩埚从炉中迅速取出,并浇注到石墨型内,形成铸锭;然后将铸坯重熔并在自制的甩带机上制成一定厚度的薄带,最后将带状钎料通过冷、热交替多次轧制成厚度分别为 400、300、200 μm 的薄片。

磁脉冲辅助半固态钎焊试验在自制的电磁成形设备上,试验工装见图 1。首先,将特定厚度的钎料按铜管直径绕成环状并套装于待连接部位,然后将铜管和铝管对中并轴向定位,再将成形线圈轴向移动至管件待连接部位并与管件对中;然后,电磁成形设备充电至

设定电压(7 kV)并放电,使内外管夹紧钎料并于内管下端形成止口,完成钎料装夹成形;最后,电磁成形设备再次充电至设定的复合成形电压(5 kV)。随后接通感应加热线圈加热钎料,当钎料温度升至设定的半固态温度后即断电,同时对成形线圈再次放电,脉冲电磁力驱动外管高速挤压薄壁环状半固态钎料并迫使其剪切流动,利用半固态浆料中固相颗粒对管壁的径向冲击和轴向剪切,有效去除母材表面氧化膜并细化钎缝组织。无钎剂实现铜管-钎料-铝管的整体复合成形合并扩散连接,冷却后即得到冶金结合的铜铝异质管件接头。

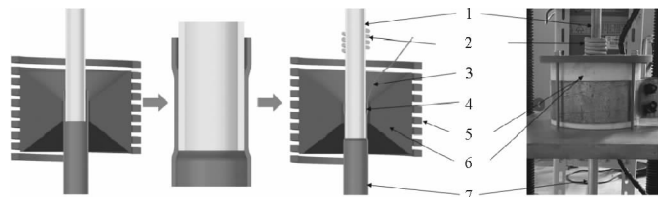


图 1 磁脉冲辅助半固态钎焊试验工装图

Fig.1 Tooling figure of magnetic pulse assisted semi-solid brazing experiment

1.Cu 管 2.感应加热线圈 3.热电偶 4.钎料 5.成形线圈
6.集磁器 7.Al 管

由于钎焊时钎料薄片重新加热到固液温度区间,且在钎焊过程中钎料受到外管的巨大冲击作用,原始固相组织被破碎成更小的颗粒,在剪切力的作用下,这些固相颗粒逐渐变得圆整,故不考虑钎料制备过程对初始形核密度的影响,仅考虑磁脉冲辅助半固态钎焊过程中钎料因高速剪切流变而带来的固相颗粒破碎对形核条件的影响。通过改变钎料厚度来改变剪切流变速率和初始形核密度,采用 Nano Measurer 软件来测试分析接头钎缝组织的晶粒尺寸与密度,将 400 μm 厚的钎料加热至对应的钎焊温度并自然冷却至室温后所测得的晶粒尺寸与密度作为零剪切速率条件下形核密度的计算依据。

2 分析模型

为考察磁脉冲辅助半固态钎焊过程中钎料高速剪切流变对初始形核条件的影响,需分析其对应的管件变形和钎料流变行为,其有限元模型见图 2。用 Hypemesh 对模型的各个部件分别进行网格划分,采用 LS-DYNA 进行磁场-流场-结构场耦合仿真分析。

不考虑钎焊过程中成形线圈、集磁器及铜管的变形,将其视为刚体,采用 * MAT_RIGID 模型;用由牛顿粘性定律计算得出的表观粘度来描述半固态钎料的流变特性,钎料和空气采用 * MAT_NULL 模型并且共节点,通过关键字卡片将空气边界设置为无反射边界,具体参数见表 1。采用 Johnson-cook 本构模型来描述成

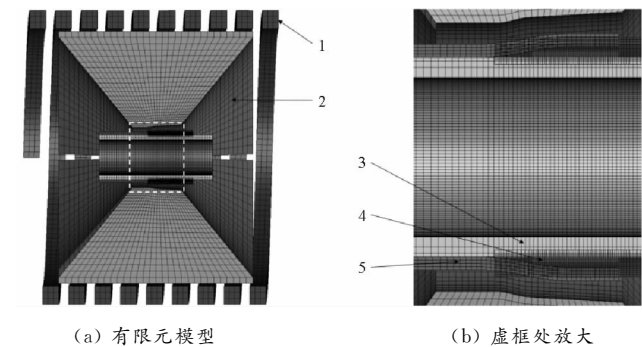


图 2 磁脉冲辅助半固态无钎剂钎焊 Cu/Al 管有限元模型
Fig.2 Finite element model of semi-solid fluxless brazing of Cu/Al tube assisted by magnetic pulse
1.成形线 2.集磁器 3.Cu 管 4.钎料 5.Al 管

形过程中 1060Al 管的变形行为:

$$\sigma = [A + B(\epsilon^p)^n] \left[1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^d \right] \quad (1)$$

式中, σ 为应力; ϵ^p 为有效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考塑性应变率; T 为温度; T_r 为室温; T_m 为材料熔点; A 、 B 、 c 、 n 、 d 为 Al 管性能参数, 见表 2。

表 1 钎料和空气的物性参数
Tab.1 Parameters of solder and air

	密度/(g·cm ⁻³)	粘度/(Pa·s)
Zn-15Al	5.2	5.5
空气	0.001 25	0

表 2 Al 外管的 Johnson-cook 本构模型参数
Tab.2 Parameters for Johnson-cook constitutive model

A/MPa	B/MPa	n	c	d
60	148	0.42	0.047	1

凝固过程模拟分析基于 ProCAST 软件进行, 其有限元模型见图 3, 环状钎料外径为 $\phi 17$ mm, 高为 7

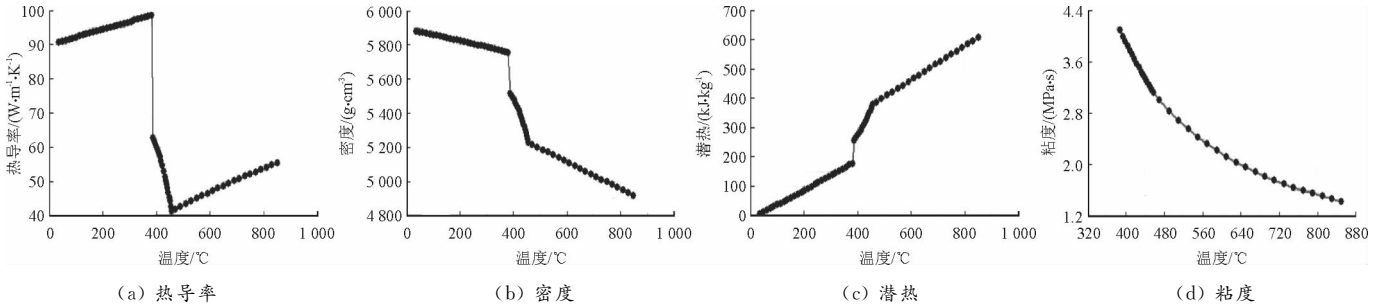


图 4 Zn-15Al 合金的热物性参数
Fig.4 Thermophysical parameters of Zn-15Al alloy

3 结果分析与讨论

图 5 为不同厚度钎料剪切流变的应力云图。可以看出, 钎料越薄, 其所受剪应力越大, 这是因为钎料厚度越小, 外管与钎料间的间隙越大, 也就是说, 其撞击钎料前的加速间距越大, 撞击挤压钎料时的速度更大, 钎料受到的冲击与剪切作用更强。图 6 为不同钎料厚度条

mm, 厚为 400 μ m, 用 Meshcast 模块进行网格划分。

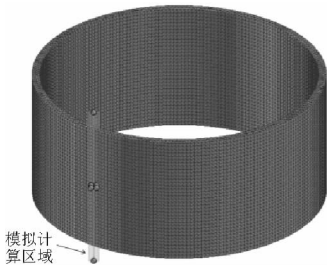


图 3 Zn-15Al 环状钎料凝固分析有限元模型
Fig.3 Finite element model for solidification analysis of Zn-15Al ring solder

为了减少计算时间, 凝固过程模拟仅取 400 μ m $\times$ 400 μ m $\times$ 7 mm 区域进行计算, 钎料设置为半固态, 剪切速率通过钎料剪切流变行为分析获得。Zn-15Al 合金的液相线温度为 461 $^{\circ}$ C, 固相线温度为 383 $^{\circ}$ C。将合金成分输入到凝固计算模型中, 得到的 Zn-15Al 合金物性参数, 见图 4。

枝晶生长速度 v 计算如下^[10]:

$$v(\Delta T) = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 \quad (2)$$

式中, ΔT 为过冷度; a_2 、 a_3 为与钎料合金有关的系数; 对于 Zn-15Al 合金, $a_2 = 2.707\ 53 \times 10^{-7}$ m/(s $\cdot$ K³), $a_3 = 7.055\ 36 \times 10^{-8}$ m/(s $\cdot$ K³)。

形核参数分别为: 体平均过冷度 $\Delta T_{v, \max} = 0.1$ K、面平均过冷度 $\Delta T_{s, \max} = 0.5$ K、体过冷度标准方差 $\Delta T_{v, \sigma} = 0.2$ K、面过冷度标准方差 $\Delta T_{s, \sigma} = 0.1$ K, 面成核密度 $n_{s, \max}$ 根据铜铝管材料物性参数设定为 3×10^8 , 体成核密度 $n_{v, \max}$ 则根据后面建立的初始形核模型确定。初始温度分别为 390、410、430 $^{\circ}$ C; 传热系数设为 2 000 W/(m² $\cdot$ K)^[11]。

件下所得钎焊接头钎缝区域的扫描电镜 (SEM) 形貌, 其中钎焊温度为 410 $^{\circ}$ C, 第一次放电电压为 7 kV, 第二次放电电压为 5 kV。由图 6 可知, 钎料越薄, 接头钎缝组织晶粒越细, 这是因为剪应力越大, 钎料剪切流变越剧烈, 半固态钎料中固相颗粒间剪切碰撞越厉害、破碎越严重, 形成更多、更细小的核心, 因此冷却凝固后晶粒尺寸越小。

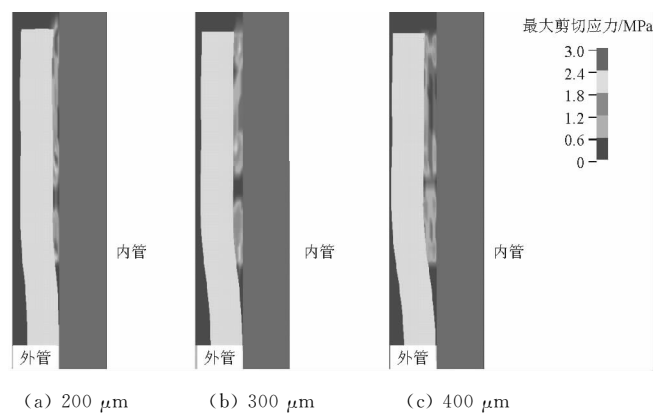


图 5 不同厚度钎料钎焊过程中的剪切应力云图
 Fig.5 Shear stress nephogram of solder with different thickness

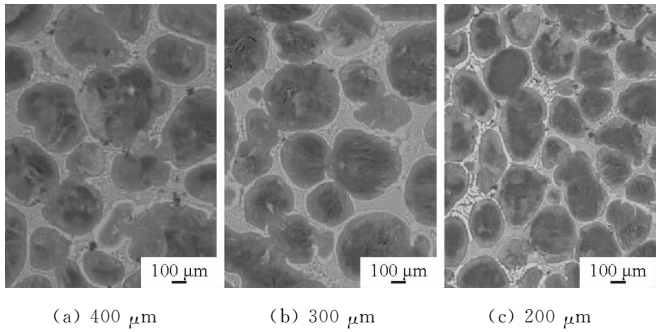


图 6 不同钎料厚度下接头钎缝 SEM 形貌
 Fig.6 SEM morphologies of solder joints with different thickness

提取钎料剪切流变分析数据,并根据剪切应力 τ 与剪切速率 r 的关系($r=\tau/\eta$, η 为粘度),可得到钎料不同厚度条件下的剪切流变速率为 285 455、349 091、434 546 s^{-1} 。结合图 6 所测得的钎缝组织平均晶粒尺寸(38.5、31.5 和 25.0 μm),可计算出不同厚度钎料钎焊所得钎缝组织的晶粒密度为 3.5×10^{13} 、 5.8×10^{13} 、 1.2×10^{14} ,由此可建立剪切速率与初始体形核密度的关系见图 7,结合剪切速率为 0 时钎料晶粒密度的测试数据(1.9×10^{13}),拟合得到如下形核密度模型:

$$n_{v,\max}=7.4\times10^{11}\times e^{r/88\ 235}+1.77\times10^{13}\quad (3)$$

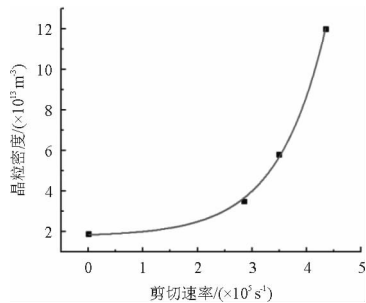


图 7 剪切速率与晶粒密度的关系

Fig.7 Relationship between shear rate and grain density

将磁场-流场-结构场耦合模拟所得的钎料剪切流变速率代入式(3),即可确定对应钎焊条件下半固态钎

缝冷却凝固的初始体形核密度。结合已建立的冷却凝固分析模型,得到钎缝凝固组织模拟结果见图 8,可见与图 6 的 SEM 形貌测试结果总体相符,3 种剪切速率下模拟晶粒平均尺寸分别为 42.1、34.8 和 26.7 μm ,均大于对应的 SEM 形貌分析结果,最大计算误差为 10.5%。误差产生的原因可能有:①在试验过程中统计晶粒尺寸时取样晶粒太少,计算出的平均晶粒尺寸结果不够准确,导致建立的形核模型不够精确;②钎料厚度不同,与外界的热交换也会有差异,传热系数有所不同,而在本模型中,传热系数设为定值,所以导致模拟与试验存在误差。钎料越薄冷却凝固过程越快,凝固组织越细小,所以试验测得的晶粒尺寸较细,模拟结果的晶粒尺寸比试验结果大。

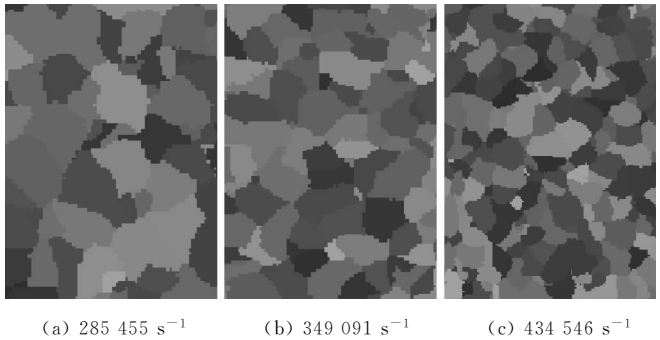


图 8 不同剪切速率钎料凝固组织模拟结果
 Fig.8 Simulation results of solder solidification microstructure at different shear rates

由图 8 可知,剪切流变速率改变了初始形核条件,进而影响钎缝凝固组织的晶粒尺寸。也就是说,随着剪切流变速率增大,因剪切流变而形成的异质质点增多;在相同的冷却条件下,异质质点能够形核并长大的几率是一定的,异质质点总数增加,形核长大的核心数亦相应增多,导致晶粒数目增加,晶粒尺寸减小。

图 9 为剪切流变速率为 285 455 s^{-1} ,不同钎焊温度条件下钎缝凝固组织的模拟结果。图 10 是对应条件下所得钎焊接头的金相组织。可以看出,模拟结果与金相图均显示出晶粒尺寸随温度升高而增大的规律,这是因为当钎焊温度较低时,钎料的固相率较高,半固态钎料中所含初始晶核增多,而成核数目越多,晶粒生长互相间的阻碍会增大,使凝固组织晶粒尺寸减小;而当钎焊温度较高时,钎料因固相率降低而使形核率降低,晶核有更大的空间和更多的时间生长,因此钎缝凝固组织的晶粒尺寸更粗大。由图 10 可知,随钎焊温度升高,钎缝凝固组织由球状晶演变为玫瑰晶,而模拟结果不能体现出这种演变。此外,钎焊温度升高,铜铝间的扩散反应会增强,更易在铝侧界面形成脆性的金属间化合物,见图 10c 中 Al 侧界面;而当钎焊温度过低时,钎料因固相率太高而导致其流动性显著降低,不足以润湿母材表

面,钎料与母材间难以形成良好的冶金反应,甚至焊不上,见图 10a 中 Cu 侧界面。

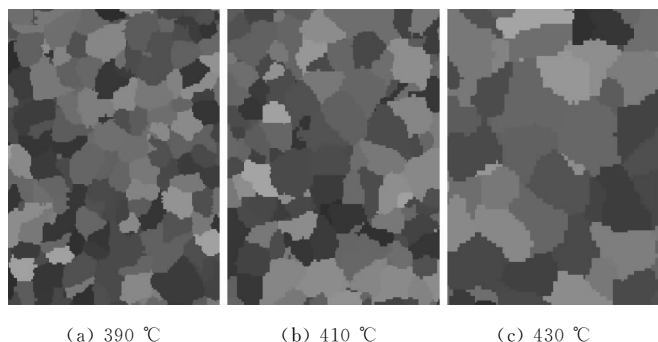


图 9 不同温度的接头焊缝中钎料的微观组织模拟结果
Fig.9 Microstructure simulation results of solder in joint welds at different temperatures

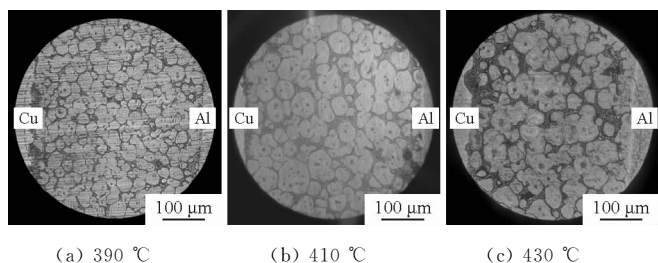


图 10 不同温度的接头焊缝中钎料的微观组织金相图
Fig.10 Metallographic microstructure of solder in joint welds at different temperatures

需要指出的是,本课题只分析了钎缝的冷却凝固过程,没有考虑到界面间的扩散反应,无法像金相图一样,显示出接头完整的微观组织形貌,这也是后续研究中需重点考虑的。

4 结 论

(1)基于 LS-DYNA 对磁脉冲辅助半固态钎焊过程进行了磁场-流场-结构场耦合仿真,结合钎焊接头微观组织分析,讨论了钎料剪切流变速率对初始形核条件的影响,建立该工艺条件下钎缝组织冷却凝固的形核模型。

(2)将形核模型耦合到冷却凝固过程,基于 ProCAST 软件,对该工艺的钎缝组织进行了模拟分析。发现当钎焊温度较低时,钎缝晶粒尺寸较小,但接头不易焊接;而钎焊温度过高时,钎缝组织晶粒粗大,且界面处已形成脆性金属间化合物;当钎焊温度为 410 °C,且其他参数合适时,能够得到良好的钎焊接头,且钎缝晶粒圆整,尺寸细小。

参 考 文 献

[1] NITIN P, RAVI T. A review on recent advances in friction stir lap welding of aluminium and copper[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(8): 8 387-8 393.

[2] TEKKAYA A E, ALLWOOD J M, BARIANI P F, et al. Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(2): 629-653.

[3] 张灿峰.“铝代铜”在制冷空调及热泵行业的应用[J].制冷与空调, 2016, 16(8): 102-104.

[4] LEI Y, HUANG S Y, LIU W, et al. Dissimilar Cu/Al tube joint by EMF-assisted brazing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(9): 4 039-4 047.

[5] 黄尚宇,黄海川,雷雨,等.一种半固态无钎剂辅助的异种金属钎焊装置及方法:中国专利,201811132724.6[P]. 2018-09-27.

[6] 胡汉起.金属凝固原理[M].北京:机械工业出版社,2007.

[7] 袁训锋.二元合金定向凝固过程的相场模拟[D].兰州:兰州理工大学,2008.

[8] XIAO Y, JI H, LI M, et al. Ultrasound-assisted brazing of Cu/Al dissimilar metals using a Zn-3Al filler metal[J]. Materials & Design, 2013, 52(12): 740-747.

[9] 王振东,黄尚宇,李佳琪,等. Zn-Al 钎料固相率及组分对 Cu/Al 管磁脉冲-半固态复合辅助钎焊接头质量的影响初探[J].材料科学与工艺, 2020, 28(4): 1-7.

[10] GANDIN C A, DESBIOLLES J L, RAPPAZ M, et al. A three-dimensional cellular automaton-finite element model for the prediction of solidification grain structures[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1999, 30(12): 3 153- 3 165.

[11] 方继恒,刘曦,谢明,等. 过热度、传热系数以及高斯分布参数对 Ag-28Cu-2Ni 合金凝固组织的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 3 077-3 084.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

《特种铸造及有色合金》杂志社

地址:武汉市江岸区江大路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

