

Cu-Al 异种金属超声焊接过程模拟

李 欢， 曹 彪， 杨景卫， 崔晓宇
(华南理工大学 机械与汽车工程学院,广州 510640)

摘 要: 利用有限元方法建立了 Cu-Al 超声焊三维热-力耦合模型. 热源包括摩擦热和塑性变形热,其热流密度与焊接不同阶段材料的振幅相关. 焊接过程超声变软影响温度场分布、应力、应变场和齿的嵌入,模拟合理考虑了铜、铝超声变软的数学模型. 模拟结果表明,铜和铝的块体温度均低于熔点,最高温度出现在焊头与铜板的接触面中心;Cu-Al 连接界面最高温度出现在焊接区域中心处. 同时也模拟了齿的嵌入,焊接过程中焊头齿完全嵌入铜表面,但底座齿并未完全嵌入铝中. 与热电偶测温 and 焊接截面形貌对比验证表明,模拟结果与实际基本吻合,较好地模拟了超声变软、热和力三者之间的作用.

关键词: 超声金属焊; 有限单元法; 超声软化; 异种金属

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150908002

0 序 言

随着电子、航空工业的发展,铝铜接头应用日益增多. 由于铝、铜之间物理性质的差异、焊接过程中容易形成脆性中间相以及铝表面有致密不易去除的氧化膜等特点,使得传统的熔化焊、电阻点焊在焊接此类接头时可焊性差、焊接强度不高. 固相焊接方法,例如搅拌摩擦焊接 Cu-Al^[1-2] 能获得较高质量的焊接,但对装配要求较高,且搅拌头容易磨损. 超声波金属焊接为固相连接,焊接时间较短,消耗能量比电阻焊低,且不需要气体保护、焊料以及填充等,目前在 Cu-Al 焊接领域已有报道^[3-4].

早期机理的研究包括通过力学试验研究材料超声软化、硬化行为和理论上研究连接面的接触应力分布两个方向^[5]. 随着超声金属焊研究的不断深入和大功率超声焊机的出现,焊接机理已不局限于氧化膜破碎、分子间作用力,还包括局部熔化、冶金反应,如扩散、再结晶等. 但大功率超声焊接区域中心温度难以通过试验手段测量,目前相关研究大都是用热电偶测试焊接区域边缘或边缘附近的温度. 不仅如此,实际上超声金属焊接更是一个超声振动、热和力三者不断耦合(相互作用)的过程,但现有的试验手段很难对此进行研究,而耦合的过程影响着温度场和应力场的动态分布,使得目前对超声金属焊接机理依然认识不足. 有限元方法可以不受试验

条件拘束,通过对模型简化来研究焊接过程耦合机理.

目前超声金属焊模型很少考虑超声变软对焊接区域温度场影响. Kim 等人^[6]模拟了齿的嵌入,但在模型中没有考虑超声变软对应力、应变分布的影响.

1 超声焊接试验

图1是实测的上板(纯铜)和下板(铝合金)的振幅分布曲线,表明焊接过程上板、下板及焊接过程中振幅分布均存在差异,过程模拟考虑实际振幅分布.

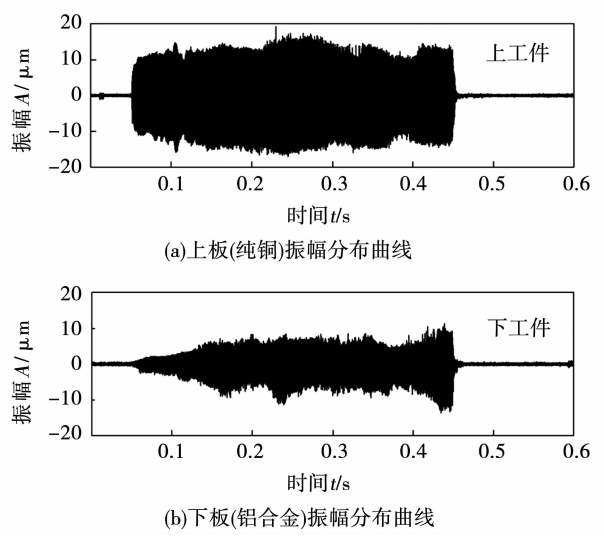


图1 焊接过程工件振幅

Fig. 1 Vibration amplitude of specimens during welding

超声金属焊机为瑞士 TELSONIC 公司 M5000 型超声金属焊机, 额定功率 4 000 W, 振动频率 20 kHz. 焊接工艺参数为压力 1 575 N, 振幅 21 μm , 焊接时间 0.4 s. 焊头和底座材料均为 M2 高速工具钢, 焊头底端轮廓均为矩形块状结构. 焊头端面有 9 个齿. 焊接用材料为 100 mm $\times$ 25 mm $\times$ 0.8 mm 的 T2 (Y₂态) 铜和 6061-T6 铝合金. 试片焊接采取搭接放置, 重叠区域为 25 mm $\times$ 25 mm. 试验采用 LK-G5001 激光位移传感器测量焊头、上板和下板的位移.

2 数值模拟过程

利用有限元软件 ANSYS 的多物理场分析模块建立了一个超声波金属焊接热力耦合模型, 模型中超声振动、热场和力场三者之间耦合作用的思路为: 热源包括摩擦热和塑性变形热, 塑性变形热与材料变软程度有关. 超声振幅影响材料变软程度, 从而影响温度场分布; 在超声和热作用下材料变软使得屈服点明显降低, 温度也影响包括摩擦系数的材料力学参数, 从而影响力场分析结果; 力场的摩擦系数的改变又影响热场.

2.1 有限元模型

模型考虑了焊头端面所有齿. 尽管超声振动破坏了结构对称性, 但由于振幅相对模型宽度而言可被忽略, 在超声振动方向取 1/2 模型进行热和力耦合分析. 由于钢导热率小, 在模型中焊头和底座在模型中均选取部分区域. 为减小计算量, 所有网格均为六面体单元, 并采取非均匀网格划分, 在焊接区域细化网格, 远离焊接区域网格稀疏, 中间区域采取渐变网格划分方式. 图 2 为所建模型, 图 2a, b, c 分

别为 3D 模型, 焊接附近区域沿截面和对称面的网格. 有限元模型单元总数为 91 718 个.

2.2 材料属性及本构关系

模型中除密度、泊松比外的材料物理属性考虑随温度变化, 表 1 和表 2 分别为铜和 6061 铝合金物理性能随温度变化的数值.

表 1 铜物理性能随温度变化

Table 1 Temperature-dependent properties of copper

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	导热系数 $\lambda/$ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热 $C/$ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	屈服强度 R_{eL}/MPa	线膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$
20	401	389	215	21.80
100	393	397	208	23.40
200	389	409	192	24.50
300	379	420	140	25.60
400	373	426	96	—
500	366	435	32	27.00

表 2 6061-T6 物理性能随温度变化

Table 2 Temperature-dependent properties of 6061-T6

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	导热系数 $\lambda/$ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热 $C/$ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	屈服强度 R_{eL}/MPa	线膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$
20	154	896	275	17.00
100	185	915	260	—
200	185	949	224	17.3
300	207	1 041	110	—
400	222	1 178	37	—
500	220	1 280	10	17.64

超声金属焊模拟使用的本构模型有随动强化、约翰逊-库克 (Johnson-Cook) 等. Johnson-Cook 模型为大应变率条件下的理想塑性模型, 但其更适合于仅受温度影响的大应变场合^[7]; 随动强化模型中考虑了材料在循环加载时的包辛格效应, 是超声金属焊接模拟中使用最广泛的材料模型. 但考虑到齿嵌入材料出现的大变形且铝、铜在大应变率下的动态再结晶本构近似于理想塑性硬化, 模型中选用等向强化本构模型.

2.3 模型加载及边界条件

模型中焊头接触面摩擦系数为 0.55^[8]; 底座接触面摩擦系数在低温取 0.4, 超过 150 $^{\circ}\text{C}$ 取 0.5^[9]; 工件接触面在低温取 0.25, 超过 150 $^{\circ}\text{C}$ 取 0.3. 考虑到材料表面状态的动态变化, 实际接触面的接触热导是逐渐上升 (接触热阻逐渐下降), 根据 Yadav 等人^[10] 的研究, 假定其为线性上升, 初始值为 2 000 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[6], 焊接结束时为完全传热条件.

根据试验测得的振幅结果, 铜振幅保持在 10 μm , 铝合金振幅在 0 ~ 0.05 s 取 2.5 μm , 0.05 ~

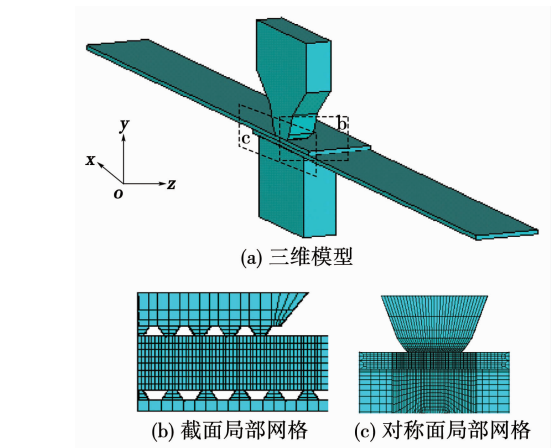


图 2 3-D 超声金属焊模型及局部区域离散
Fig. 2 3-D model for ultrasonic metal welding and discretization of local area

0.35 s 取 5 μm,0.35 ~ 0.4 s 取 10 μm. 热源分段考虑为 0 ~ 0.05 s,摩擦热发生在所有接触面上,塑性变形热发生在工件连接面和焊头与铜的接触面,铝合金在此阶段主要为弹性变形,不考虑弹性滞后能;0.05 ~ 0.35 s 热源加载部位与上阶段相同,尽管此阶段中铝合金已进入塑性屈服阶段,但由于振幅值较低,剪切力产热少,因此也不考虑底座接触面塑性变形热;0.35 ~ 0.4 s 摩擦热、塑性变形热发生焊头接触面和底座接触面,但此阶段材料均已接近完全屈服,不考虑焊件内部的塑性变形热.

由于连接区域很快形成^[3-4],且面积变化不大,因此不考虑塑性变形和摩擦区域的变化,在模型中假定为方形. 图 3 为模型热源作用区域图. 图 3a 是通过剥开焊接面来确定材料摩擦区域和塑性变形区域;图 3b 是底座齿与铝板热源区域. 模型中工件接触面塑性变形区域面积为 35 mm²,摩擦区域面积为 28 mm².

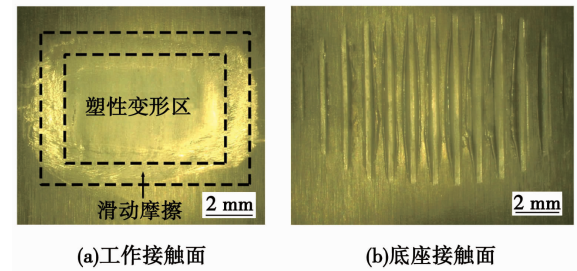


图 3 模型热源作用区域

Fig. 3 Schematic representation of heat flux area

在模型中,压力施加在焊头的顶端面,底座底面约束 y 向固定位移,对称面施加对称位移约束. 摩擦热和塑性变形热分别施加在摩擦区域和塑性变形区,对称面为绝热边界,模型中与空气所有接触面都定义为对流换热面,同时为弥补忽略辐射换热的不足,将对流换热系数人为定为 15 J/(m²·℃);焊接初始温度为 25 ℃. 由于齿嵌入工件材料的过程为大变形问题,在分析时打开大变形选项,并增加每个子步平衡迭代数. 当载荷步之间材料属性(如屈服强度等)改变时应用重启动分析方式使计算时间点连续;此时采用较小时间子步来确保计算收敛.

2.4 超声变软系数及热源计算

材料变软包括温度变软和超声变软,在模型中考虑材料变软率的动态变化,材料变软在模型体现在屈服强度下降. 超声变软率计算式为^[11]

$$\alpha_{us} = (1 - d I_{us})^a \tag{1}$$

式中: d 和 a 为相关待定系数; I_{us} 为声强密度.

根据相关文献[12-13]多点曲线拟合的结果,在 20 kHz 振幅条件下,铜和铝的超声变软率计算式分别为

$$\alpha_{Al} = \left[1 - 0.1056 \times \left(\frac{\xi_{Al}}{5.6} \right)^2 \right] \tag{2}$$

$$\alpha_{Cu} = \left[1 - 0.28643 \times \left(\frac{20\xi_{Cu}}{170.5} \right)^2 \right]^5 \tag{3}$$

式中: α_{Cu}, ξ_{Cu} 为铜的超声变软率和振幅; α_{Al}, ξ_{Al} 为铝的超声变软率和材料振幅.

超声变软对材料塑性影响主要表现为屈服强度下降,即

$$R_{eL} = R_{eLT} \cdot \alpha_{us} \tag{4}$$

式中: R_{eLT} 为随温度变化的屈服强度.

摩擦热与频率 f 和材料相对振幅值 Δξ 有关,根据库仑摩擦定理来计算. 假定塑性变形全部转为热量,且与最大剪切力有关. 塑性变形热计算式为

$$q_p = \frac{4 R_{eL} \Delta \xi f}{\sqrt{3}} \tag{5}$$

式中: q_p 为塑性变形热.

3 模拟结果分析与讨论

3.1 温度场分布

图 4 为 0.4 s 时的 3D 温度场分布. 此时最高温度为 428 ℃,出现在焊头接触面中心. 由于铜和铝导热系数的差异,材料之间温度场为非对称分布,且铜等温线范围比铝宽.

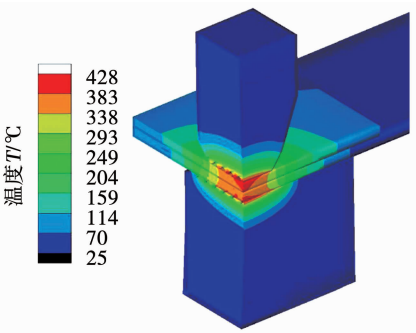


图 4 温度场分布(0.4 s)

Fig. 4 Temperature distribution at 0.4 s weld time

图 5 为连接界面焊接区域温度场分布,最高温度出现在区域中心,为 383 ℃,材料过程中心处温度上升速率为 957.5 ℃/s.

图 6 为界面中心处温度随时间变化关系. 由图 6 可以看出,在 0.15 s 后连接面中心温度与时间近似为线性关系.

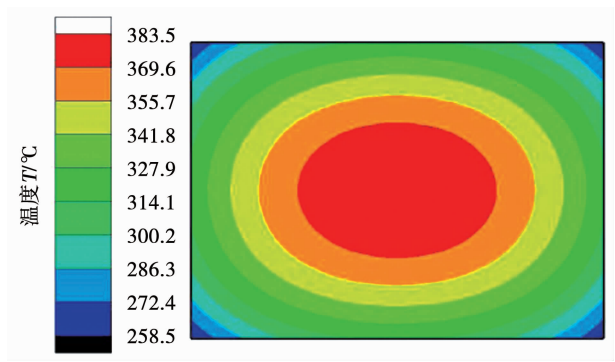


图 5 工件界面温度分布(0.4 s)

Fig. 5 Temperature distribution at weld interface at 0.4 s

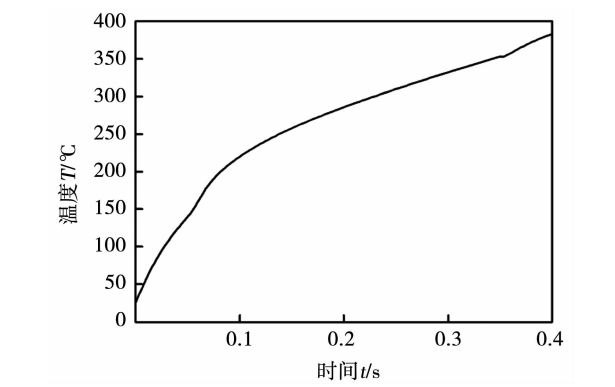


图 6 工件界面中心温度随时间变化

Fig. 6 Variation of temperature at center of work-work interface with time

3.2 齿动态嵌入过程

图 7 是 0.4 s 的 y 向位移分布. y 向位移分布能反映齿的嵌入. 由图 7 中可以看出, 焊头端面的齿完全嵌入铜表面, 而底座端面齿并未完全嵌入 6061 铝合金下表面, 焊头下压位移为 0.253 mm.

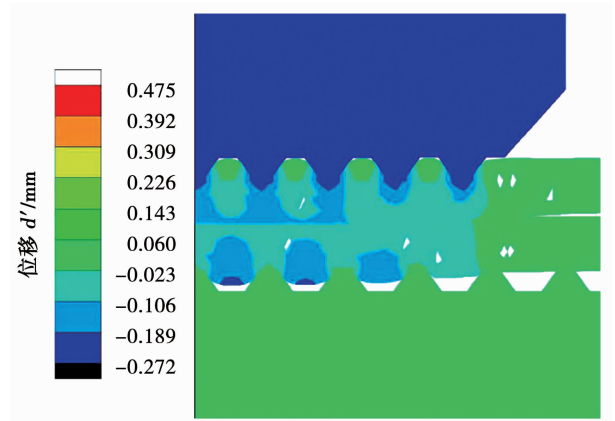


图 7 位移分布

Fig. 7 Displacement distribution at 0.4 s

3.3 模型验证

3.3.1 热电偶测温验证

采用直径 0.1 mm 的 K 型热电偶测温来验证温度场模拟结果. 测温方法为: 沿两搭接试片的界面从边缘钻直径 1 mm 圆孔深入到焊接区域, 用精密电阻点焊设备将热电偶端头嵌入铝合金的半圆槽中, 其它引出部分做好绝缘处理. 测温点选择在焊接区域长边对称线距离连接面中心 1.5 mm 处.

图 8 为 K 型热电偶测温结果与模拟结果的对比. 由于人为设定在 0.1 s 前工件接触面有恒定接触热阻之后为完全传热, 且测温区域非中心区域, 导致温度历程曲线在 0.1 s 处温度变化曲线出现拐点. 从温度数据对比可知, 模拟结果与实测结果吻合较好.

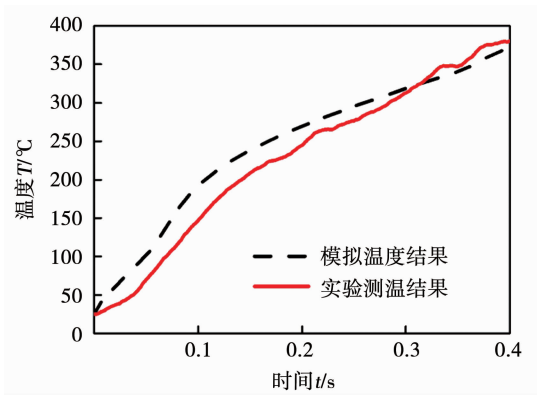


图 8 模拟温度结果和试验结果对比

Fig. 8 Comparison of experimental measurements and simulation results for temperature

3.3.2 焊接截面对比验证

图 9 分别是焊接和模拟试验得到的中心横向截面轮廓. 由图 9 可以看出, 焊头端面齿完全嵌入铜

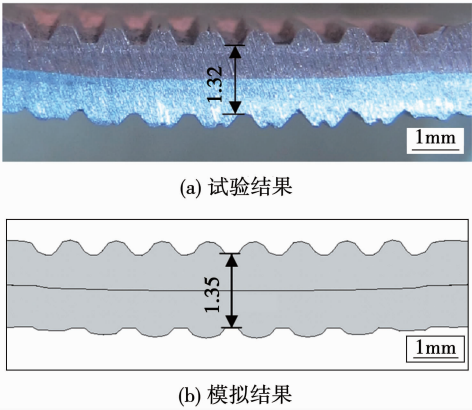


图 9 焊件横截面试验与模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of experiment and simulation results for welding cross-section

表面;底座的齿都没有完全嵌入铝合金表面,且越远离焊接中心齿嵌入深度越小,模拟结果嵌入较实际偏小,且越远离中心齿嵌入深度越小,原因是越远离焊接中心温度越低。模拟结果表现了与试验相同的齿嵌入深度分布情况,下板嵌入小是模型简化带来的误差。总体上看,模型较好地模拟了齿的嵌入。

3.4 结果讨论

从温度场分布模拟结果(图4)可知,超声焊接过程最高温度出现在焊头接触面上,主要原因是这里的摩擦产热与塑性变形产热量高。实际上焊头接触面产热比工件接触面高,与实际相符。

温度模拟结果中(图8),在0~0.1 s阶段内温升速度比实际测温高,其原因是,在焊接初始阶段大约10 ms内,热源主要为齿嵌入铜过程中产生的塑性变形热,而该阶段工件接触面不存在热源引起的温升作用,模拟中采用了均匀的热源加载,导致了初始温度比实际高。

从图7和图9中可以看出,焊头齿完全嵌入铜上表面,对于底座接触面,即使是中间的齿也并未完全嵌入铝表面。这一现象可以从大功率超声焊接过程振幅分配规律来解释;在焊接初期主要为焊头与铜表面摩擦,铜发生屈服后超声振幅传递给铜,使得其在超声和热作用下变软,工件接触面产生摩擦并逐渐进入塑性连接。此后工件接触面超声振动传递到下板铝合金中,下板的振幅明显偏小且是一个渐变的过程。由图1的实测结果可知,下板振幅长时间处于焊头一半以下的水平,因此底座齿嵌入深度有限。底座压痕分布不均匀主要是由于表面压力分布不均匀及焊接变形导致的。模型考虑振幅分配,能够较好模拟齿的压入,更接近超声金属焊接实际情况。

4 结 论

(1) 在大功率焊接过程中,超声变软大幅降低了材料屈服强度,模型中超声变软不仅影响材料应力应变场,也影响温度场分布。模型考虑超声作用下材料的塑性变形及产热,更符合实际情形。

(2) 模拟结果表明,超声焊接Cu-Al属固相焊接,最高温度点位于焊头与铜接触面,工件接触面最高温度为383℃。由于热物理性能的差异,铜与铝合金温度场呈现非对称分布。

(3) 模拟了焊头和底座的齿嵌入工件的情况。在焊接过程中,焊头齿完全嵌入铜上表面,底座齿未完全嵌入。

(4) 模型考虑了塑性变形热、超声振幅分配影

响及较完整的材料性能与边界条件等,较好地模拟了超声、热和力三者之间的作用。

参考文献:

- [1] 董丰波,陈文华,宿国友,等.母材相对位置对搅拌摩擦焊接铝/铜异种金属接头性能的影响[J].焊接学报,2011,32(10):85-88.
Dong Fengbo, Chen Wenhua, Su Guoyou, *et al.* Effect of base metal relative positions on properties of Al/Cu FSW joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 85-88.
- [2] 吴小伟,沈以赴,李博,等.铝-铜搅拌摩擦焊接搭接焊缝共晶组织形成与抑制[J].焊接学报,2014,35(1):87-90.
Wu Xiaowei, Shen Yifu, Li Bo, *et al.* Formation and inhibition of eutectics in Al/Cu dissimilar metal lap joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 87-90.
- [3] Yang J, Cao B, He X. Microstructure evolution and mechanical properties of Cu-Al joints by ultrasonic welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(6): 500-504.
- [4] 李东,赵杨洋,张延松.焊接能量对铝/铜超声波焊接接头纤维组织的影响[J].焊接学报,2014,35(2):47-50.
Li Dong, Zhao Yangyang, Zhang Yansong. Effect of welding energy on microstructures of the Al/Cu joints obtained by ultrasonic welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(2): 47-50.
- [5] Hazlett T H, Ambekar S M. Additional studies on interface temperatures and bonding mechanisms of ultrasonic welds[J]. Welding Research Supplement, 1970, 49(5): 196-200.
- [6] Kim W, Argento A, Grima A, *et al.* Thermo-mechanical analysis of frictional heating in ultrasonic spot welding of aluminium plates[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(7): 1093-1103.
- [7] Jedrasiak P, Shercliff H, Chen Y. Modeling of the thermal field in dissimilar alloy ultrasonic welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(2): 799-807.
- [8] Senouci A, Zaidi H, Frene J. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel[J]. Applied Surface Science, 1999, 144(1): 287-291.
- [9] Chao Y, Qi X, Tang W. Heat transfer in friction stir welding-experimental and numerical studies[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125(1): 138-145.
- [10] Yadav S. Thermomechanical analysis of an ultrasonic rapid manufacturing (URM) system[J]. Journal of Manufacturing Process, 2005, 7(2): 153-161.
- [11] Siddiq A, Ghassemieh E. Thermomechanical analyses of ultrasonic welding process using thermal and acoustic softening effects[J]. Mechanics of Materials, 2008, 40(12): 982-1000.
- [12] Hung J, Tsai Y, Hung C. Friction effect of ultrasonic-vibration on upsetting[J]. Ultrasonics, 2007, 46(3): 277-284.
- [13] Huang H, Chang B, Du D. Effect of superimposed ultrasound on mechanical properties of copper[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(7): 1117-1122.

作者简介:李欢,男,1983年出生,博士研究生。主要从事新型焊接方法等方面的研究工作。发表论文2篇。Email: lihuan2009@163.com

通讯作者:曹彪,男,教授,博士研究生导师。Email: mebciao@scut.edu.cn