大功率超声波焊接纯铜的动态摩擦及超声软化过程

李 欢，刘千喜，张长鑫，张 健

（长江大学 机械工程学院，湖北 荆州 434023）

摘 要：采用有限元方法，依据界面温度和焊头下压位移的试验结果，探索了纯铜超声波焊接时摩擦及材料软化过程，并分析了焊接过程的温度场及塑性应变分布。结果表明：所建模型能较好模拟焊接动态摩擦系数超声软化变化过程。工件接触面的平均摩擦系数在焊接初期快速增加，之后急剧下降，并在焊接时间0.2 s后呈现较平稳的波动。铜的超声软化系数在焊接初期急剧增加，之后缓慢增加，并在焊接时间0.3 s后明显增加。超声软化是材料塑性变形的主要物理机制。

关键词：材料合成与加工工艺；超声波焊接；有限元模拟；摩擦系数；超声软化

中图分类号：TG456.9 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)08-2548-07

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231176

Dynamic friction action and ultrasonic softening during high-power ultrasonic welding process of pure copper

LI Huan，LIU Qian-xi，ZHANG Chang-xin，ZHANG Jian

（*School of Mechanical Engineering*，*Yangtze University*，*Jingzhou* 434023，*China*）

Abstract：Based on the experimental results of interfacial temperature and sonotrode displacement，the finite element method was employed to investigate the friction and material softening process in pure copper ultrasonic welding，and the distribution of the temperature fields and plastic strain during the welding process were also analyzed. The results show that the established model can better simulate the dynamic friction coefficient and ultrasonic softening variation processes during welding. The average friction coefficient of the workpiece contact surface increased rapidly in the early stages of welding，and then decreased sharply，and presented smooth fluctuations after welding time of 0.2 s. The ultrasonic softening coefficlent of copper increased sharply in the early stages of welding，then slowly increased，and began to increase significantly when the welding time was 0.3 s. Ultrasonic softening is the main physical mechanism of materials plastic deformation.

Key words：materials synthesis and processing technology；ultrasonic welding；finite element simulation；friction coefficient；ultrasonic softening

收稿日期：2023-10-30.

基金项目：国家自然科学基金项目(51605103)；国家重点研发计划专项子课题项目(2022YFB4602300)；湖北省教育厅科研计划重点项目(D20221306).

作者简介：李欢(1983-)，男，副教授，博士.研究方向：新能源汽车车身，动力锂电池的精密焊接工艺及过程数值模拟.E-mail：lihuan@yangtzeu.edu.cn

0　引　言

由于铜具有良好的导电、导热性,目前在新能源电动汽车、太阳能汽车领域的动力锂电池模块以及太阳能集热板需要大量的铜/铜接头[1,2]。超声波焊接是一种固态焊接技术,具有焊后工件残余应力较低、接头强度高、绿色节能、环境友好的焊接特性[3-5],更适合焊接铜/铜接头。目前纯铜超声波焊接已成为研究热点。Ma 等[6]发现较低的工件表面微粗糙度能制造较高的摩擦热,获得更高的纯铜超声波接头强度;Ni 等[7]发现界面摩擦是形成纯铜超声波焊接接头的主要原因。为研究超声波焊接过程,Shen 等[8]建立了一个有限元模型,模拟了纯铜超声波焊接过程,研究表明摩擦产热对界面温升贡献超过 95%。

目前关于纯铜超声波焊接过程模拟的研究极少[9,10],且模型中均认为超声引起的材料软化仅与振幅相关。然而,在实际超声波焊接过程中,由于焊头下压及嵌入工件导致的焊接结构变薄,以及接触面的变化等会改变超声传递路径以及声场强度,进而改变超声软化程度。因此,超声软化是一个复杂的动态过程。此外,材料软化导致界面冶金反应及机械互锁,使界面摩擦系数呈现动态变化,但目前对于金属接头的超声波焊接动态摩擦及超声软化过程尚无报道。本文利用有限元模拟方法,以铜/铜接头作为工件,建立了热—机有限元模型,探索了大功率超声波焊接纯铜的动态摩擦及超声软化过程,并结合试验验证了模拟结果的可靠性。研究结果揭示了焊接过程中材料的动态摩擦、超声软化行为,为进一步明晰超声波焊接机理提供了理论支持与实践指导。

1　试验方法

焊接试验采用瑞士 TELSONIC 公司 M5000 型大功率超声波金属焊机,如图 1 所示。其额定功率为 4 000 W,振动频率为 20 kHz。其他焊接工艺为:焊接压力 2 350 N、焊接振幅 22.5 μm、焊接时间 0.6 s。焊头和底座材料均采用 M2 高速工具钢,焊头齿数选用 9 个。工件材料为 T2(Y2 态)纯铜,其尺寸均为 100 mm×25 mm×0.8 mm,并采取搭接方式放置,搭接区域的长度为 25 mm。

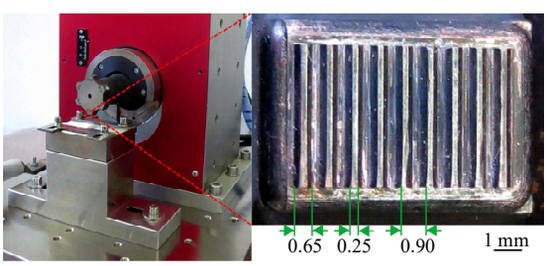

图 1　大功率超声波金属焊机(单位:mm)

Fig. 1　High-power ultrasonic metal welding machine

采用基恩士 LK-G5001 型激光位移传感器测量焊头下压位移,具体方法为:将位移传感器固定在焊头上端,激光斑点直径设置为 0.4 mm,激光头距离焊头顶面距离为 15 mm。在实际温度测量中,热电偶会存在热惯性的问题。为减少测量误差,采用日本大晃 K-H-GGF-0.2 直径为 0.2 mm 的 K 型热电偶测量焊接界面温度。具体测温方法为:在下铜板上表面开 0.5 mm 半圆形槽,将热电偶通过精密电阻焊机嵌入槽内,测温点距焊接界面中心 1.5 mm,如图 2 所示。数据采集系统将热电偶生成的电信号放大 200 倍后转换为对应的温度值,测得的温度精度为±0.1 ℃。焊头下压位移、温度测量时采样频率分别为 1、10 kHz。

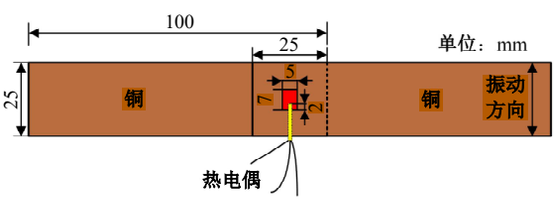

图 2　热电偶测温示意图

Fig. 2　Schematic diagram of thermocouple temperature measurement

2　模型建立

2.1　有限元模型建立

热传导的控制方程为[11]:

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = k_T\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+q \quad (1)$$

式中:c_T为随温度变化的材料比热容;T为温度;k_T为随温度变化的热导率;q为焊接热源。

采用 Ansys 软件建立一个热-机有限元模型。热分析选用三维 20 节点单元 Solid90。齿的嵌入属于大变形问题,因此选择具有分析大应变能力的单元 Solid186。为提高计算效率,模型仅考虑了部分焊头与底座。靠近焊接中心区域网格尺寸较小,最小单元尺寸为 0.125 mm,而远离焊接中心区域网格尺寸逐渐变大。图 3 为所建的有限元模型,单元数为 55 542 个。

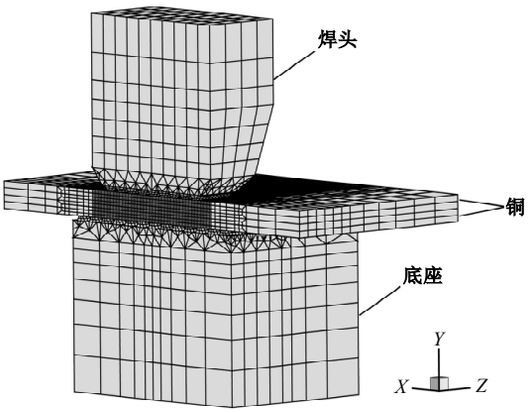

图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.2 边界条件及材料属性

对于纯铜超声波焊接,引起界面温升的热源主要包括摩擦热、塑性变形热以及弹性滞后能,其中塑性变形热与弹性滞后能仅占总热源的2%～5%[8]。因此,所建模型中仅考虑了摩擦热。假定摩擦热均匀分布在接触面,在实际焊接过程中,摩擦区域是在焊接初期较短时间内形成的,并在之后趋于稳定。根据库仑摩擦定理,此时摩擦热流密度为[12]:

$$q_f=\frac{\mu\times F\times 4\times\lambda\times f}{A_f} \tag{2}$$

式中:q_f为摩擦热值;A_f为摩擦区域面积;F为焊接压力;λ为焊接振幅;f为振动频率。

超声软化主要是超声振动作用下的声学软化,在模型中材料的动态软化体现在材料屈服强度下降[13],即:

$$\sigma_{s(\xi,T)}=\sigma_T\times\xi \tag{3}$$

式中:$\sigma_{s(\xi,T)}$为考虑超声和温度的材料屈服强度;σ_T为随温度变化的屈服强度;ξ为超声软化系数。

在热分析中,摩擦热被施加在工件接触面上。同时,为模拟实际焊接过程中的热量交换,对焊头和工件与空气的接触面分别施加120、500 J/(m²·℃)的对流换热系数[14]。在焊接压力与超声振动的作用下,材料发生塑性变形,界面连接点增多,热源传输通道变宽。因此,实际接触面之间的接触热导是逐渐上升的。将初期接触热导系数设置为2 000 W/(m²·℃),则焊接结束时接触热导为:

$$\mathrm{TCC}_{max}=\frac{1\,000\times K_{max}}{L} \tag{4}$$

式中:K_{max}为材料的最大热导系数;L为整个模型包络区域的对角线长度。

在结构分析中,压力被施加在焊头的顶面所有节点上,底座的底面施加全位移约束。

模型中除密度、泊松比外的材料物理属性均考虑随温度变化,图4为铜、钢随温度变化的物理性能[15]。

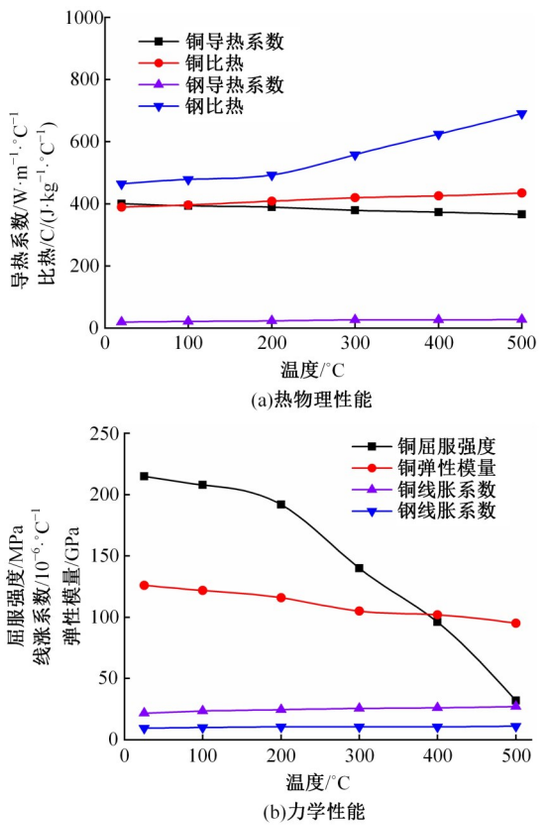

图4 材料属性随温度变化

Fig. 4 Material properties change with temperature

2.3 模拟计算过程

计算步骤为:首先进行热分析,任意给定摩擦系数计算出摩擦热流密度,分析中选取间隔时间为0.05 s,当设定模拟的温度T_{pr}与测量的温度T_{ex}相等时输出此时的摩擦系数及温度场。但在实际插值中难以找到完全符合的摩擦系数,需另外设定误差范围为3%,及设定模拟结果与试验结果的相对误差最小时输出摩擦系数μ。与摩擦系数的优化相似,在误差范围3%以内,根据模拟焊头下压位移结果与实测结果相对误差最小时输出材料超声软化系数ξ。具体模拟计算过程如图5所示。

图6为模拟结果与试验结果对比。模拟的温度以及焊头下压位移的相对误差分别为2.49%、1.68%,说明预测结果合理。此外,随着焊接时间的增加,界面温度及焊头下压位移逐渐增大。在焊接结束时,界面峰值温度达到445 ℃,焊头下压位移最大值为0.317 mm。

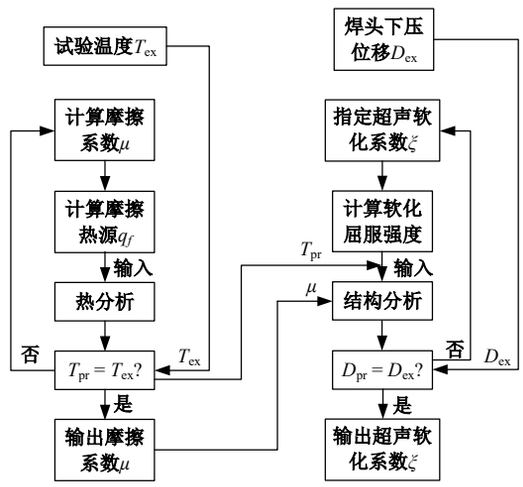

图 5　模拟计算过程

Fig. 5　Simulation calculation process

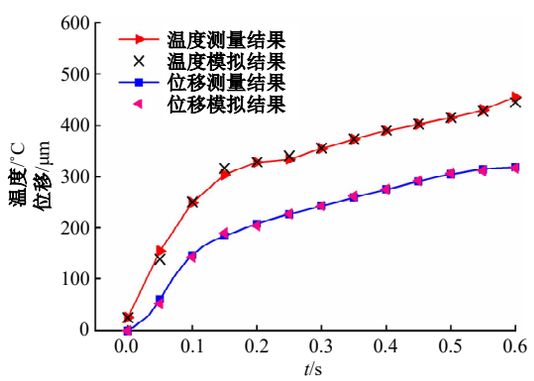

图 6　模拟结果与试验结果对比

Fig. 6　Comparison of simulation results and experimental results

为进一步验证模型的合理性,对比了焊接结束时试验得到的(图 7(a))与模拟的(图 7(b))接头横截面宏观形貌。从图 7 中可知,该工艺参数条件下获得的纯铜超声波焊接接头不存在孔隙,没有宏观裂纹存在,说明接头成型良好。模拟结果与试验结果误差约为 2.4%,表明所建模型能够较好地模拟纯铜超声波焊接过程。

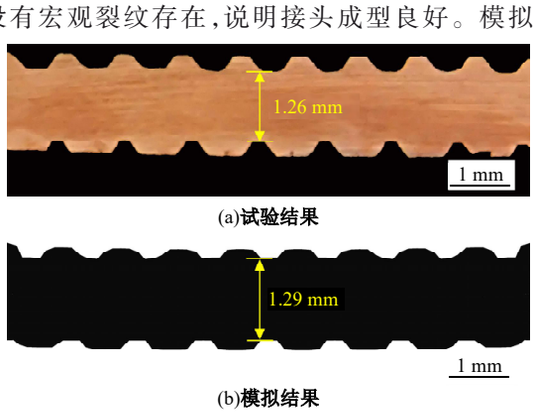

图 7　试验与模拟接头横截面宏观形貌对比

Fig. 7　Comparison of macroscopic image of experiment and simulated joint cross-sections

3　结果与讨论

3.1　焊接温度场

图 8 为焊接时间 0.6 s 时模拟的温度场分布结果。模拟得到的最高温度为 458.6 ℃,出现在焊接界面附近。由于钢的导热系数低,焊头的高温区域范围比工件窄;工件之间的温度场在焊接区域(图中标示区域)呈现对称分布,而其他区域呈现非对称分布,这是由于部分的热量传导至远离焊接区域的底座齿上。

图 9 为不同焊接时间下焊接界面温度分布结果,可以看出,在焊接时间为 0.1 s 时焊接区域的局部温度高于纯铜的动态再结晶温度(T_{DR}=250 ℃)[16,17],这说明此时开始出现动态再结晶行为,而焊接区域外的温度低于动态再结晶温度,说明此时没有热-机影响区及热影响区产生。随着焊接时间的延长,热-机影响区及热影响区的范围逐渐变宽;在焊接时间 0.3 s 及以后,整个工件接

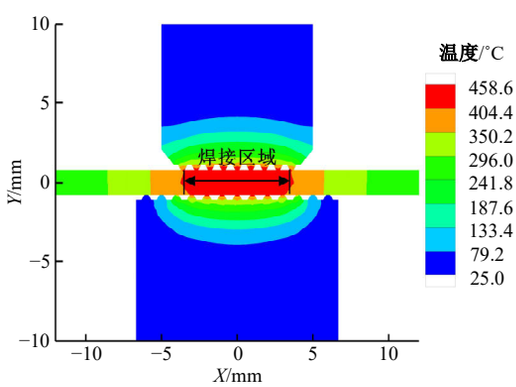

图 8　温度场分布(0.6 s)

Fig. 8　Temperature field distributions at 0. 6 s

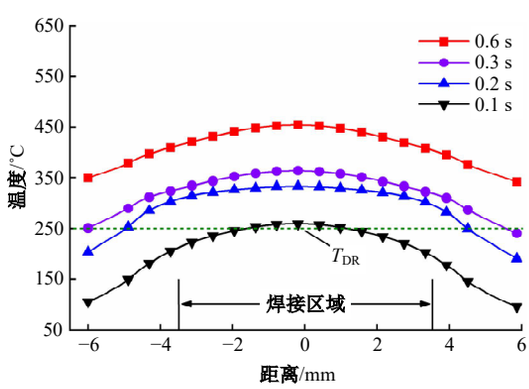

图 9　不同焊接时间下焊接界面温度分布

Fig. 9　Temperature distribution at the welding interface under different welding times

触面温度均高于250 ℃。考虑到工件接触面会传导机械振动能,因此整个接触面均考虑为热-机影响区。

工件接触面的平均摩擦系数决定了焊接界面的温度分布。图10显示了工件接触面的平均摩擦系数随焊接时间的变化。在焊接时间0.1 s之前,工件接触面的平均摩擦系数迅速增加,这是因为焊接初期在压力的作用下工件表面氧化膜破碎,微观摩擦点越来越多,直到初始金属面形成时平均摩擦系数达到峰值。之后摩擦系数急剧降低,这是因为此时界面温度达到动态再结晶发生的临界温度,界面发生塑性变形,导致界面出现轻微的机械互锁,一定程度上阻碍了滑动摩擦。在焊接时间0.2 s之后,界面的高温使材料屈服强度明显下降,这会增大材料摩擦。在焊接时间0.3 s之后,滑动摩擦逐渐转为黏滞摩擦,使摩擦热减少。在焊接最后阶段摩擦热略微增加是因为机械互锁导致的波浪形滑动增加。

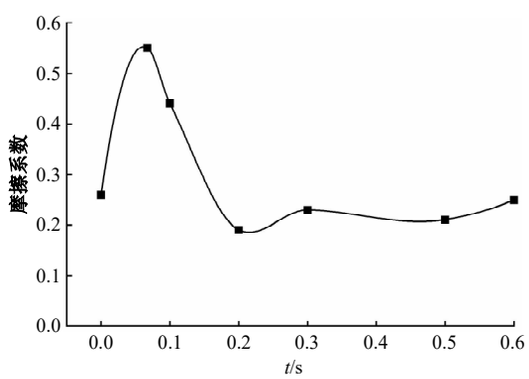

图10 摩擦系数动态变化

Fig. 10 Dynamic change in friction coefficient

3.2 材料塑性变形

焊头与底座的齿嵌入工件的深度能反映材料的塑性应变。图11为不同焊接时间下焊接横截面塑性应变分布。在焊接时间0.1 s时(图11(a)),由于超声软化主要发生在上工件,在超声振动以及温升的共同作用下材料发生明显的软化现象,焊头开始嵌入上工件表面,导致其发生塑性变形。同时,底座没有明显嵌入下工件表面,此时下工件塑性应变较低。随着焊接进行至0.18 s(图11(b)),底座齿开始嵌入下工件表面,下工件塑性应变增加,而此时上工件的塑性应变增加有限。随着焊接时间提升至0.35 s(图11(c)),由于底座齿持续嵌入下工件,此时焊头与底座齿的嵌入深度逐渐接近相等,上、下工件的塑性应变近似趋于

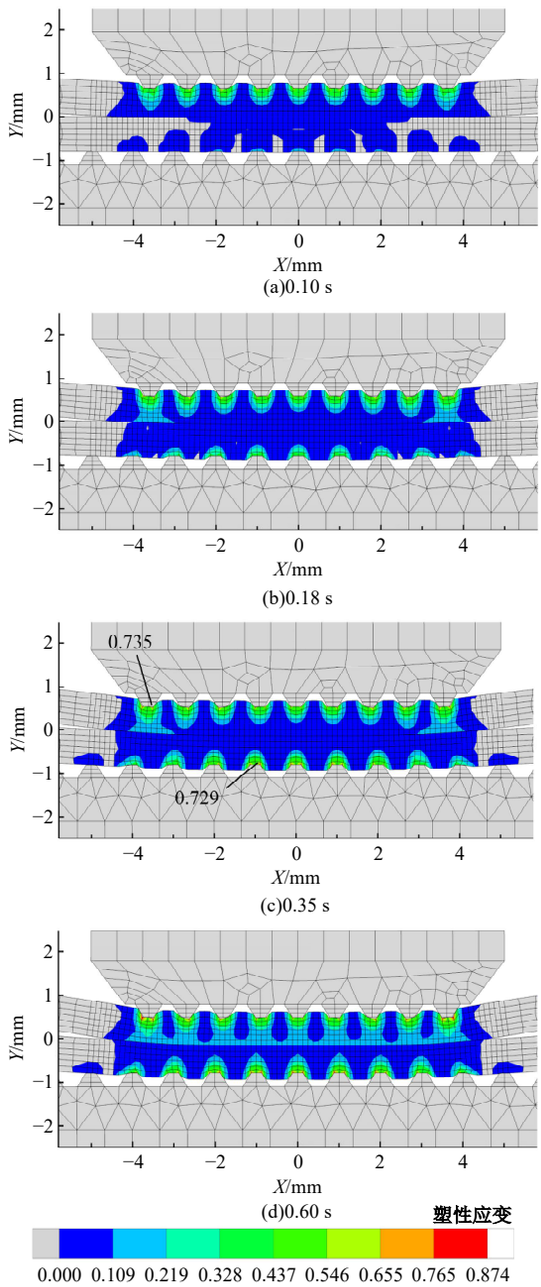

图11 不同焊接时间下焊接横截面塑性应变分布

Fig. 11 Plastic strain distribution in welded cross-section at different welding time

一致。随后,焊头齿加速嵌入上工件表面,在焊接结束时(图11(d)),上工件的最大塑性应变明显高于下工件。但焊头齿并未完全嵌入上工件表面,未出现其他异质接头超声波焊接时出现的材料在焊头齿谷处的堆积,避免了焊接裂纹的形成[18,19]。

3.3 材料超声软化

图12为上工件超声软化系数ξ随焊接时间的变化曲线,可以看到,超声软化系数的变化可以分

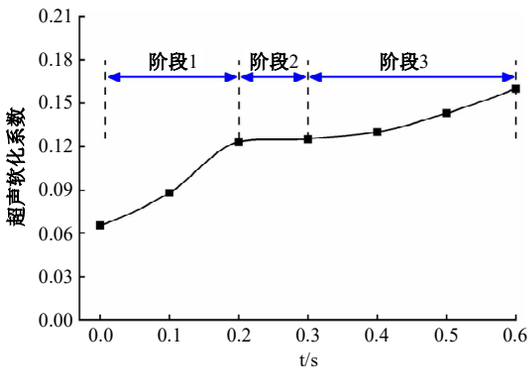

图 12　超声软化系数动态变化

Fig. 12　Dynamic change of ultrasonic softening coefficient

为 3 个阶段：在焊接时间 0.2 s 之前，随着焊接时间的增加，ξ 从 0.06 逐渐增加至 0.12，即铜的屈服强度由室温下的 94% 降低至 88%。这是因为该阶段随着焊头与底座不断地嵌入工件，焊接厚度逐渐变薄，以及接触面的不断扩展、初始金属面的形成使超声传输路径增加，导致超声软化作用效应也逐渐降低[20,21]；在焊接时间 0.2 s 之后，随着时间的增加，焊头下压的增幅逐渐降低，工件的翘曲可能会减少接触面积，导致声场强度降低，因此超声软化系数缓慢增加；在焊接时间 0.3 s 之后，由于工件的翘曲达到最大，焊头及底座齿的嵌入不断进行，焊件加速变薄，导致超声软化系数继续增加。

图 13 为考虑和不考虑超声软化下的材料塑性变形对比，结果表明，即使在同样高温条件下，在不考虑超声软化时工件塑性应变较低。对比说明，超声软化能显著提高材料塑性变形，促进接头的成型。

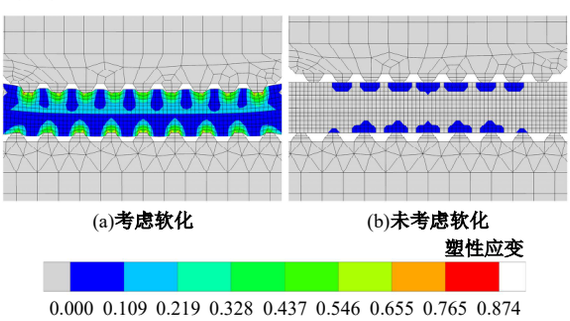

图 13　焊接横截面塑性变形模拟结果对比

Fig. 13　Comparison of simulation results of plastic deformation of welding cross section

4　结　论

（1）本文采用有限元方法建立了一个热-机耦合模型，以试验测量的界面温度和焊头下压位移作为依据，较好的模拟了焊接过程的动态摩擦及超声软化过程。

（2）在焊接初期，平均摩擦系数迅速增大，并在焊接时间 0.1 s 时达到峰值；在焊接时间 0.2 s 前摩擦系数急剧降低；在焊接时间 0.2 s 之后出现平稳波动。

（3）在焊接时间 0.2 s 之前，随着焊接时间的增加，超声软化系数逐渐增大，此时铜的屈服强度由室温下的 94% 降低至 88%；在焊接时间 0.2～0.3 s 时，超声软化系数增加变缓；在焊接时间 0.3 s 之后迅速增加，焊接结束时的铜超声软化系数为 0.16。

（4）超声软化影响了上、下工件的嵌入过程。在焊接结束时，上工件的最大塑性应变明显高于下工件，焊头的齿并未完全嵌入上工件表面。超声软化是材料塑性应变加剧的主要原因。

参考文献：

[1] Ma Q C, Ma J Y, Zhou J L, et al. Abnormal dislocation substructure in the ultrasonically welded joints of Cu single crystals[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2022, 27(8): 606-614.

[2] 刘亚俊，汤勇，万珍平，等. 太阳能集热铜片与铜管的超声波缝焊技术[J]. 华南理工大学学报：自然科学版，2003，31(1)：48-50.
Liu Ya-jun, Tang Yong, Wan Zhen-ping, et al. Ultrasonic seam welding of copper plates and tubes for collecting solar energy[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 31(1): 48-50.

[3] 李欢，周亢，曹彪，等. 铝合金大功率超声波焊接界面及接头性能研究[J]. 机械工程学报，2021，57(6)：87-95.
Li Huan, Zhou Kang, Cao Biao, et al. Analysis of welding interface and joint properties of high power ultrasonic welding of aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 87-95.

[4] 谷晓燕，刘东锋，刘婧，等. 焊接能量对 Cu/Al 超声波焊接接头组织与性能的影响[J]. 吉林大学学报：工学版，2019，49(5)：1600-1607.
Gu Xiao-yan, Liu Dong-feng, Liu Jing, et al. Effect of welding energy on microstructure and mechanical properties of Cu/Al joints welded by ultrasonic welding[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(5): 1600-1607.

[5] 谷晓燕, 隋成龙, 狄星, 等. 焊接能量对铜/钛超声波焊接接头性能的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(5): 1669-1676.
Gu Xiao-yan, Sui Cheng-long, Di Xing, et al. Effect of welding energy on performance of Cu/Ti joints obtained by ultrasonic welding[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(5): 1669-1676.

[6] Ma Q C, Ma J Y, Zhou J L, et al. Intrinsic dependence of welding quality and recrystallization on the surface-contacted micro-asperity scale during ultrasonic welding of Cu-Cu joints[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17(3/4): 353-364.

[7] Ni Z L, Wang X X, Li S, et al. Mechanical strength enhancement of ultrasonic metal welded Cu/Cu joint by Cu nanoparticles interlayer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38(12): 88-92.

[8] Shen N, Samanta A, Cai W W, et al. 3D finite element model of dynamic material behaviors for multilayer ultrasonic metal welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62(2): 302-312.

[9] Ma Z N, Zhang Y S. Characterization of multilayer ultrasonic welding based on the online monitoring of sonotrode displacement[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54(6): 138-147.

[10] Sanga B, Wattal R, Nagesh D S. An FEA based study of thermal behaviour of ultrasonically welded phosphor bronze sheets[J]. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 2021, 15(2): 8057-8071.

[11] Cheng X, Li X. Investigation of heat generation in ultrasonic metal welding using micro sensor arrays[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(2): 273-282.

[12] Elangovan S. Experimental and theoretical investigations on temperature distribution at the joint interface for copper joints using ultrasonic welding[J]. Manufacturing Review, 2014, 1(10): 13-26.

[13] 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.

[14] Ngo T T, Huang J H, Wang C C. The BFGS method for estimating the interface temperature and convection coefficient in ultrasonic welding[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2015, 69(15): 66-75.

[15] Li H, Cao B, Yang J W, et al. Modeling of resistance heat assisted ultrasonic welding of Cu-Al joint [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256(6): 121-130.

[16] Andrade U, Meyers M A, Vecchio K S, et al. Dynamic recrystallization in high-strain, high-strain-rate plastic deformation of copper[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(9): 3183-3195.

[17] Wen H, Zhao Y, Topping T D, et al. Influence of pressing temperature on microstructure evolution and mechanical behavior of ultrafine-grained Cu processed by equal-channel angular pressing[J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(3): 185-194.

[18] Li H, Cao B. Effects of welding pressure on high-power ultrasonic spot welding of Cu/Al dissimilar metals[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 46(10): 194-203.

[19] Li H, Zhang C X, Deng Y H, et al. Interfacial reactions and joint performances of high-power ultrasonic welding of aluminum to steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26(9/10): 328-343.

[20] Siddiq A, Elsayed T. Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM [J]. Materials Letters, 2011, 65(2): 356-359.

[21] Kelly G S, Advani S G, Gillespie J W, et al. A model to characterize acoustic softening during ultrasonic consolidation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(11): 1835-1845.