



超声波焊接工艺参数对铜导线接头性能的影响

成先明, 杨 可, 刘思沾, 季珊林, 王 健

(河海大学 机电工程学院, 常州 213022)

摘 要: 以BVR2.5 mm²铜导线为研究对象, 采用单一变量法对超声波线束焊接进行实验。以焊接振幅、时间、压力为独立变量展开接头力学性能测试和导电性测试, 通过接头和断口微观形貌分析超声波线束焊接机理。结果表明: 铜导线接头强度随焊接振幅、时间、压力增大均呈现先增大后减小的趋势, 当焊接时间为1100 ms、焊接振幅为40%、焊接压力为0.3 MPa时, 各焊接工艺参数均达到临界值, 接头抗拉力达到554.8 N。接头电阻随焊接压力增加先减小后增大, 当焊接压力为0.3 MPa时, 电阻为0.275 mΩ。随着焊接压力的增加, 铜导线由边缘向内部逐渐形成稳定冶金结合, 先由局部点连接扩展为面连接, 然后形成机械嵌合, 最终产生原子间键合。在焊接时间、振幅、压力达到临界值时, 焊接接头拉伸断口为典型韧性断裂模式, 满足强度要求。

关键词: 铜导线; 超声波线束焊; 力学性能; 导电性; 微观形貌

文章编号: 1004-0609(2022)-11-3341-11

中图分类号: TG456.9

文献标志码: A

引文格式: 成先明, 杨 可, 刘思沾, 等. 超声波焊接工艺参数对铜导线接头性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(11): 3341–3351. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42423

CHENG Xian-ming, YANG Ke, LIU Si-zhan, et al. Effect of ultrasonic welding process parameters on properties of copper conductor joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(11): 3341 – 3351. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42423

铜导线连接技术广泛应用于电力电子、新能源汽车、电器医疗、航空航天等领域。主要连接方法有压接、钎焊和超声波焊接等^[1]。压接在常温下进行, 通过压接设备使导线产生塑性变形而形成机械连接。压接后的导线并非完全接触, 各连接界面处存在较高的接触电阻, 且在长期接触运行过程中, 接触电阻会逐渐增大^[2], 导致接头发热及电能损耗增加, 影响电路安全。钎焊包括火焰钎焊和电阻钎焊等^[3]。相较于压接技术, 钎焊需要焊料、溶剂等, 焊接过程中消耗能量较多, 可能产生常见的冶金缺陷, 如夹渣、气孔、偏析等^[4]。超声波焊接利

用超声高频振动产生能量, 在压力作用下使接触界面塑性变形并发生冶金反应, 是一种固相连接技术。焊接过程中不产生烟尘, 不需要添加焊接剂, 焊接能量仅为钎焊的2%^[5], 是一种节能环保、绿色高效的焊接方法。铜导线超声波焊接由于其焊接能量小、速度快、强度高且接头电阻低^[6–8], 适用于要求抗拉强度高且接触电阻小的场合。

超声波焊接周期短, 焊接过程至少包含三个阶段: 局部点连接→振动打碎氧化物和污染物, 形成面连接→在超声软化和摩擦热作用下产生塑性变形, 形成稳定黏结。接头强度受焊接振幅、时间和

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFE0100100); 常州市重点研发计划(社会发展科技支撑)资助项目(CE20205046)

收稿日期: 2021-09-28; 修订日期: 2021-11-09

通信作者: 杨 可, 教授, 博士; 电话: 0519-85192035; E-mail: yangke_hhuc@126.com

压力等多参数影响,许多研究者对工艺参数对接头强度的影响展开了研究。YANG 等^[9]研究发现超声波焊接接头抗拉强度随输入能量增大而增大,当连接面积达到饱和时,抗拉强度最大,而后不随焊接能量增加变化。WANG 等^[10]研究发现界面连接强度和焊接边缘抗拉强度决定接头处力学性能。杨景卫等^[11]认为焊接压力低于临界值时,接头强度随压力的增加而增大,当压力高于临界值时,接头强度保持稳定。柳健等^[12]研究发现焊接时间对接头强度的影响也有相同的规律。尽管已有学者开展了焊接工艺参数对接头性能的研究,但大部分工作为薄板焊接,很少有对焊接工艺参数对铜导线接头性能影响的研究。

本文作者研究不同超声波焊接工艺参数对铜导线接头性能的影响,给出接头结合强度与焊接工艺参数之间的关系,结合接头显微组织及拉伸断口的微观形貌,分析接头形成稳定焊合时焊接振幅、时间、压力等工艺参数作用机制及对接头导电性的影响。

1 实验

实验选用 BVR2.5 铜线(Cu 含量 $\geq 99.95\%$),导线外径 3.6 mm,由 19 股直径 0.41 mm 铜绞线组成。截取约 100 mm 长的铜导线若干根,按 USCAR-45 标准剥去绝缘材料,露出铜芯长度 18 mm,如图 1(a)所示。实验中采用的设备为 CJH-1600 超声波线束焊接机,最大输出功率 3000 W,频率 20 kHz。采用上下放置方式对铜导线进行超声波焊接,如图 1(b)所示。焊接试验采用单一变量法,在固定其他工艺参数条件下,设置不同焊接振幅、压力、时间进行超声波线束焊接试验。焊接振幅设定 25%、30%、35%、40%、50%、55%;焊接时间 800、900、1000、1100、1200、1300、1400 ms;焊接压力 0.2、0.25、0.3、0.35、0.4 MPa。

焊接过程如图 2 所示:顶块以预定夹紧力 p_0 (与焊接压力大小相同)横向夹紧导线,减小铜绞线间隙,限制导线横向窜动,然后压头横向推出紧贴顶块前端(见图 2(a));压头向下夹紧,提供焊接压力 p_1 (见图 2(b));焊头 A 高频振动,提供焊接能量,导线在超声振动作用下完成结合(见图 2(c));顶块

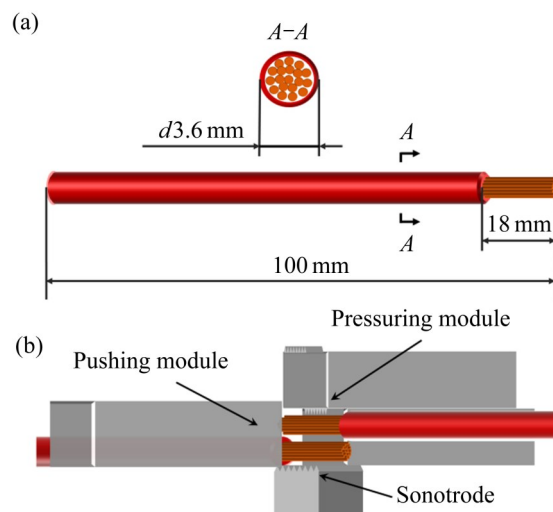


图1 试样尺寸与放样示意图

Fig. 1 Dimension of sample and schematic diagram of sampling

缩回,压头向上移动、收回,完成焊接(见图 2(d))。

超声波焊接接头的抗拉力是评价焊接质量的主要手段。采用 UTM5105 型电子万能试验机(如图 3 所示)按 USCAR-45 标准对铜导线超声波焊接试样进行拉力测试,拉伸速度 50 mm/min。每组参数焊接试验 3 次,取 3 次试验结果平均值作为该参数下的抗拉力。焊件截面形貌与焊接工艺有关,直观反映了接头变形行为。试验中采用 SZ601 体式显微镜观察接头宏观形貌。截取并制备焊接接头金相试样,采用 HVS-1000A 型倒置金相显微镜观察接头微观形貌,并分析铜绞线界面结合机理。采用 TH2829B 数字电桥测量接头电阻,分析接头结合效果对导电性的影响。测试点取距离接头中间部位两侧各 15 mm 处,两侧试点间距 30 mm,如图 3 所示。采用扫描电镜(SEM)对拉伸断口观察,分析断裂模式。

2 结果与分析

2.1 焊接工艺参数对接头强度的影响

图 4 所示为焊接压力 0.3 MPa、焊接时间 1000 ms、焊接振幅 25%~55% 时不同振幅条件下接头抗拉强度的变化规律。图 5 所示为保持焊接压力 0.3 MPa、焊接振幅 40%、焊接时间 800~1400 ms 时不同焊接时间条件下接头抗拉强度变化规律。图 6 所

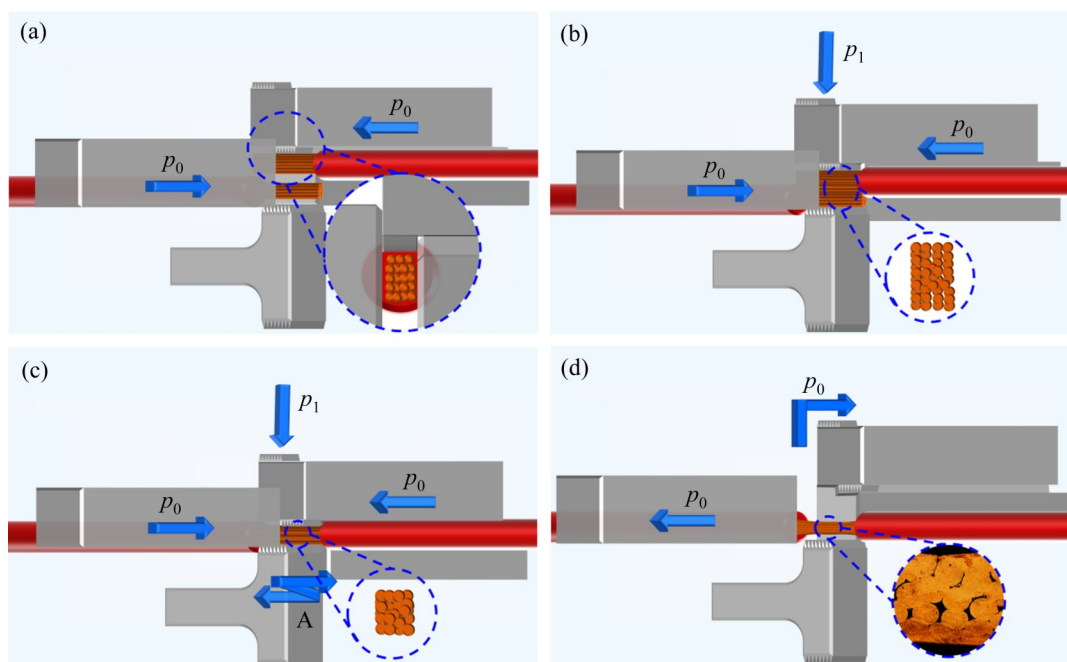


图2 超声波导线焊接步骤

Fig. 2 Processing steps during ultrasonic welding of cables: (a) pushing model clamps cables laterally with pre-pressure p_0 ; (b) pressing model comes down to providing welding pressure p_1 ; (c) Sonotrode vibrating at high frequency to provide welding energy; (d) pressing model moves upwards and retracts to complete welding

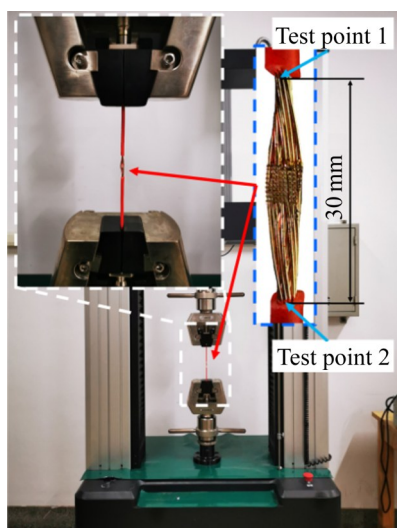


图3 接头抗拉强度及导电性测试

Fig. 3 Tensile strength and conductivity testing of welds

示为取最佳焊接振幅 40%、焊接时间 1100 ms、焊接压力 0.2~0.4 MPa 时不同焊接压力条件下接头抗拉强度的变化规律(图 4~6 中竖直线表示抗拉力标准差)。

由图 4 可见, 当焊接振幅为 25%~40% 时, 接头抗拉力标准差较大, 说明接头质量不稳定, 但接

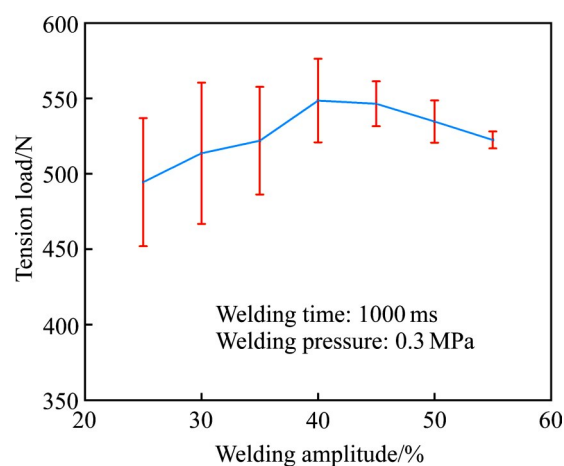


图4 焊接振幅对接头抗拉强度的影响

Fig. 4 Influence of welding amplitude on tensile strength of joint

头抗拉强度随振幅增加而增强, 这是因为增加振幅有利于焊点数量和增大机械咬合深度, 如图 7 所示。振幅超过 40% 时, 最大抗拉力的标准差逐步下降, 即接头质量随振幅增加而趋于稳定, 但接头抗拉强度会随振幅增加而减小。由于较大振幅可以使塑性流动位错向有利于塑性流动的趋势演变^[13], 及时填充塑性变形时的空洞, 增强接头稳定性, 但振

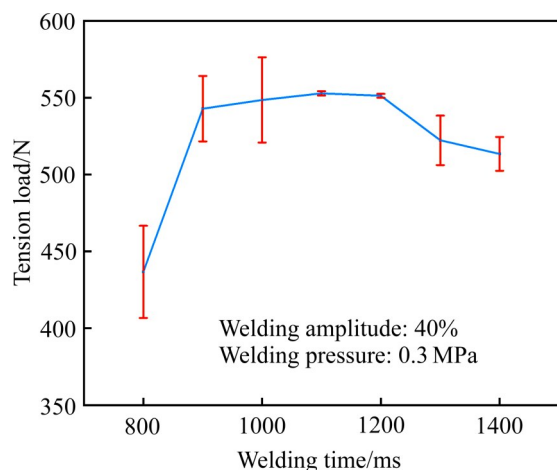


图5 焊接时间对接头抗拉强度的影响

Fig. 5 Influence of welding time on tensile strength of joint

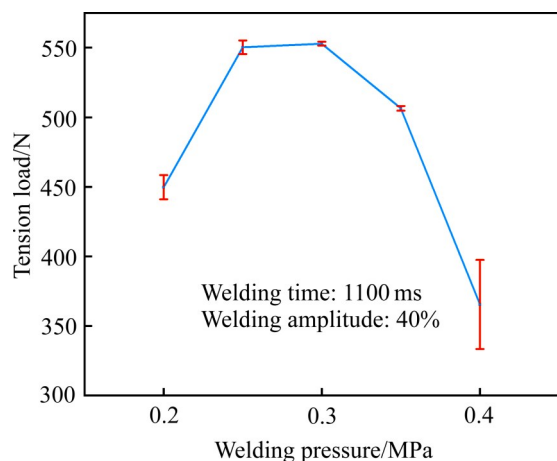


图6 焊接压力对接头抗拉强度的影响

Fig. 6 Influence of welding pressure on tensile strength of joint

幅过大又会在接头处产生疲劳裂纹降低接头力学性能。

从图5可看出, 焊接时间在800~900 ms之间, 接头抗拉强度快速提升, 而后基本保持平稳, 在1100~1200ms范围内, 接头稳定性最强, 且最大抗拉力达到552.9 N, 说明焊接时间为1100 ms时, 接头处塑性变形空洞已完全填充。继续增加焊接时间, 接头抗拉强度下降。焊接时间在900~1200 ms范围内对接头抗拉力影响不显著, 其原因可能是由于900 ms时各绞线基本实现紧密焊合, 继续增加焊接时间并未形成新的结合界面, 已结合的界面进一步强化, 抗拉强度仅有少量提升。当焊接时间达

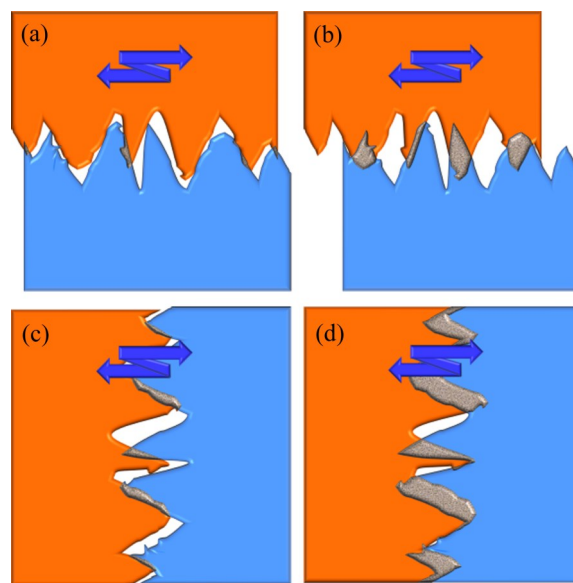


图7 焊接振幅对结合点影响

Fig. 7 Influence of welding amplitude on joint: (a), (b) Vertical direction; (c), (d) Horizontal direction

1100 ms时, 各结合界面趋于稳定, 接头焊接质量也达到稳定阶段。当焊接时间超过1200 ms时, 接头温度升高, 产生严重塑性变形, 抗拉强度降低。

由图6可知, 在焊接压力为0.2 MPa时, 接头抗拉力较低, 这是由于低压力下仅形成局部点连接。当焊接压力升至0.25 MPa时, 接头力学性能提升较大, 说明焊接压力使局部点连接扩展为面连接, 结合面积增加。焊接压力在0.2~0.25 MPa变化时, 接头抗拉力变化不大, 说明在该焊接压力下基本形成稳定焊合。继续增加焊接压力, 接头力学性能下降。当焊接压力达到0.4 MPa时, 不仅接头抗拉力较低, 且质量波动较大。

由图4~6可看出, 铜导线接头强度随焊接振幅、时间和压力的增大均呈现先增大后减小的趋势, 当焊接时间为1100 ms、振幅为40%、压力为0.3 MPa时, 各焊接工艺参数均达到临界值, 接头抗拉力达到554.8 N。对比可以看出, 焊接质量受焊接压力影响最大, 其次是焊接时间和振幅。图4和6的焊接时间分别为1000、1100 ms, 同样可以说明1100 ms时, 接头质量最稳定。但当焊接压力大于0.4 MPa时, 接头强度急剧下降, 接头稳定性也变差, 说明较低焊接压力条件下, 接头质量稳定性受焊接时间影响最大, 并且随着振幅增加而增

强,当焊接压力达到0.4 MPa,接头稳定性因压力过大而降低。

2.2 接头形貌分析

微观形貌观察可以辅助分析焊接接头力学性能,为探究超声波焊接机理提供依据。通过分析不同焊接压力下的接头形貌,可以充分掌握超声波焊接形成固相连接的过程。图8所示为保持焊接振幅为40%、焊接时间为1100 ms,不同焊接压力下接头的轴向截面形貌。从图8中可以看出,随焊接压力增加,接头径向截面积减小。当焊接压力为0.2 MPa时,焊接压力低,界面处摩擦力较低,表面氧化膜破碎不完全。接头内部相邻导线间仅形成点连接,存在明显分界线,成为焊接接头薄弱部位,拉力作用下点连接处最先剥离,焊接接头内部层状剥离,导致焊接接头断裂。当焊接压力为0.3 MPa时,材料表面微凸体塑性变形增大,焊接结合面积增大^[14]。各绞线间形成紧密连接,有效结合面积大幅增加,抗拉强度也进一步增强。当焊接压力为0.35 MPa时,接头焊合长度超过焊头尺寸,焊头边缘处存在应力集中,在高频超声振动作用下,接头产生疲劳裂纹,降低了接头的力学性能。

图9所示为不同焊接压力下接头的径向截面形貌。由图9可看出,当焊接压力为0.2 MPa时,接头四周结合较为紧密,中间部分存在较大间隙。这是由于在超声高频振动作用下,底部靠近焊头部分

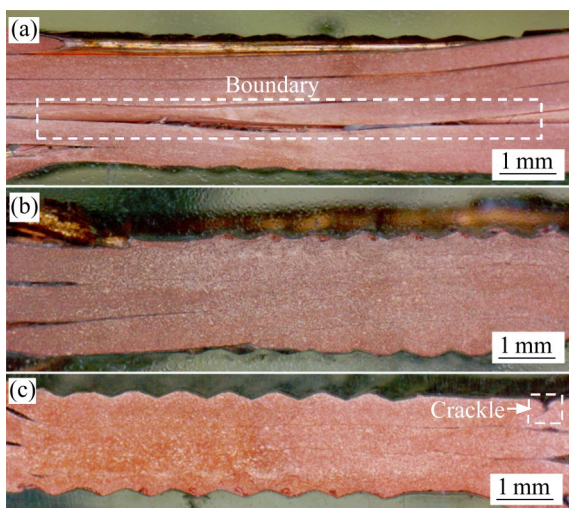


图8 不同焊接压力下接头轴向显微组织

Fig. 8 Axial microstructures of joints under different welding pressures: (a) 0.2 MPa; (b) 0.3 MPa; (c) 0.35 MPa

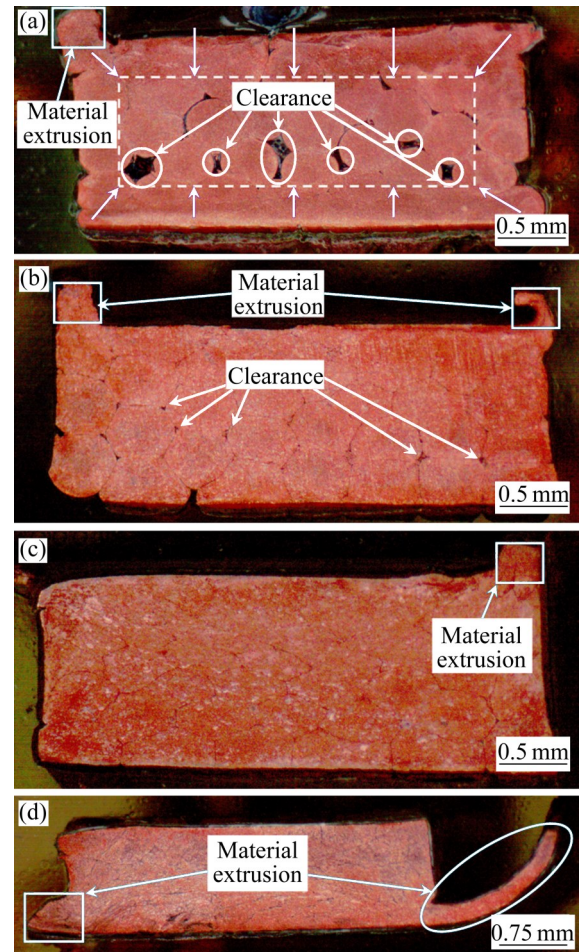


图9 不同焊接压力下接头径向显微组织

Fig. 9 Radial microstructures of joints under different welding pressures: (a) 0.2 MPa; (b) 0.25 MPa; (c) 0.3 MPa; (d) 0.35 MPa

最先从“黏-滑”状态变为黏滞状态,形成紧密连接,而后振动摩擦力沿底部向上传播,如图9(a)所示。顶部靠近压头,振幅大幅衰减,大量运动能转换为导线间的结合能,实现紧密结合。同时,各绞线在焊接过程中并非水平规则排列,在底层和顶层的作用力及边缘反作用力下,两侧靠近边缘部分导线会沿垂直方向运动,实现可靠连接。当焊接压力为0.25 MPa时,连接界面在超声波振动摩擦作用下温度进一步升高,塑性流动能力增强,仅存在少量间隙未焊合,接头力学性能较好。当焊接压力为0.3 MPa时,接头截面基本不存在间隙,抗拉力达到最大值。由于焊头沿导线径向运动,在压力作用下,径向结合效果略高于轴向,拉伸时易在接头中间部位沿轴向断裂。当焊接压力为0.35 MPa时,焊头高频超声振动促使接头软化,在静压力下产生

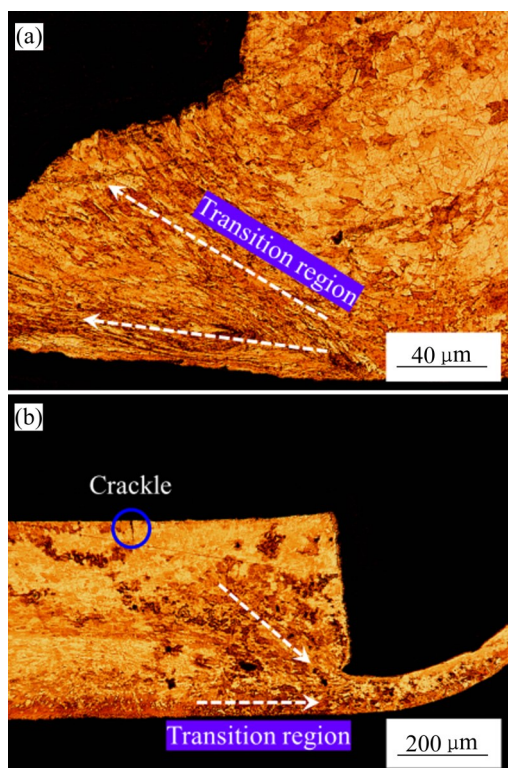


图10 材料溢出的显微组织

Fig. 10 Microstructures of material spillage

严重塑性变形，截面积减小，大量材料被振动挤出，如图10所示。

图11所示为不同焊接压力下接头的显微组织。由图11可看出，当焊接压力0.2 MPa时，接头中间大部分结合方式为局部点连接，同时伴随铜表层破碎挤出。这是由于在超声振动和静压力作用下，绞线间接触界面摩擦生热，界面温度提高，铜表面屈服强度降低而变软。铜表层与内部的剪切力低于振动产生的摩擦力时，便发生剥落。此时，结合面积较小，接头抗拉强度较低。当焊接压力增加到0.25 MPa时，连接方式从点接触扩展为面接触，大部分结合面在塑性变形作用下形成机械嵌合。靠近焊头部位已经形成原子间键合。从局部放大图中可以看出，底部靠近焊头部位的铜丝已经产生再结晶，晶粒沿超声振动方向生长，这是接头力学性能大幅提升的根本原因。当焊接压力达到0.3 MPa时，机械嵌合基本转化为原子间键合，生成再结晶过渡区域，接头抗拉强度达到最高。这是由于超声软化和振动去除了表面附着物，连接界面间原子在摩擦升温中被激活，静压力使金属原子相互靠近，当原子距离缩小至纳米级别时，两原子核间电子云密集，

从而形成原子间键合的电子桥^[15]。当压力为0.35 MPa时，接头径向因高频振动，产生疲劳裂纹。轴向靠近接头边缘处，因应力集中，也产生微裂纹，此时接头抗拉强度急剧下降，断裂均产生在微裂纹扩展区域。

焊接工艺参数在达到最佳临界值前，焊接能量随焊接参数增加而增加，导线间隙减小。导线实现稳定结合至少经历四个步骤：首先局部点接触，进而扩展为面接触，然后在塑性变形作用下形成机械嵌合，最终因原子间相互靠近形成原子间键合。

超声波焊接过程中工艺参数对接头力学性能的影响主要分为两个阶段：首先，超声波焊接各工艺参数均未达到临界值，各股绞线未完全结合，接头力学性能较差。增加任一焊接参数都有助于增强材料塑性流动变形，扩大结合界面，产生原子间键合，提高接头的抗拉强度。其次，当某一参数超过临界值时，接头发生过焊，材料内部位错产生塞积、堆垛，塑性下降，加上焊接边缘产生应力集中，极易产生微裂纹、气孔等缺陷^[16]。另一方面，焊接参数过大会导致接头截面积减小，即接头区域变薄，靠近焊头区域导线容易发生压溃、断裂等现象，这是导致接头力学性能下降的根本原因。

2.3 接头导电性分析

接头电阻直接影响接头的导电性。通过接头电阻测试可以进一步分析接头每根导线连接的有效性。采用TH2829B数字电桥校准后，在20℃室温下测量30 mm铜导线的电阻值为0.232 mΩ，与理论值误差仅为4%，可用于接头电阻测量。

图12所示为保持焊接振幅为40%、时间为1100 ms时不同焊接压力下接头电阻的变化。由图12可看出，随着焊接压力从0.2 MPa增加到0.35 MPa，接头电阻先减小后增大，标准差降低。当焊接压力为0.2 MPa时，导线间仅形成局部点连接，连接处表面氧化膜破碎，形成金属导电斑点^[17]。流经导电斑点的电流发生电流收缩，产生接触电阻，接头电阻升高。随着焊接压力增加到0.3 MPa，接头有效结合面积达到最大，且形成原子间键合，基本不存在接触电阻，阻值为0.275 mΩ，满足SAE/USCAR-38标准。当焊接压力为0.35 MPa时，接头压缩比过大，有效载流面积降低，电子通过能力下降，接头电阻增加。接头电阻标准差随焊接压力

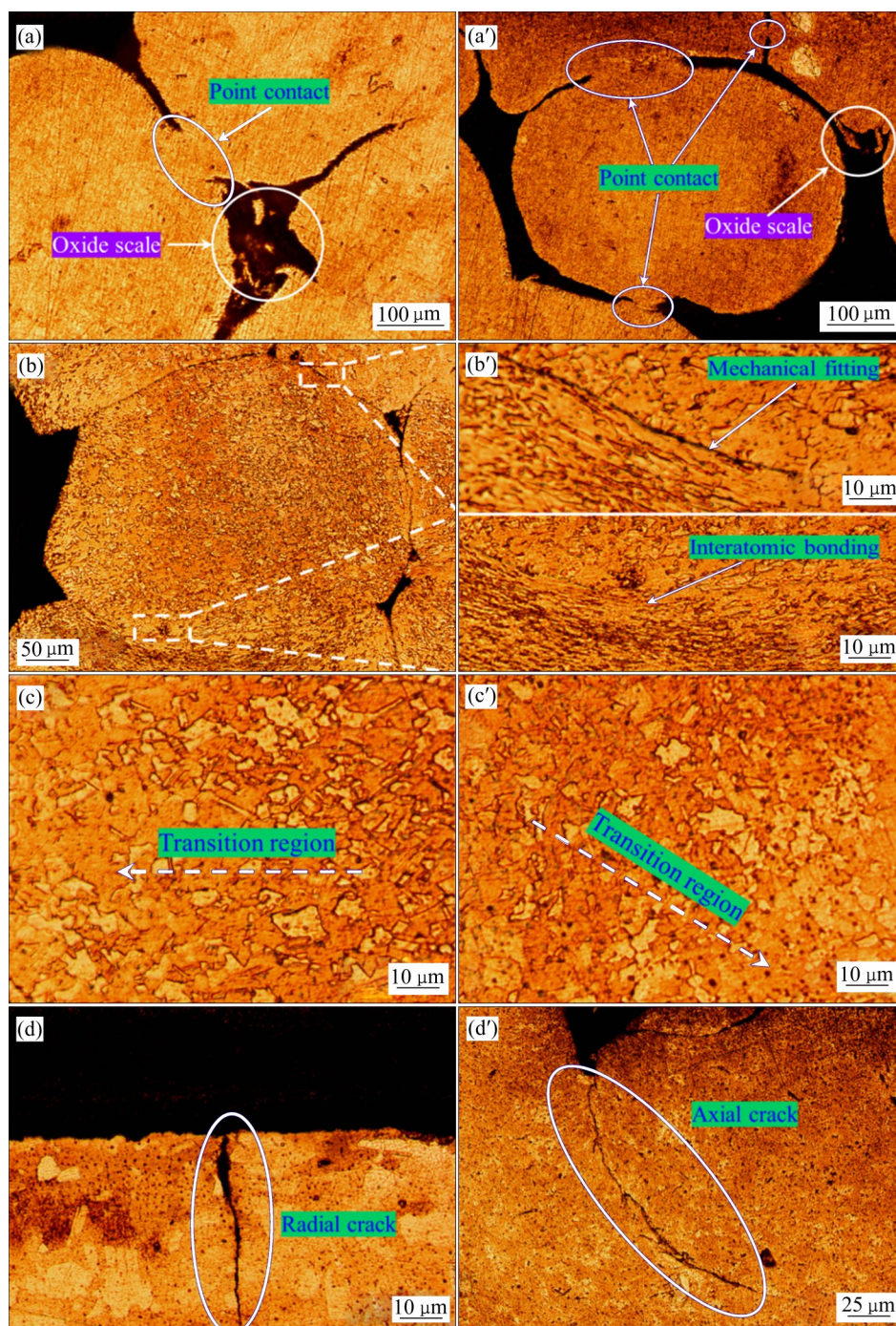


图 11 不同焊接压力下接头的显微组织

Fig. 11 Microstructures of joints under different welding pressures: (a), (a') 0.2 MPa; (b), (b') 0.25 MPa; (c), (c') 0.3 MPa; (d), (d') 0.35 MPa

增加而降低, 这是由于增加焊接压力有利于提高接头焊合的稳定性, 与焊接压力对接头抗拉性的影响结果一致。

影响接头电阻的主要因素有接触电阻、接头截面积和位错密度等。在焊接压力较低时, 接触电阻对接头导电性影响较大。当焊接压力超过 0.3 MPa

时, 接头电阻受截面积影响较大。在焊接压力为 0.3 MPa 时, 接头电阻约为铜导线的 1.2 倍。这是由于在焊接压力作用下, 接头截面存在一定的压缩比, 接头载流能力降低。另一方面, 在静压力和高频超声振动作用下, 接头位错密度增加, 对电子散射能力增强^[18], 电阻率上升。

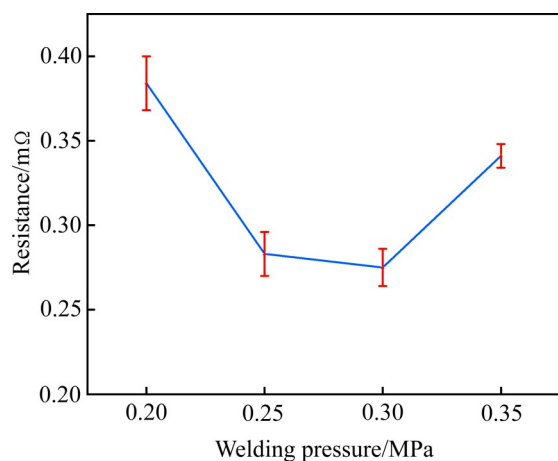


图 12 不同焊接压力下接头电阻的变化

Fig. 12 Change of joint resistance at different welding pressures

2.4 接头断裂形貌分析

图 13 所示为不同焊接压力下焊接接头的抗拉力-位移曲线。从图 13 中可见，当焊接压力 0.2 MPa 时最大抗拉力为 449.2 N。当焊接压力为 0.3 MPa 时，拉伸过程中拉力逐渐增大，当拉力达到 500 N 时，拉伸达到弹性极限，随后进入塑性变形区，拉力增长缓慢。当拉力达到 554.8 N 时出现局部断裂，表明在最佳焊接参数条件下可以得到韧性和强度都较高的接头。此外，图中出现多处塑性强化区域，说明达到最大抗拉力时，接头并未完全分离，仍含有少量铜丝连接未断。这是由于铜导线由多股铜丝绞合而成，焊接时每股铜丝产生的焊接应力不同，拉伸时受力不均匀，导致部分铜丝在最大

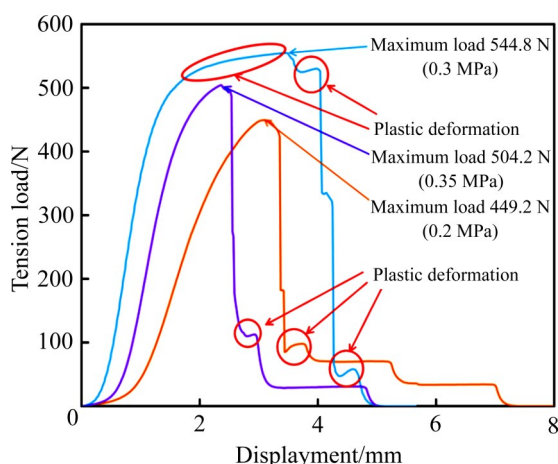


图 13 不同焊接压力下焊接接头抗拉力-位移曲线

Fig. 13 Tensile - displacement curves of welding joint under different welding pressure

抗拉力条件下仍处于塑性变形阶段。当压力为 0.35 MPa 时，最大抗拉力为 504.2 N，且断裂前未发生屈服强化。

图 14 所示为不同焊接压力下焊接接头的断口微观形貌。由图 14 可看出，当焊接压力为 0.2

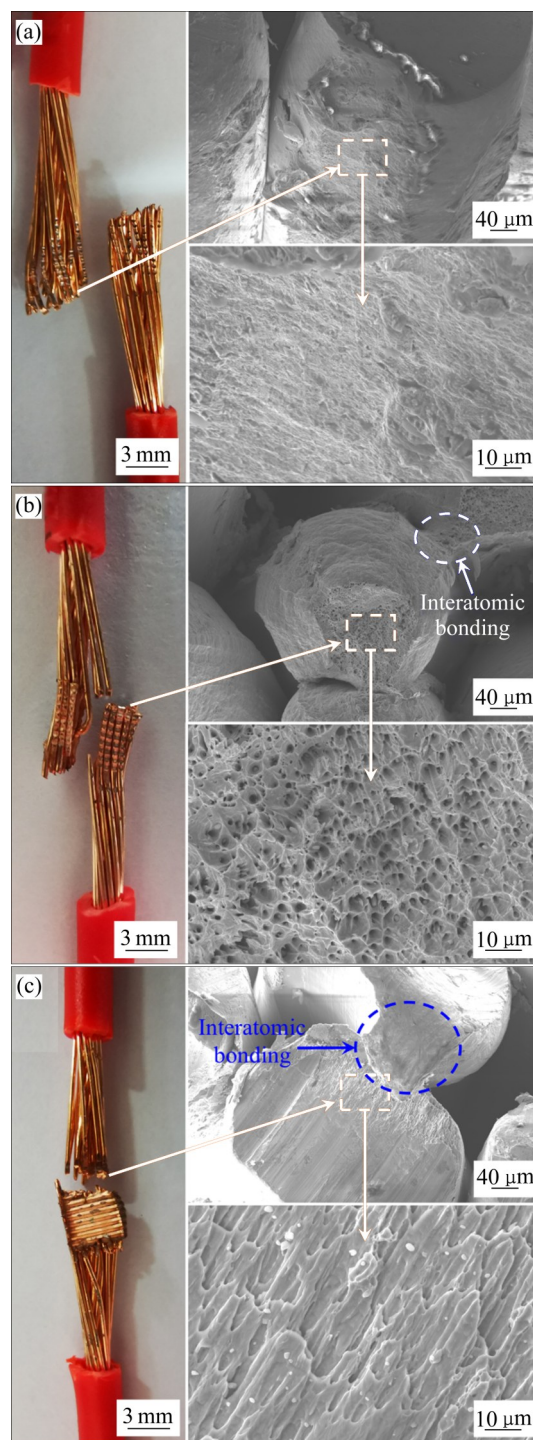


图 14 不同焊接压力下焊接接头的断口形貌

Fig. 14 Fracture morphologies of welding joint under different welding pressures: (a) 0.2 MPa; (b) 0.3 MPa; (c) 0.35 MPa

MPa,断裂发生在中间分界面,断口平整,没有明显的撕裂痕迹,为典型的脆性断裂特征^[19]。说明焊接压力较小时,焊头超声振动产生的摩擦力较低,超声软化变形较小,仅形成局部微连接。当焊接压力为0.3 MPa时,接头从中心沿轴向断裂,这是由于在焊接过程中,接头从外部往中间逐渐形成稳定结合,断裂最先发生在中间部位,然后沿垂直方向扩展。断面为塑性变形区域,断口由大量韧窝组成,且与母材明显不同,这是由于在高频振动和静压力作用下,连接界面发生动态再结晶,形成有效原子间键合,说明焊接质量较高,断口为典型的韧性断裂模式。当焊接压力为0.35 MPa,焊接边缘因高频超声振动产生疲劳微裂纹,断口出现表面波纹和韧窝方向一致。说明接头沿微裂纹扩展断裂时,部分连接区受到撕裂力作用,材料相互撕扯形成撕裂韧窝^[20]。此时为韧-脆混合断裂,与抗拉力曲线结果一致。

3 结论

1) 通过接头抗拉力试验得知,超声波线束焊工艺参数(焊接振幅、时间、压力)对铜导线接头性能的影响一致:随着焊接工艺参数增加,铜导线接头力学性能基本呈现先提高后降低的趋势;当焊接振幅为40%、焊接时间为1100 ms、焊接压力为0.3 MPa时,接头抗拉力达到554.8 N,焊接效果最好。

2) 超声波线束焊接头由边缘向内部逐渐形成原子间键合,经历四个阶段:焊接参数较低时为局部点接触,进而扩大为面接触,在静压力和超声作用下形成机械嵌合,最终在结合面实现原子间键合。

3) 接头电阻随焊接压力增加先降低后升高。当焊接压力较低时,接头因存在接触电阻,阻值较高。当焊接压力高于0.3 MPa时,由于接头截面积减小,所以有效载流能力降低,电阻升高。当焊接压力为0.3 MPa时,电阻最低为0.275 mΩ。

4) 超声波线束焊接头应力分布不均匀,接头达到最大抗拉力时并未完全断裂,仍有少量铜丝焊合。焊接压力从0.2~0.3 MPa变化时,断口形貌分别呈现出典型的脆性断裂特征和韧性断裂特征。焊接压力0.35 MPa时,焊接接头出现裂纹,断口呈现出韧-脆复合断裂特征。

REFERENCES

- [1] 孙守红, 张伟. 压接连接工艺技术研究[J]. 电子工艺技术, 2014, 35(6): 350-352, 367.
SUN Shou-hong, ZHANG Wei. Research on pressure soldering connection technology[J]. Electronics Process Technology, 2014, 35(6): 350-352, 367.
- [2] 唐立军, 周年荣, 刘雪扬, 等. 铝导线软钎焊用含铋 Sn-0.7Cu-1Zn 合金钎料的研发及性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(9): 67-71.
TANG Li-jun, ZHOU Nian-rong, LIU Xue-yang, et al. Development and properties of Sn-0.7Cu-1Zn alloy solder containing Bi applied in soft brazing of aluminum wire[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(9): 67-71.
- [3] 邓怀波, 张体明, 许章亮, 等. 镍丝与多股铜线电阻钎焊接头形成机理及微观组织[J]. 焊接技术, 2019, 48(8): 27-30, 5.
DENG Huai-bo, ZHANG Ti-ming, XU Zhang-liang, et al. Formation mechanism and microstructure of resistance brazing joint of nickel wire and multi-strand copper wire[J]. Welding Technology, 2019, 48(8): 27-30, 5.
- [4] MAHMUD K, MURUGAN S P, CHO Y, et al. Geometrical degradation of electrode and liquid metal embrittlement cracking in resistance spot welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61: 334-348.
- [5] 曹秒艳, 田少杰, 胡 晗, 等. 铝-镁异种合金板材超声焊接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2789-2797.
CAO Miao-yan, TIAN Shao-jie, HU Han, et al. Ultrasonic welding technology of aluminum-magnesium alloy plates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(12): 2789-2797.
- [6] YANG J W, CAO B, LUQ H. The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2017, 10(2): E193.
- [7] NI Z L, YANG J, GAO Z T, et al. Joint formation in ultrasonic spot welding of aluminum to copper and the effect of particle interlayer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 57-67.
- [8] 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.
- [9] YANG J W, CAO B, HE X C. 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.
- [10] WANG T H, SHUKLA S, FRANK M, et al. Evolution of bond formation and fracture process of ultrasonic spot-welded dissimilar materials[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(2): 171–177.
- [11] 杨景卫, 曹彪, 柳健, 等. 压力对纯铜超声焊接界面行为的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 53–56, 131.
- YANG Jing-wei, CAO Biao, LIU Jian, et al. Effect of welding pressure on interfacial behavior of ultrasonic-welded copper joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 53–56, 131.
- [12] 柳健, 杨景卫, 曹彪, 等. 铜/铜超声波焊接的相对运动及断面微观演变[J]. 焊接学报, 2018, 39(9): 41–44, 130.
- LIU Jian, YANG Jing-wei, CAO Biao, et al. Relative motion and its relation to microstructure evolution during high-power ultrasonic welding of copper sheets[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(9): 41–44, 130.
- [13] 姚喆赫, 陈子辰, 梅德庆. 超声能场在金属微/介观成形中的作用理论及实验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 98.
- YAO Zhe-he, CHEN Zi-chen, MEI De-qing. Theoretical and experimental studies on effects of ultrasonic energy field in micro/meso metal forming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 98.
- [14] CHENG Q, FENG Z L, CHEN J, et al. Analytical approach for describing the collapse of surface asperities under compressive stress during rapid solid state bonding[J]. Scripta Materialia, 2017, 128: 41–44.
- [15] 肖乾坤, 朱政强, 李铭锋. 纯铜超声波焊接及数值模拟[J]. 焊接技术, 2019, 48(1): 15–19.
- XIAO Qian-kun, ZHU Zheng-qiang, LI Ming-feng. Ultrasonic welding of pure copper and its numerical simulation[J]. Welding Technology, 2019, 48(1): 15–19.
- [16] 蒋少松, 杨天豪, 孙宏宇, 等. 超声波振动对钛箔拉伸性能及位错分布的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(2): 84–89.
- JIANG Shao-song, YANG Tian-hao, SUN Hong-yu, et al. Influence of ultrasonic vibration on tensile properties and dislocation distribution of titanium foil[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(2): 84–89.
- [17] 李辉, 王晓, 赖伟, 等. 压接型 IGBT 器件接触电阻计算及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5320–5329.
- LI Hui, WANG Xiao, LAI Wei, et al. Calculation and analysis of influence factors of electrical contact resistances inside press-pack IGBT device[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5320–5329.
- [18] 牛海东, 武海军, 陈家林, 等. 晶粒形态、尺寸对 Ag-28Cu-0.75Ni 合金超细丝加工及电学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(10): 3590–3596.
- NIU Hai-dong, WU Hai-jun, CHEN Jia-lin, et al. Effects of grain morphology and size on processing and electrical properties of Ag-28Cu-0.75Ni alloy ultra-fine wire[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(10): 3590–3596.
- [19] LI Y L, CHU Z H, LI X W, et al. Swirl-like Cu-Sn phase formation and the effects on the ultrasonic spot welded joint of Sn-coated Cu plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116911–116923.
- [20] 彭光健, 严奇, 张泰华, 等. 热输入对 5A06-6061 铝合金搅拌摩擦焊接头断裂特征的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(9): 2041–2047.
- PENG Guang-jian, YAN Qi, ZHANG Tai-hua, et al. Effect of heat input on fracture behavior of friction stir welded 5A06-6061 aluminum alloy joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(9): 2041–2047.

Effect of ultrasonic welding process parameters on properties of copper conductor joint

CHENG Xian-ming, YANG Ke, LIU Si-zhan, JI Shan-lin, WANG Jian

(School of Mechanical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: The ultrasonic bounding of 2.5 mm² copper(Cu) cables was conducted through single variable method. The mechanical properties and conductivity of the joint were tested using welding amplitude, time and pressure as independent variables. The connection mechanism of ultrasonic wire bounding was analyzed through the interface micro-morphology and fracture morphology of the joint. The results show that the strength of copper conductor joint increases first and then decreases with the increase of welding amplitude, time and pressure. The tensile strength of the joint reaches 554.8 N, at welding time of 1100 ms, welding amplitude of 40% and welding pressure 0.3 MPa, and all welding process parameters reach the critical value. The joint resistance decreases first and then increases with the increase of the welding pressure. The resistance is 0.275 mΩ when the welding pressure is 0.3 MPa. The microstructure analysis results show that the welded joint gradually forms a stable bond from the edge to the inside. Firstly, the local point connection is extended to face connection, then the mechanical chimerism is formed, and finally it becomes interatomic bonding. The fracture morphology analysis shows that the maximum tensile strength is ductile fracture and the joint plasticity is good.

Key words: Cu cables; ultrasonic wire bounding; mechanical properties; conductivity; micro- morphology

Foundation item: Project(2017YFE0100100) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(CE20205046) supported by the Changzhou Key Research and Development Plan (Social Development Technology), China

Received date: 2021-09-28; **Accepted date:** 2021-11-09

Corresponding author: YANG Ke; Tel: +86-519-85192035; E-mail: yangke_hhuc@126.com

(编辑 李艳红)