基于铜线夹与 ACSR 电缆线束的异种材料磁脉冲压接接头分析

柳泉潇潇，周彬彬，彭定宸，李光耀，崔俊佳

（湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室，长沙 410082）

摘要：目的 探究磁脉冲技术在铜线夹与钢芯铝绞线（ACSR）电缆线束压接接头中的应用，以及放电能量对电缆接头性能的影响。**方法** 利用磁脉冲放电设备在 40 kJ 和 45 kJ 放电能量下压接 Cu-ACSR 电缆接头，观察接头宏观形貌，进行接头拉伸试验，观察接头失效情况并评价接头性能。**结果** 压接的位置越靠近末端，压接区直径的变形量越大。40 kJ 放电能量下对应失效后，电缆线束末端发生了较为明显的弹性回复，其外圈铝合金线束张开，而在 45 kJ 时没有明显张开现象。45 kJ 放电能量下对应失效后的铝合金线束延长量明显高于 40 kJ 时。同时，45 kJ 放电能量下压接电缆接头截面可以观察到更大且更均匀的变形。**结论** 使用磁脉冲技术可以实现异种材料的铜线夹和 ACSR 电缆线束的有效连接。在 45 kJ 放电能量下压接电缆接头的最大拉伸载荷相对于 40 kJ 时提升了 55%，由此说明在 45 kJ 放电能量下压接电缆接头性能优于 40 kJ 时。

关键词：铜线夹；钢芯铝绞线（ACSR）电缆线束；磁脉冲压接；放电能量

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.009

中图分类号：TG391 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2021)04-0061-06

Analysis of Magnetic Pulse Crimping Joints of Dissimilar Materials Based on Copper Clamp and ACSR Cable Harness

LIU Quan-xiao-xiao, ZHOU Bin-bin, PENG Ding-chen, LI Guang-yao, CUI Jun-jia

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: This paper aims to explore the application of magnetic pulse technology on the crimping joints between copper clamp and aluminum cable steel reinforced (ACSR) cable harness, and analyze the effect of discharge energy on the performance of cable joints. The magnetic pulse discharge equipment was used to crimp Cu-ACSR cable joints at 40 kJ and 45 kJ discharge energies, and the macroscopic morphology of the joints was observed. The tensile test was carried out to observe the joint failure and evaluate the joint performance. The test results showed that the closer the crimping position was to the end, the greater the deformation of the crimping zone diameter was. The end of the cable harness had obvious elastic recovery after the failure at the discharge energy of 40 kJ. The aluminum alloy harness of the outer ring opened, but there was no obvious opening phenomenon at 45 kJ. The extension of the aluminum alloy harness at 45 kJ discharge energy after failure was significantly higher than that at 40 kJ. Simultaneously, larger and more uniform deformation could be observed in the cross section of crimped cable joint at 45 kJ discharge energy. Consequently, the use of magnetic pulse technology enabled the efficient connection of copper clip and ASCR cable harness of heterogeneous materials. The maximum tensile load of the crimping cable joint at 45 kJ discharge energy was increased by 55% compared with that at 40 kJ, which indicated that the crimping cable joint performance at 45 kJ discharge energy was better.

收稿日期：2021-04-29

基金项目：国家自然科学基金（51975202）；湖南省自然科学基金优秀青年科学基金（2019JJ30005）

作者简介：柳泉潇潇（1992—），男，博士生，主要研究方向为电磁焊接技术。

通讯作者：崔俊佳（1983—），男，博士，教授，主要研究方向为汽车车身轻量化设计与制造。

KEY WORDS: copper clamp; aluminum cable steel reinforced (ACSR) cable harness; magnetic pulse crimping; discharge energy

近年来，随着经济、科技的高速发展，资源短缺、环境污染等问题受到了广泛的关注，为了进一步响应国家号召，各行各业逐步开始迈向节能减排的征途[1]。随着我国城市化水平的不断提升，电力电缆作为城市电网的重要设备之一需要满足更高的要求，但是近年来电缆接头故障频发，造成了较大的经济损失，电网安全面临着极大的威胁，所以在兼顾节能减排的同时还需要保证电缆接头的安全可靠性[2−3]。

铝合金具有密度小、质量轻、导电性能好、耐腐蚀性好，散热快以及价格相对较低等优势而被广泛用作重要的轻质材料，钢芯铝绞线则常被用作高压输电用电缆[4−6]。接线端子对导电性等的要求相对更高，兼顾成本，通常会采用铜线夹。考虑到铝线与铜线夹不同材料的物理化学性质差异，采用诸如铆接、焊接和螺栓连接等传统连接技术具有许多难点问题，实现异种材料电缆接头的有效连接仍然存在较大的挑战[7−9]。

磁脉冲连接是一种可靠的异种材料连接技术，属于电磁成形（EMF）的一种，可以有效避免诸多传统连接技术存在的不足，其中电缆线束与接线端子的连接则主要采用磁脉冲压接技术。通过脉冲磁场在高导电性金属上产生的磁场力迫使金属发生高速碰撞，从而实现同种或异种材料之间的连接[10−11]。与传统的连接方式相比，磁脉冲压接技术在整个连接过程中不会产生持续的热量、气体、辐射或烟雾等，具有更优的环保性[12]。相较于普通的压接方式，磁脉冲压接的全过程均无接触，减小了人为操作带来的误差，使接线端子变形更为均匀，从而保证了压接区表面的平整度[13]。

目前关于磁脉冲连接异种材料管件方面的研究已经十分广泛。崔俊佳等[14]对铝-铁管状零件电磁脉冲焊接的内管临界壁厚进行了相关研究。同时，崔俊佳等[15]还通过试验验证，提出了一种通过磁脉冲压焊工艺连接薄壁碳纤维增强塑料管与 5A02 铝管的新结构。于海平等[16]在 15~17 kV 的放电电压和 1.75 mm 的径向间隙下开展了 5A02 铝合金和 SS304 不锈钢管的电磁脉冲焊接试验。Artzy 等[17]研究了 Al-Mg 和 Al-Al 磁脉冲焊接期间金属间相（IMP）的产生。陈树君等[18]研究了在 5 kV 放电电压下 1060 铝管和 AZ31B 镁棒的磁脉冲焊接接头的焊缝界面附近微观组织演变。Patra 等[19]在初始碰撞角一定的情况下，采用 1.25 mm 间隙和 24 kJ 放电能量的优化参数，成功获得了高质量的纯铜-低碳钢管的磁脉冲焊接接头。

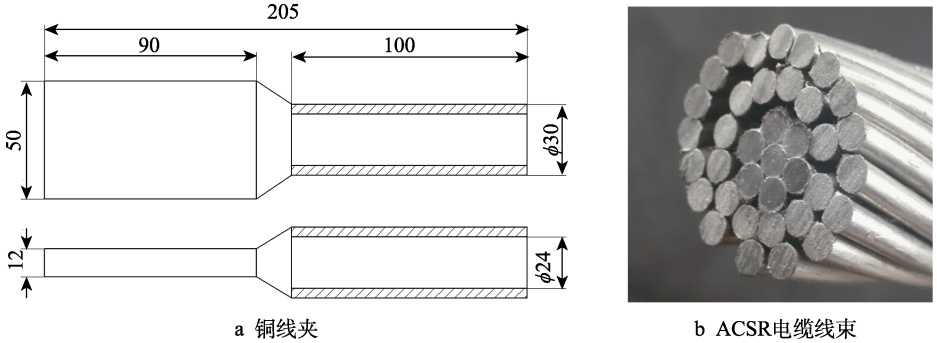
部分学者针对电磁压接技术在端子和线束连接上的应用也展开了一定的研究。韩宏文等[20]基于铜镀镍接线端子和线缆的电磁压接，就相关工艺参数组合展开了研究，并通过试验验证了电磁脉冲压接工艺应用于接线端子的可行性。Rajak 等[21]通过试验分析和有限元方法，探究了 3 种不同类型横截面（梯形、矩形和圆形）的螺旋线圈，在电磁压接 AA1050 端子和线束过程中的端子径向压缩情况，从而确定了梯形横截面的螺旋线圈是最佳几何形状。Rajak 等[22]还基于 LS-DYNA^{TM} 数值模拟结果展开线圈设计并找到了端子均匀变形的最佳放电电压，通过试验进一步验证了将电磁压接应用于铝端子-铜线束连接的可行性。

目前关于磁脉冲压接技术应用于铜线夹和钢芯铝绞线（ACSR）电缆线束方面的研究尚且较少。文中主要研究磁脉冲压接技术在连接铜线夹和 ACSR 电缆线束方面的应用，同时进一步探究放电能量对压接 Cu-ACSR 电缆接头性能的影响。

1 试验

1.1 材料

采用外形似锅铲状的线夹（见图 1a），材料为 T2 紫铜，其接线端长度为 100 mm，内径为 24 mm，外径为 30 mm，平板段长度为 90 mm，宽度为 50 mm，厚度为 12 mm，中间段长 15 mm 为梯形过渡。电缆线束（见图 1b）为 3 层环状分布的钢芯铝绞线（ACSR），



a 铜线夹　　b ACSR电缆线束

图 1 铜线夹尺寸示意及 ACSR 电缆线束截面

Fig.1 Dimension diagram of copper clamp and cross section of ACSR cable harness

外两层为铝线，主要起导电作用，最内层材料为钢，用以提升电缆线束的抗拉强度。试验前对试件进行去毛刺处理，将上述铜线夹和 ACSR 电缆线束按图 2 所示装配。

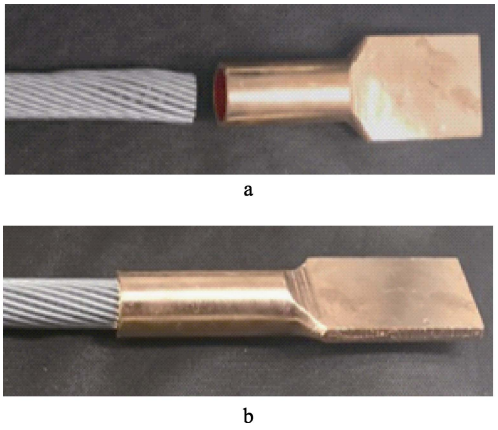


图 2　铜线夹和 ACSR 电缆线束装配图

Fig.2 Assembly drawing of copper clamp and ACSR cable harness

1.2　方法

试验采用磁脉冲放电设备，最大放电能量为 48 kJ，额定电压为 16 kV。该设备由控制电路和储存能量的电容库组成，控制电路是由控制充放电电路和系统检测电路组成，电容库是由 4 个并联的单个电容组成，系统的自有频率为 100 kHz。如图 3 所示，磁脉冲压接技术是基于电磁感应定律，通过电磁力使金属产生高速变形。当高压充电电源给脉冲储能电容器充电后，接通高压间隙放电开关，电容向线圈快速放电，产生瞬时、高压的电磁力，当所受电磁力达到材料的屈服强度时，线夹接线端上压接区开始发生变形并向内颈缩，线夹接线端内壁撞击 ACSR 电缆线束外壁并贴合，形成凹陷区从而构成机械锁死，最终实现了 Cu-ACSR 电缆接头的压接。在李亚等[23]的研究中发现，当能量每增加 3 kJ 时，管件的碰撞速度大约增长 13 m/s，且碰撞速度的提高与放电能量的增加在一定范围内呈线性关系，通过进一步的接头拉伸试验分析发现，随着放电能量的增加，拉伸载荷会有不同程度的提高。由此说明在合适的放电参数下，即可获得高强度、高质量的磁脉冲压接接头。

为了探究磁脉冲压接技术是否有助于获得良好的电缆接头，同时探究放电能量对于电缆接头性能的影响，文中将采用 40 kJ 和 45 kJ 两种放电能量进行磁脉冲压接试验，磁脉冲压接电缆接头的原理见图 3。经预实验发现，相对于单个压接点，两次压接的电缆接头其最大拉伸载荷得到了明显的提升，增加压接次数会提高电缆接头的最大抗拉载荷，因此为使电缆接头拥有更好的力学及电学性能，通常会在单个接线端子上进行多次压接。此外，预实验结果显示压接顺序对电缆接头总体压接效果的影响较小，改变压接顺序对接头最大拉伸载荷的影响并不明显，同时也不会改变其拉伸失效模式。因此文中选择在接线端压接区依次等距进行 4 次压接，间隔距离为 20 mm。

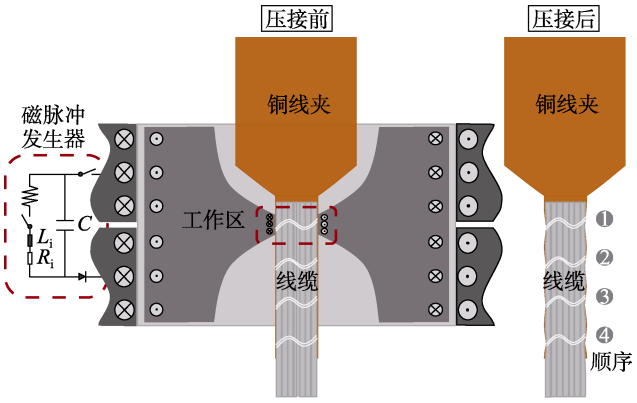


图 3　磁脉冲压接原理

Fig.3 Schematic diagram of magnetic pulse crimping

2　结果与分析

2.1　压接表面宏观形貌

放电结束后，观察 Cu-ACSR 电缆接头的宏观形貌，发现铜线夹接线端产生了较为明显的颈缩变形，同时测量 40 kJ 放电能量下压接区直径得到一组数据，如图 4 所示。观察发现经 4 次压接后的 Cu-ACSR 电缆接头，压接区直径的变化量呈依次递增趋势，前 3 次压接区直径的变形量相对较小，最末端压接区直径的变形量显著增大，这是由于邻近结构的阻力变小而导致的。随着压接区位置越靠近铜线夹接线端的末端，电缆接头压接的效果也越好，因此在进行磁脉冲压接时应选择相对靠近末端的合适位置。从宏观上看，磁脉冲压接技术可以实现 Cu-ACSR 异种材料电缆接头的有效连接。耿辉辉等[24]研究发现，在碰撞间隙不变的情况下，放电能量主要影响碰撞速度，即放

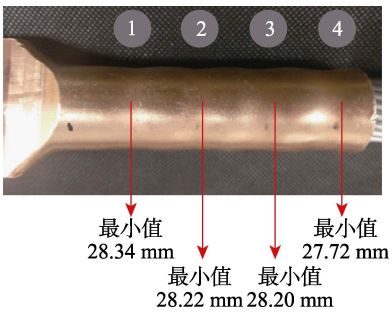


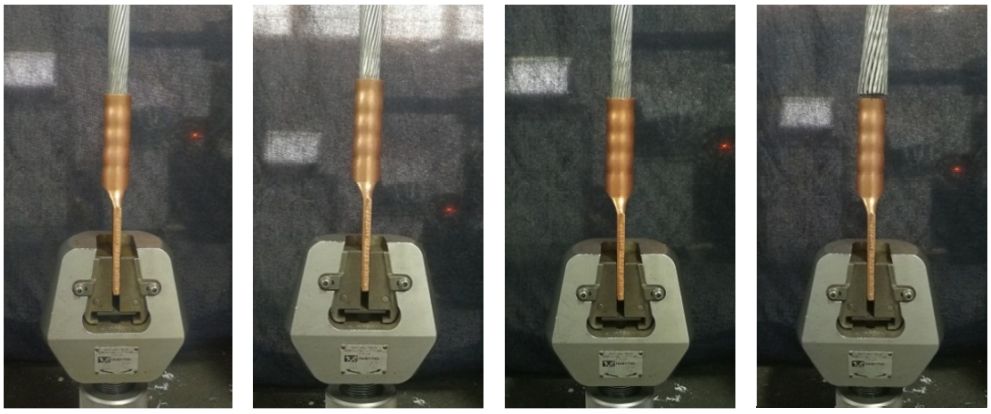
图 4　40 kJ 放电能量下压接 Cu-ACSR 电缆接头的宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphology of crimping Cu-ACSR cable joint at 40 kJ discharge energy

电能量越大，接触位置的碰撞速度越大，最终直接影响接线端的变形量与连接效果。为了进一步探究放电能量对于磁脉冲压接电缆接头性能的影响，对在 40 kJ 和 45 kJ 两种放电能量下制得的 Cu-ACSR 电缆接头进行拉伸试验，观察其失效过程，分析其失效模式，评估接头性能。

2.2 接头拉伸性能

采用型号为 INSTRON 5985 的电子万能材料试验机进行拉伸试验并分析 Cu-ACSR 电缆接头的力学性能，初步评估磁脉冲压接电缆接头。为了避免偶然性，分别对 40 kJ 和 45 kJ 两种能量下制得的样件进行 3 次重复性试验。如图 5 所示为 40 kJ 放电能量下压接 Cu-ACSR 电缆接头对应拉伸过程，在初始阶段，螺旋铝合金线束呈弯曲状态（见图 5a）；随着拉伸载荷增大，螺旋铝合金线束逐渐被拉直绷紧（见图 5b）；随着拉伸载荷的不断上升，接线端子与电缆线束开始产生相对滑动（见图 5c）；由于拉伸载荷不足以使铝合金线束发生断裂，从而导致电缆线束最终完全被拉出，拉伸过程结束（见图 5d）。整个拉伸过程的总位移是由接线端子与电缆线束的相对移动距离、螺旋线束拉直位移以及铝合金线束轴向塑性变形位移 3 部分组成。观察发现 45 kJ 放电能量下电缆接头对应失效过程与 40 kJ 时基本一致。



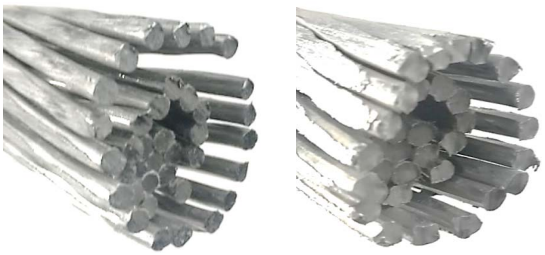
a 初始状态 b 线缆拉直 c 开始失效 d 完全失效

图 5 40 kJ 放电能量下压接 Cu-ACSR 电缆接头的拉伸失效过程

Fig.5 Tensile failure process of crimping Cu-ACSR cable joint at 40 kJ discharge energy

进一步观察不同能量下拉脱失效后 ACSR 电缆线束的末端形貌可以发现不同。图 6 展示了 2 种放电能量下 ACSR 电缆线束失效拔出后的末端扩张现象，通过对比发现，在 40 kJ 放电能量下对应失效后的电缆线束末端（见图 6a）发生了较为明显的弹性回复，其外圈铝合金线束张开，而在 45 kJ 放电能量下对应失效后的电缆线束末端（见图 6b）没有明显张开现象。如图 7 所示，展示了 2 种放电能量下 ACSR 电缆线束失效拔出后的末端延长现象，可以看出 45 kJ 放电能量下对应失效后的外圈铝合金线束延长量明显高于 40 kJ 时。分析可知在 40 kJ 放电能量下对应的螺旋铝合金线束在失效时尚未完全被拉直，轴向塑性变形位移也相对较小，而 45 kJ 放电能量下对应的螺旋铝合金线束不仅完全被拉直，同时还发生了更大的轴向塑性变形位移。

如图 8 所示是 40 kJ 和 45 kJ 放电能量下对应接头的位移-载荷曲线。观察 40 kJ 对应电缆接头的位移-载荷曲线发现出现了多个波峰，其中第 1 个波峰对应的是最大拉伸载荷，约为 18 kN，经振荡后接头彻底失效。观察 45 kJ 对应电缆接头的位移-载荷曲线发现只有一个波峰，对应了最大拉伸载荷，约为 28 kN，在载荷达到最高点后急剧下降，经一段平稳过渡后再



a 40 kJ b 45 kJ

图 6 两种放电能量下对应失效后 ACSR 电缆线束末端的扩张现象

Fig.6 Expansion phenomenon of ACSR cable harness end after invalidation at two kinds of discharge energies

a 40 kJ b 45 kJ

图 7 两种放电能量下对应失效后 ACSR 电缆线束末端的延长现象

Fig.7 Extension phenomenon of ACSR cable harness end after failure at two kinds of discharge energies

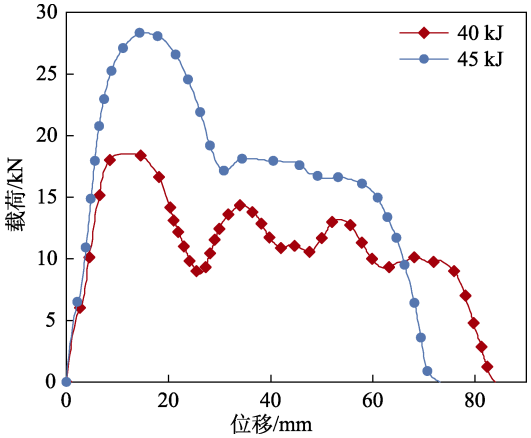


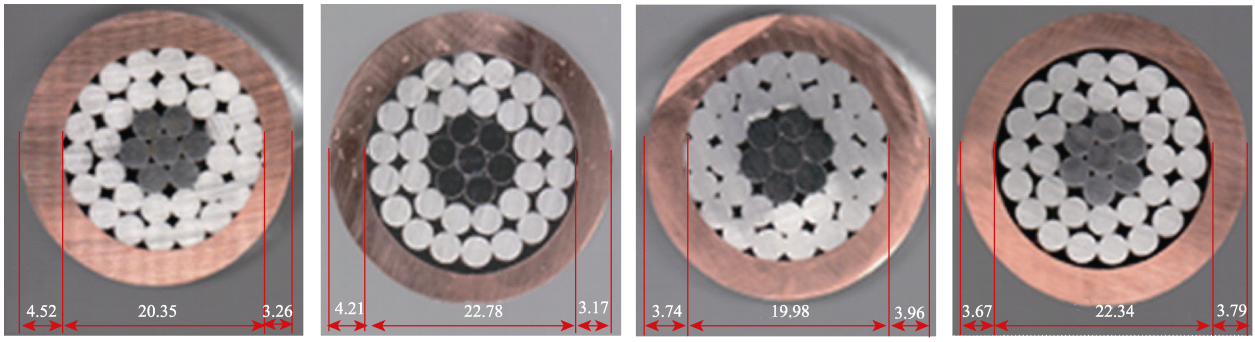
图 8　40 kJ 和 45 kJ 放电能量下压接电缆接头对应拉伸位移-载荷

Fig.8 Tensile displacement-load diagram of crimping cable joints at 40 kJ and 45 kJ discharge energies

次急剧下降，直至电缆接头彻底失效。40 kJ 放电能量下压接电缆接头在达到最大拉伸载荷时，螺旋铝合金线束并未完全被拉直，且随着线束相对接头滑移脱出的同时继续被拉直，且逐渐出现较小的轴向塑性变形位移，直至电缆线束完全被拉脱。45 kJ 放电能量下的电缆接头压实性更佳，在达到最大拉伸载荷时螺旋铝合金线束完全被拉直，随后发生较大的轴向塑性变形位移，由于拉伸载荷尚不足以使铝合金线束发生断裂，直至电缆线束完全被拉脱接头失效。两种能量下的磁脉冲压接电缆接头的拉伸失效模式总体规律保持一致，存在一定区别。

2.3　接头截面分析

通过观察 Cu-ACSR 电缆接头不同位置的截面形貌进一步分析接头结合性能，样件分别取自放电能量为 40 kJ 和 45 kJ 下 Cu-ACSR 电缆接头，将其沿径向切开并打磨，得到如图 9 所示的待观察试样。由于磁脉冲压接试验中采用非连续型集磁器，对称的两半式集磁器在试验时存在一定范围的开口区，电磁力分布在中心区最大，向开口区过渡时会逐渐减小，因此开口区位置对应接线端子的变形相对较小，整个压接区的截面并不是一个完全标准的圆形。观察 40 kJ 和 45 kJ 放电能量下的 Cu-ACSR 电缆接头紧缩段截面形貌（见图 9a 和 9c）发现，45 kJ 能量下的铜线夹接线端内径变化量更大，表现出相对更加紧密的结合；其壁厚的相对变形量也更加均匀，整体呈现出更好的压接效果。分析发现 Cu-ACSR 电缆接头过渡段的截面形貌（见图 9b 和 9d）表现出相似的变化规律。由此可见，45 kJ 放电能量下压接电缆接头的综合性能更佳。



a 40 kJ 紧缩段　　b 40 kJ 过渡段　　c 45 kJ 紧缩段　　d 45 kJ 过渡段

图 9　Cu-ACSR 电缆接头的截面形貌

Fig.9 Cross-section morphology of Cu-ACSR cable joint

3　结语

1）使用磁脉冲压接技术可以实现异种材料铜线夹和 ACSR 电缆线束的有效连接。

2）邻近结构的阻力会直接影响接线端的压接区变形量，压接区位置越靠近末端，电缆接头压接的效果越好，因此采用磁脉冲压接电缆接头时应选择相对合适的位置，有助于提升电缆接头的性能。

3）45 kJ 放电能量下制得的磁脉冲压接 Cu-ACSR 电缆接头，接头性能相对优于 40 kJ 放电能量下接头，因此在一定范围内提高放电能量，有助于提升磁脉冲压接电缆接头的性能。

参考文献：

[1] 张旖旎. 新材料技术在节能减排中的作用[J]. 绿色环保建材, 2018(2): 1.
ZHANG Yi-ni. The Role of New Material Technology in Energy Conservation and Emission Reduction[J]. Green Building Materials, 2018(2): 1.

[2] 魏钢. 高压交联聚乙烯电力电缆接头绝缘缺陷检测及识别研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 1—3.
WEI Gang. Research on Detection and Identification of Insulation Defects in High Voltage XLPE Power Cable Joints[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 1—3.

[3] 成守花. 电力电缆接头绝缘缺陷电热场仿真与放电试验研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020: 2—5.

CHENG Shou-hua. Study on Electric Heating Field Simulation and Discharge Test of Insulation Defects in Power Cable Joints[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020: 2—5.

[4] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68—75.
GUAN Ren-guo, LOU Hua-fen, HUANG Hui, et al. Development Status, Trends and Prospects of Aluminum Alloy Materials[J]. Engineering Science in China, 2020, 22(5): 68—75.

[5] 李波, 樊磊. 某电网超高压输电钢芯铝绞线断裂失效分析[J]. 有色金属工程, 2015, 5(3): 19—53.
LI Bo, FAN Lei. Fracture Failure Analysis of Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) for Ultra-High Voltage Transmission in a Certain Power Grid[J]. Non-ferrous Metal Engineering, 2015, 5(3): 19—53.

[6] 蒋兢兢. 铝导体在线束轻量化设计中的应用[J]. 汽车与配件, 2019(9): 76—78.
JIANG Jing-jing. Application of Aluminum Conductor in Lightweight Design of Wire Harness[J]. Automobile and Accessories, 2019(9): 76—78.

[7] 孙永铎, 汪家梅, 芦丽莉, 等. 321/690 异种金属焊接接头的腐蚀疲劳行为研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(5): 85—97.
SUN Yong-ze, WANG Jia-mei, LU Li-li, et al. Research on Corrosion Fatigue Behavior of 321/690 Dissimilar Metal Welded Joints[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(5): 85—97.

[8] GENG H H, SUN L Q, LI G Y, et al. Fatigue Fracture Properties of Magnetic Pulse Welded Dissimilar Al-Fe Lap Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 146—154.

[9] RAOELISON R N, SAPANATHAN T, BUIRON N, et al. Magnetic Pulse Welding of Al/Al and Al/Cu Metal Pairs: Consequences of the Dissimilar Combination on the Interfacial Behavior during the Welding Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20(1): 112—127.

[10] WEDDELING C, WOODWARD S T, MARRE M, et al. Influence of Groove Characteristics on Strength of Form-Fit Joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 925—935.

[11] KAPIL A, SHARMA A. Magnetic Pulse Welding: an Efficient and Environmentally Friendly Multi-Material Joining Technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 100: 35—38.

[12] JASSIM A K. Magnetic Pulse Welding Technology[C]// Kuala Lumpur: Energy, Power and Control (EPC-IQ) of the 2010 1st International Conference, 2011.

[13] RAJAK A K, KORE S D. Experimental Investigation of Aluminum-Copper Wire Crimping with Electromagnetic Process: Its Advantages over Conventional Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 57—66.

[14] CUI J J, SUN G Y, XU J R, et al. A Study on the Critical Wall Thickness of the Inner Tube for Magnetic Pulse Welding of Tubular Al-Fe Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 138—146.

[15] CUI J J, LI Y, LIU Q X X, et al. Joining of Tubular Carbon Fiber-Reinforced Plastic/Aluminum by Magnetic Pulse Welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 264: 273—282.

[16] YU H P, DANG H Q, QIU Y N. Interfacial Microstructure of Stainless Steel/Aluminum Alloy Tube Lap Joints Fabricated via Magnetic Pulse Welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 297—303.

[17] ARTZY A B, STERN A, FRAGE N, et al. Interface Phenomena in Aluminium-Magnesium Magnetic Pulse Welding[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2008, 13(4): 402—408.

[18] CHEN S J, JIANG X Q. Microstructure Evolution during Magnetic Pulse Welding of Dissimilar Aluminum and Magnesium Alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 19: 14—21.

[19] PATRA S, ARORA K S, SHOME M, et al. Interface Characteristics and Performance of Magnetic Pulse Welded Copper-Steel Tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 278—286.

[20] 韩宏文, 冉洋, 高雷. 接线端子电磁脉冲压接工艺仿真及验证[J]. 激光杂志, 2020, 41(10): 111—116.
HAN Hong-wen, RAN Yang, GAO Lei. Simulation and Verification of EMP Crimping Process for Terminals[J]. Journal of Laser, 2020, 41(10): 111—116.

[21] RAJAK A K, KORE S D. Comparison of Different Types of Coil in Electromagnetic Terminal-Wire Crimping Process: Numerical and Experimental Analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34(A): 329—338.

[22] RAJAK A K, KORE S D. Numerical Simulation and Experimental Study on Electromagnetic Crimping of Aluminum Terminal to Copper Wire Strands[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163(B): 744—753.

[23] 李亚. 5A02 铝合金与 CFRP 管件磁脉冲压焊工艺与连接机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 35—42.
LI Ya. Research on Magnetic Pulse Crimping Welding Process and Joining Mechanism of 5A02 Aluminum Alloy and CFRP Pipe[D]. Changsha: Hunan University, 2019: 35—42.

[24] 耿辉辉. Al-Fe 磁脉冲焊接及其接头失效机制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 28—32.
GENG Hui-hui. Study on Al-Fe Magnetic Pulse Welding and Its Joint Failure Mechanism[D]. Changsha: Hunan University, 2019: 28—32.