



·前沿技术与交叉科学·

## 电动汽车高压线束电磁脉冲压接装置的研制及实验

李成祥, 沈婷, 周言, 吴浩, 张炳飞, 米彦

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 采用铝合金高压线束替代铜合金高压线束可帮助电动汽车减少重量、提高续航和降低成本。针对铝与铜由于金属性质差异难以可靠连接的问题, 本文提出采用电磁脉冲压接技术连接铝合金高压线束与铜合金接线端子, 并研制了一套适用于两者连接的电磁脉冲压接装置, 其最大放电能量为 28 kJ。压接过程中, 随着放电电压的升高, 接线端子表面的温度升高。当放电电压为 12 kV 时, 实现了铝合金高压线束与铜合金接线端子的可靠连接。采用光学显微镜分析连接界面的微观结构, 并测试其电气性能和机械性能。分析结果表明: 电磁脉冲压接技术可实现铝合金高压线束与接线端子、铝合金芯线之间的冶金结合, 且连接界面出现了波纹形貌与涡旋形貌。测试结果显示: 接头接触电阻测试、振动测试、拉力负荷测试均满足汽车行业标准和电缆接头国家标准。

**关键词:** 电动汽车; 高压线束; 接线端子; 电磁脉冲压接; 性能测试

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210568

## Development and experiment of electromagnetic pulse crimping device for high-voltage wire harness of electric vehicles

Li Chengxiang, Shen Ting, Zhou Yan, Wu Hao, Zhang Bingfei, Mi Yan

(Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The use of aluminum alloy high-voltage wire harnesses instead of copper wire harnesses can reduce the weight of electric vehicles, increase battery endurance, and reduce cost. Aiming at the difficulty of reliable and effective connection between aluminum alloy high-voltage wire harness and copper alloy terminal, this paper proposes to use electromagnetic pulse crimping technology (EMPC) to connect aluminum alloy high-voltage wire harness and copper alloy terminal. A set of EMPC device suitable for the connection has been developed. The EMPW device has a maximum discharge energy of 28 kJ. During the crimping process, with the increase of the discharge voltage, the temperature of the terminal surface increases. The aluminum alloy high-voltage wire harness and the copper alloy terminal can be connected reliably at 12 kV. An optical microscope was used to analyze the microstructure of the connection interface, and the electrical and mechanical properties of the interface were tested. The analysis shows that the electromagnetic pulse crimping technology can realize metallurgical combination between the aluminum alloy high-voltage wire harness and the terminal as well as the aluminum alloy core wires. The connection interface has a corrugated morphology and a vortex morphology. The test results show that the contact resistance, vibration test and tensile load test of the joint meet the industrial standards of automobile and the national standards of cable joint.

**Key words:** electric vehicle, high-voltage wire harnesses, terminal, electromagnetic pulse crimping, performance test

新能源汽车替代传统燃油车是汽车制造业的战略转型方向之一, 可有效缓解日益突出的环境污染问题, 助力碳达峰、碳中和<sup>[1]</sup>。电动汽车, 作为新能源汽车的一种, 迎来了前所未有的发展机遇<sup>[2]</sup>。然而, 价格昂贵与续航力不足制约着电动汽车的进一步推广。高压线束是电动汽车电力系统的关键零部件, 承担着能源与动力装置间的电气传输功能<sup>[3]</sup>。目前, 高压线束芯线多采用 0.21 mm 的铜合金导线绞合而成<sup>[4]</sup>, 导致铜的使用量较大且成本较高, 因

\* 收稿日期: 2021-12-02; 修订日期: 2022-04-29  
通信作者: 李成祥, lichengxiang@cqu.edu.cn。

此有学者提出采用铝合金导线替代铜合金导线,不仅成本可以降低 20%,质量还可以减轻 30%<sup>[5-8]</sup>,从而降低价格、提高续航力。

高压线束的工作电流可达 300 A 以上,对连接处的电学性能和力学性能要求较高<sup>[9]</sup>。目前,电动汽车高压线束与接线端子的连接方式主要是液压,其次还有摩擦焊接和超声波焊接。液压接头的接触电阻较大,在水汽影响下易发生电化学腐蚀;且铝合金的蠕变会增加接触电阻<sup>[5,10]</sup>。摩擦焊接在焊接前需采用液压机将铝合金接头和铝合金导线压合,并将压合后的铝合金接头与铝合金导线加工齐平后,与铜合金端子焊接,过程相对繁琐复杂<sup>[10]</sup>。超声波焊接对铝合金导线表面的晶粒大小、位错密度要求较高<sup>[6]</sup>。这些缺陷限制了铝合金线束替代铜合金线束的应用,亟需一种可靠连接铜合金端子与铝合金线束的技术,促进铝合金线束替代铜合金线束,推动节能减排,具有重要的实践意义和工程价值。

电磁脉冲成形技术常用于异种金属的连接,其利用强脉冲磁场作用于金属工件,使工件高速碰撞,形成冶金结合,可克服传统方式的缺陷,展现出广阔的应用前景<sup>[11]</sup>。该技术具有速度快、不产生脆性金属间化合物、绿色环保、能量可控、无需加热等优势,吸引了广大学者和工程技术人员广泛关注和持续研究。该技术主要应用于管件压接<sup>[12]</sup>与板件连接<sup>[13]</sup>。有研究者提出采用电磁脉冲压接的方式连接电力电缆与接线端子<sup>[14-16]</sup>,因此,本文提出采用电磁脉冲压接技术连接电动汽车高压线束的工艺。但文献<sup>[14-16]</sup>中均将芯线剥出后再与接线端子压接,未考虑实际应用中接线端子与线束外径均大于集磁器直径而压接后难以取出的问题,且电动汽车高压线束采用 0.21 mm 的多股导线,与电力电缆的芯线差异较大,其与接线端子的结合过程及机理也有待深入研究。

综上所述,本文针对电动汽车高压线束及接线端子的结构特征,搭建了适用于高压线束的电磁脉冲压接实验平台,并开展铝合金高压线束与铜合金端子的连接实验。通过电阻测试仪器测量接头的电学性能,采用扫描电子显微镜探究线束与接线端子的结合机理。

## 1 电磁脉冲压接平台的研制

### 1.1 电磁脉冲压接的基本原理

电磁脉冲压接是以洛伦兹力作为驱动力,使工件(飞板与基板)高速运动并猛烈碰撞,形成冶金结合。其工作过程为:充电电源对储能电容充电后,放电开关导通,储能电容对线圈放电,线圈中的脉冲电流形成时变磁场,飞板在时变磁场中感应出涡流和洛伦兹力。飞板在洛伦兹力作用下发生高速位移,当其位移等于飞板与基板的间距时,两者发生猛烈碰撞。碰撞过程中,碰撞接触面受撞击和挤压,形成高速金属射流并发生塑性流动。高速金属射流可以清除工件表面污渍与氧化物,产生清洁表面。碰撞界面金属的塑性流动促使原子间形成金属键,从而形成牢固的冶金结合。

### 1.2 线圈与集磁器的研制

当设计、研制电磁脉冲压接装置时,需要考虑电动汽车高压线束的结构特点和几何参数。本文选用的 95 mm<sup>2</sup> 高压线束及其对应的接线端子如图 1 所示。高压线束为同轴结构,由导电层与屏蔽层组成,接线端子主要与导电层相连接。导电层由多股软质铝合金芯线构成,其直径为 14 mm,单股芯线的直径约为 0.46 mm。接线端子的材料为铬铜合金,其表面镀锡、镀银以提高抗氧化能力和优化接触面。接线端子的外径为 22 mm,内径为 16 mm,与线束接触部分的长度为 20 mm。当高压线束与接线端子以同心方式固定之后,接线端子的内径与高压线束的间隙间距约为 1 mm。

根据接线端子的结构特点,本文的压接线圈采用适用于管件连接的螺线管状线圈结构。由于接线端子连接区域的厚度较大,约为 3 mm,连接所需电磁力较高,因此选用多匝线圈结构以提高电磁能量的利用率。相较于放电回路的电阻和电感,多匝线圈自身的电阻和电感较高,尽管能量损耗会提高,但是可集中更多的电磁能量用于压接,如式(1)所示。

$$E_{\text{coil}} = E_{\text{total}} \times \frac{Z_{\text{coil}}}{Z_{\text{line}} + Z_{\text{coil}}} \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{coil}}$  是线圈中的能量,  $E_{\text{total}}$  是储能电容中的能量,  $Z_{\text{line}}$  是线路阻抗,  $Z_{\text{coil}}$  是线圈阻抗。由式(1)可知,  $Z_{\text{coil}}$  越大,  $E_{\text{coil}}$  越大。



Fig. 1 Harness and terminal  
图 1 高压线束与接线端子

最后,线圈匝数设计为 18 匝,其截面为矩形。集磁器的截面为梯形,其工作区域的长度与接线端子的连接区域长度一致,为 20 mm。工作区域的半径约为 23 mm,减少接线端子与集磁器之间的间隙。线圈与集磁器的材料均为紫铜。线圈的匝与匝之间、线圈与集磁器之间均采用绝缘材料隔离,保持绝缘强度。

### 1.3 电磁脉冲压接平台的设计

本文搭建的电磁脉冲压接平台示意图如图 2 所示,主要由实验室自制的电磁脉冲压接装置 WD-28-T 和相应的测量装置构成。电磁脉冲压接装置包括控制单元、能量存储单元、放电单元、线圈和集磁器。

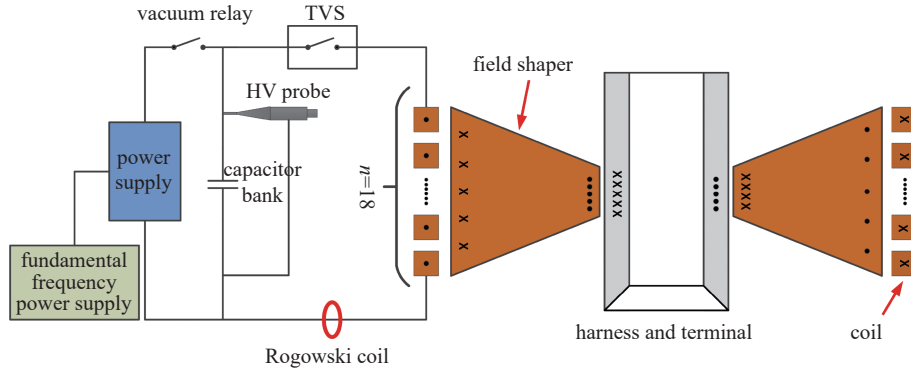


Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic pulse crimping (EMPC)

图 2 电磁脉冲压接平台示意图

充电电源选用高压直流电源,其最大充电电压为 20 kV,最大充电电流为 30 mA。能量存储单元为储能电容,容值  $C$  为 140  $\mu\text{F}$ ,其额定电压  $U$  为 20 kV。放电单元由多棒极型真空触发开关和实验室自研的 CF-21 型触发源构成。控制单元为 FPGA,可产生多路控制信号。根据式(2)可知,电磁脉冲压接装置的最大放电能量为 28 kJ。

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (2)$$

式中:  $C$  是储能电容的电容值,  $U$  是充电电压。

## 2 电磁脉冲压接实验过程及分析

### 2.1 电磁脉冲压接过程中的电磁参数

为探究接线端子与高压线束可靠压接的参数范围,调节充电电压(即放电电压)从 1 kV 开始,逐渐提高,获得不同的实验样品。在实验过程中,采用高压探头(Tektronix: P6015A)和罗氏线圈(MEATROL: D-H-FCT-495)对放电电压和放电电流进行测量。当放电电压为 4 kV 时,放电电压和放电电流的波形如图 3(a)所示。当放电开关导通时,储能电容两端的电压快速下降,而放电回路中的电流快速上升。将开关导通后的时间设为  $t$ ,当  $t$  为 43  $\mu\text{s}$  时,放电电流达到其峰值,约为 25 kA,放电电流上升速率  $di/dt$  约为 0.58 kA/ $\mu\text{s}$ 。由于多棒极真空触发管的反向截止特性,当  $t$  为 86  $\mu\text{s}$  时,放电电流变为 0 A,放电只持续了半个周期。此时,接线端子与高压线束并没有实现压接。当

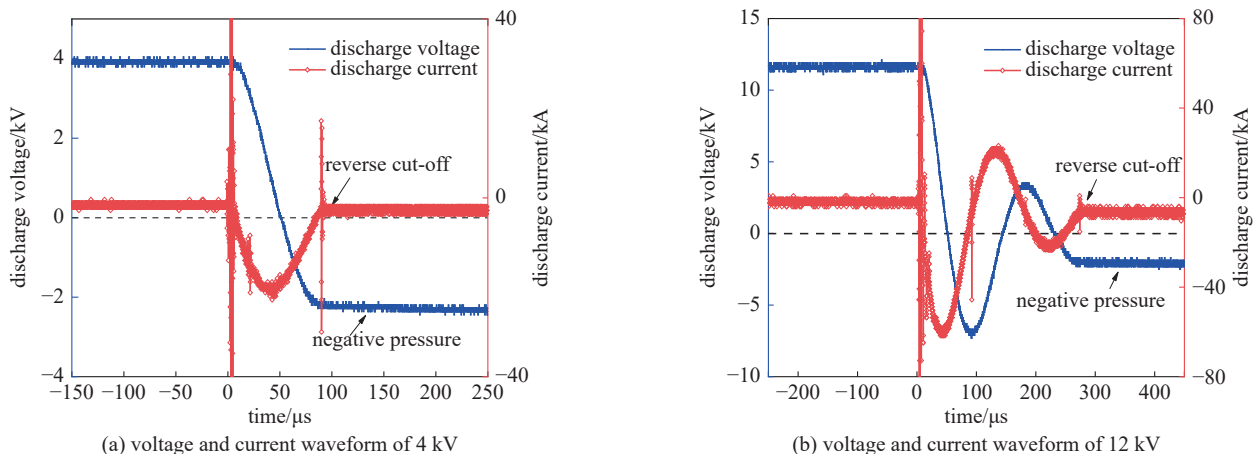


Fig. 3 Voltage and current waveform of different discharge voltages

图 3 不同放电电压时的电压电流波形测试结果

放电电压为 12 kV 时,放电电压和放电电流的波形如图 3(b)所示,尽管放电电压提高了,但对放电电流的频率没有影响。当  $t$  为 43  $\mu\text{s}$  时,放电电流达到其峰值,约为 62 kA,放电电流上升速率  $di/dt$  约为 1.44 kA/ $\mu\text{s}$ 。同样因为多棒极真空触发管的反向截止特性,当  $t$  为 275  $\mu\text{s}$  时,放电电流变为 0 A。与图 3(a)中的放电电流不同,当放电电压为 12 kV 时,放电电流发生了衰减振荡,持续了一个半周期。这是因为电磁脉冲压接装置放电回路的等效电路为 RLC 衰减振荡电路,但由于真空触发管的反向截止特性,未能产生连续完整的放电电流。当放电电流的变化速率较快时,真空触发管的反向截止现象会推迟,放电电流持续时间会增加。在电磁脉冲压接过程中,随着放电电压的升高,放电电流的幅值也会提高,在放电周期固定的情况下,放电电流的变化率也会提高,反向截止时间会延长。电磁脉冲压接过程主要发生在第一个 1/4 周期内,而后续的电流感对压接效果几乎没有影响,因此,真空触发管的反向截止特性对电磁脉冲压接效果几乎没有影响。

## 2.2 电磁脉冲压接过程中的温升及分析

实验中,采用 H11 红外成像测温枪测量压接后接线端子的表面温度。当放电电压低于 10 kV 时,接线端子未发生塑性变形,其表面温度的改变主要由端子中感应涡流的热效应引起,热量可由式(3)与(4)获得<sup>[17]</sup>。

$$J_e = \sigma E = \sigma \frac{d\Phi}{dt} = \sigma \frac{SdB}{dt} \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{\sigma} J_{\text{total}} \cdot J_{\text{total}} \quad (4)$$

式中:  $J_e$  是感应涡流密度,  $\sigma$  是接线端子的电导率,  $E$  是感应电动势,  $\Phi$  是磁通密度,  $B$  是磁感应强度,  $Q$  是热量,  $J_{\text{total}}$  是总体感应涡流密度。

当放电电压在这一范围内,接线端子的温升较低,如当放电电压为 9 kV 时,接线端子的温升约为 16.5  $^{\circ}\text{C}$ 。误差允许范围内,温升与放电电流的平方成正比。当放电电压为 10 kV 时,接线端子发生了塑性变形,其表面温度的改变不仅因为感应涡流的热效应,塑性变形也会使接线端子的内能发生改变并转化为热能。因此,温度升高较大,约为 20.5  $^{\circ}\text{C}$ 。此时,温升不再与放电电流的平方成一定比例。当放电电压为 12 kV 时,接线端子与高压线束实现了可靠连接,接线端子的表面温升可达 34.1  $^{\circ}\text{C}$ 。由此可知,电磁脉冲压接中,接线端子表面的温升较低,对其表面镀锡层无明显影响。

## 3 电磁脉冲压接结果及分析

### 3.1 电磁脉冲压接接头的宏观形貌

当放电电压为 12 kV 时,接线端子与高压线束实现了可靠连接,其宏观形貌如图 4 所示。在接线端子与高压线束的接触区域,发生了塑性变形。该区域内的直径由 19 mm 缩小至 16.6 mm。尤其是接线端子的底部,由于倒角存在,使得该区域接线端子对高压线束完全覆盖。此外,接线端子的外表面平滑规则,既无棱角、毛刺,也无镀层脱落的现象。



Fig. 4 Crimping joint sample

图 4 压接接头样品

### 3.2 电磁脉冲压接接头的微观结构

为深入分析接线端子与高压线束的连接效果,本文探究了两者连接界面的微观结构。将图 4 中的连接样品沿着压接区域切割,多次打磨后,采用光学显微镜 37018(Garl Zeiss Micriscopy GmbH)对连接界面 A 点、B 点及铝合金线束区域 C 点开展测试分析,如图 5(a)所示。铝合金高压线束相互之间已经没有明显的分界,铜合金接线端子与铝合金高压线束之间界限明显,但相互之间紧密结合,没有明显间隙。图 5(b)和图 5(c)分析时光学显微镜放大倍数为 500 倍。

图 5(b)是连接界面 A 点处的微观结构,铜与铝之间存在明显的界限,铜与铝相互嵌入,边界轮廓呈现波纹形貌,该处波峰最高约为 26  $\mu\text{m}$ ,波长约为 95  $\mu\text{m}$ 。图 5(c)是连接界面 B 点处的微观结构,铜与铝的边界轮廓也是波纹形貌,但其形状并不规则,还出现了较为复杂的涡旋结构。由于相互嵌入的程度更深,涡旋结构的连接效果强于波纹结构。

图 5(b)与图 5(c)的连接界面区别主要由两个原因引起:第一是因为铝合金高压线束并不平整,如图 2 所示,这种不平整也促进了连接界面不规则形貌的形成,使两者之间的接触更加紧密;第二是因为集磁器缝隙引起的,由

于集磁器的工作原理, 缝隙处不能形成连续电流, 无法产生对应的洛伦兹力, 该区域的接线端子的塑性变形不是由自身的洛伦兹力产生的, 而是边缘区域带动下发生的塑性变形, 因此, 该区域接线端子与高压线束的碰撞速度比较低, 形成的连接界面结合强度也较弱。

图 5(d) 是铝合金高压线束区域 C 点处的微观结构, 此时光学显微镜的放大倍数为 100 倍。在观察视野范围内(1.3 mm×0.98 mm), 铝线与铝线之间不存在明显界限。由此判断, 铝合金高压线束芯线之间形成了冶金结合。高线束芯线之间的接合与接线端子与高线束之间的接合不同, 高压线束的芯线受到的驱动力主要为两个: 一是接线端子在塑性变形过程中挤压高压线束, 使其具有向内挤压的速度; 二是铝合金高压线束芯线在时变磁场中也感应产生洛伦兹力, 在洛伦兹力驱动下向内挤压、运动。在这两种驱动力作用下, 芯线与芯线之间高速碰撞, 形成冶金结合。

### 3.3 电磁脉冲压接接头的性能

电动汽车高压线束主要用于电能传输, 因此接头处的接触电阻是其重要性能之一。本文采用精密分析仪器分析接头接触电阻并与高压线束本身电阻开展对比。截取 130 mm 长的区域作为样品 1, 包括接线端子(50 mm)与高压线束(80 mm), 多次测量求取平均值, 接触电阻测量结果约为 3.7  $\mu\Omega$ 。截取同样长度的高压线束样品 2 测量, 接触电阻约为 4.95  $\mu\Omega$ 。分析测试结果可知, 样品 1 中的电阻包括铝合金高压线束电阻、接触电阻、铜合金接线端子电阻, 样品 2 仅为铝合金高压线束的电阻。铝合金高压线束的电阻高于接线端子的电阻, 由此可知, 接线端子与高压线束的接触电阻低于高压线束的自身电阻, 满足行业标准 QC/T1067 和 GB/T14315 对于压接处接触电阻的要求。

本文还参考行业标准 QC/T1067 按照振动等级 V2 进行了检测, 结果显示接触电阻连续大于 7  $\mu\Omega$  的时间不超过 1  $\mu\text{s}$ , 满足要求。同时采用了 SANS 万能试验机对线束接头进行了拉力负荷测试, 在 5700 N(60×标称横截面积) 拉力负荷下, 1 min 内压接处未发生滑移, 满足 GB/T14315 的要求。

## 4 结 论

电动汽车制造中, 采用铝合金高压线束替代铜合金线束可减少电动汽车重量、提高续航, 降低成本。本文针对铝合金高压线束与铜合金接线端子的连接难题, 提出采用电磁脉冲压接技术连接铝合金高压线束与铜合金接线端子, 并开展相应的实验研究。得到如下结论: (1) 研制了一套适用于高压线束和接线端子连接的电磁脉冲压接装置, 最大放电能量为 28 kJ。当放电电压为 12 kV 时, 放电电流峰值可达到 62 kA, 实现了铝合金高压线束与铜合金接线端子的可靠连接; (2) 压接过程中, 随着放电电压的升高, 放电电流变化率  $di/dt$  也提高, 真空触发管反向截止时间也发生变化, 放电电流持续时间增长。接线端子表面的温度升高, 但温升不是金属冶金结合的主要原因; (3) 电磁脉冲压接铝合金高压线束与接线端子, 两者发生冶金结合, 连接界面呈现出波纹形貌与涡旋形貌。此外, 铝合金芯线之间也形成冶金结合。汽车高压线束压接接头的接触电阻测试、振动测试、拉伸测试, 均满足相关行业标准。

### 参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020年)的通知[EB/OL]. (2012-06-28)[2012-07-09]. [http://www.gov.cn/zwggk/2012-07/09/content\\_2179032.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2012-07/09/content_2179032.htm). (The State Council. Notice on printing and distributing the development plan for energy saving and new energy automobile industry (2012-2020)[EB/OL]. (2012-06-28)[2012-07-09]. [http://www.gov.cn/zwggk/2012-07/09/content\\_2179032.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2012-07/09/content_2179032.htm).)
- [2] 杨国丰, 周庆凡, 侯明杨, 等. 中国电动汽车发展前景预测与分析[J]. 国际石油经济, 2017, 25(4): 59-65. (Yang Guofeng, Zhou Qingfan, Hou Mingyang, et al. Analysis of China's electric vehicles and its prospect[J]. International Petroleum Economics, 2017, 25(4): 59-65)
- [3] 谢暴, 陶其铭. 基于CFD的汽车发动机舱热管理及优化[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(1): 115-122. (Xie Bao, Tao Qiming. Thermal management and optimization of automobile cabin based on CFD[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016, 7(1): 115-122)
- [4] 郭建保, 陈玉鹤, 陈现岭, 等. 电动汽车高压线束力学试验与仿真分析[J]. 中国汽车, 2020(9): 38-43. (Guo Jianbao, Chen Yunhe, Chen Xianling, et al. Test and simulation analysis of electric vehicle HV-cable[J]. China Auto, 2020(9): 38-43)

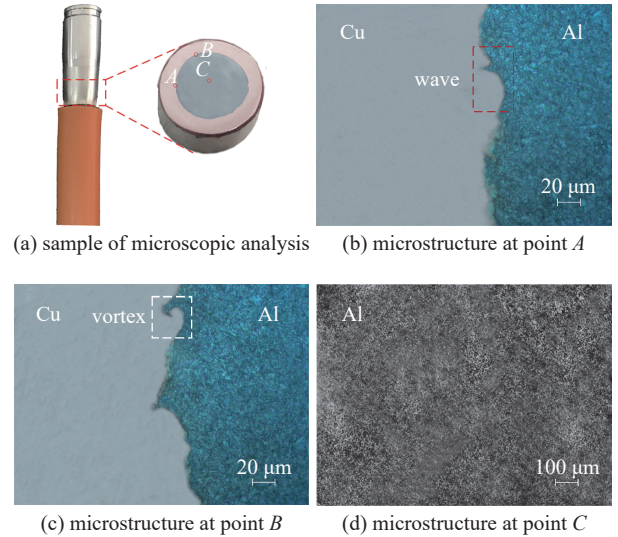


Fig. 5 Microstructure of connecting interface  
图 5 接线端子与高压线束连接界面的微观结构

- [5] 毛建伟, 王武军, 李厚琨, 等. 浅谈铝导线在汽车线束轻量化中的应用[J]. *汽车电器*, 2020(7): 66-68. (Mao Jianwei, Wang Wujun, Li Houkun, et al. Discussion on the application of aluminum conductors in wiring harnesses lightweight[J]. *Auto Electric Parts*, 2020(7): 66-68)
- [6] 王宇, 姚旭东, 欧文军, 等. 汽车用导线现状及发展前景[J]. *汽车电器*, 2020(4): 35-38,42. (Wang Yu, Yao Xudong, Ou Wenjun, et al. Current situation and development prospects of automotive wires[J]. *Auto Electric Parts*, 2020(4): 35-38,42)
- [7] 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 Jingjing. Application of aluminum conductor in lightweight design of wire harness[J]. *Automobile & Parts*, 2019(9): 76-78)
- [8] 刘洋, 刘丹, 娄锋. 浅谈纯电动汽车整车级高压线束开发[J]. *汽车实用技术*, 2018, 44(11): 13-15,18. (Liu Yang, Liu Dan, Lou Feng. Development of whole-vehicle-grade high-voltage wire harness for pure electric vehicle[J]. *Automobile Applied Technology*, 2018, 44(11): 13-15,18)
- [9] 赵平堂, 凌文丹, 李志攀, 等. 电动车高压线束的设计制造[J]. *汽车电器*, 2020(4): 7-10. (Zhao Pingtang, Ling Wendan, Li Zhipan, et al. Design and manufacture of electric vehicle high-voltage harness[J]. *Auto Electric Parts*, 2020(4): 7-10)
- [10] 李金宝, 王子国, 刘国山, 等. 车用铝导线连接技术研究[C]//第19届亚太汽车工程年会暨2017中国汽车工程学会年会论文集. 2017: 3. (Li Jinbao, Wang Ziguo, Liu Guoshan, et al. Research on connection technology of automotive aluminum cable[C]//Proceedings of 19th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. 2017: 3)
- [11] Kapil A, Sharma A. Magnetic pulse welding: an efficient and environmentally friendly multi-material joining technique[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 100: 35-58.
- [12] Bellmann J, Schettler S, Schulze S, et al. Improving and monitoring the magnetic pulse welding process between dissimilar metals[J]. *Welding in the World*, 2021, 65(2): 199-209.
- [13] 李成祥, 杜建, 周言, 等. 电磁脉冲板件焊接设备研制及镁/铝合金板焊接实验研究[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(10): 2018-2027. (Li Chengxiang, Du Jian, Zhou Yan, et al. Development of electromagnetic pulse welding equipment for plates and experimental research on magnesium/aluminum alloy welding[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(10): 2018-2027)
- [14] Rajak A K, Kore S D. Numerical simulation and experimental study on electromagnetic crimping of aluminium terminal to copper wire strands[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 163: 744-753.
- [15] 刘刚, 韩佳一, 丁健, 等. 高压电力电缆导体连接管的电磁脉冲成形研究[J]. *高电压技术*, 2021, 47(3): 1109-1117. (Liu Gang, Han Jiayi, Ding Jian, et al. Research on electromagnetic pulse forming of conductor connecting pipe of high voltage power cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 1109-1117)
- [16] 李成祥, 杜建, 陈丹, 等. 基于电磁脉冲成形技术的电缆接头压接装置的研制及实验研究[J]. *高电压技术*, 2020, 46(8): 2941-2950. (Li Chengxiang, Du Jian, Chen Dan, et al. Development and experimental study of cable joint pressure connecting device based on the electromagnetic pulse forming technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(8): 2941-2950)
- [17] Cao Quanliang, Han Xiaotao, Lai Zhipeng, et al. Analysis and reduction of coil temperature rise in electromagnetic forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 185-194.