

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.016

铜铝过渡接头可分离式电磁压接线圈设计及实验研究

魏 炜¹, 白晓斌¹, 常 江¹, 路志建², 杨兰均²

(1. 国网陕西省电力有限公司宝鸡供电公司, 陕西 宝鸡 721000; 2. 西安交通大学电工材料电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 磁场线圈是电磁成形设备的关键组成部分,其结构及性能影响着电磁成形的效果。目前基础研究中提到的可分离式线圈存在能量利用率低、寿命低的问题,因此,为了将电磁成形技术应用于铜铝过渡接头制作领域,需要研发高强度、高能量利用率的可分离式磁场线圈。文中设计了基于外置集磁器的可分离式线圈,并使用可分离线圈进行了铜铝接头压接实验研究。通过电磁场—结构场有限元仿真,研究了放电频率、线圈和集磁器结构等参数对成形效果和集磁器工作区磁感应强度的影响规律;铜铝接头压接实验研究表明:随着脉冲电容器组放电电压的提高,外管形变不均匀度降低;并且铜铝接头的接触电阻阻值及波动范围减小,抗拉力增大,放电电压高于14 kV时,铜铝接头强度高于铝绞线本体;对放电电压14 kV及以上的接头界面微观分析发现,随着碰撞速度的增大,波状界面波长及峰值增大;对Cu/Al焊接界面线扫发现长度为2 μm 左右的元素互扩散,并未发生界面熔融现象。因此铜铝接头结合机理主要分为以下两方面:由于元素互扩散在界面处形成原子键合;由于高速率撞击产生强烈塑形变形而形成冶金结合。

关键词: 电磁压接;可分离式线圈;数值模拟;接触电阻;结合机理

Design and Experiment Study on Separable Electromagnetic Crimping Coil of Copper-aluminum Transition Joints

WEI Wei¹, BAI Xiaobin¹, CHANG Jiang¹, LU Zhijian², YANG Lanjun²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Baoji Power Supply Company, Shaanxi Baoji 721000, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The magnetic field coil is a critical part of electromagnetic forming equipment, and its structure and performance influence the effect of the electromagnetic forming process. The separable coil proposed in the present foundation study has such issues as low energy utilization and short lifetime. Therefore, to enable the application of electromagnetic forming technology in the field of copper-aluminum transition joints, it is necessary to develop separable magnetic field coil with high strength and high energy utilization. In this paper, the separable coil based on external magnetic collector is designed and the separable coil is used to perform the copper-aluminum joint crimping experiment study. The influence of such parameters as discharge frequency, the coil and magnetic collector structure on the forming effect and magnetic induction intensity of the working area of the magnetic collector is studied through electromagnetic-structural finite element simulation. Results from copper-aluminum transition joints crimping experiments indicate that with the increase of discharge voltage of the pulse capacitor bank, the uneven deformation of the outer tube is decreased. Moreover, the contact resistance and fluctuation range of the copper-aluminum joints are decreased, the tensile strength is increased. When the discharge voltage is above 14 kV, the strength of the copper-aluminum joints is higher than that of the aluminum stranded wire. It is found from the microscopic analysis of cable joint interfaces with discharge voltage at 14 kV and above that with an increase in collision velocity, the wavelength

收稿日期:2025-10-11; 修回日期:2026-01-10

基金项目:陕西省技术创新引导专项(2023KXJ-010); 国家电网陕西省科技项目(5226KY230014)。

Project Supported by Shaanxi Province Technological Innovation Guided Special Project(2023KXJ-010), State Grid Shaanxi Province Science and Technology Project(5226KY230014).

and peak of the wavy interface are increased. It is found from the line scans of Cu/Al welding interface that element diffusion with a length of around $2\ \mu\text{m}$ is occurred without interface melting. Therefore, the bonding mechanism of the copper-aluminum joints is mainly classified into following two aspects: the formation of atomic bonding at the interface due to element diffusion, and the formation of metallurgical bonding due to intense plastic deformation caused by high-speed collision.

Key words: electromagnetic crimping; separable coil; numerical simulation; contact resistance; bonding mechanism

0 引言

电磁成形(EMF, electromagnetic forming)是一种利用磁场力使金属工件变形的高速率、高能率成形方法,适用于良导体材料的加工。相较于传统的金属成形工艺,电磁成形具有提高成形极限、减小回弹、减小起皱等特点^[1-5]。目前,电磁压接技术在铜铝接头制作中的优越性已经得到验证,能够降低接头的接触电阻、提高接头的强度^[6-8]。

现有研究中使用电磁成形技术加工金属空心圆管时,最普遍采用的就是螺线管线圈^[9-12],通常在线圈内部配合集磁器来实现磁场在小范围内的集中。Rajak A K等人比较了3种不同类型的集磁器,即单台式、双台式和锥式集磁器。研究认为,在集磁器工作区长度和外径不变的情况下,单台式集磁器比双台式和锥式集磁器效率更高^[13]。除了螺线管线圈,还有其他类型的磁场线圈。周纹霆等^[14]设计了单匝磁场线圈,线圈机械强度高,装置工作电压可达15 kV,峰值电流为600 kA。Shotri R等人采用5匝比特线圈进行电磁焊接,多匝比特线圈机械强度优于螺旋形线圈,适合用于大电流与强磁场的场合,能产生良好的焊接接头^[15]。

目前基础研究所使用的闭合式线圈通常难以拆解,无法适用于形状不规则、长度较长的工件加工。近年来,国内外众多学者对可分离式磁场线圈进行了广泛的研究。Golovashchenko使用两个U形线圈串联来实现可开合结构,每个U形线圈产生 180° 的半圆路径的电流,两个U形线圈能够产生类似环流的效果,实现管件的电磁加工^[16]。由于该结构外圈电流产生的磁场与内圈电流磁场相抵消,因此该结构能量利用率极低。Deeg等人将集磁器置于线圈外部,线圈为一体式结构,集磁器为可开合结构,工件加工完成后,打开集磁器就可以将工件取出^[17]。该结构集磁器两部分接触面之间往往由于接触不良易造成打火烧蚀问题,降低集磁器的使用寿命。Taber G A等人使用O形可开合集磁器实现了6061铝管与六边形1018钢棒之间的连接。在8 kJ的能量下,实现了管件的良好连接,在相同能量

下,可开合结构相比于一体式结构能量利用率低,管件形变量小^[18]。

以上提到的可分离式线圈存在能量利用率低、寿命低的问题,尚未实际应用于工程中。因此,为了将电磁成形技术应用于铜铝过渡接头制作领域,需要研发高强度、高能量利用率的分离式磁场线圈。

文中设计了基于外置集磁器的可分离式线圈,利用电磁场及动力学仿真分析可分离式线圈的电流、磁场分布以及外管形变速度的影响因素,并使用可分离线圈进行了铜铝过渡接头电磁压接实验研究。

1 可分离式线圈设计

目前大多数管件电磁成形均采用“线圈+内置集磁器”结构,见图1(a)。通过储能电容器组对成形线圈进行放电产生脉冲大电流,从而产生一个瞬变的磁场。根据电磁感应定律,置于磁场中的待加工工件上感应出与线圈中方向相反的电流,工件在电磁斥力的作用下快速塑性形变。该结构在管件电磁成形结束后,管件需要从集磁器工作区中抽离。在铜铝过渡接头电磁成形时,绞线长度较长,考虑到绞线长度较长,并且接头形状不规则,接头一般无法从内置集磁器的工作区中抽离,内置集磁器无法实际应用于铜铝过渡接头电磁成形的场景。因此,文中设计了一种基于外置集磁器的可分离式线圈,见图1(b)。

外置集磁器位于磁场线圈外部,将磁场线圈包围,通过脉冲电容器组向磁场线圈放电产生电流 i_1 ,在外置集磁器中产生感应电流 i_2 , i_2 通过缝隙在工作区附近形成环流,以此在工作区中产生用于电磁成形的强磁场。将外置集磁器分为上下可分离的两部分,两部分之间通过导流面形成电连接,外置集磁器两部分缓冲区间隙为0.5~1 mm,从而降低缓冲区部分的电感,并且缓冲区表面贴有绝缘薄膜以防止绝缘击穿。外置集磁器的电流流向见图2。

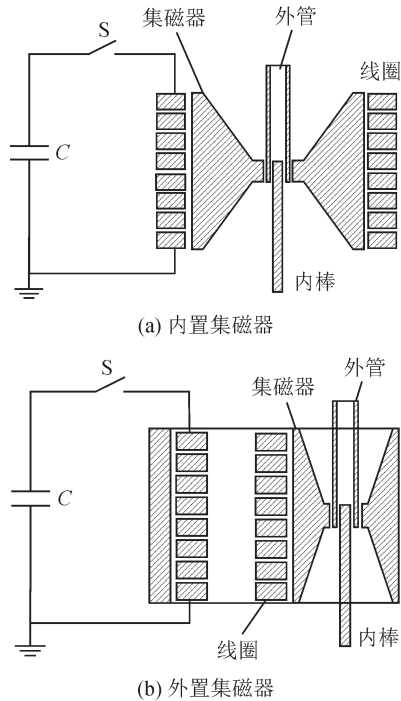


图1 不同集磁器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different field shapers

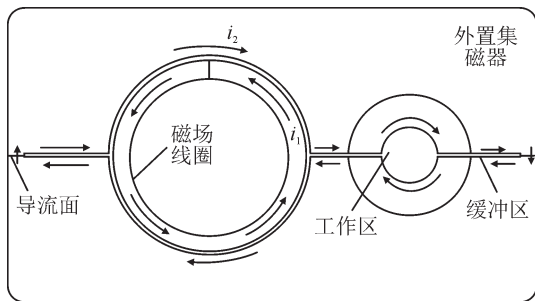


图2 外置集磁器的电流流向

Fig. 2 Current flow direction of the external field shaper

2 线圈设计

文中针对 70 mm² 铝绞线铜端子连接进行磁场线圈和外置集磁器结构的设计, 铝绞线导体外径为 10.0 mm, 铜端子外径为 16 mm, 壁厚 2 mm, 与铝绞线之间的径向间隙 1 mm。

磁场线圈和集磁器的整体设计方案见图 3。首先, 保证放电能量不变, 改变放电频率, 使用 LS-DYNA 软件仿真外管碰撞速度随频率的变化规律, 确定对于特定外管的最佳放电频率; 其次, 分别保持外置集磁器结构和线圈参数一定, 研究不同线圈参数和集磁器结构对集磁器工作区磁感应强度的影响; 最后, 结构定型, 进行铜铝接头压接实验研究。

2.1 放电频率对外管碰撞速度的影响

电磁感应是瞬态过程, 需要考虑趋肤效应对外管感应涡流密度的影响。根据式(1)可知, 随着放电频率的增大, 趋肤深度 δ 随着放电频率的增大而减

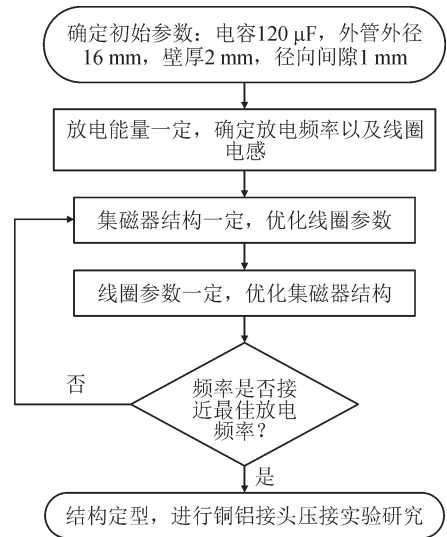


图3 分离式线圈设计方案

Fig. 3 Design scheme of separable coil

小。当趋肤深度过小时, 只有外管表面很浅的深度受到电磁斥力, 不利于外管加速运动; 当趋肤深度大于外管壁厚时, 则会导致部分磁场穿透外管, 造成较大的能量损失。因此, 合理的趋肤深度是进行良好电磁压接的一个前提条件。根据式(1)计算出的 1~20 kHz 下紫铜的趋肤深度值见图 4。为了提高电磁压接的能量利用率, 研究不同频率对外管形变速度的影响规律, 寻找铜铝过渡接头压接的最佳放电频率。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (1)$$

式(1)中: δ 为趋肤深度; f 为放电频率; ρ 为外管的电阻率; μ_0 为真空磁导率。

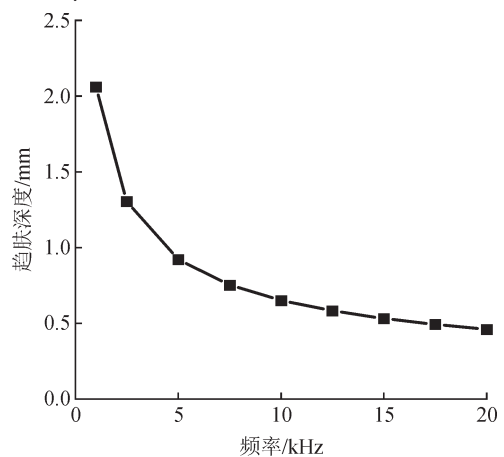


图4 不同频率下紫铜的趋肤深度

Fig. 4 Skin depth of copper under different frequencies

首先, 令放电电容 $C=160$ mF, 充电电压为 12 kV, 回路杂散电感为 200 nH, 电阻约为 20 m Ω 。采用 Pspice 电路仿真软件模拟产生 2.5~20 kHz 的放电电流所需的磁场线圈电感值, 并将不同频率的放电电

流作为初始条件输入LS-DYNA 软件模拟外管塑性形变过程,分析放电频率对外管碰撞速度的影响。

为了考虑高速率时的应变速率效应,文中使用Johnson-Cook 本构关系模型描述铜管在高速变形下的材料性能。并且考虑到电磁压接是高速成形过程,整个过程在几十 μs 即可完成,碰撞时热量来不及传递,可近似为绝热过程。不考虑热传导因素,Johnson-Cook 模型可以简化为^[13]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot (1 + c \ln \varepsilon^*) \quad (2)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: σ 为流动应力; A 为屈服强度; B 、 n 为应变硬化影响指数; c 为应变速率敏感指数; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变速率; ε_0 为参考应变速率。

文中仿真中的管件材料为退火态紫铜,其Johnson-Cook 本构模型参数见表1^[9]。

表1 紫铜的Johnson-Cook 模型参数

Table 1 Parameters of Johnson-Cook model of copper

材料	A/MPa	B/MPa	n	c
紫铜	90	292	0.31	0.025

外管的形变速度与外管受力与时间的积分成正比,随着频率的升高,虽然外管的加速度增大,但是加速时间减小,因此必然存在一个最佳的放电频率使得放电能量一定时,外管与铝绞线的碰撞速度最大。

放电能量一定时,不同频率下外管形变速度曲线见图5。不同频率下,外管与铝绞线的碰撞速度以及碰撞时间见表2。当频率为2.5~5 kHz时,外管与铝绞线在放电电流的前1/4周期碰撞,此时刻在放电电流的上升阶段;当频率为7.5~15 kHz时,外管与铝绞线在放电电流的1/4~1/2周期碰撞,此时刻在放电电流的下降阶段,其中当放电频率为15 kHz时,外管与铝绞线在29.2 μs 碰撞,此时外管的速度达到整个加速过程的最大值;频率为20 kHz时,外管运动半个周期都未与铝绞线碰撞。因此,频率从5 kHz增大至15 kHz,外管与铝绞线碰撞速度先增大后减小,频率为10 kHz时外管与铝绞线碰撞速度最大为101.3 m/s,因此针对70 mm²铜端子,电磁压接的最佳频率在10 kHz附近,此时磁场线圈的电感为1.5 μH 。

2.2 线圈结构设计

普通螺线管的电感计算公式^[20]为

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} n^2 d \varphi \quad (4)$$

式(4)中: n 为螺线管的匝数; d 为螺线管的外径; φ 为随比值 a/d 变化的数值, a 为螺线管的长度。因此,在螺线管线圈的长度、外径以及匝数一定时,线

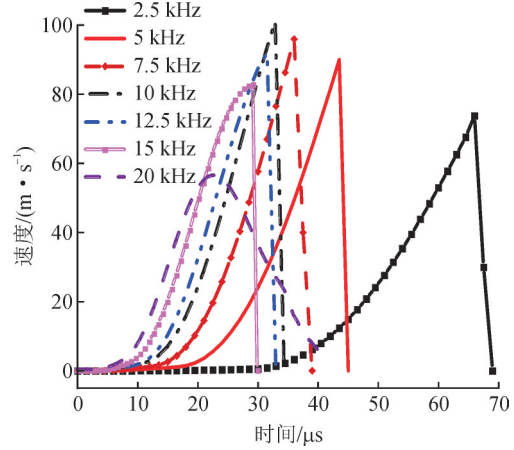


图5 不同频率下外管的形变速度曲线

Fig. 5 The deformation speed curves of the outer tube under different frequencies

表2 不同频率下外管的碰撞速度和碰撞时间

Table 2 The velocity and collision time of outer tubes under different frequencies

参数	数值						
频率/kHz	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0
碰撞速度/(m·s ⁻¹)	73.7	90.0	95.9	101.1	91.9	82.8	
碰撞时间/ms	66.0	43.5	36.0	33.0	31.5	29.2	

圈的电感也是定值,与每匝的厚度以及匝间隙无关。并且在电路放电频率不发生改变的情况下,管件在集磁器工作区中的受力与管件表面的磁感应强度的平方成正比^[5],因此可根据磁感应强度的大小来评价管件的受力情况。

在保持线圈电感量为1.5 μH ,放电电流频率为10 kHz,电流峰值为100 kA的情况下,使用电磁场仿真软件研究线圈长径比对集磁器工作区磁感应强度和线圈受力的影响,其中为了保持线圈电感不变,需要调整线圈的匝数。

首先,令线圈的外径为60 mm,改变线圈的轴向长度分别为120、90、60、40 mm,不同长径比下集磁器工作区峰值磁感应强度和线圈表面受到的最大应力见表3。

表3 保持线圈外径不变,不同长径比下峰值磁感应强度和线圈受力

Table 3 Peak magnetic induction and coil stress under different aspect ratios, maintaining the outer diameter of the coil constant

长径比	峰值磁感应强度/T	线圈受到的最大应力/MPa
2	23.0	15.5
3/2	24.2	19.4
1	24.7	35.6
2/3	23.5	73.9

由表3可知,保证线圈的外径和电感不变,随着长径比的增大,集磁器工作区磁感应强度先增大后减小,长径比为1时,磁感应强度最大,为24.7 T;并且随着长径比的增大,线圈受力由73.9 MPa降低至15.5 MPa。

其次,令线圈的长度为90 mm,外径分别为45、60、90、120 mm,不同长径比下集磁器工作区峰值磁感应强度和线圈表面受到的最大应力见表4。

表4 保持线圈长度不变,不同长径比下峰值磁感应强度和线圈受力

Table 4 Peak magnetic induction and coil stress under different aspect ratios, maintaining the length of the coil constant

长径比	峰值磁感应强度/T	线圈受到的最大应力/MPa
2	22.4	17.3
3/2	24.2	19.4
1	25.0	20.8
2/3	23.5	20.9

由表4可知,保证线圈的轴向长度和电感不变,随着长径比的增大,集磁器工作区磁场强度先增大后减小,长径比为1时,磁场强度最大,为25.0 T;随着长径比的增大,线圈受力略微增大。

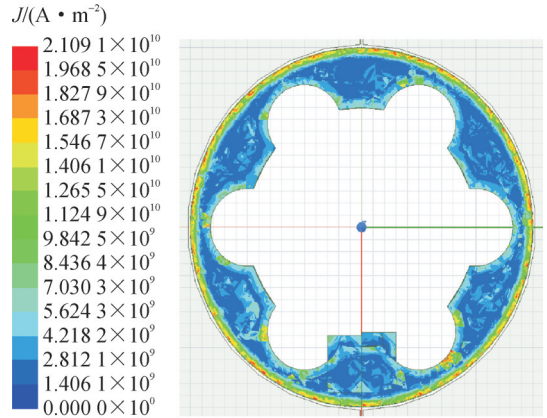
由表3、4可知,虽然长径比为1时,集磁器工作区磁感应强度最大,但是线圈受到的最大应力仍然较大,这必然会影响到线圈的使用寿命。因此综合考虑峰值磁感应强度和线圈受到的最大应力值,选择线圈的长径比为1.5。

综上,线圈的长径比选择为1.5,线圈外径为60 mm,轴向长度为90 mm,匝数为14匝,线圈的电感值为1.5 μH。

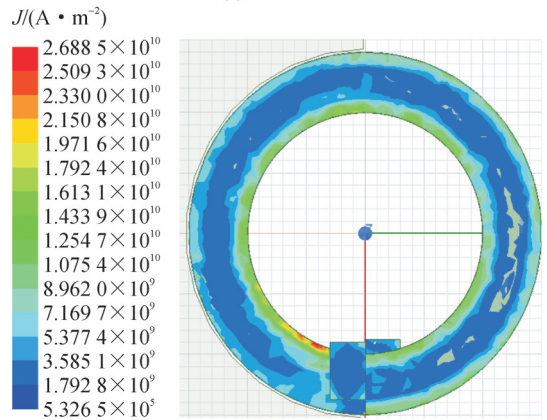
考虑到线圈与外置集磁器中感应涡流方向相反,线圈受到沿径向向内的应力,因此在线圈内侧开槽进行线圈的固定。由于电流路径趋于构成最小电阻路径,因此线圈不开槽时,线圈中的电流集中分布于线圈的内侧,邻近效应却使线圈中的电流有向线圈外侧分布的趋势,最终导致绝大部分电流分布在线圈内侧,另一部分电流分布在线圈外侧。沿内侧开槽可以增大线圈内侧电流路径,迫使线圈内电流更加趋近于集磁器内表面,见图6,增大集磁器与线圈之间的耦合系数,从而增大集磁器工作区磁感应强度。

2.3 外置集磁器结构设计

集磁器在工作区处的形状结构影响感应涡流在工作区附近的分布情况,电流在工作区附近越集中、越靠近工作区,越有利于工作区中强磁场的产生。



(a) 内侧开槽



(b) 不开槽

图6 线圈内电流分布

Fig. 6 Distribution of current within the coil

3种形状集磁器在管件表面产生的磁感应强度在轴向上的分布图见图7,斜角、阶梯状和直角结构在管件表面产生的最大磁感应强度分别为14.2、22.0、24.2 T。斜角工作区结构在管件表面产生的磁感应强度最小,为直角结构所产生的磁感应强度的58.9%,阶梯状结构和直角结构在管件表面产生的磁感应强度相近,阶梯状略小,磁感应强度为直角结构的91.0%,3种结构中,直角工作区结构的集磁器能够实现最大能量利用率。

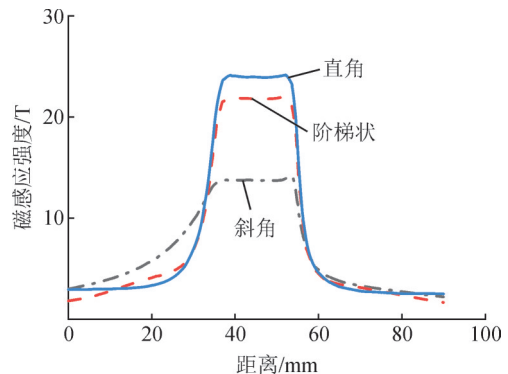


图7 不同工作区形状管件表面磁感应强度分布

Fig. 7 Distribution of surface magnetic induction intensity of different working area shapes of outer tubes

2.4 内置集磁器与外置集磁器比较

保持磁场线圈的电感不变,为比较内置集磁器与外置集磁器在能量利用效率上的差异,建立内置集磁器结构模型,集磁器工作区形状为直角结构,长度为18 mm。采用内置集磁器结构时线圈中的电流分布见图8,对于环形形状的线圈,高频电流在环形导体中流动时会出现环流效应,电流沿线圈内侧分布。当线圈内部存在集磁器时,集磁器外圈中感应出反方向的环形电流,由于邻近效应,线圈中的电流更加趋近于集磁器的内表面。与图6中的外置集磁器结构相比,在环流效应和邻近效应的共同作用下,内置集磁器结构中的磁场线圈电流绝大部分集中在线圈内侧,线圈与集磁器耦合系数更大,因此内置集磁器中的感应涡流更大,在外管表面产生的磁感应强度更强。

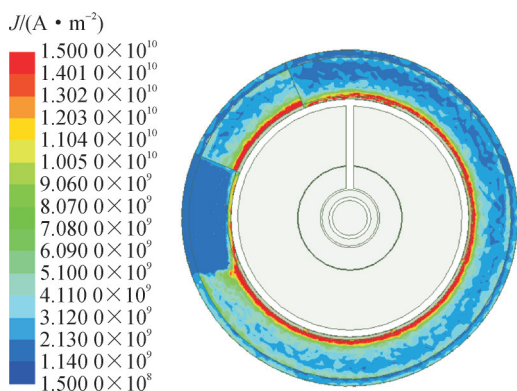


图8 带有内置集磁器的线圈内电流分布

Fig. 8 Distribution of current within the coil with the internal field shaper

内置集磁器与外置集磁器在管件表面产生的磁感应强度轴向分布见图9,在工作区中的管件表面,轴向上的磁感应强度分布均匀,工作区边缘处的磁感应强度逐渐下降。内置集磁器结构在管件表面产生的最大磁感应强度为32.4 T,为外置集磁器结构的133.9%,从磁场线圈中的电流分布来看,内置集磁器结构中线圈电流分布更为合理,效率比外置集磁器结构高。因此外置集磁器在获得拆解方便的同时却牺牲了能量利用率。

2.5 可分离线圈整体设计

线圈设计示意图见图10,线圈外径60 mm,长度90 mm,匝数14匝,总电感量为1.5 mH,外置集磁器工作区直径和长度均为18 mm。脉冲电容器组采用2台80 mF电容器并联,采用平行传输板降低回路电感,回路杂散电感为200 nH,电阻为20 mΩ,当充电电压为12 kV时,放电频率为9.6 kHz,电流峰值为102 kA。

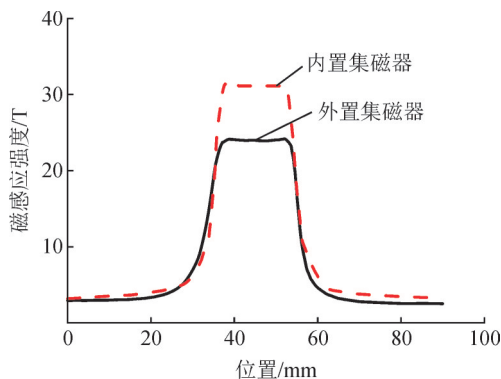


图9 内置集磁器与外置集磁器磁感应强度分布

Fig. 9 Distribution of magnetic induction intensity of the internal and external field shapers

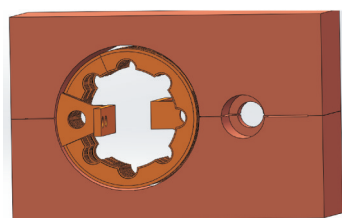


图10 可分离线圈设计图

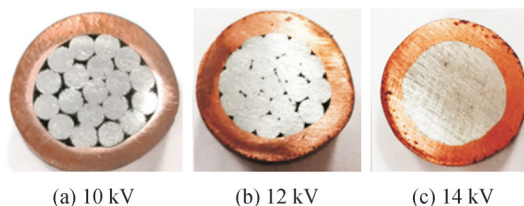
Fig. 10 Design diagram of the separable coil

3 铜铝接头压接实验研究

3.1 放电电压对压接效果的影响

令脉冲电容器组放电电压为10~14 kV,对压接区域截面形状、外管的形变均匀度以及铜铝接头的性能进行了研究。

不同电压下铜铝接头截面图见图11,放电电压为10 kV的铜铝接头截面中,外层铝绞线由于铜管受到磁压力向内挤压出现了向内形变的趋势,铜管所受磁压力不足以使铜管在形变后与线芯发生充分接触,铜管与每股绞线的边缘处发生部分接触,相邻两股线之间的缝隙清晰可见。并且由于集磁器为双缝隙结构,导致铜管的周向电磁力分布不均匀,进而导致铜管的变形不均匀^[21-22]。进一步随着放电电压的增大,铜管与绞线之间的接触面积增大,每股绞线之间的间隙减小,直至放电电压为14 kV时,铝绞线线芯的每根单线都紧密地挤压在一起,铜端子与铝绞线紧密连接。



(a) 10 kV (b) 12 kV (c) 14 kV

图11 不同电压下接头截面图

Fig. 11 Cross-sectional diagram of joints under different voltages

由于集磁器开缝对管件形变量的影响不可忽略,靠近开缝处管件形变量最小,因此同时测量形变区域外径的最大值与最小值,测量结果见图12。定义管件形变不均匀度=(形变后外径最大值-形变后外径最小值)/外径初始值。随着放电电压的提高,管件形变不均匀度呈现出减小的趋势,由10 kV的6.6%降低至14 kV的3.5%。由于管件形变时,远离集磁器开缝的位置最先与线芯碰撞,受到线芯的反作用力停止形变,缝隙附近位置此时还未与线芯发生碰撞,继续缩径变形。因此,放电电压越大,越有利于增加缝隙附近位置的形变量,使得管件形变更为均匀。然而当放电电压由14 kV提高至16 kV,由于铝绞线每股之间的间隙已经被管件压实,管件的形变不均匀度几乎不变。

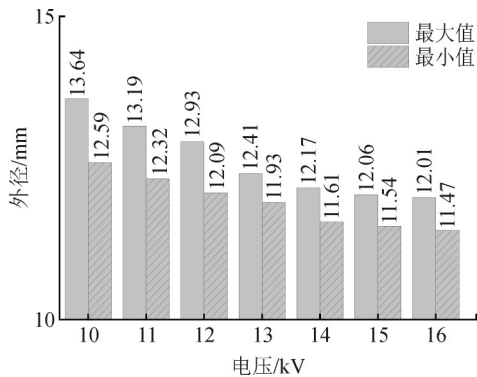


图12 不同电压下外管外径测量值

Fig. 12 Measurement values of outer diameter of outer tubes under different voltages

通过直流低电阻测量仪测得的铜铝接头电阻见图13,每个放电电压下测量5个接头的接触电阻。当放电电压为10 kV时,接头电阻波动很大,最小值为36 μΩ,最大值达到82.6 μΩ,接头电阻阻值波动较大可能与铝绞线线芯表面状况以及其位于管件内部的位置有关。随着放电电压的增大,接头电阻逐渐减小,并且波动幅度减小,电阻阻值趋于稳定,低于国标GB/T 14315—2008中要求值。

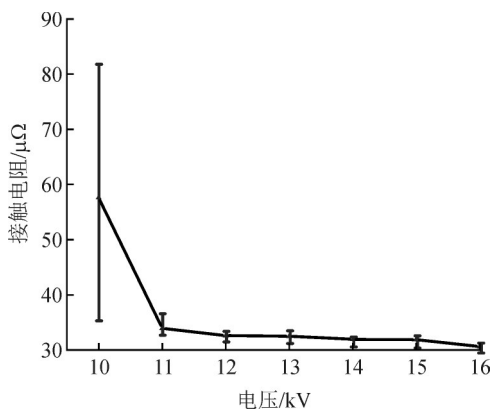


图13 不同电压下铜铝接头样品接触电阻

Fig. 13 Contact resistance of Cu/Al joints under different voltages

对不同放电电压铜铝接头进行拉伸测试曲线见图14,放电电压为12 kV时,由于外管与铝绞线压接不紧密,当拉力为4.6 kN时,铝绞线与铜端子拉脱。当放电电压为14 kV时,此时铝绞线本体断裂,拉伸曲线拉力下降阶段的每一个折点表示铝绞线每根的断裂处。14 kV铜铝接头样品拉伸结果表明,在合适的放电参数下,电磁压接电缆接头强度高于铝绞线本体。

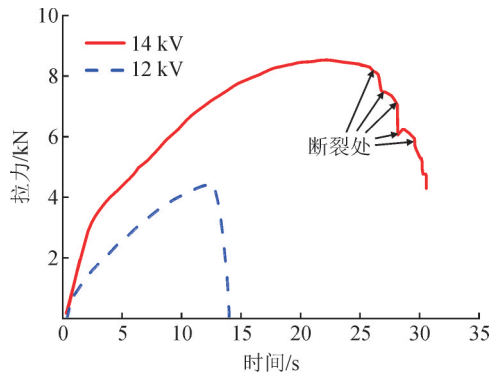


图14 不同电压下铜铝接头样品拉伸结果

Fig. 14 Tensile results of Cu/Al joints under different voltages

综合考虑管件形变不均匀度、接触电阻以及接头的抗拉力,14 kV为70 mm²铜铝过渡接头压接的最佳放电电压。

3.2 电缆接头微观界面分析

放电电压为14 kV的样品界面见图15(a),较暗区域代表铝电缆芯,而较亮区域代表铜端子。铜铝焊接界面呈现出波浪状,长度约为20~30 μm,波峰高度可达10 μm。波状界面较为连续,通常会有数个波浪状形状连续出现。在波状界面处,铜铝接触紧密且无缝隙,这表明铜铝界面已经实现了有效的焊接效果。当放电电压为16 kV时的铜铝界面见图15(b),在铜铝界面上出现了一个长度为100 μm的波浪状连接界面,其波峰高度可达25 μm。这表明随着放电电压的增加,外管与铝绞线的碰撞速度也增加,导致波状界面的波长和波峰增大。然而过大的碰撞速度导致焊接界面处出现细小的紫铜颗粒,见图15(c)。这说明尽管较高的碰撞速度可以增加波状界面的波峰,但也会在界面处引发微观缺陷的发生。

使用扫描电镜对图16(a)中直线从左至右进行线扫描。直线上所有元素线扫描结果见图16(b),直线左侧为铜端子区域,Cu元素占比大,几乎无Al元素;直线右侧为铝线芯区域,Al元素占比大,几乎无Cu元素,其中少量的C、O元素可能是由于金刚石抛光液残余以及金属氧化导致的。在Cu、Al元素的过渡区域,从直线左侧至右侧,Cu元素下降,Al元素含

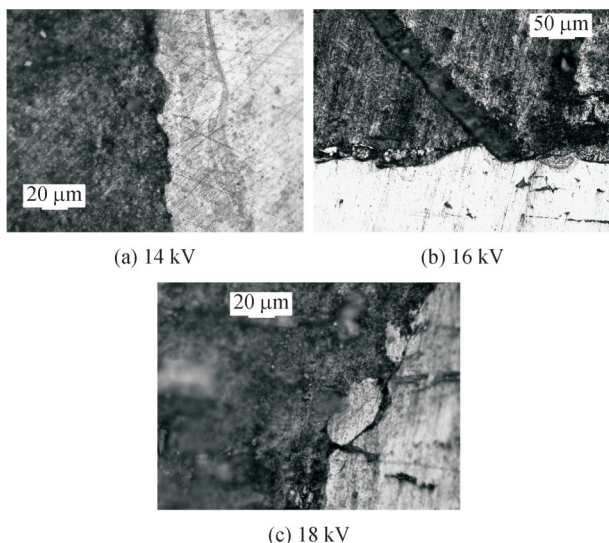
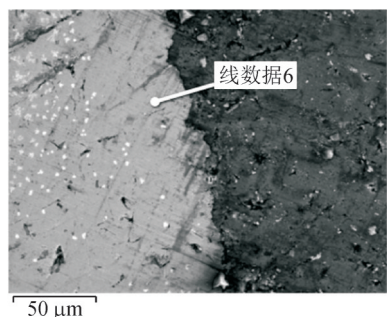


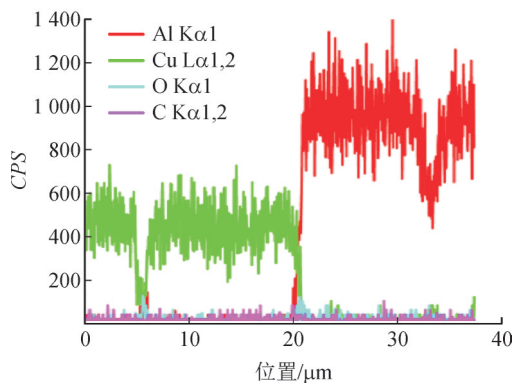
图15 不同放电电压下,铜铝界面金相形貌

Fig. 15 Morphology of Cu/Al interface in metallographic structure under different discharge voltages

量上升。焊接界面处发生了Cu、Al元素的互扩散,长度为2 μm左右,相比于发生熔融现象的金属过渡区,铜铝接头焊接Cu、Al元素的互扩散长度短很多^[23-26],说明在放电电压为14 kV的试验条件下,碰撞界面上的温升难以使铜或铝材料产生融化现象。



(a) 铜/铝界面SEM图



(b) 铜/铝界面元素

图16 Cu/Al界面元素分析

Fig. 16 Analysis of Cu/Al interface elements

根据上述的研究,焊接界面处并未出现熔融过渡区和金属化合物,而是出现了2 μm的原子互扩散,出现了原子之间的键合。并且界面处观察到波状机械咬合界面。因此铜铝接头电磁焊接结合机

理主要分为以下两方面:由于元素互扩散在界面处形成原子键合;由于高速率撞击产生强烈塑性变形从而形成冶金结合。

4 结论

文中设计了基于外置集磁器的可分离式线圈,并使用可分离线圈进行了铜铝过渡接头压接实验研究,得到了以下结论:

1)保持放电能量一定,随着放电频率的增大,铜外管与铝绞线碰撞速度先增大后减小,最佳放电频率为10 kHz;随着线圈长径比的增大,集磁器工作区磁感应强度先增大后减小,综合考虑线圈受力和磁感应强度,线圈长径比为1.5较为适宜。

2)不同集磁器工作区形状中直角工作区结构的集磁器产生的磁感应强度最大,能量利用率最高;随着集磁器缓冲区的加长,导流面上电流在轴向长度上均匀分布,最大电流密度减小,降低接触面打火、烧蚀风险。

3)随着脉冲电容器组放电电压的提高,铜外管与绞线之间的接触面积增大,每股绞线之间的间隙减小,外管形变不均匀度降低;并且铜铝接头的接触电阻阻值及波动范围减小,抗拉力增大,放电电压高于14 kV时,铜铝接头强度高于铝绞线本体。综合考虑管件形变不均匀度、接触电阻以及接头的抗拉力,14 kV为70 mm²铜铝接头压接的最佳放电电压。

4)对放电电压14 kV及以上的铜铝接头界面微观分析发现,随着碰撞速度的增大,波状界面波长及峰值增大,然而过大的碰撞速度易造成界面破碎等微观缺陷;对Cu/Al焊接界面线扫发现长度为2 μm左右的元素互扩散,并未发生界面熔融现象。因此铜铝接头结合机理主要分为以下两方面:由于元素互扩散在界面处形成原子键合;由于高速率撞击产生强烈塑性变形从而形成冶金结合。

参考文献:

[1] 李晨辉,王 骁,韩佳一,等. 电缆导体连接管的电磁脉冲压接工艺参数研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 156-165.
LI Chenhui, WANG Xiao, HAN Jiayi, et al. Research on electromagnetic pulse crimping process parameters for cable conductor connecting pipe[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (7): 156-165.

[2] 陆豪赫,常 江,白晓斌,等. 电磁脉冲在管/绳典型结构焊接中的应用研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(5): 51-55.
LU Haohe, CHANG Jiang, BAI Xiaobin, et al. Application of electromagnetic pulse in welding of typical structure of pipe/rope

- [J]. Hot Working Technology, 2025, 54(5):51-55.
- [3] 熊奇, 邱爽, 李彦昕, 等. 组合式电磁成形技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9):2710-2729.
XIONG Qi, QIU Shuang, LI Yanxin, et al. Research progress of combined electromagnetic forming technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9):2710-2729.
- [4] 张望, 朱鑫辉, 邱立, 等. 基于铜环驱动的TA2钛板电磁成形数值模拟与实验研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(11):3339-3348.
ZHANG Wang, ZHU Xinhui, QIU Li, et al. Numerical and experimental study of electromagnetic drive forming for TA2 titanium sheet based on a copper ring[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(11):3339-3348.
- [5] 李成祥, 王现民, 周言, 等. 基于双线圈结构的铝—铜电磁脉冲板件焊接中间层抑制方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13):4112-4124.
LI Chengxiang, WANG Xianmin, ZHOU Yan, et al. The suppression of intermediate layer in Al-Cu electromagnetic pulse welding with double coils structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13):4112-4124.
- [6] RAJAK A K, KORE S D. Experimental investigation of aluminium-copper wire crimping with electromagnetic process: Its advantages over conventional process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017(26):57-66.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] LUEG-ALTHOFF J, SCHILLING B, BELLMANN J, et al. Influence of the wall thicknesses on the joint quality during magnetic pulse welding in tube-to-tube configuration[J]. International Conference on High Speed Forming, 2016(7):DE290R-16992.
- [10] YU Haiping, XU Zhidan, JIANG Hongwei, et al. Magnetic pulse joining of aluminum alloy-carbon steel tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012(22):548-552.
- [11] 徐志丹. 3A21 铝合金—20 钢管件磁脉冲焊接数值模拟与工艺试验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
XU Zhidan. Numerical simulation and process test of magnetic pulse welding of 3A21 aluminum alloy-20 steel pipe fittings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [12] 邵子豪, 吴伟业, 汪晨鑫, 等. 基于凸形集磁器的管件电磁胀形电磁力及成形性分析[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(11):36-44.
SHAO Zihao, WU Weiye, WANG Chenxin, et al. Analysis of electromagnetic force and formability of tube electromagnetic bulging based on convex magnetic collector[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(11):36-44.
- [13] RAJAK A K, KUMAR R, BASUMATARY H, et al. Numerical and experimental study on effect of different types of field-shaper on electromagnetic terminal-wire crimping process[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(3):453-459.
- [14] 周纹霆, 董守龙, 王晓雨, 等. 电磁脉冲焊接电缆接头的装置的研制及测试[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11):2424-2434.
ZHOU Wenting, DONG Shoulong, WANG Xiaoyu, et al. Development and test of electromagnetic pulse welding cable joint device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11):2424-2434.
- [15] SHOTRI R, FAES K, DE A. Magnetic pulse welding of copper to steel tubes - experimental investigation and process modelling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020(58):249-258.
- [16] GOLOVASHCHENKO S. Electromagnetic forming and joining for automotive applications[D]. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2006:201-206.
- [17] DEEG T D. Verfahren und anordnung zur verformung von werkstücken aus metall durch impulsartige einwirkung eines magnetfeldes: 1118265A[P]. 1967-06-30.
- [18] TABER G A, VIVEK A, COFFEY J, et al. Openable electromagnetic actuator as a non-contact, agile tool for crimping operations[J]. Manufacturing Letters, 2015(5):21-24.
- [19] PSYK V, RISCH D, KINSEY B L, et al. Electromagnetic forming-a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5):787-829.
- [20] 卡兰塔罗夫. 电感计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
KALANTAROV. Inductance calculation manual[M]. Beijing: China Machine Press, 1990.
- [21] 颜子欣, 邱东阳, 崔晓辉, 等. 多缝隙集磁器的磁脉冲管件缩径成形及连接[J]. 锻压技术, 2021, 46(4):206-214.
YAN Zixin, QIU Dongyang, CUI Xiaohui, et al. Diameter reduction forming and welding of magnetic pulse tube for multi-slit magnetic collector[J]. Forming and Stamping Technology, 2021, 46(4):206-214.
- [22] 王成林. 基于集磁器的管件电磁胀形电磁力分布规律与管件成形均匀度研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2022.
WANG Chenglin. Research on electromagnetic force distribution law and forming uniformity of pipe fittings based on magnetic collector[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022.
- [23] MANOHARAN P, MANOGARAN A P, PRIEM D, et al. State of the art of electromagnetic energy for welding and powder compaction[J]. Welding in the World, 2013, 57(6):867-878.
- [24] LI Chengxiang, XU Chennan, ZHOU Yan, et al. Atomic diffusion behavior in electromagnetic pulse welding[J]. Materials Letters, 2023(330):133242.
- [25] WANG P Q, CHEN D L, RAN Y, et al. Electromagnetic pulse welding of Al/Cu dissimilar materials: Microstructure and tensile properties[J]. Materials Science and Engineering A, 2020(792):139842.
- [26] 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.
GENG Huihui. Magnetic pulse welding and fracture behavior of Al-Fe joint[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- 魏伟(1983—), 男, 高级工程师, 长期从事电力工程建设管理及电力系统自动化工作(E-mail: 82602803@qq.com)。
杨兰均(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事脉冲功率等离子体科学与技术、新型电力设备研究工作(通信作者)(E-mail: yanglj@mail.xjtu.edu.cn)。