

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.07.017

电缆导体连接管的电磁脉冲压接工艺参数研究

李晨辉¹, 王 骁¹, 韩佳一², 黄逍遙¹, 丁 健¹, 杨兰均²

(1. 宁波送变电建设有限公司甬城配电网建设分公司, 浙江 宁波 315000; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 电磁脉冲成形技术是一种通过电磁力来对金属材料进行加工的高能率成形技术, 将其应用于电缆导体连接管的压接中, 可以在压接后连接管的表面形貌、紧密度、接触电阻等方面起到明显的改善作用。文中针对GT-70、GT-150、GT-300三种铜连接管制作了3种型号的集磁器, 并对其产生的磁场和管件的变形过程进行了仿真和实验研究, 探究了不同型号连接管的压接工艺参数。研究发现, 铜连接管与铜电缆绞线之间能实现固相焊接的最低碰撞速度是118.6 m/s, 对于GT-70、GT-150、GT-300的铜连接管, 在放电电流峰值为49.1、50.8、54.9 kA, 频率为6.41、5.95、5.52 kHz时碰撞速度分别能达到该值, 而在同等储能条件下不插入连接管进行放电时, 在工作区所能获得的峰值磁场分别达到18.72、15.41、13.36 T。

关键词: 电缆导体连接管; 电磁脉冲压接; 碰撞速度; 工作区磁场; 接头电阻

Research on Electromagnetic Pulse Crimping Process Parameters for Cable Conductor Connecting Pipe

LI Chenhui¹, WANG Xiao¹, HAN Jiayi², HUANG Xiaoyao¹, DING Jian¹, YANG Lanjun²

(1. Yongcheng Power Distribution Grid Construction Branch Ningbo Power Transmission and Transformation Construction Company Ltd., Zhenjiang Ningbo 315000, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Electromagnetic pulse forming technology is a kind of high-energy rate forming technology which can process metal materials by electromagnetic force. Its application in the crimping of cable conductor connecting pipe can obviously improve the surface morphology, compactness and contact resistance of the connecting pipe after crimping. As for such 3 types of copper connecting pipes as GT-70, GT-150 and GT-300 in this paper, 3 types of magnetic collectors are made. The magnetic field generated by the magnetic collectors and the deformation process of the pipe fittings are simulated and experimentally studied, and the crimping process parameters of different types of connecting pipes are explored. It is found that the minimum collision velocity for solid-phase welding between copper connecting pipe and copper cable stranded wire is 118.6 m/s. For GT-70, GT-150 and GT-300 copper connecting pipes, the collision speed can reach the value at peak of discharge currents at 49.1 kV, 50.8 kV and 54.9 kA and the frequencies at 6.41 kHz, 5.95 kHz and 5.52 kHz respectively. However, under the same energy storage conditions and in case of discharging without inserting connecting pipe, the peak magnetic field obtained in the operating area can reach 18.72 T, 15.41 T and 13.36 T, respectively.

Key words: cable conductor connecting pipe; electromagnetic pulse crimping; collision velocity; magnetic field of operating area; resistance of joint

收稿日期:2022-11-21; 修回日期:2023-01-18

基金项目:陕西省重点项目(2021GXLH-Z-007)。

Project Supported by Key Project in Shaanxi Province(2021GXLH-Z-007).

0 引言

电磁脉冲成形^[1-3](electromagnetic pulse forming, EMPF)技术是一种通过电磁力来对良导体材料进行加工的高能率成形技术。在电缆中间接头制作过程中,可以用EMPF取代传统的液压压接方法,来实现对导体连接管的压接效果的提升。

RAJAK A K^[4-5]等人对壁厚为1 mm的铝制终端端子与多股铜线的EMPF压接进行了研究,发现EMPF压接得到的接头截面比液压压接的接头更均匀。而周纹霆^[6-7]等人研制了一台用于电缆接头压接的EMPF成形设备并进行了研究,发现用EMPF方法可以获得电阻小于传统压接方法的电缆接头。

通过对国标GT-70的铜连接管的压接研究可知,EMPT在改善连接管表面形貌和提升压接紧密度等方面具有明显优势:液压压接的连接管表面存在毛刺和压痕,压接的紧密度和均匀度差;而用EMPT压制的连接管表面较光滑,没有毛刺和棱角,管壁紧密挤压住绞线。这表明而在一定条件下,EMPF可以使连接管与电缆线芯之间实现类似于固相焊接的连接效果。

然而,电力电缆的规格和型号多种多样,所用的导体连接管在外径、壁厚等尺寸上也有所不同。而RUETER D^[8]等人的研究表明,管状试件和成形线圈之间径向间距的增大,会造成明显的磁场能量损失。

文中针对国标GT-70、GT-150和GT-300三种铜连接管,研制了3种型号的集磁器,并对其产生的磁场和管件的变形过程进行了仿真和实验研究,以探究不同型号连接管的压接工艺参数。

1 原理简介

使用EMPF技术压接导体连接管的基本原理(见图1)是:通过储能电容器组对成形线圈(励磁线圈)进行放电,线圈中会流过高频的衰减振荡电流,并在特定的区域内产生一个瞬变的强磁场,此时将待加工的管件置于其内,管件上就会感应出涡流,并在强磁场的作用下发生缩径形变。回路中的电流 i_1 为

$$i_1 = \frac{U_{c0}}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: C 为电容量; L 为整个回路总电感; R 为回路总电阻; U_{c0} 为电容初始电压; t 为时间; ω 为角频率。

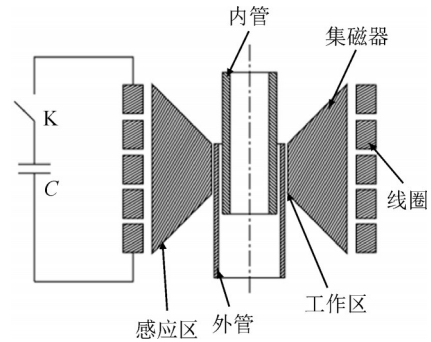


图1 整体原理图

Fig. 1 Overall schematic diagram

集磁器则是EMPF技术中常用的一种辅助工具,其主要作用是增大特定工作区域内的磁密度,以提高管件成形的效果^[9-10]。集磁器也具有减小励磁线圈所受的力学破坏作用;同时,由于集磁器成本远小于成形线圈,往往会将一个励磁线圈和多个不同尺寸的集磁器配套使用,以应对不同形状、尺寸试样的加工需求。

用于管件压接的集磁器外观一般是C形圆柱环体,其结构根据功能可划分为外感应层(外壁)、导流层(切缝)和内工作层(内壁),见图2。当励磁线圈中流过脉冲电流 i_1 时,集磁器的外壁上感应出涡流 i_2 ,而外壁通过导流缝的两侧与内壁形成回路,使得 i_2 流过集磁器的内壁,从而在工作区内产生强磁场,并在管件中产生感应电流 i_3 ,来实现电磁加工。一般来说,外感应层的轴向长度应大于内工作层,以便在工作层上获得远大于感应层的电流密度。典型的集磁器截面形状为梯形。

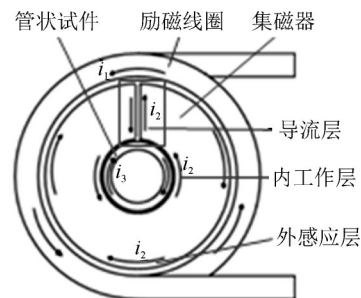


图2 成形线圈原理图

Fig. 2 Schematic diagram of forming coil

2 实验方法和装置

2.1 储能装置与成形线圈系统

文中所使用的储能电容器是总容值为120 μ F、耐受电压为20 kV的脉冲电容器组。所使用的成形

线圈系统由铜合金制作的22匝励磁线圈和3种分别用于GT-70、GT-150、GT-300连接管加工的集磁器组成,其尺寸参数见表1和图3。

表1 集磁器工作区尺寸

Table 1 Size of collector working area

集磁器型号	对应使用的连接管型号	对应绞线截面积/ mm^2	工作区半径 R/mm	工作区长度 L/mm
jc70	GT-70	70	8.5	27
jc150	GT-150	150	12.0	34
jc300	GT-300	300	16.0	42

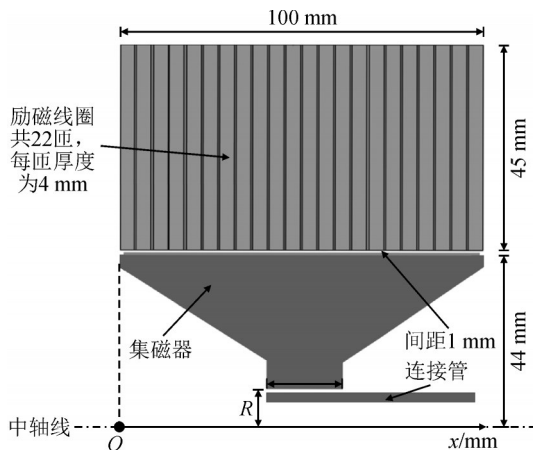


图3 成形线圈尺寸结构图

Fig. 3 Dimensional structure of forming coil

2.2 碰撞速度测量

在高能率压接和焊接领域,碰撞速度是影响连接效果最直接的因素^[11]。

如果碰撞速度足够大,连接管内壁和与绞线外表面之间将有可能实现固相焊接。在高速变形和碰撞下,他们表面的氧化膜破碎,并被变形所产生的气流吹离连接区域,从而使连接达到原子键合的程度,极大提升了压接紧密度。

同时,电缆绞线的表面存在绞痕,碰撞速度较低时,连接管与绞线的最外层碰撞后就停止了形变,绞痕内会存在较大的空隙。如果铜管在与线芯碰撞时仍能保持较高的变形速度,那么铜管就会变形填入绞痕内,增大管内壁和线芯外表面的接触面积,提升压接的紧密性。

由于接触电阻主要受收缩电阻(由通流的接触面积决定)和表面膜电阻(由金属表面氧化膜和污染层状态决定)的影响,由上文知,这两种电阻都会因碰撞速度的提升而减小。

因此,提升碰撞速度可以明显改善压接的紧密性和接头的接触电阻,对碰撞速度的研究具有重要的实际意义。

文中使用HS4-M-2高速摄像机(IDT)分别对型号为GT-70、GT-150、GT-300的连接管在不同电流条件下的自由变形过程进行拍摄分析,每两张照片的拍摄间隔为 $13.6 \mu\text{s}$,一组变形照片示例见图4。根据照片中管件未变形时的壁厚与内径,可按照比例测量计算得到变形后管件的內径尺寸,取原內径与变形后內径的差值为內径形变量。本实验中所使用的铜连接管尺寸参数见表2。

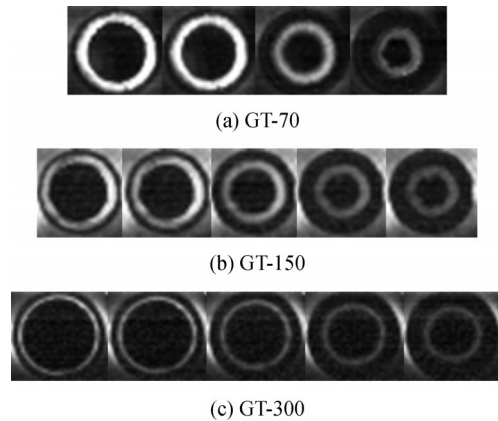


图4 高速相片示例

Fig. 4 High speed photo example

表2 连接管尺寸

Table 2 Connecting pipe size

型号	外径/mm	內径/mm	壁厚/mm	长度/mm
GT-70	16	12	2.0	78
GT-150	22	17	2.5	94
GT-300	31	24	3.5	120

取连接管内径缩小到线芯标称直径时为发生碰撞的时间点,按式(3)计算管件与线芯之间的碰撞速度

$$v = \frac{1}{2} \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式(3)中: v 为碰撞速度, m/s ; d_1 、 d_2 分别为发生碰撞的时间点前后所测量到的管件內径, m ; t_1 、 t_2 分别为发生碰撞的时间点前后的拍摄时间点, s 。

2.3 磁场测量

成形线圈系统在其工作区内产生磁场是衡量其性能的重要因素,因此,文中通过实验测量了使用3种集磁器时工作区内的磁场分布,并与仿真结果进行了对比。文中采用磁光效应法来测量磁场^[12-18]。

磁场测量实验所用到的设备包括一台LCX-561S-300-CSB-PPF激光器(OXXIUS)、2个DET36A2光电转换器(THORLABS)及示波器、一块TGG磁光晶体、一块用作起偏器的偏振镜、一块偏振分束镜以及复数用于光路调整的反射镜,见图5。所使用的TGG晶体长度为 5 mm ,费尔德常数为 190 rad/Tm 。采用

一块偏振分束镜作为检偏器, 可以将偏振光在两个互相垂直方向上光强分量分解出来分别测量, 这有助于提高测量的准确度, 减少环境因素造成的误差^[19]。

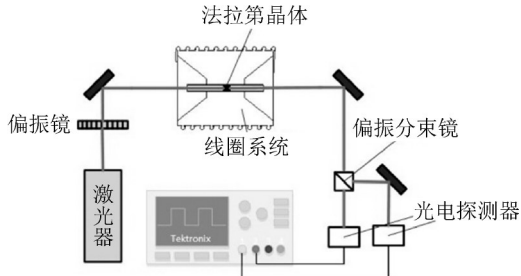


图5 磁场测量装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of magnetic field measuring device

2.4 直流电阻测量

使用QJ36S直流低电阻测试仪(上海双特)对接接头的电阻进行测量。

3 结果与讨论

3.1 放电电流

充电 10 kV 时, 在不使用集磁器以及分别使用 jc70、jc150、jc300 集磁器情况下测得的放电电流波形见图 6。使用 3 种集磁器时电流波形的峰值 I_0 分别为 42.8、40.8、38.0 kA, 振荡频率 f 分别为 6.41、5.95、5.52 kHz。

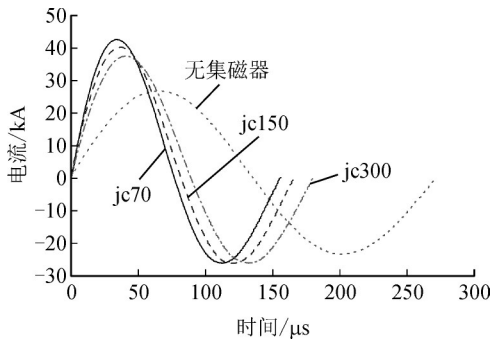


图6 不同集磁器使用情况下的放电电流

Fig. 6 Discharge current of different magnetic collectors

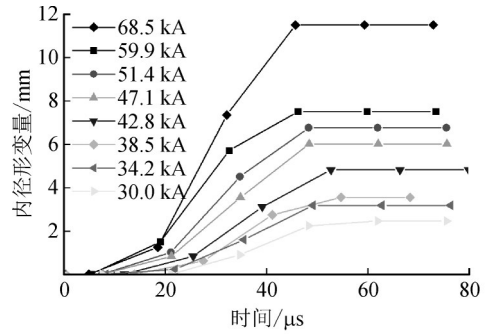
根据式(1)可知, 在其他参数不变时, 电感 L 越大, 电流峰值和振荡频率越小, 故使用集磁器会明显减小成形线圈整体的电感; 而使用这 3 种集磁器时, 成形线圈系统的整体电感关系应为 $300 \text{ mm}^2 > 150 \text{ mm}^2 > 70 \text{ mm}^2$ 。同时, I_0 与充电电压 U_{c0} 成正比关系。

3.2 碰撞速度

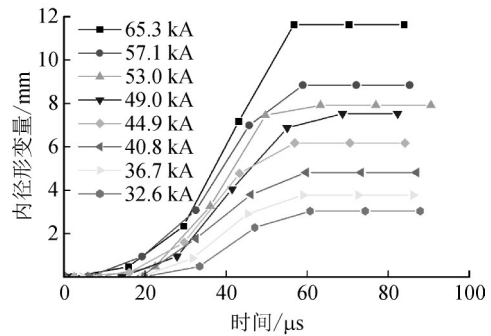
3.2.1 碰撞速度和碰撞时间与峰值电流的关系

连接管内径形变曲线见图 7, 由图 7 可知, 对同一种型号的连接管来说, I_0 越大, 管件的最终形变量越大, 而在压接过程中, 管件的最终形变量还取决

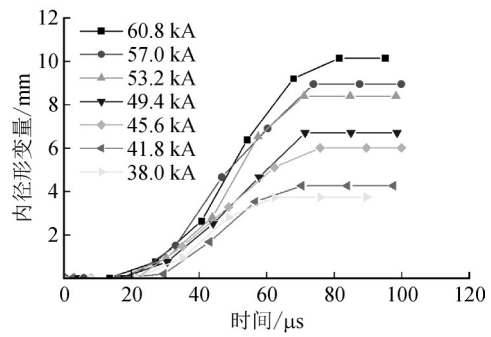
于线芯的尺寸。由 GB/T 3956—2008 可知, 截面积为 $70、150、300 \text{ mm}^2$ 的非紧压绞合圆形铜导体的标称直径分别为 9.75、14.35、20.65 mm。由图 7 可知, 对于 GT-70、GT-150、GT-300 的连接管来说, 在 I_0 分别为 30.0、32.6、38.0 kA 时, 自由变形后的管件内径均已略小于线芯的标称直径, 但在该条件下的碰撞速度都较小, 压接效果较差。为了保证压接可靠性, 需要获得更高的碰撞速度。



(a) 70 mm²



(b) 150 mm²



(c) 300 mm²

图7 连接管内径形变曲线

Fig. 7 Deformation curve of inner diameter of connecting pipe

计算得到 3 种规格的连接管所能达到的碰撞速度和碰撞时间与峰值电流 I_0 的关系见图 8, 其中碰撞时间为触发放电到发生碰撞之间的时间。从图 8 可以看出, 电流越大, 碰撞速度越大, 碰撞时间越短, 且碰撞时间都小于放电电流振荡周期的四分之一。在充电电压为 16 kV 时, GT-70、GT-150、GT-300 铜连接管的碰撞速度分别最大可达到 222、177、147 m/s。

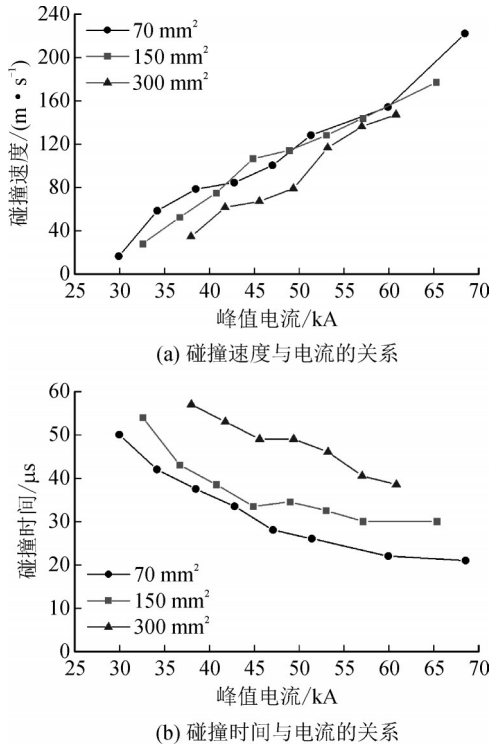


图8 碰撞速度关系曲线

Fig. 8 Collision velocity relation curve

3.2.2 焊接下限速度

在电磁成形焊接、爆炸焊接等固相焊接领域，通常对碰撞速度选择具有以下要求^[20]：

1)焊接时需要产生射流，从而使焊接界面产生自清理功能，将杂质和金属氧化膜的碎片吹出。能满足该条件的最小速度称作焊接下限速度。

2)能够获得类似于正弦波形(波长50~400 μm左右，波高10~200 μm左右)的结合界面或焊接强度足够高的平直结合界面。

3)不能使结合界面出现过熔现象，如果焊接能量过大，焊接界面热量过高，焊接力卸载后界面仍处于热软化状态，反射的卸载拉伸波将会拉开焊接界面，造成焊接失效。焊接能量直接受到碰撞速度的影响，因此也存在一个对最大焊接速度的限制，称作焊接上限速度。

对于焊接上限和下限速度，可以套用爆炸焊接窗口理论来进行计算。而焊接上限速度则通常在每秒数千米这一量级，故实际应用中往往对焊接下限速度更为关注。DERIBAS等提出了焊接下限速度的计算式^[21]

v_{p,min} = K \sqrt{\frac{H_v}{\rho}} (4)

式(4)中：K为与材料表面状况有关的常数，取0.6~1.2，对于表面处理完好的管件来说，K可取0.6；

H_v为管件材料的硬度，MPa；ρ是管件材料的密度，kg/m³。

根据式(4)，取K=0.6、H_v=350 MPa和ρ=8.96×10³ kg/m³，可以算出铜管的焊接下限速度为118.6 m/s。实验中，GT-70、GT-150、GT-300的铜连接管，分别在I_0为49.1、50.8、54.9 kA时能达到这一速度。

3.3 磁场分布

3.3.1 使用3种集磁器时的磁场分布规律

只改变放电电流幅值，测量了使用jc70集磁器时工作区中心点的磁感应强度，得到结果见图9。磁感应强度与电流峰值呈正比关系。

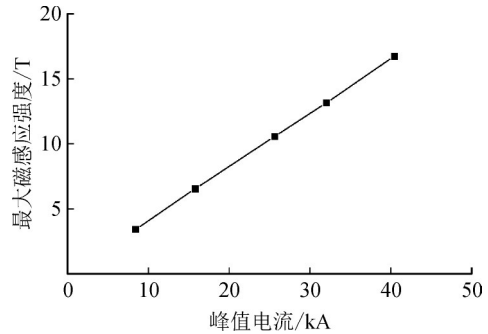


图9 峰值电流与磁感应强度关系曲线

Fig. 9 Curve of peak current and magnetic induction intensity

在充电电压为17 kV时，对不使用集磁器和使用jc70、jc150、jc300集磁器的情况下，成形线圈轴线上的磁感应强度分布进行了测量，见图10。

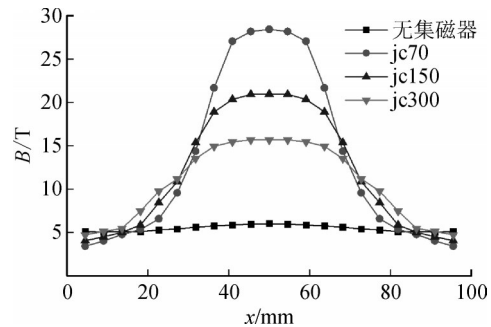


图10 充电17 kV时可测得的峰值磁场分布

Fig. 10 The strongest magnetic field that can be measured when charging 17 kV

从图10可以看出，不使用集磁器时，磁感应强度变化曲线在线圈中心位置达到峰值，并向两侧逐渐减小；使用集磁器时，磁感应强度曲线在工作区范围内存在一段变化较小的平顶区，工作区中心位置的磁感应强度与边缘位置的差值普遍在4%以内。采用jc70、jc150、jc300集磁器可获得的最大磁感应强度分别为28.4、20.9、15.7 T。使用jc70、jc150、jc300集磁器时工作区轴线上的磁感应强度分别是不使用集磁器时的473%、349%、261%。

将磁场测量结果与使用 Ansoft Maxwell 仿真^[22-29]得到的磁场进行对比,磁场的分布规律相似,且4种情况下的最大磁感应强度测量值比仿真值分别小4.5%、4.1%、4.3%、2.3%。

对3种集磁器工作区内不同径向位置的磁场也进行了测量对比,发现其与轴线上对应位置的磁感应强度相比,差值普遍在4%以内,整个工作区内的磁场较为均匀。

3.3.2 碰撞速度与工作区磁场的关系

结合图8的碰撞速度曲线,测量了各个速度点在相同储能、无待加工管件条件下对应的工作区中心磁感应强度,结果见图11。

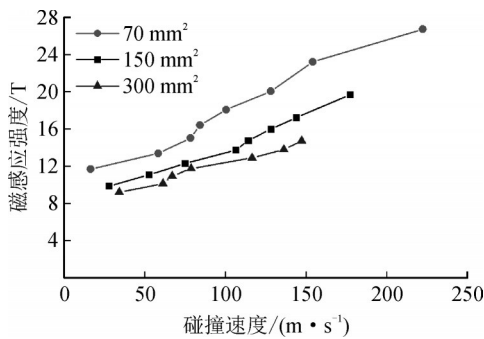


图11 碰撞速度与磁场关系曲线图

Fig. 11 The relationship between collision velocity and magnetic field

若要让管件碰撞速度达到焊接下限速度118.6 m/s,则在使用jc70、jc150、jc300集磁器进行无管件放电时,工作区内的最大磁感应强度分别应达到18.72、15.41、13.36 T。

3.3.3 漏磁场能量

理想状态下,在集磁器工作区插入长度和壁厚都足够大的管状试件进行放电时,管件内部的磁场应为零。实际应用中,受导体连接管长度、壁厚以及摆放位置等因素的影响,管件内部磁场不会为零,而这部分磁场对管件的成形不起作用,会降低整个设备的成形效率,因此称之为漏磁。对漏磁进行计算和测量具有实际意义。

通过实验测量了充电电压为3.5 kV时,3种集磁器在插入管件情况下的轴线磁感应强度分布,并与插入管件时的仿真结果和不插入管件时的测量结果进行了比较,结果见图12,该实验条件下,管件都未发生变形。

为便于衡量漏磁对线圈系统成形效率的影响,需要计算工作区内管件内部漏磁的磁场能量,并与不加管件时相同区域的磁场能量进行对比。磁场能量密度 ω_m 和磁场能量 W_m 的公式为:

$$\omega_m = \frac{B^2}{2\mu} \quad (5)$$

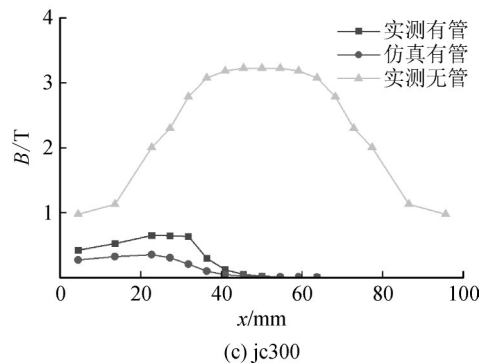
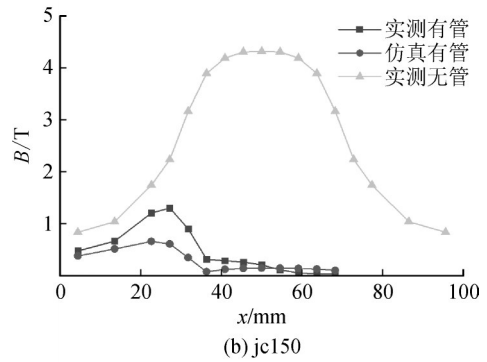
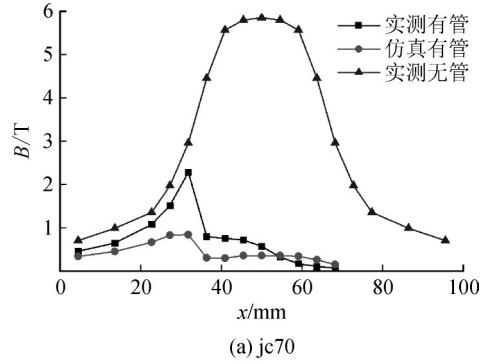


图12 漏磁场分布

Fig. 12 Leakage field distribution

$$W_m = \int_V \omega_m dV \quad (6)$$

式(5)、(6)中: ω_m 是磁场能量密度, J/m^3 ; W_m 是磁场能量, J ; μ 为磁导率, H/m ; V 是体积, m^3 。

磁场能量的计算结果见表3,从表3可以看出,对这3种集磁器来说,漏磁对成形效率的影响在1%以下。同时,漏磁对jc150和jc300集磁器的影响要明显小于jc70集磁器,这是因为GT-150和GT-300铜管的壁厚远大于GT-70铜管,而当铜管的壁厚小于实际趋肤深度,管中能产生的感应涡流总值与壁厚足够大时相比就会减小,增大了磁场能量的损失^[30]。

3.4 接头电阻

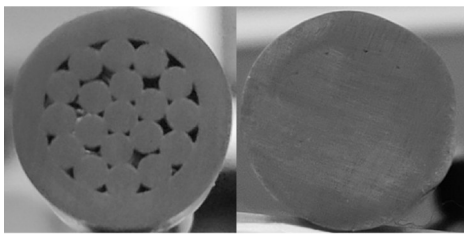
I_0 为30.0、51.4 kA时,对GT-70铜管与截面积为70 mm²的铜绞线进行压接,得到的横截面图见图13。从图13可以看出, $I_0=30.0$ kA时,铜管与绞线之间初步达到压接状态,但是铜管内壁与绞线外壁还未完全贴合,连接界面存在由绞线表面的绞痕导致的大

表3 使用3种集磁器时的漏磁能量对比

Table 3 Comparison of magnetic flux leakage energy of three kinds of magnetic collectors

集磁器型号	总磁能/J	漏磁磁能/J		比例/%	
		实测	仿真	实测	仿真
jc70	37.44	0.37	0.14	0.99	0.37
jc150	51.42	0.19	0.05	0.36	0.11
jc300	71.01	0.26	0.05	0.37	0.07

空隙,该条件下对应的碰撞速度为16.3 m/s;而 $I_0=51.4$ kA时,连接界面上的空隙已无法用肉眼辨别,铜管内壁已经完全将绞痕填满,该条件下对应的连接管壁变形速度为130 m/s。



(a) $I_0=30.0$ kA (b) $I_0=51.4$ kA

图13 接头截面形貌对比

Fig. 13 Comparison of joint section morphology

根据GB/T 14315—2008中的要求,电缆接头的直流电阻应不大于等长线芯电阻的1.2倍;而由GB/T 3956—2008可知,截面积为 70 mm^2 的圆形绞合导体的标称电阻为 $0.268\ \Omega/\text{km}$ 。据此,可算得GT-70电缆接头的电阻应小于 $25.73\ \mu\Omega$ 。

分别测量了 I_0 为30.0~51.4 kA时得到的GT-70电缆接头电阻,得到其与碰撞速度的关系曲线见图14。从图14可以看出,接头电阻随着碰撞速度的提升而减小,碰撞速度大于60 m/s时,接头电阻在国标要求范围内;而碰撞速度130 m/s时,接头电阻可达到 $13.6\ \mu\Omega$ 。

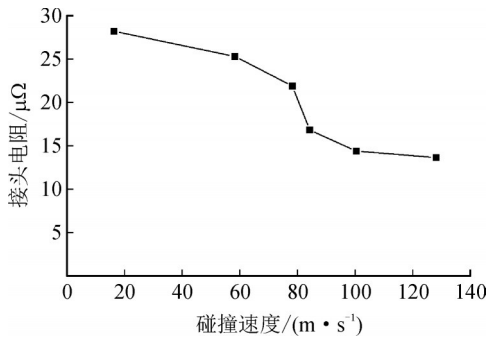


图14 接头电阻与碰撞速度关系曲线

Fig. 14 Relation curve between joint resistance and impact velocity

3.5 集磁器的变形与破坏

在电磁脉冲成形应用中,成形线圈易受到电磁

力的破坏,而使用集磁器可以降低线圈的损坏率,但是集磁器自身也有可能变形或者破坏,因此,研究集磁器的受力变形情况具有实际意义。

文中对一块在实验中发生变形的集磁器进行了研究,其变形后见图15。该集磁器的切缝宽度原为1 mm,对变形后的切缝进行测量,得到切缝宽度见图16(a)。同时,采用Ansoft Maxwell对集磁器的受力进行了仿真分析,得到集磁器切缝处的受力分布结果见图16(b)。

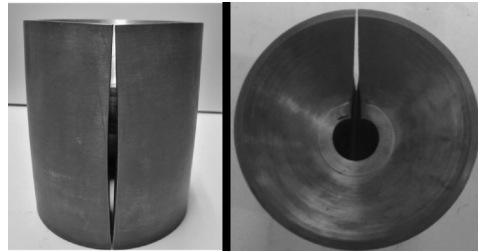
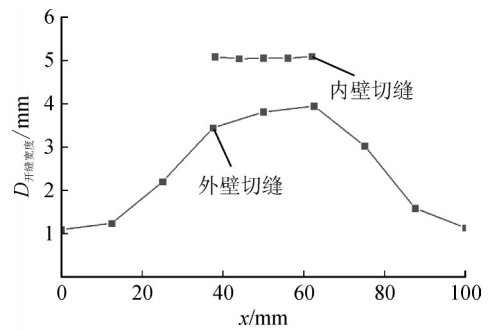
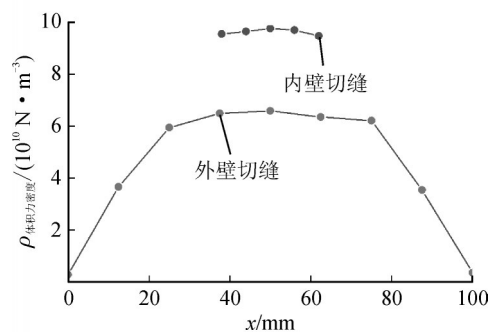


图15 变形破坏的集磁器

Fig. 15 Magnetic concentrator with deformation failure



(a) 集磁器切缝处形变测量



(b) 集磁器切缝处受力仿真

图16 集磁器切缝处形变与受力仿真

Fig. 16 Simulation of deformation and stress at the slit of magnetic concentrator

仿真结果表明,集磁器切缝内层受力较均匀,而外层受力由中心区域向两侧递减,且切缝外层的受力要远小于内层受力,这一规律与测量所得集磁器形变量分布一致。

4 结论

文中主要对国标GT-70、GT-150、GT-300三种

铜连接管进行 EMPF 压接的工艺参数进行了研究, 获得的工艺参数对照表见表 4, 并得到如下结论。

表 4 工艺参数总结

Table 4 Summary of process parameters

集磁器型号	f/kHz	I_0/kA	B/T	$v/(m \cdot s^{-1})$
70 mm ²	6.41	30.0	11.69	16.30
		34.2	13.36	58.20
		38.5	15.03	78.20
		42.8	16.40	84.20
		47.1	18.07	100.30
		51.4	20.04	128.00
		59.9	23.18	154.00
		68.5	26.72	222.00
150 mm ²	5.95	32.6	9.84	27.80
		36.7	11.07	52.40
		40.8	12.30	74.80
		44.9	13.73	106.30
		49.0	14.76	114.00
		53.0	15.99	128.00
		57.1	17.22	143.75
		65.3	19.68	177.00
300 mm ²	5.52	38.0	9.20	34.20
		41.8	10.12	61.20
		45.6	10.94	66.90
		49.4	11.76	78.70
		53.2	12.88	116.30
		57.0	13.80	136.00
		60.8	14.72	147.00

1) 使用集磁器可以大幅增强工作区内的磁场。在集磁器的整个工作区内, 磁感应强度都较均匀, 与磁感应强度最强的中心点相比, 轴线和径向的磁感应强度变化量普遍都在 4% 以下。

2) 加工时, 管件中的漏磁对成形效率的影响较小, 普遍在 1% 以下, 管件壁厚越大, 漏磁影响越小。

3) 铜连接管与铜电缆绞线的焊接下限速度是 118.6 m/s。理论上当管壁与线芯外表面的碰撞速度大于这一速度时, 可以获得固相焊接的连接界面。对于 GT-70、GT-150、GT-300 的铜连接管, 在峰值电流为 49.1、50.8、54.9 kA 时分别能达到这一速度。

4) 提升碰撞速度可以明显改善压接的紧密性和接头的接触电阻。碰撞速度达 130 m/s 时, 接头横截面的连接界面上已无肉眼可辨别的空隙, 铜管内壁完全将空隙填满。

5) 使用 jc70、jc150、jc300 集磁器进行无管件放电, 若工作区中心磁感应强度分别能达到 18.72、15.41、13.36 T, 则同等储能条件下对相应型号管件

进行压接时, 碰撞速度可达到焊接下限速度 118.6 m/s。设计成形线圈系统时, 可以此为参考衡量其性能。

6) 集磁器工作区所受的电磁力最强, 最易发生变形破坏。

实际上, 文中结论不只适用于铜导体连接管的 EMPF 压接, 同时也可应用于其他尺寸和材料相似的金属管件加工。

参考文献:

- [1] 熊 奇, 唐红涛, 王沐雪, 等. 2011 年以来电磁成形研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1171-1181.
XIONG Qi, TANG Hongtao, WANG Muxue, et al. Research progress of electromagnetic forming technique since 2011 [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1171-1181.
- [2] 熊 奇, 周丽君, 杨 猛, 等. 单脉冲电磁成形中洛伦兹力在时间上的双向竞争关系及其对成形效果的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3453-3463.
XIONG Qi, ZHOU Lijun, YANG Meng, et al. The two-way competitive relationship of Lorentz force in time in single pulse electromagnetic forming and its influence on forming effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3453-3463.
- [3] 邱 立, 何晨骏, 张 望. 双管件电磁约束成形的电磁分布与均匀性变形研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 128-135.
QIU Li, HE Chenjun, ZHANG Wang. Study on electromagnetic force distribution and axial uniform deformation of dual-tube electromagnetic constraint forming[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 128-135.
- [4] 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(4): 57-66.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] RUETER D, MORGENSTERN T. Ultrasound generation with high power and coil only EMAT concepts[J]. Ultrasonics, 2014, 54(8): 2141-2150.
- [9] KHAN M R, HOSSAIN M M, SHARMA A, et al. Predicting the effect of field shaper in electromagnetic welding using FEM[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(2): 1129-1136.
- [10] BAHMANI M A, NIAYESH K, KARIMI A. 3D simulation of magnetic field distribution in electromagnetic forming systems with field-shaper[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2295-2301.
- [11] 王伟策, 高勇军, 王耀华, 等. 铜钢爆炸焊接动态参数的研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 17-19.
WANG Weice, GAO Yongjun, WANG Yaohua, et al. Study on dynamic parameters of explosive welding of copper and steel[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 17-19.
- [12] 李振华, 李秋惠, 李春燕, 等. 脉冲强磁场测量技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 68-76.
LI Zhenhua, LI Qiuhui, LI Chunyan, et al. Measurement techniques of strong pulsed magnetic field: A review[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 68-76.
- [13] 徐紫薇, 李晓明, 杨林, 等. 基于S-LCL补偿的磁场感应式电能传输系统研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 39-46.
XU Ziwei, LI Xiaoming, YANG Lin, et al. Research on electromagnetic inductive power transmission system based on S-LCL compensation network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 39-46.
- [14] 郭亮, 杜欢, 王晓卫, 等. 基于磁场检测与多判据融合的架空线路接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 24-34.
GUO Liang, DU Huan, WANG Xiaowei, et al. Single phase to ground fault location method of an overhead line based on magnetic field detection and multi-criteria fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 24-34.
- [15] 马焯, 孙刚. 牵引变压器漏磁场计算与油箱磁屏蔽优化方案研[J]. 变压器, 2021, 58(3): 26-31.
MA Ye, SUN Gang. Calculation of leakage magnetic field in traction transformer and research on optimal scheme of magnetic shield in oil tank[J]. Transformer, 2021, 58(3): 26-31.
- [16] 王振芹, 丁兆帅, 王娜. 基于磁场—流场—温度场耦合的GIS母线热分析[J]. 浙江电力, 2021, 40(1): 44-49.
WANG Zhenqin, DING Zhaoshuai, WANG Na. Thermal analysis of GIS busbar based on coupled magnetic-fluid-temperature fields[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(1): 44-49.
- [17] 韩小涛, 张绍哲, 魏文琦, 等. 平顶脉冲强磁场技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 5021-5034.
HAN Xiaotao, ZHANG Shaozhe, WEI Wenqi, et al. Flat-top pulsed high magnetic field technology and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 5021-5034.
- [18] 徐肖伟, 钱国超, 邹德旭, 等. 不同模型下变压器绕组漏磁场及短路力的比对研究[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 85-89.
XU Xiaowei, QIAN Guochao, ZOU Dexu, et al. Comparison research on leakage magnetic field and short-circuit force of transformer windings under different models[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 85-89.
- [19] LEWIS, MATTHEW S. Megagauss 2.0: A 10 capacitor system for production of megagauss fields for laser plasma experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(10): 5749-5756.
- [20] 邵丙璜. 爆炸焊接原理及其工程应用[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987.
SHAO Binghuang. The principle of explosive welding and its engineering application[M]. Dalian: Dalian Institute of Technology Press, 1987.
- [21] 许祖熙, 段卫东, 金沐, 等. 爆炸焊接复合管工艺及参数研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(4): 67-71.
XU Zuxi, DUAN Weidong, JIN Mu, et al. Explosive welding technology and parameters of composite tube[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(4): 67-71.
- [22] 赵志刚, 史文军, 刘慧敏, 等. 局部简化建模法三维有限元仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 182-187.
ZHAO Zhigang, SHI Wenjun, LIU Huimin, et al. 3D finite element simulation and experimental verification based on local simplified modeling method[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 182-187.
- [23] 王世山, 王德林, 李彦明. 大型有限元软件Ansys在电磁领域的使用[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 27-30.
WANG Shishan, WANG Delin, LI Yanming. The application of Ansys in electromagnetic field[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 27-30.
- [24] 吕安强, 李静, 张振鹏, 等. 夹具对高压绝缘电缆热学特性影响的有限元分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 283-290.
LYU Anqiang, LI Jing, ZHANG Zhenpeng, et al. Finite element analysis for the influence of clamp on the thermal characteristics of high voltage insulated power cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 283-290.
- [25] 王仁, 李林达, 李正绪, 等. 换流变压器内部短路电流有限元仿真及能量评估[J]. 变压器, 2022, 59(10): 26-31.
WANG Ren, LI Linda, LI Zhengxu, et al. Converter

- transformer internal short circuit current simulation based on FEM and energy evaluation[J]. *Transformer*, 2022, 59(10):26-31.
- [26] 孙永军, 陈科技, 陈赛慧, 等. 基于有限元法的低频输电电缆温度场分析[J]. *浙江电力*, 2021, 40(10):60-65.
SUN Yongjun, CHEN Keji, CHEN Saihui, et al. Temperature field analysis of low-frequency ac transmission cable based on finite element method[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(10):60-65.
- [27] 张 旭, 翟登辉, 张彦龙, 等. 基于有限元仿真的配电网主设备极端条件下寿命评估方法研究[J]. *供用电*, 2020, 38(1):80-85.
ZHANG Xu, ZHAI Denghui, ZHANG Yanlong, et al. Research on life evaluation method of main equipment of distribution network under extreme conditions based on finite element simulation[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 38(1):80-85.
- [28] 魏建华, 赵文彬, 李 敏, 等. 基于有限元的低风压导线发热分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(19):56-64.
WEI Jianhua, ZHAO Wenbin, LI Min, et al. Heating analysis of a low-wind-pressure conductor based on finite elements[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19):56-64.
- [29] 张海军, 张 华, 马 强, 等. 基于有限元的电力变压器绕组弹塑性变形分析[J]. *高压电器*, 2019, 55(6):170-176.
ZHANG Haijun, ZHANG Hua, MA Qiang, et al. Analysis on elastic and plastic deformations of power transformer winding based on finite element method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(6):170-176.
- [30] 何文治. 管件电磁缩径成形仿真分析及工艺参数设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
HE Wenzhi. Simulation analysis and process parameter design of electromagnetic tube necking[D]. Wuhan: Huazhong University of science and technology, 2011.
- 李晨辉(1990—), 男, 工程师, 研究方向为配电工程领域(E-mail:siouxie1984@163.com)。
- 王 骁(1978—), 男, 工程师, 研究方向为配电工程领域(通信作者)(E-mail:yahawang@sina.com)。