

研究与设计

# 不同直流弧焊电源输出电缆周围 低频磁场的研究

张 军<sup>1</sup>,王世莹<sup>1</sup>,宋永伦<sup>1</sup>,陈 凯<sup>2</sup>,刘 忠<sup>2</sup>,支 楠<sup>2</sup>

(1.北京工业大学,北京 100022;2.成都电气检测所,四川 成都 610052)

**摘要:**焊接过程低频磁场主要分布在焊接电源和焊接电缆周围,一般焊接电缆周围的磁场强度比焊接电源周围强,对作业人员的辐射影响更大。在此分析了两类典型直流焊接电源的输出电缆周围磁场的产生机理,通过试验分析了电缆周围磁场的特性。研究发现,焊接电缆周围的磁场频率决定于焊接电源的电路拓扑,不同焊接电源在电缆周围的磁场差异较大;在输出电流值相同时,不同焊机的输出电缆周围磁场对人体影响程度不同。

**关键词:**直流弧焊电源;焊接电缆;低频磁场

**中图分类号:** TG434.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-2303(2009)03-0080-03

## Investigation on the low-frequency magnetic field around the output cables from the different D.C. arc welding power source

ZHANG Jun<sup>1</sup>, WANG Shi-ying<sup>1</sup>, SONG Yong-lun<sup>1</sup>, CHEN Kai<sup>2</sup>, LIU Zhong<sup>2</sup>, ZHI Nan<sup>2</sup>

(1.Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2.Chengdu Electrical Appliance Inspection Institute, Chengdu 610052, China)

**Abstract:** The low-frequency magnetic field generated by the process of welding is mainly distributed around the power source and the cables. Generally speaking, the magnetic field strength around the cables is stronger, so the effect of radiation to workers is more severe. In this paper, the mechanisms and properties of magnetic field around the output cables from two typical D.C. welding power sources are analyzed by experiment. It is found that the frequency of magnetic field around cables is determined by the topologies of welding power source. Moreover, there exists an obvious difference among the magnetic fields around the cables generated by different welding power source. The effect to human body is also varying when the value of current is equal.

**Key words:** D.C. welding power source; welding cables; low-frequency magnetic field

## 0 前言

目前,低频磁场对人体的影响的研究日益受到重视。工业发达国家如德国、英国、美国、澳大利亚等均针对焊接环境低频电磁场制定了相关的标准或准则<sup>[1-5]</sup>。我国针对焊接低频电磁场对设备及作业人员影响的相关标准正在积极制定中,预计在2008年底出台。

经研究,焊接环境电场强度较弱,数值在几到几十 V/m 量级,比国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)的参考限值小几个数量级,所以一般不作为研究对象。焊接磁场主要分布在焊接电源和焊接电缆周围,尤其以焊接电缆周围的磁场分布对人体影响最为直接,而不同的焊接电源和焊接工艺在焊接电缆周围的磁场存在较大差异。在此以直流焊接电源焊接电缆周围的磁场作为研究对象,阐述了低频磁场产生的机理,并通过测量总结了不同类型直流焊接电源输出电缆周围磁场分布的特征。

收稿日期:2008-11-05

作者简介:张 军(1975—),男,山东单县人,副教授,主要从事焊接过程控制自动化方面的研究工作。

### 1 焊接电缆周围低频磁场产生机理

研究电缆周围的低频磁场,焊接电缆可看作长直导线。在测试时,将焊接电源的两根电缆分开一定距离,此时,每一根电缆可看做一条长直导线,其周围的磁场分布符合安培定律<sup>[6]</sup>。将电缆上某点定义为三维空间的原点  $O(0,0,0)$ ,  $z$  轴方向为电流方向,则在垂直于电流方向的平面内一点  $D(x,y)$  的磁场强度

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{-I}{2\pi} \frac{y}{(x^2+y^2)} \\ H_y &= \frac{I}{2\pi} \frac{x}{(x^2+y^2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $H_x$  为  $x$  方向的磁场强度;  $H_y$  为  $y$  方向的磁场强度;  $z$  轴的磁场强度为 0。所以在该点的磁感应强度为

$$B = \mu H = \mu \sqrt{H_x^2 + H_y^2} = \frac{\mu I}{2\pi r}, \quad (2)$$

式中  $\mu$  为空气的磁导率,计算时用真空磁导率  $\mu_0$  来替代空气磁导率  $\mu$ ;  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  为  $D(x,y)$  至电缆的垂直距离。

从式(2)可见,焊接电缆周围的低频磁场决定于电缆内电流的纹波大小。

### 2 不同类型焊机的输出电流及其产生的低频磁场特点

晶闸管整流焊机和 IGBT 逆变焊机是目前弧焊中应用最广泛的直流焊机。对于晶闸管整流焊机,其输出波形为脉动直流,脉动频率决定于焊机的电路拓扑结构,一般为 150 Hz 或者 300 Hz,如图 1a 所示。图 1a 为三相全桥整流电源的在无感电阻负载时的输出电流波形,输出电流平均值是 100 A,脉动波的频率为 300 Hz。IGBT 逆变焊机的输出电流是直流叠加纹波,不同的焊机其纹波系数不同,纹波频率和 IGBT 的开关频率相关。图 1b 是 IGBT 逆变焊机在无感电阻负载时的输出电流波形,焊接电流 100 A,纹波频率为 42 kHz。

可见不同的直流焊接电源,其输出电流的波形存在较大差异,这势必会造成周围磁场的不同。

### 3 低频磁场对人体影响的评估

当电磁辐射为多个频率叠加时,不同频率电场、磁场对人体的作用具有累加效应。对于低频电磁暴露的安全评估,在低于 10 MHz 的频率下,ICNIRP 规定应符合如下两个评估条件<sup>[7]</sup>

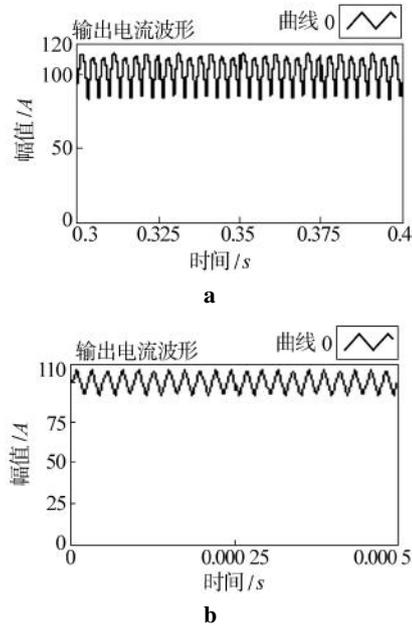


图 1 电阻负载时晶闸管整流和 IGBT 逆变焊机的输出电流波形

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{B_j}{B_{L,j}} + \sum_{j>65\text{kHz}} \frac{B_j}{b} \leq 1, \quad (4)$$

式中  $E_i$  频率  $i$  下的电场强度;  $E_{L,i}$  频率为  $i$  时规定的电场强度参考限值;  $B_j$  为测试点频率为  $j$  时的磁感应强度;  $B_{L,j}$  为频率为  $j$  时规定的磁感应强度参考限值;  $a$  为  $610 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $b$  为  $30.7 \text{ uT}$ 。

据文献[8]100 kHz 以下的电磁场对人体的作用主要是感应,超过 100 kHz 的电磁场对人体的影响主要是热效应,所以研究低频磁场应将频带限制在 100 kHz 以下。因此,在不考虑高于 100 kHz 的磁场分量时,可用式(5)判断是否超过安全限值。若所测磁场的磁感应强度满足式(5)则磁场的强度一定超出了安全限值。

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{B_j}{B_{L,j}} + \sum_{j>65\text{kHz}} \frac{B_j}{b} > 1, \quad (5)$$

### 4 测量

测量设备采用德国 NARDA 公司的 ELT-400 电磁场测试仪,测量频段 30 Hz~400 kHz,测量场量范围可至 50 mT。此设备可根据式 5 直接给出磁场中某点的磁感应强度是否超出 ICNIRP 安全限值。测试的焊接电源为国产  $\text{CO}_2$  焊机,一台为晶闸管整流焊机,额定输出为 600 A,一台为 IGBT 逆变焊

表 1 IGBT 逆变焊机在 100 A 电流输出时电缆周围磁场数据

线缆距离 /cm	各频率下的磁感应强度幅值/ $\mu\text{T}$			$\sum \frac{B_n}{R_n}$
	21 kHz	42 kHz	84 kHz	
50	2	4	1	0.23
20	3	6	2	0.36
10	2	12	1	0.46
ICNIRP 标准参考值	30.7	30.7	30.7	—

注:  $\sum \frac{B_n}{R_n}$  为各频率下测量值和参考限值比值的累加和。

表 2 晶闸管整流焊机在 100 A 电流输出时电缆周围的磁场数据

线缆距离 /cm	各频率下的磁感应强度幅值/ $\mu\text{T}$			$\sum \frac{B_n}{R_n}$
	300 Hz	400 Hz	600 Hz	
50	25	1	6	0.48
20	40	1	10	0.76
10	61	2	16	1.19
ICNIRP 标准参考值	83.3	62.5	41.7	—

注:  $\sum \frac{B_n}{R_n}$  为各频率下测量值和参考限值比值的累加和。

机,额定输出 400 A。采用无感电阻负载。测试过程中,将一根电缆用木支架支撑,电缆和地面平行,另一根电缆远离此待测电缆。测量结果如表 1 和表 2 所示。

试验发现,逆变焊机电缆周围的磁场频谱主要分布在 21 kHz(IGBT 的开关频率),42 kHz 和 84 kHz 处,其他频率的幅值较小,可见低频磁场的频域分布和电源的开关频率有关;此逆变焊接电源的纹波较小,综合评估值较小,没有超出表 ICNIRP 的参考限值。可控硅整流焊机输出电缆周围的磁场在 300 Hz 和 600 Hz 处的值较大,300 Hz 的分量是由于电源全桥整流,导致输出电流存在 300 Hz 的纹波,而纹波不可避免带有谐波,所以在 600 Hz 处有较大幅值是由于 300 Hz 的脉动波的谐波带来的,可见晶闸管焊接电缆周围的低频磁场的频域分布和整流电路的拓扑直接相关。由图 1 可见,晶闸管焊机的输出电流纹波要比 IGBT 焊机大,对比表 1 和表 2,可见晶闸管的输出电缆周围的磁场强度也比 IGBT 焊机大,所以焊接电缆周围低频磁场的幅值决定于焊接电缆内直流电流的脉动分量的幅值。

## 5 结论

同样的输出电流值,不同类型焊机电缆周围的

磁场在频率和幅值上有较大差异;低频磁场的频域分布决定于电源的开关频率,幅值决定于电缆内电流的纹波。焊接作业人员的遭受的电磁暴露问题,不仅和焊接工艺有关而且还和电源类型有关,所以在保证焊接工艺的前提下,采用“环保型”焊接电源是解决电磁暴露问题的一个重要途径。

## 参考文献:

- [1] BS\_EN50444-2008, Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic fields from equipment for arc welding and allied processes, 2008.
- [2] BS\_EN50445-2008, Product family standard to demonstrate compliance of equipment for resistance welding, arc welding and allied processes with the basic restrictions related to human exposure to electromagnetic fields(0 Hz~ 300 GHz), 2008.
- [3] GERMAN PROFESSIONAL ASSOCIATION OF PRECISION MECHANICS AND ELECTRICAL ENGINEERING (BGFE). BGV B11(VBG 25) Regulations for the prevention of industrial accidents "Electromagnetic Fields" [J].Cologne (Germany), June 2001.
- [4] IEEE Std C95.6(tm)-2002 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0~3 kHz.
- [5] Directive 2004/140/EC of the European Parliament and of the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields), 29 April 2004, Official Journal of the European Union, L 184/1
- [6] IEC62226-2-1 2004 Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range-Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body.
- [7] ICNIRP guidelines: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields[J].In: Health Physics, 1998, 74(4):494-22.
- [8] ICNIRP statement: Guidance on Determining Compliance of Exposure to Pulsed and Complex Non-Sinusoidal Waveforms below 100 kHz with ICNIRP Guidelines[J].In: Health Physics, 2003, 84(3):383-387.
- [9] 刘亚宁.电磁生物效应[M].北京:北京邮电大学出版社, 2002.
- [10] Jorgen H, Henrik I. Exposure of Welders and Other Metal Workers to ELF Magnetic Fields[J].Bioelectromagnetics, 1997(18):470~477.
- [11] WEMAN K. Health hazards caused by electromagnetic fields during welding[J].In: Svetsaren, Engl. Edition, 1999, 48(1): 14-16.