

软开关逆变式弧焊电源的设计

张光先, 邹增大, 尹海, 李思海

(山东大学, 济南 250061)

摘要: 软开关技术是解决逆变弧焊电源可靠性的核心技术。本文提出了一种新的软开关逆变弧焊电源的设计方案, 该方案基本上可实现空载、短路、燃弧全负载范围内的软开关状态。本文分析了超前臂的关断功耗与并联电容之间的关系, 串联电容及回路电感对环流期的电流变化的影响。并指出了滞后桥臂零电流关断区域, 以及超前臂和滞后臂的零开通条件。在此基础上提出了引入无功电流分量解决空载及轻载时软开关失败问题的方案, 以及几个主要谐振参数的设计方法。在实践中采用本方案表明, 降低了开关应力及损耗, 提高了整机可靠性, 降低了弧焊电源的成本。

关键词: 软开关; 逆变; 弧焊电源

中图分类号: TG444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)01-14-05



张光先

0 序 言

软开关逆变技术已成功应用于众多电源中, 但在逆变弧焊电源的应用中, 由于弧焊电源经常工作在输出开路、短路、燃弧等状态中, 负载范围宽, 在整个负载范围内实现软开关难度大。现在逆变焊机中软开关控制方式主要分为两种, 第一种是串联谐振式的调频工作方式(PFM), 这种方式弧焊电源空载时的无功电流太大, 主回路中电流峰值很高, 存在电流连续与非连续两种状态, 控制复杂, 仅美国米勒公司在某些类型的焊机中采用; 第二种是全桥移相谐振的脉宽调制工作方式(PWM), 由于采用 PWM 控制, 控制特性较好, 回路中电流峰值低, 但实现软开关的条件范围窄^[1], 本研究提出一种新的软开关逆变弧焊电源的设计方案, 解决如何在整个工作范围实现逆变弧焊电源软开关的问题。

1 主回路设计与实现

1.1 主回路形式

主回路选用改进型的全桥相移谐振式电路, 如图 1 所示。

Q_1, Q_3 为超前臂; Q_2, Q_4 为滞后臂; C_1, C_3 为超前臂电容; C_2, C_4 为滞后臂电容; $C_1 = C_3, C_2 = C_4$, C_X 为抑制环流电容, L_{X1} 为变压器回路等效漏感, L_{X2} 为饱和电感, B 为变压器。 E 为输入电压, U_o 为输出

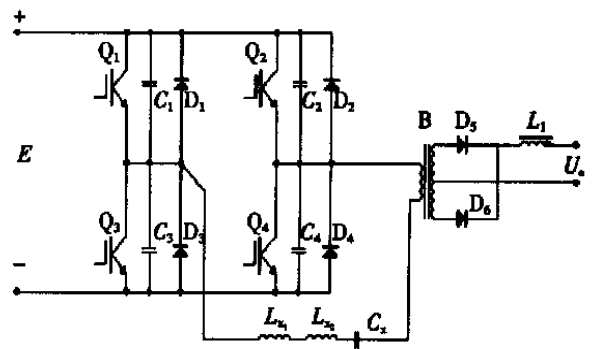


图 1 主电路形式

Fig. 1 The main loop

出电压。

1.2 控制方式

(1) 采用峰值电流控制模式, 既保护了开关管又可有效抑制变压器偏磁。

(2) 软开关实现模式为 Q_1, Q_3 为 PWM 控制; Q_2, Q_4 为互补 180° 导通, 不进行 PWM 调制。整个工作过程分为四个模式。

Q_1, Q_4 导通, 电流通路为

$$E^+ \rightarrow Q_1 \rightarrow L_{X1} \rightarrow L_{X2} \rightarrow C_X \rightarrow B \rightarrow Q_4 \rightarrow E^-$$

Q_1 截止, 电流通路为

$$E^+ \rightarrow C_1 \rightarrow L_{X1} \rightarrow L_{X2} \rightarrow C_X \rightarrow B \rightarrow Q_4 \rightarrow E^-, Q_1$$

两端电压上升。

当 Q_1 电压至 E 时, D_3 导通, 电流通路为

$$E^- \rightarrow D_3 \rightarrow L_{X1} \rightarrow L_{X2} \rightarrow C_X \rightarrow B \rightarrow Q_4 \rightarrow E^-$$

Q_4 截止, 电流通路为

$$E^- \rightarrow D_3 \rightarrow L_{X1} \rightarrow L_{X2} \rightarrow C_X \rightarrow B \rightarrow C_3 \rightarrow E^-$$

收稿日期: 2001-08-30

当 C_4 电压至 E 时电流通路为

$E^- D_3 L_{X_1} t_{X_2} C_X B D_2 E^+$ 。

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 驱动波形如图 2 所示。

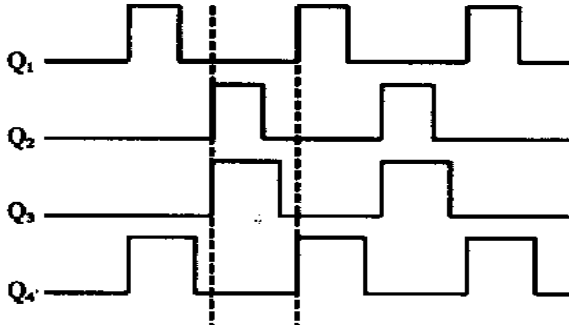


图 2 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 驱动波形

Fig. 2 Drive waveform of Q_1, Q_2, Q_3, Q_4

1.3 电路的实现

1.3.1 实现中的几个主要问题

(1) 元件选择

将以上计算应用于 ZX7 系列及 NBC 系列逆变焊接电源的设计中,以 ZX7 - 500 电源为例,其功率管可用 100 A/1 200 V 的 IGBT,主变压器采用非晶铁芯绕制,串在变压器原边的电容采用高频 CBB 系列电容。

(2) 控制回路的实现

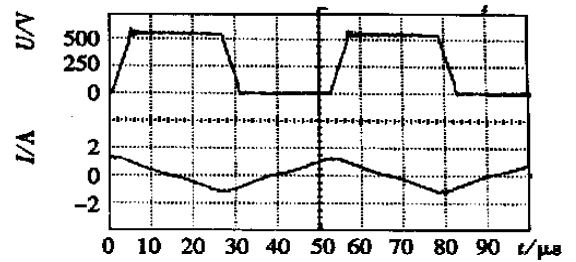
由于没有此种导通模式的专用芯片,本设计是在电流型芯片 UC3846 的基础上改造使用。

(3) 实现中的难点

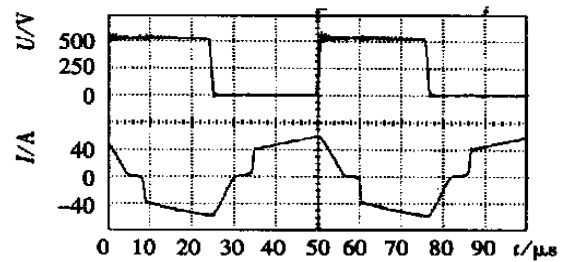
饱和电感由于功耗很大、发热,且电感量易发生变化,设计应选择损耗小、矩形度好的铁芯材料。

1.3.2 主电路中的几个波形

主电路中的几个波形如图 3 所示。



(a) Unload



(b) Load

图 3 Q 两端电压波形与变压器原边电流波形

Fig. 3 Sketch chart of voltage waveform at both ends of Q and current waveform at primary of transformer

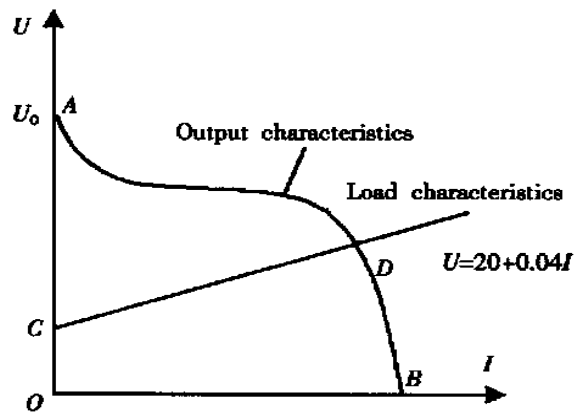


图 4 弧焊逆变电源的外特性曲线

Fig. 4 Output curve of arc welding power

2 主回路中参数选择计算

以 ZX7 系列焊机为例,焊接电源的外特性曲线如图 4 所示。

弧焊电源要可靠工作必须满足在 $ADBO$ 整个包络线内的所有点上 C_1, C_2, C_3, C_4 要换流充分,否则开通时 IGBT 两端并联的电容将直接向 IGBT 放电,使开关器件 IGBT 损坏。

2.1 空载、轻载时 C_1, C_3 的换流问题

图 4 中 A 点及附近点区域输出电流很小基本上为零,即焊机为空载状态或轻载,此时输出为最大脉宽, C_1, C_2, C_3, C_4 电容无法进行换流,造成软开关模式失败。解决方法是在逆变桥内引入无功电流,使超前臂和滞后臂电容换流完毕,由于 $C_1 = C_3 \gg$

$C_2 = C_4$,故主要考虑超前臂的换流,换流无功电流大小满足式为

$$\frac{I_S \cdot t_S}{2 C_1} > E$$

式中: I_S 为换流期间的无功电流; t_S 为死区时间; E 为电源电压。

2.2 超前臂电容大小的确定

超前臂为负载换流, C_1, C_3 的作用是降低关断损耗和改善关断轨迹,等效电路如图 5 所示。

图中 C 是等效的超前臂电容; I_0 是输出电流折算到原边回路的等效恒流源。假定 U 是 IGBT 的 c, e 两端电压, I 是流过 IGBT 中的电流, U_{cg} 是 c, g 两

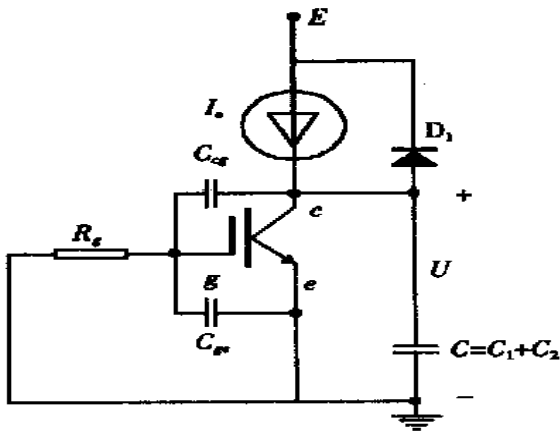


图5 超前臂关断时的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of the leading-arm devices shutting off

端电压, U_{ge} 是 g 、 e 两端电压。由于 $E \gg U_{ge}$, 所以 $U_{cg} \approx U$, I_c 是流过 C 中的电流。

2.2.1 关断初期栅极电压变化规律

当 $C=0$ 时, 在 D 导通之前 $I = I_o$, 由于米勒效应, U_{ge} 基本不变, 即

$$\frac{U_{ge}}{R_g} = C_{cg} \frac{dU}{dt}$$

当 $C \neq 0$ 时,

$$\frac{U_{ge}}{R_g} = C_{cg} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right| + C_{cg} \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

$$I_o = I + I_c,$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I_c}{C}$$

选择 C 使 $\frac{I_c}{C}$ 很小, 即

$$C_{ge} \frac{dU}{dt} \ll C_{ge} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right|$$

一般选择

$$C_{cg} \frac{dU}{dt} < (5 \sim 10) C_{ge} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right| \quad (2)$$

则式(1)可简化为

$$\frac{U_g}{R_g} = C_{ge} \left| \frac{dU_{ge}}{dt} \right|$$

式中: U_{ge} 为指数衰减。由于 IGBT 开启门槛电平较高且与饱和电流对应的 U_{ge} 相差不大, 所以在关断区内 U_{ge} 基本上线性下降, 即

$$U_{ge} = U_{gem} - \frac{U_{gem} + U_{ger}}{2R_g} \cdot \frac{t}{C_{ge}} \quad (3)$$

式中: U_{gem} 为工作电流对应的临界饱和栅极电平; U_{ger} 为门槛电平。

2.2.2 IGBT 的关断功耗

IGBT 的关断分为两部分, 一是场效应管的关断过程, 二是内部载流子的自身复合过程。整个关断过程可等效如图 6^[2] 所示。

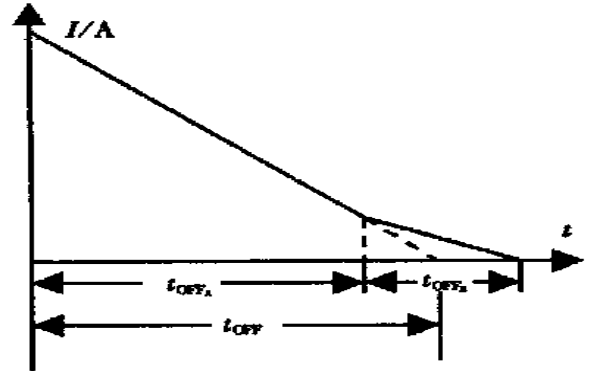


图6 IGBT 关断时的电流波形

Fig. 6 Current waveform of IGBT shutting off

图中 t_{OFF_A} 为电流下降时间; t_{OFF_B} 为电流拖尾时间, 关断过程的 IGBT 上的功耗主要由 t_{OFF_A} 、 t_{OFF_B} 决定, 设关断电流简化为线性下降, 关断时间为 t_{OFF} 见图 6。

IGBT 中的电流为

$$I = I_o - I_o \frac{t}{t_{OFF}}$$

IGBT 两端电压为

$$U = \frac{1}{C} \int_0^t I_o \frac{t}{t_{OFF}} dt = \frac{I_o}{2C} \cdot \frac{t^2}{t_{OFF}}$$

IGBT 的功耗为

当 $\frac{I_c}{C}$ 很小, 在 t_{OFF} 内, $U < E$ 时

$$P = \frac{1}{t_{OFF}} \int_0^{t_{OFF}} U I dt = \frac{1}{t_{OFF}} \int_0^{t_{OFF}} \left(I_o - I_o \frac{t}{t_{OFF}} \right) \cdot \frac{I_o}{2C} \cdot \frac{t^2}{t_{OFF}} dt = \frac{I_o^2 \cdot t_{OFF}}{24 \cdot C} \quad (4)$$

当 $\frac{I_c}{C}$ 较大, 在 t_{OFF} 内的 t_{OFF_1} 时刻, $U = E$, 则二极管 D 导通续流。

同理可得在 t_{OFF} 内 IGBT 上的功耗为

$$P = \frac{1}{t_{OFF}} \int_0^{t_{OFF}} U I dt = \frac{1}{t_{OFF}} \int_0^{t_{OFF_1}} U I dt + \int_0^{t_{OFF_1}} E I dt = \frac{I_o^2}{2C t_{OFF}} \left(\frac{t_{OFF_1}^3}{3} - \frac{t_{OFF}^4}{4 t_{OFF}} \right) + E I_o \left(\frac{t_{OFF}}{2} - t_{OFF_1} + \frac{t_{OFF_1}^2}{2 t_{OFF}} \right)$$

在此种工作状态下 IGBT 的功耗较大, 实际一般选择 C 在 t_{OFF} 内使 $U \approx E$, 即

$$E = \frac{I_o}{2C} \cdot \frac{t_{OFF}^2}{t_{OFF}}$$

$$C = \frac{I_o}{2E} \cdot t_{OFF} \quad (5)$$

根据式(2)可计算出电容大小。

2.3 环流过程分析及串联电容的计算

超前臂关断后,电路进入环流阶段,变压器回路中电流通过串联电容 C_X 基本上线性衰减,使回路中通态损耗变小,滞后臂关断时损耗变小,关断时电流为零最理想。假设环流时等效电路如图 7 所示,在以下分析略去滞后臂的关断死区时间。

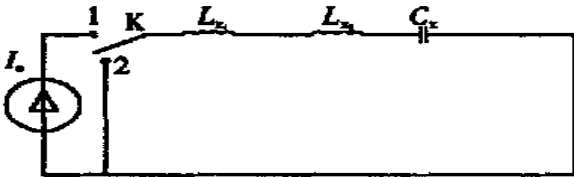


图 7 环流回路的等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit of the circulating current

L_{X1} 为等效漏抗; L_{X2} 为饱和电感; C_X 为串联电容,假设 L_{X2} 饱和电流相对于工作电流约为零,电容电压幅值为 U_C , L_{X1} 初始电流为 I_0 , K 在 1 位为超前臂导通, K 在 2 位时为环流位置。 t_{ON} 为超前臂导通时间。 t 是电流衰减约为零的时间。

K 在位置 1 时,即导通期间 t_{ON} 内,电容 C_X 上的电压变化为

$$2 U_C = \frac{I_0 t_{ON}}{C_X} \quad (6)$$

K 在位置 2 时,即环流期约 $T/2 - t_{ON}$ 内 (T 为弧焊电源的工作周期),电容 C_X 上的电压为

$$U_C = (L_{X1} + L_{X2}) \frac{di}{dt} \quad (7)$$

由于 L_{X2} 处于饱和,故 $U_C = L_{X1} \frac{di}{dt}$ 。

从式 (6)、(7) 可得

$$t = \left[\frac{1}{2} - A \operatorname{rectan} \left(\frac{t_{ON}}{2 \sqrt{L_{X1} C_X}} - \frac{1}{2 T_{ON} \sqrt{L_{X1} C_X}} \right) \right] \sqrt{L_{X1} C_X} \quad (8)$$

在一个周期内有

$$t_{ON} + t = \frac{T}{2}$$

设弧焊电源逆变频率为 50 kHz,利用式 (8)、(9) 可得一族曲线,如图 8 所示,曲线与直线 $t_{ON} + t = 10 \mu s$ 的交点为零关断区的范围,在图中取一曲线可看出,当 t_{ON} 在 A ~ B 范围内都可保证为滞后臂零电流关断。选定一条曲线,来保证 t_{ON} 工作范围,此曲线对应一个 $L_X \cdot C$ 值。电路中的 L_X 值已知后,可选定 C 值。 L_X 主要由漏抗来决定,可以测量出来。

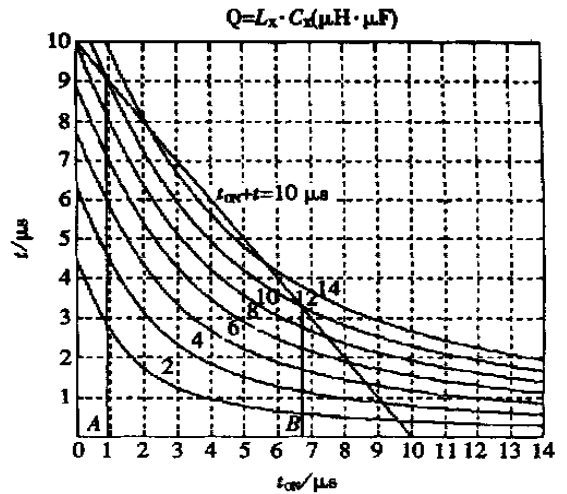


图 8 滞后臂零电流关断的范围

Fig. 8 Zero current shutting off range of the lagging arm

2.4 开关管的零开通条件及饱和电感的工作状态
饱和电感的磁链数可用伏秒积来表示,饱和电感 L_{X2} 的工作状况主要有几个阶段,如图 9 所示。

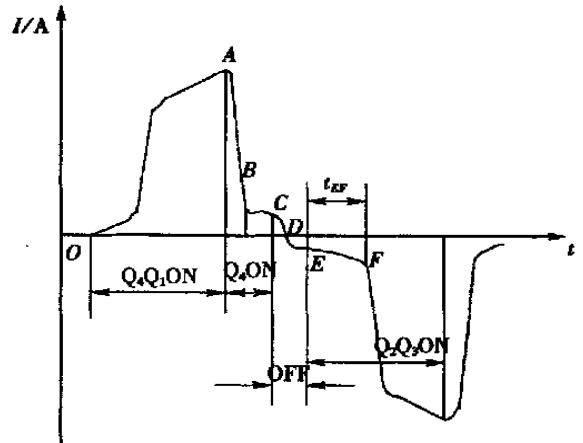


图 9 变压器原边的电流波形

Fig. 9 Primary current waveform of the transformer

(1) 在 B 点之前 L_{X2} 为饱和状态; (2) 在环流期 BC 段的饱和电感的伏秒数为 $U_C \cdot t_{BC}$; (3) 死区 CE 段中的 CD 段饱和电感的伏秒数为 $(U_C + E) t_{CD}$, DE 段电流反相饱和电感的伏秒数为 $U_C \cdot t_{DE}$; (4) 在 IGBT 开通初期, L_{X2} 上的伏秒数为 $(U_C + E) t_{EF}$, 其中 A、B、C、D、E、F 定义如图 9 中所示。

A 点为超前臂关断点, B 点为 L_{X2} 的饱和电流点, C 点为滞后臂关断点, D 点为 L_{X2} 电流反相点, E 点为 IGBT 开通时刻, F 点为饱和 L_{X2} 的饱和点。总之, L_{X2} 的总磁链数保证 t_{EF} 的值大于 IGBT 的开通时间 t_{ON1} , 来保证 IGBT 的零电流开通, 即 $t_{EF} - t_{ON1} > 0$, $t_{EF} - t_{ON1}$ 的值称为占空比损失, t_{ON1} 为 IGBT 的开

通时间。实际中 L_{x_2} 随温度改变而变化。故 L_{x_2} 的选择还需通过试验进行调整。

3 生产应用

该方案已成功应用于实践,并推广至平特性、下降特性弧焊电源,使得此类弧焊电源可靠性增加,成本下降,并且此方案已在奥太焊机上应用,生产数千台弧焊电源,取得明显经济效益。

4 结 论

(1) 本文提出的计算方法,可正确地计算出软开关的工作区域,以及开关管的工作状态。利用本

文提出的计算方法,可得到开关管的关断损耗及主回路中几个主要参数值。

(2) 本文提出了一种实现全负载软开关的方案,经实际应用取得良好效果。

参考文献:

- [1] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计[M].北京:电子工业出版社,1998.
- [2] 郑利军,任天良,姜 燕. PWM 方式开关电源中 IGBT 的损耗分析[J]. 电力电子技术,1999,33(5):58~60.

作者简介: 张光先,男,36岁,工学硕士,副教授。主要从事逆变弧焊电源的开发与应用,发表论文 20 余篇。

Email: zhang_gxcn@yahoo.com.cn

(编辑:董卫国)

[上接第 13 页]

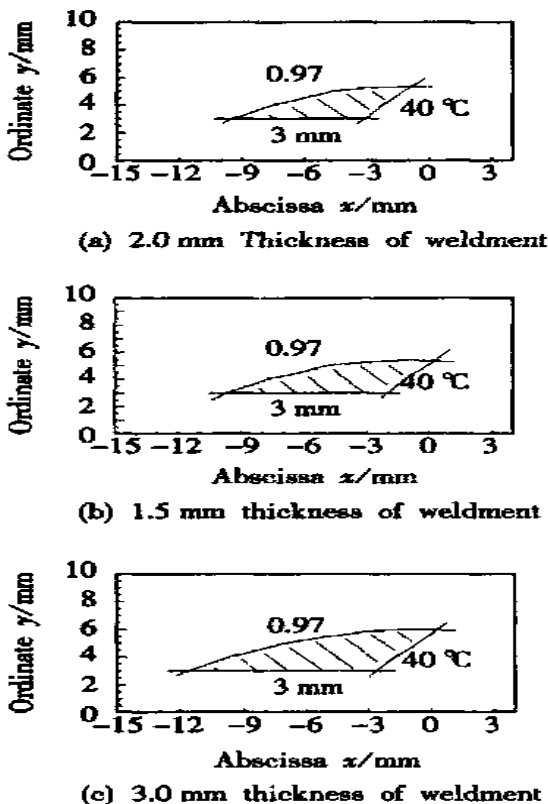


图 4 不同测温点的相关系数、温度变化等值线与偏离焊接线的直线的交叉图

Fig.4 Crossover within the correlation coefficients, the temperature variance and the straight line deviating the welding direction line in difference measurement points

40 两条等值线与偏离焊接线 3 mm 的直线的组合图。在图 4 中,在两条等值线与偏离焊接线的直线闭合的阴影区,相关系数大于 0.97,温度变化大于 40 $^{\circ}$ C。如果测温系统测温精度为 40 $^{\circ}$ C,要求相关系数大于 0.97,实际焊缝宽度在 4~5 mm 左右,那么应选择测温点在阴影区内。

5 结 论

根据正面不同测温点与背面熔宽的相关性、测温系统的精度要求及实际的焊缝宽度,详细地给出可选择的测温点区域,使测温点选择具有一定的原则可循。

参考文献:

- [1] 李亮玉,陈树君,殷树言.基于焊接温度场正面信息的熔透控制——三维温度场熔透解析模型及验证[J]. 机械工程学报,2000,36(9),41~44.
- [2] 李亮玉.基于焊接场正面信息建模的熔透过程控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.

作者简介: 李亮玉,男,1965年8月出生,工学博士,教授。主要从事焊接设备及过程控制的研究,发表论文 30 余篇。

Email: liliangyu2001@yaboo.com

(编辑:董卫国)

Yan ,GUO Jian. p12 ~ 13 ,18

Abstract : The penetration control is the domain field on welding research using topside temperature information of weldment ,and the choosing of the top temperature measurement points is also regarded as an important task of the real time control. In this paper on the base of the established three-dimensional analytical model in a plate of finite size with a Gaussian distributed moving heat source the choosing fields of top face temperature measuring points for control of the back face width is quantitatively obtained making use of the relativity theory and considering the temperature sensitivity and the seam width. The general principle of the choosing fields is provided ,and the next penetration control can be based on it.

Key words : penetration ; relativity ; temperature measurement

The Design of Main Loop for Soft-Switching Inverter Arc Welding Power Source ZHANG Guang-xian (Shandong University ,Jinan 250061 ,China) ,ZOU Zeng-da ,YIN Hai ,LI Si-hai. p14 ~ 18

Abstract : Soft-switching is the key technology to improve the reliability of inverter arc welding power. A new design of soft-switching inverter arc welding power is proposed in this paper. The soft-switching state of any load ,such as unloading ,short-circuiting and arcing ,can be primarily realized by the design. The paper analyses the relation between the parallel capacities and the shutting loss of the leading-arm ,the effect of the serial capacities and the inductance of the loop impact on the change of current during the circumfluence time ,the zero-current-shutting extent of the lagging-arm and the ZVS ,ZCS condition of the leading-arm devices and lagging-arm devices. In order to solve the problem that the soft-switching will fail during unload or light load period ,the authors put forward a layout introducing no-power current sect and several primary resonant parameters. Practice shows that the design reduces the switching stress and loss ,improves the reliability of the whole machine and reduces the cost of the arc welding power.

Key words : soft-switching ; invert ; arc welding power source

A Study of Processing Cu/ WC_p Composite Coatings by Laser Cladding CHEN Yan-bin (National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 15001 , China) ,REN Zhen-an. p19 ~ 22

Abstract : In this paper ,laser processing was used to carry out laser cladding Cu/ WC_p composite coatings on 45 steel substrates. The influence rule of WC amount on the microstructure and the wear resistance of composite coatings was investigated. The results showed that by adjusting the content of WC , - Cu solid solution and WC diphasic tissue can be found ; when the content of WC is above 30 % ,some dot-like WC particles will be found ,which indicates that WC can melt and solute at a certain extent ; between Cu/ WC_p composite coatings and metal matrix there is a transition region in which the microstructures are the compounds of steel substrate and WC. The test of friction resistance of the Cu/ WC_p composite coating was conducted on 40Cr grinding wheel and the result showed that the friction coefficient and the wearing amount are the least while the amount of WC is 10 % . The test of friction resistance was conducted on horniness alloy grinding wheel and the result showed that the friction coefficient is the least while the amount of WC

is 30 % ; the wearing amount is the least while the amount of WC is 10 % .

Key words : Cu/ WC_p composite coating ; laser cladding ; wear resistance

New Electrofusion Welding Method for Polyethylene Pipe SHI Chur-sheng (School of Materials Science and Engineering ,Tianjin University ,Tianjin 300072 ,China) ,LI Jia-jun ,WANG Yu-lin. p23 ~ 26

Abstract : A new electrofusion welding method that adopted carbon fiber felt/ polyethylene (PE) as a heat source was studied in this paper. On the basis of systematical analysis of the factors influenced the welding strength ,the welding parameters were determined. The result shows that the dominating factors affected the welding performance are the input power ,the temperature of weld interface and welding time. The ideal welding strength is obtained while the temperature of weld interface ranges from 140 to 220 . And the effect of the weld time on strength is relative to the input power. The microstructure near the welding interface varies from polymer matrix. The fracture mode varies with molten time of welding interface. Compared with the current electrofusion weld , the method described in this paper possesses some advantages ,such as low cost ,easy to use and high generality etc.

Key words : polyethylene pipe ; electrofusion welding ; composites ; welding parameter

The Prediction of Welding Deformation for the Marine High-Strength Steel Based on Artificial Neural Network LIU Li-ming (Dalian University of Technology ,Dalian 116024 , China) ,LIANG Guo-li ,LIU Yu-jun ,ZHENG Zhan ,ZHANG Chong-hua ,LIU Pei-sheng. p27 ~ 29 , 33

Abstract : This paper based on the physical simulation and finite element analysis (FEA) for the marine high-strength steel ,the numerical simulation of the welding deformation for the marine block steel structure was established by artificial neural network (ANN) . Through simulating the welding parameters ,the thickness of armor plate and the welding sequence ,the influencing factors to marine steel structure were studied. The valid path of controlling the welding deformation for marine high-strength steel was attained. The simulation results showed that in all kinds of factors ,the welding sequence was the main factor to influence the welding deformation. By choosing little electric current of the same direction backstep welding ,the deformation in the welding process of the marine block steel structure was controlled. By above method ,the deformation of marine high-strength steel was predicted rapidly at the welding process. It really offered a theoretic direction for the marine development and manufacture ,avoided the blindness of the welding experiment .

Key words : artificial neural network ; marine high-strength steel ; welding deformation

Microstructure Simulation and Prediction of IN718 Superalloy in Inertial Friction Welding LI Fu-guo (College of Materials Science and Engineering ,Northwestern Polytechnical University ,Xi 'an 710072 , China) ,NIE Lei ,LI Qing-hua ,DUAN Li-yu. p30 ~ 33

Abstract : Based on the study of high quality turbo disk and compressor disk of aero-engine ,the inertial friction welding process of IN-718 is analyzed and simulated with finite element numerical simulation