

专著 西北工业大学
出版基金 资助项目
ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

电阻焊控制技术

张勇 马铁军 杨思乾 方平 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

西北工业大学出版基金资助项目

电阻焊控制技术

张勇 马铁军 杨思乾 方平 著

西北工业大学出版社

88493844

【内容简介】 本书主要针对在航空、航天及汽车制造等领域应用广泛的典型电阻点焊方法,专门介绍其电源过程分析及控制模型、单片机与 DSP 控制系统的硬件及软件设计,以及智能控制技术。全书共 7 章。主要内容包括单相交流点焊控制技术,电容储能点、缝焊控制技术,三相次级整流阻焊电源的计算机控制技术,以及逆变点焊电源控制技术,并对电阻点焊工艺及质量控制理论、点焊电源计算机控制系统的电磁兼容设计等也作了详细介绍。

本书是从事电阻焊设备、工艺研究和生产的工程技术人员的重要参考书,也适用于从事其他热加工工艺的工程技术人员,还可作为焊接专业本科生及研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

电阻焊控制技术/张勇等著. —西安:西北工业大学出版社,2014.1

ISBN 978-7-5612-3904-9

I. ①电… II. ①张… III. ①电阻焊—计算机控制 IV. ①TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 012931 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:18.75

字 数:340 千字

版 次:2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价:55.00 元

前 言

电阻焊方法广泛应用于航空、航天、汽车及电子等制造领域,其接头的质量主要取决于电源的控制性能。电阻焊电源经历了从单相到三相,从不整流到整流的演变过程。20世纪80年代中期诞生了中频逆变点焊电源。由于受大功率开关器件、电力电子控制等技术的制约,因此可靠性问题长期阻碍中频逆变点焊电源的发展和推广。

随着大功率开关器件及计算机技术的发展,发达国家在21世纪初就突破了中频逆变点焊电源的可靠性瓶颈。近几年,中频逆变点焊电源在发达国家得到了迅速推广,在满足新材料愈来愈高的点焊质量要求和顺应可持续发展的节能绿色制造技术战略等方面,都表现出诸多明显的技术和工艺优势。目前,具有人工智能功能的计算机控制中频逆变点焊电源是发展的主要方向。国内开展中频逆变点焊电源研究工作几乎与发达国家同步启动,但投入的资金和人力有限,目前理论和应用研究与发达国家存在一定差距。现今国内拥有自主知识产权的企业不多,发展受到制约。计算机控制的传统点焊电源目前乃至今后较长时间仍是国内主要的点焊设备。为了缩短与发达国家的差距,需要从计算机控制的传统点焊电源入手,研究中频逆变点焊电源的计算机控制及其人工智能应用的关键技术,促进我国中频逆变点焊电源的发展和推广。这便是本书写作及其研究工作的初衷。

本书内容主要是笔者及其所在研究小组长期科研工作的积累,同时也参考了相关的引文资料。本书既系统深入地阐述了单相交流、电容储能及三相次级整流等传统点焊电源和新型中频逆变点焊电源的过程分析、控制模型建立及计算机控制系统的软件与硬件设计,还力图反映电阻点焊电源智能控制技术的研究进展状况,对困扰研究人员的电阻点焊电源计算机控制系统的电磁兼容设计也做了较深入的阐述。编写时将控制原理、系统设计等方面的内容与实际的控制电路综合起来进行论述,由简到深,注重理论性、实用性及系统性的有机结合。

本书绪论及第3,4,6章由张勇撰写;第2章由方平撰写;第5章由马铁军撰写;第7章由杨思乾、张勇撰写。本书由张勇、马铁军统稿。

就电阻焊电源控制及其智能技术应用的相关理论与技术实现而言,尚有很多

相关问题需要深入研究。由于笔者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

本书的研究工作受到航空基础科学基金项目(98H53072)和国家自然科学基金面上项目(51275418)的支持,在此一并表示感谢。

最后,特别感谢本书援引的参考文献的作者。

著 者

2013年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电阻焊的物理本质及特点	1
1.2 电阻焊的分类	1
1.3 电阻焊电源及控制技术的发展方向	3
第 2 章 电阻焊工艺及质量控制理论基础	6
2.1 电阻焊工艺基础	6
2.2 电阻焊接头的质量控制	26
第 3 章 单相交流点焊控制技术	38
3.1 控制过程的数学模型	38
3.2 交流点焊单片机控制系统硬件电路	43
3.3 交流点焊单片机控制系统软件	55
3.4 集散型点焊智能控制系统	62
3.5 交流点焊过程的智能控制技术	85
第 4 章 电容储能点、缝焊控制技术	96
4.1 概述	96
4.2 电容储能焊控制的基本理论	97
4.3 电容储能焊机控制系统的几项关键技术	100
4.4 电容储能焊机控制技术实例 1—— 大功率无触点换向电容储能焊机微机控制系统	104
4.5 电容储能焊机控制技术实例 2——电容恒流充电控制技术	107
4.6 电容储能焊机控制技术实例 3——电容储能缝焊控制技术	112
第 5 章 三相次级整流阻焊电源的计算机控制技术	118
5.1 概述	118

5.2	三相次级整流阻焊机主电路的工作过程与控制原理	123
5.3	三相次级整流阻焊电源控制系统硬件设计	133
5.4	三相次级整流阻焊电源控制系统软件设计	142
第 6 章	逆变点焊电源控制技术	168
6.1	概述	168
6.2	逆变点焊电源工作原理	174
6.3	逆变点焊电源电流型 PWM 控制系统	178
6.4	基于 DSP 的逆变点焊电源恒电压、恒电流控制	191
6.5	逆变点焊电源的智能控制	223
第 7 章	点焊电源计算机控制系统的电磁兼容设计	246
7.1	电磁骚扰及其耦合途径	246
7.2	有源器件的选择与印刷电路板的设计原则	252
7.3	系统地线及接地技术	265
7.4	电磁屏蔽及电源系统的抗骚扰设计	276
7.5	点焊电源计算机控制系统的软件抗干扰设计	279
参考文献	289

第 1 章 绪 论

1.1 电阻焊的物理本质及特点

电阻焊的物理本质是利用焊接区(两电极间的金属区域)的接触电阻热和金属本身的电阻热,以及大量的塑性变形能量,使两个分离表面的金属原子之间接近到晶格距离(0.3~0.5 nm),形成金属键,在结合面上产生足够量的共同晶粒而得到焊点、焊缝或对接接头。

电阻焊的电阻热是电流通过焊接区时,由接触电阻和焊件内阻吸收的电能不能转换为热能。电阻焊过程的塑性变形能量,是电阻热和通过电极对焊件施加压力的共同作用获得的。

电阻焊具有辅助工序少、焊件变形小、接头质量高,以及劳动条件好、易于自动化生产等显著优点,是应用广泛的一种压力焊方法。目前在制造领域,尤其是在汽车、航空航天、电子和家用电器等行业,电阻焊方法都有大量应用。

1.2 电阻焊的分类

按焊件的接头形式、工艺方法和电源种类的不同,电阻焊方法分为多种形式。

1. 按接头形式分类

电阻焊有搭接和对接两种不同的接头形式,如图 1-1 所示。

以搭接接头为主要形式的点焊、缝焊和凸焊方法,是利用电阻热使金属熔化形成熔核实现连接的;以对接接头为主要形式的对焊方法,是利用电阻热(或经闪光预热),使接头金属加热到一定温度,在压力作用下,接头产生形变,界面金属交互结晶实现连接的。

2. 根据焊接电流波形分类

根据使用焊接电流波形的不同形式,电阻焊可分为交流焊、直流焊及脉冲焊三类。

1)交流焊按工作频率的高低可分为低频(3~10 Hz)、工频(50~60 Hz)、中频(100~5 000 Hz)及高频(10~500 kHz)。

2) 直流焊按焊接变压器一次交变馈电方式可分为单相次级整流、三相次级整流和逆变次级整流。

3) 脉冲焊按焊接变压器一次单向馈电方式可分为电容储能和直流冲击波。

电阻焊方法有多种接头形式和焊接电流波形,其分类也较烦琐,如图 1-2 所示是电阻焊方法的分类图。实际应用中,通常对某一电阻焊方法称其全名,例如工频交流点焊、三相次级整流点焊、电容储能缝焊、中频逆变直流点焊等。

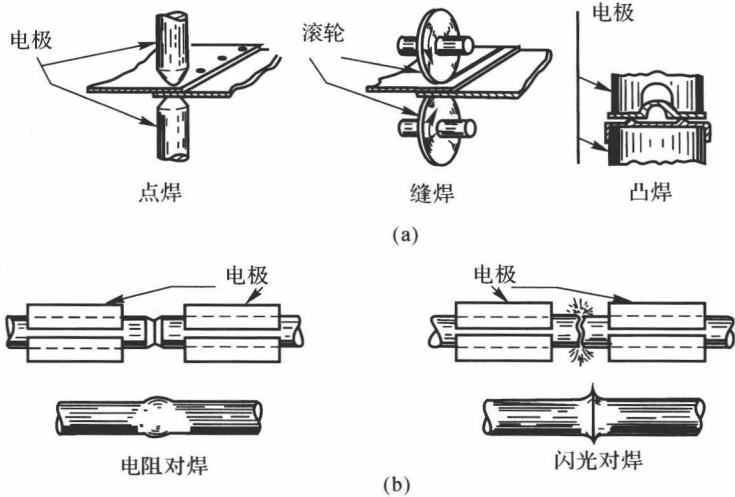


图 1-1 电阻焊按接头形式分类

(a) 搭接接头; (b) 对接接头

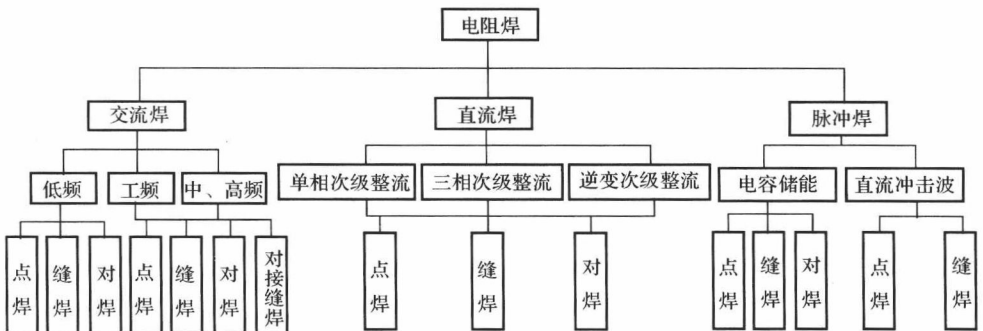


图 1-2 电阻焊方法的分类图

1.3 电阻焊电源及控制技术的发展方向

1. 电阻焊电源的发展方向

焊接电源作为焊接生产的能源供给装置,其性能直接影响到焊接质量,因此对焊接电源的研究长期以来受到人们的高度重视。随着科技的迅猛发展,为适应新材料、新工艺不断提出的应用要求,电阻焊电源也在不断地发展与完善之中,经历了从单相到三相,从不整流到整流,从工频到中、高频的演变。逆变技术在焊接电源中的应用为焊接电源的发展带来了革命性的变化,采用逆变技术的次级整流电阻焊电源是目前发展的重要方向。图1-3所示为目前应用较多的几种电阻焊焊接电流波形。

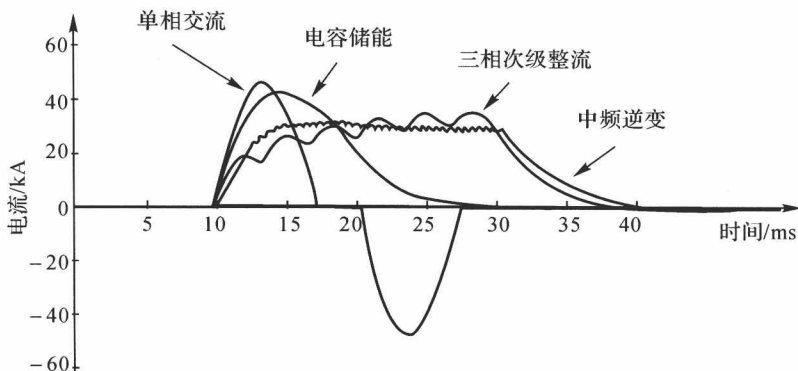


图 1-3 目前应用较多的电阻焊焊接电流波形

相对于传统的阻焊电源,逆变式中频阻焊电源具有很多优点。

1) 焊接变压器体积小、质量轻。因此,可将焊钳和变压器连同二次整流器一体化,用于点焊机器人,可以减小点焊机器人所需的驱动功率和装配质量,缩短焊接工作循环周期,延长装置寿命。

2) 可进行高速精密控制。传统的交流阻焊电源,其工作频率为 $50\sim 60$ Hz,限制了响应速度,控制分解能力也低。而逆变阻焊电源,由于逆变频率是工频的数倍至几十倍,故整个反馈控制系统的响应速度和控制分解能力较工频阻焊电源优越得多,有利于实现焊接过程的自动化和智能控制。

3) 功率因数高,节能经济性好。

4) 在焊接工艺方面,逆变点焊更具有形成稳定熔核的电流范围扩大、电极寿命长、电磁影响小、无交流“集肤”作用以及可以广泛点焊异种金属等优势。

正是由于逆变阻焊电源具有的上述突出优点,因而从其诞生之日起就一直是焊接设备领域研究的热点。

2. 电阻焊控制技术的发展方向

生产实践表明,在材料性能、工艺方法和接头形式确定之后,电阻焊的接头质量主要取决于电源及其控制系统的性能,基本不依赖操作者的技术水平。对于应用最多的电阻点焊方法,实际生产中熔核尺寸是评定质量的主要指标。因此,为了稳定焊接质量,需要对熔核形成过程的有关电参数进行自动控制,以形成合格焊点,或者自动反映和控制与熔核形成有关的物理参量,以实时判定和控制焊点质量。点焊过程及焊点质量的稳定性是电阻焊质量控制研究中长期以来的重点和关键问题。

焊接电流的大小对焊接质量起着决定性的作用。当焊接时间和电极力保持不变时,焊点熔核的大小与焊接电流的有效值密切相关。因此,检测和控制焊接电流是点焊控制必须解决的首要任务。恒压法(恒电流百分数法)和恒流法控制是自20世纪80年代以来,工业生产中普遍采用的点焊质量控制方法。

与此同时,还发展了电极间电压、动态电阻、能量、电极位移、超声、红外辐射以及温度等点焊质量控制方法。上述这些基于单一信息的控制方法,对于实现高度非线性、有多变量耦合作用和大量随机不确定因素的复杂点焊过程的精确控制,还存在一定的局限性,也难以满足越来越高的应用要求。

多参数联合监控方法可以充分利用不同参数对点焊质量监控的适应性,弥补单一参数监控的不足,是提高点焊质量监控精度的有效途径。目前,常用的多参数联合监控有电流与位移联合监控、能量与声发射监控、电流与能量和位移联合监控等。

以神经网络(artificial neural network, ANN)技术、模糊逻辑控制(fuzzy logic control, FLC)、专家系统(expert system, ES)为标志的人工智能控制技术,其基本特点是不依赖或不完全依赖被控对象的数学模型,主要利用人的操作经验、知识和推理技术以及控制系统的某些信息和性能得出相应的控制动作,在解决高度非线性和严重不确定系统控制方面显示出了巨大的潜力,也为电阻焊过程的建模和控制提供了全新的途径。在电阻焊领域,20世纪90年代初期就有学者开展了单一参数监控与人工智能技术结合的工频交流点焊控制的研究工作。近些年来,电阻焊人工智能多参数联合监控技术的研究方兴未艾,这也是电阻焊控制技术今后发展的主要方向。

高性能的单片机和数字信号处理器(digital signal processor, DSP)的迅猛发展,对电阻焊控制技术产生了深刻影响。这些适合复杂工业现场应用的计算

机,具有数据处理能力强、指令周期短、运算精度高及外设资源丰富等优点,不仅为电阻焊电源智能化、数字化的实现提供了强有力的技术保障,而且可以大大降低控制系统的设计成本,同时也能提高系统的可靠性。

可以预见,日趋成熟的基于高性能单片计算机和 DSP 的电阻焊智能控制技术,必将在生产实际中得到广泛应用。

第 2 章 电阻焊工艺及质量控制理论基础

电阻焊工艺是用电阻焊方法焊接零部件过程的总称。由于被焊零部件的材料性质、形状、尺寸及质量要求不尽相同,所以具体焊接工艺也各有特点。

随着电阻焊工艺在各工业部门的推广应用和对接头质量不断提出更高的要求,电阻焊电源控制、参数测量和质量监控技术越来越受到人们的重视。近几十年来电子计算机技术的迅速发展,为电阻焊控制技术的进一步发展,创造了更优越的条件。经过几十年各国科学工作者的努力,已研究出多种高精度的自动化控制系统,并逐步应用于要求质量高的产品生产中。

本章主要针对在航空、航天及汽车制造等领域应用广泛的典型电阻点、缝焊方法,介绍电阻焊的工艺以及质量控制理论基础。

2.1 电阻焊工艺基础

2.1.1 电阻点焊的电流场及温度场

1. 电阻点焊的热源

电阻焊的热源是电阻热。当电流通过导体时,导体将析热,其温度会升高,这是因为导体电阻吸收的电能量转换成热能的缘故。同样,电阻点焊时当焊接电流通过两电极间的金属区——焊接区——时(见图 2-1),由于焊接区具有电阻,亦会析热,并在焊件内部形成热源——内部热源。

根据焦耳定律,焊接区总的析热量为

$$Q = I^2 R t \quad (2-1)$$

式中, I 为焊接电流有效值; R 为焊接区总电阻的平均值; t 为通过焊接区电流的时间。

焊接区总电阻为

$$R = 2R_{ew} + 2R_w + R_c \quad (2-2)$$

式中, R_{ew} 为电极与工件间的接触电阻; R_w 为焊件内部电阻; R_c 为焊件间的接触电阻。

在焊接过程中,随着加热时间的变化,电极与工件、工件与工件间的接触电阻发生变化;同时,温度的提高使焊件的内部电阻也在发生变化;并且电流也是时间的函数。因此,有

$$Q = \int_0^t i^2 r dt \quad (2-3)$$

其中

$$r = 2r_{ew} + 2r_w + r_c \quad (2-4)$$

式中, i 为电流的瞬时值; r 为焊接区总电阻的动态值; t 为通电时间。

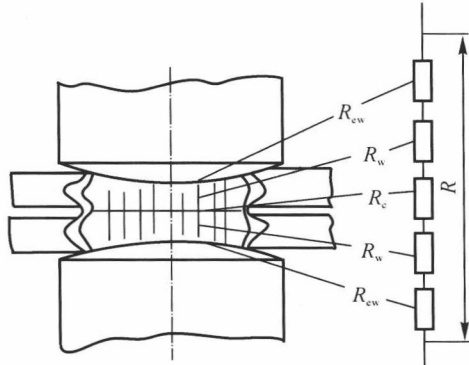


图 2-1 点焊接区示意图和等效电路
 R —焊接区总电阻; R_c —焊件间的接触电阻
 R_{ew} —电极与工件间的接触电阻; R_w —焊件内部电阻

从式(2-3)可以看出电阻焊加热时电流起着主要的作用。

研究表明,不同的金属材料在加热过程中焊接区总电阻的动态值变化规律相差很大,如图2-2所示。不锈钢、钛合金等材料的总电阻随焊接时间呈单调下降的趋势;铝及铝合金在加热初期总电阻迅速下降,随后趋于稳定;而低碳钢的变化曲线却明显有一峰值。由于动态电阻标志着焊接区加热和熔核长大的特征,因此可用来作为监控焊点质量的物理参量。

2. 电阻点焊的电场、电流场和温度场

(1) 电阻点焊的电场和电流场

点焊时决定电流和电流密度的是电场分布,它是影响热源强度的重要因素。因此,研究点焊电场分布对了解和控制熔

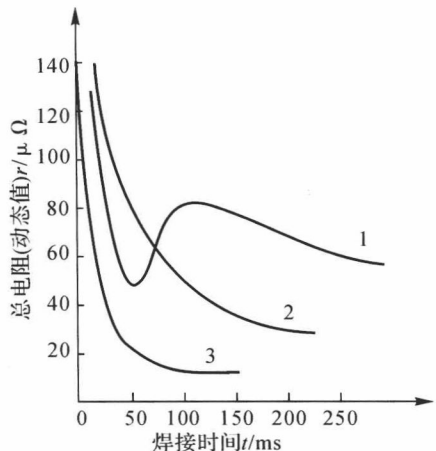


图 2-2 典型材料的动态电阻比较
 1—低碳钢; 2—不锈钢; 3—铝及铝合金

核形成与长大具有重要意义。若以电极中心线作为 z 轴, 则点焊电场以 z 轴对称, 因此可以用过 z 轴的任一平面上的等位线表示电场分布。因为电流线垂直于等位线, 所以可根据等位线作出电流分布, 以等电流线表示电场中电流场的分布。在圆柱坐标中电场分布满足微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (2-5)$$

式中, φ 为求解区域内某点的电势; z 和 r 分别为该点轴向、径向坐标; ρ 为该点的电阻率。

由于式(2-5)是非线性的, 其中电阻率 ρ 在求解域的各点上都不是常数, 而且方程的边界条件又极其复杂, 所以用解析法求解非常困难。目前, 多数是用有限元法或有限差分法求其近似的数值解。图2-3(a)所示为用差分法计算的电场分布, 其中电流线的含义是在它所限定的范围内的电流占总电流的百分数。

由图2-3可知, 在以电极直径为直径的焊件金属的圆柱体内, 电流并非均匀分布。影响电流分布的因素很多, 其中主要有焊件和电极的形状、尺寸及温度分布等。由于电极-焊件和焊件-焊件间的接触面积比焊件本身小得多, 因此电流不仅流过以接触面为底的圆柱体内, 在圆柱体以外电场的作用也会使不同点的带电粒子具备相应运动与传输能量的能力, 使电流线垂直等势面向外扩展, 电流线得以重新分布。

图2-3(b)表示了焊件不同截面上的电流密度。在电极-焊件的接触面 I—I 上, 以及焊件-焊件的接触面 III—III 上, 由中心向外, 电流密度逐渐增大, 在边缘上电流密度最大。在接触面 III—III 上, 接触面边缘以外, 各点电势逐渐降低, 在电极力作用下, 接触点也逐渐减少, 使电流密度逐渐下降。由焊件中间截面 II—II 的电流密度分布可见, 在以电极直径为直径的圆内, 电流密度基本上均匀分布, 数值较大。在圆以外, 由于电场的扩展作用, 仍有电流通过, 但电流密度逐渐减小。电流密度分布的不均匀性与电极直径和焊件厚度之比有关, 比值越大电流密度分布越趋向均匀。

温度分布的变化会引起电场的变化, 温度升高, 电阻率增大, 电流密度减小。

图2-4表示了熔核形成之后的电流密度分布。由图中的曲线 I—I 可见, 电流密度随温度的变化是非常显著的。由于熔核内液态金属的电阻率突增(见图2-5), 按分配定律, 电流将向低温区扩展, 此处电流密度降低到最小值。在熔核周围, 随着温度下降, 电流密度明显地增大, 至接触面边缘, 如前所述, 电流密度明显地增大至最大。

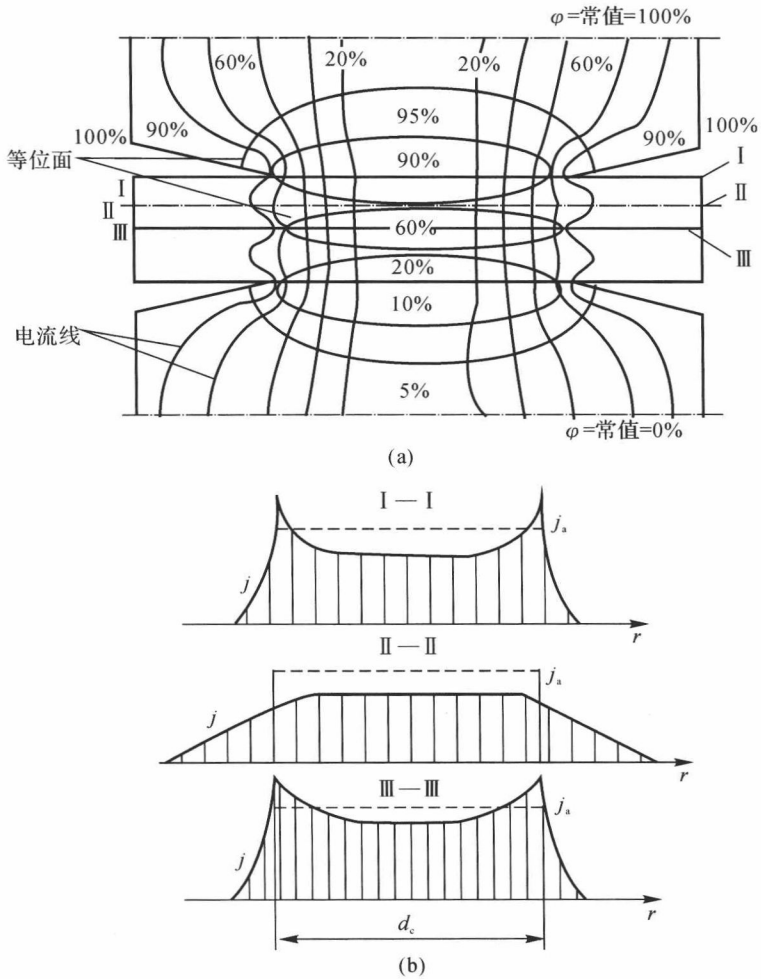


图 2-3 点焊时电场和电流分布(计算机数据绘制)

(a) 电场分布; (b) 典型截面的电流密度分布

j — 电流密度; j_a — 平均电流密度

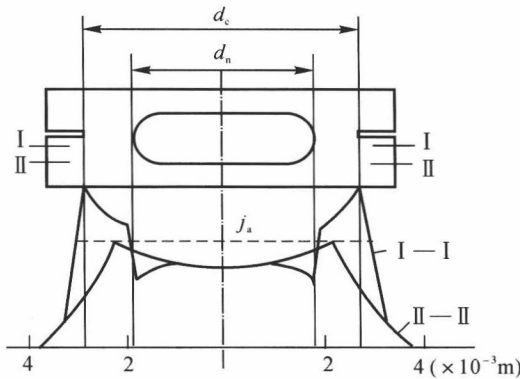


图 2-4 存在液态熔核时电流密度分布
(计算机计算数据绘制)

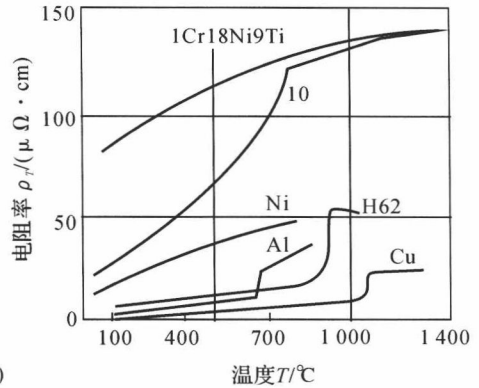


图 2-5 部分金属材料高温时的电阻率

(2) 电阻点焊的温度场

温度场是表示某一时刻焊件上温度分布的数量场。通过点焊終了时的温度场,可以了解熔核的形状和尺寸以及焊接接头的技术性能(强度、塑性及抗腐蚀性等)。

同电场一样,点焊的温度场对 \$z\$ 轴对称,过 \$z\$ 轴的任一平面上的温度场能够表示其全貌。温度场是析热和散热综合作用的结果,析热由材料性能和电流密度决定,散热则主要通过电极和焊点周围温度较低的金属进行。焊接时温度场随时间而变化,但最重要的是加热終了的温度场。点焊时,用柱坐标表示的热传导微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{c\rho'} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right]}_A + \underbrace{\frac{j^2 \rho_T}{c\rho'}}_B \quad (2-6)$$

式中,A项为不均匀加热物体由于自身的热传导而产生的温度变化,它与材料的热物理性能和温度梯度有关;B项为由于热源的析热而发生的温度变化。

若假定在微量时间间隔内,热导率 \$\lambda\$ = 常数,则可将式(2-6)简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{j^2 \rho_T}{C_V} \quad (2-7)$$

式中,\$\alpha\$ 为导温系数,\$\alpha = \lambda / c\rho' (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})\$;\$C_V\$ 为单位体积的热容,\$C_V = c\rho' (\text{J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mm}^3)^{-1})\$;\$c\$ 为金属材料的比热容,\$\rho'\$ 为金属材料的密度;\$\rho_T\$ 为金属材料的电阻率;\$j\$ 为焊接区的电流密度。

式(2-7)虽已简化,但因电场和接触点尺寸不断变化,用解析法求解仍非常困