

电阻焊理论与实践

中国机械工程学会焊接学会
电阻焊（Ⅲ）专业委员会

编著



机械工业出版社

372788

电阻焊理论与实践

中国机械工程学会焊接学会
电阻焊(Ⅱ)专业委员会 编著



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书是中国焊接学会第Ⅱ委员会编写的一本电阻焊专著。它包括电阻焊基本理论；常用结构钢、不锈钢、高温合金、铝合金和钛合金等材料的焊接工艺；新的电阻焊机、微机控制器和点焊机器人的设计及有关数据；电极设计与材料；电阻焊缺陷形貌和鉴别；电阻焊质量检验和监控技术；电阻焊结构和车间设计等。

本书不仅介绍了我国当代电阻焊科研和生产中积累的大量的宝贵经验，并对一些新的技术问题作了分析和讨论。因此，它对我国焊接事业发展将会起到积极的推动作用。

本书可供设计、科研、生产和高校从事电阻焊的科技人员及师生参考。



责任编辑：方婉莹 版式设计：王颖
封面设计：方芬 责任校对：肖新民
责任印制：路琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 33¹/₄·插页 4·字数 827 千字

1994年1月北京第1版·1994年1月北京第1次印刷

印数 0001—1,200·定价：40.80元

ISBN 7-111-03469-4/TG·759

前 言

电阻焊作为焊接学科的一个分支,是各工业部门广泛应用的加工、装配方法。在近20年来,其技术的发展、学术的繁荣是前所未有的。主要表现在电阻焊基础理论的深化,新一代电阻焊设备的涌现和电阻焊技术的普遍应用等方面。如点焊机器人的诞生和推广应用,多功能高精度的微机控制器的出现和普及,多种质量监控技术的扩大应用,对于接头微观组织与缺陷新的理解和判断。从而电阻焊走出传统的汽车等领域的应用,挤身于高技术以至广泛的家用电器各个领域,成为国民经济中不可缺少的、生产效率很高的一种制造工艺。

电阻焊学科的飞速发展,使该学科的工作者面临频繁地更新知识、吸收和推广新技术的艰巨任务,而国内缺乏这方面的较系统又实践性强的专著,因此电阻焊专业委员会在焊接学会的指导下组织编写了《电阻焊理论与实践》一书。

本书的内容包括电阻焊接头形成机理;常用材料及典型结构的电阻焊性能与规范参数的选用;电阻焊机机械和电路的设计与计算;控制器和质量监控系统的工作原理及波形分析。此外,对电极材料、常见缺陷和检验方法、电阻焊结构与车间设计、工时定额、点焊机器人工程应用的工艺设计等也作了专门介绍。

本书的作者都是多年从事电阻焊设计、科研、生产或教学的专业技术人员。在编写过程中,除注意电阻焊基本理论和概念阐述外,加强了科研成果和生产实践经验的总结,并力求作到理论联系实际,以利于科学实验和生产实践的应用,期望对本专业和非焊接专业工作者都能有所裨益。

本书由徐松英、毕惠琴、刘效方主编。孙仁德编写第一、三章,张义淑编写第二章,施秉周编写第四章,薛伟鸣、袁传浩编写第五章,杜为民编写第六章,袁仕兴、蔡才英、周成柏编写第七章,马立中组织编写第四至第七章,王明廉、刘朝煜编写第八章,贺中义编写第九、十、十一章,毕惠琴编写第十二、十三章,胡葆珍编写第十四章,刘效方编写第十五、十六、十七章,崔维达、毕惠琴编写第十八章,钱国才、陈幼松编写第十九章,马福临编写第二十章。朱正行、严向明任主审。

在本书编写过程中,得到了上海电焊机厂、上海交通大学、南昌航空工业学院的大力支持;还有天津大学、北京航空航天大学、成都电焊机研究所、成都电焊机厂、洪都机械厂、上海工程技术大学、北京航空材料研究所、第一汽车制造厂、第二汽车制造厂等单位以及许多科技工作者都提供了许多宝贵的技术资料,谨在此表示感谢。

由于我们水平有限,书中存在疏漏和错误在所难免,恳切希望读者给予批评和指正,以期在再版时加以补充或订正。

中国机械工程学会焊接
学会第Ⅲ专业委员会
1992年12月

基本符号表

物理量符号	名称	单位	物理量符号	名称	单位
a	导温系数		t_p	预压时间	s
b	宽度	mm	t_w	焊接时间	s
c	比热容	J/(kg·K)	u	电压瞬时值	V
C_V	体积热容/体积	J/(m ³ ·K)	v	速度	m/s
d	直径	m	v_a	送进速度	m/s
d_{i_0}	电极与板件接触面直径	mm	v_f	闪光速度	m/s
d_c	板件间接触面直径	mm	v_{fh}	临界闪光速度	m/s
d_e	电极工作端面直径	mm	v_w	焊接速度	mm/s
d_n	熔核直径	mm	A	电场不均匀系数	
d_r	塑性环直径	mm	$A\%$	焊透率	
e	电源电压瞬时值	V	B	轮盘宽度	mm
	电极偏心距	mm	D	电极体直径	mm
f	频率	Hz	E	弹性模量	Pa
	摩擦系数		F	电极压力	N
f_a	顶锻压强	MPa	F	变形弹力	N
h	高度	m	F_f	锻压力	N
h_n	熔深	mm	F_n	正拉力	N
i	电流瞬时值	A	F_p	预压力	N
j	电流密度	A/mm ²	F_r	电磁斥力	N
j_a	平均电流密度	A/mm ²	F_s	抗剪力	N
j_w	焊接电流密度	A/mm ²	FS	负载持续率	
k	系数		F_{v_p}	顶锻力	N
l	长度	m	F_w	焊接压力	N
	位移量	mm	G	重量	kg
m	集肤效应系数		H	磁场强度	A/m
m_0	熔化潜热	J/kg	I	电流	A
n	转速	r/min	I_{fh}	烧化电流	A
	匝数	匝	I_m	电流幅值	A
r	半径	m	I_p	初级电流有效值	A
s	距离	mm	I_s	次级电流有效值	A
S	面积	mm ²	I_{sh}	分流电流	A
t	时间	s		短路电流	A
t_i	间隙时间	s	I_{v_p}	顶锻电流	A
t_F	锻压时间	s	I_w	焊接电流	A
			K	变压比	
			L	长度	m

物理量符号	名 称	单 位	物理量符号	名 称	单 位
L	自感	H	$U_{v,}$	顶锻电压	V
M	弯矩	$N \cdot m$	V	体积	m^3
P	压力	N	W	热量	J
p	压强	Pa	W_e	有效热量	J
P	功率	W	W_L	损耗热量	J
P_{ef}	有效功率	W	X	感抗	Ω
P_m	最大功率	W	X_s	分路感抗	Ω
P_s	焊机容量	kVA	Z	电抗	Ω
Q	热量	J	Z_s	分路电抗	Ω
	载荷	kg	δ	厚度	mm
	空气消耗量	m^3/h		位移	mm
R	电阻	Ω	ρ	电阻率	$\Omega \cdot m$
R_b	焊件、板件电流	$\mu\Omega$	ρ_0	273 K时的电阻率	$\Omega \cdot m$
R_c	焊件间的接触电阻	$\mu\Omega$	γ	密度	kg/m^3
R_{bc}	焊件与电极间的接触电阻	$\mu\Omega$	λ	波长	$m (1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm})$
R_f	闪光接触电阻	$\mu\Omega$		热导率	$J/(m \cdot s \cdot K)$
R_s	次级总电阻	$\mu\Omega$	α	引燃角(控制角)	度
	分路电阻	$\mu\Omega$	σ_b	抗拉强度	MPa
R_{st}	短路电阻	$\mu\Omega$	σ_r	抗剪强度	MPa
R_w	焊接电阻	$\mu\Omega$	η	效率	
S_s	点距	mm	μ	磁导率	H/m
T	温度	K	ω	角频率	1/s
T_{av}	平均温度	K		匝数	匝
T_m	最高温度	K	$\phi(\varphi)$	相位角	($^\circ$)
T_m	熔点	K	θ	导通角	($^\circ$)
U	电压	V	Δ_f	闪光留量	mm
U_{20}	次级空载电压	V	$\Delta_{v,}$	顶锻留量	mm
$U_{f,}$	烧化电压	V			

目 录

第一篇 电阻焊工艺基础

第一章 点焊、缝焊和凸焊	1	第三节 带涂层钢板的焊接	51
第一节 点焊的应用及接头形成	1	第四节 可淬硬钢的焊接	55
一、点焊的应用	1	第五节 不锈钢与耐热合金的焊接	58
二、点焊接头的形成	2	第六节 钛合金的焊接	60
第二节 点焊的热源	2	第七节 铝合金的焊接	61
一、热源	2	第三章 对焊	64
二、点焊时的电场	3	第一节 对焊的应用及接头形成	64
三、点焊电阻	7	一、对焊的应用	64
第三节 焊点形成	12	二、对焊接头的形成	65
一、点焊温度场及熔核形成	12	第二节 电阻对焊	66
二、点焊的热平衡	14	一、热源及加热	66
三、焊接电流计算	15	二、电阻对焊工艺	68
四、点焊过程	16	第三节 闪光对焊过程	70
第四节 点焊工艺	19	一、闪光加热阶段	70
一、点焊方法	19	二、顶锻阶段	79
二、对焊点质量的一般要求	20	三、预热阶段	81
三、焊件焊前的表面准备	22	第四节 闪光对焊工艺	81
四、点焊规范	24	一、焊前准备	81
五、分流	30	二、规范参数及其选择	82
六、不等厚度与不同材料焊件的点焊	32	三、焊后加工	86
第五节 缝焊工艺	34	第五节 闪光对焊技术的发展	86
一、缝焊方法	34	一、程序降低电压闪光法	87
二、缝焊特点	35	二、脉冲闪光法	88
三、缝焊规范参数	36	三、送进速度瞬时控制闪光法	89
第六节 凸焊工艺	39	第六节 各种金属材料和零件的对焊	90
一、凸焊接头型式及应用	39	一、金属材料性能的影响	90
二、凸焊接头形成过程	41	二、各种金属材料的对焊特点	92
三、凸焊规范	42	三、典型零件的对焊特点	97
四、凸焊的焊前准备	44	第七节 管子缝对焊	109
第二章 常用金属材料的点焊与缝焊	47	一、中频加热焊接管子	109
第一节 金属材料点焊与缝焊的焊接性	47	二、高频加热焊接管子	110
第二节 低碳钢的焊接	49		

第二篇 电 阻 焊 机

第四章 电阻焊机概述	113	第一节 电阻焊机分类及基本技术要求	113
------------------	-----	-------------------------	-----

一、概述	113	一、工作原理	188
二、电阻焊机的分类	113	二、放电回路的等值电路和放电波形	188
三、电阻焊机的型号	114	三、电容贮能电阻焊机的优缺点	190
第二节 电阻焊机焊接回路基本特点和工 作循环	115	四、电容贮能电阻焊机组成部分及其 特点	190
一、电阻焊机的焊接回路	115	五、电容贮能电阻焊机焊接规范的调 节	192
二、电阻焊机的负载持续率	116	六、典型贮能点焊机	193
三、电阻焊机的技术经济指标	116	七、贮能缝焊机	194
四、电阻焊机的工作循环	116	八、贮能对焊机	195
第三节 电阻焊机的基本结构	118	第二节 三相低频电阻焊机	195
一、电阻焊机的主电力电路	118	一、工作原理	195
二、电阻焊机机械结构	118	二、三相低频电阻焊机的优点	197
三、电阻焊机控制装置	119	三、三相低频焊机控制箱的特点和参数	197
第四节 国内外电阻焊机的发展	119	四、三相低频电阻焊机的气路系统	198
一、我国电阻焊机的发展	119	第三节 次级整流电阻焊机	202
二、国外电阻焊机发展趋势	119	一、概述	202
第五章 电阻焊机的设计与计算	122	二、单相全波整流焊机	205
第一节 电阻焊机的刚性及夹紧力计算	122	三、三相半波整流焊机	208
一、垂直加压机电阻焊机的电极位移	122	四、六相或双三相半波整流焊机	211
二、夹紧机构	130	五、整流器计算	213
三、螺栓	134	六、整流器的保护	216
第二节 气压机构和液压机构	138	第四节 多点焊机	218
一、概述	138	一、多点焊机的特点及其应用概况	218
二、气压与液压机构	138	二、多点焊机的主要结构及其组成部分	219
三、气动系统设计	147	三、多点焊机的供电分配与焊接程序举 例	226
四、液压系统	150	四、综合型多点焊设备	227
五、导轨与气缸的组合	151	五、当前国外多点焊技术发展趋势	229
六、冷却水系统	152	第八章 电阻焊机的安装、调试、维 修和改造	230
第三节 电阻焊机焊接回路的计算	152	第一节 电阻焊机的安装和调试	230
一、概述	152	一、电阻焊机的安装	230
二、焊接回路的结构	152	二、电阻焊机的调试	231
第四节 电阻焊机用阻焊变压器的计算方 法	155	三、电阻焊机的鉴定	232
一、概述	155	第二节 电阻焊机的维修和改造	233
二、结构特点	156	一、电阻焊机的维修	233
三、计算方法	156	二、电阻焊机的改造	234
第六章 电阻焊机控制装置	164	第三节 常见故障分析与排除	235
第一节 电阻焊机控制方式	164	一、机械故障	235
第二节 电阻焊机控制器的基本单元线路	168	二、电气故障	236
第三节 控制器分析举例	178	第四节 安全技术	239
第四节 电阻焊机控制器的发展趋势	183		
第七章 特种和专用电阻焊机	188		
第一节 电容贮能电阻焊机	188		

第三篇 电 极

第九章 电极的功能与问题241

第一节 电极的功能241

一、传输电流241

二、传递压力241

三、电极的散热作用242

第二节 电极的温升243

第三节 电极的损坏形式与影响因素244

一、电极的变形245

二、电极的粘附247

三、铜-钨复合电极的损坏251

第十章 电极材料253

第一节 电极材料的分类253

一、对电极材料的要求253

二、电极材料的分类253

第二节 铜和铜合金256

一、紫铜256

二、铜合金257

三、铜和铜合金的使用汇度261

第三节 粉末烧结材料266

一、钨、钼类材料266

二、氧化铝弥散强化铜267

第十一章 电极的形状、尺寸和应用269

第一节 电极的分类269

第二节 点焊电极和电极握杆272

一、点焊电极的特点272

二、点焊电极的形状和尺寸274

三、有关点焊电极的一些数据276

四、电极握杆278

第三节 缝焊、凸焊和对焊电极281

一、缝焊电极281

二、凸焊电极284

三、对焊电极285

第四节 电极的使用和保养286

第四篇 电阻焊缺陷及特殊形貌组织

第十二章 点焊、缝焊缺陷与特殊形貌组织291

第一节 点焊、缝焊缺陷及其影响291

一、未熔合与未完全熔合291

二、缩孔、裂纹与结合线伸入293

三、过烧与晶间腐蚀297

四、表面烧伤、烧穿和喷溅299

五、压痕过深和翘离301

第二节 点焊和缝焊的特殊形貌组织303

一、胡须组织303

二、涡旋状组织305

三、环形层状花样308

四、晶间加粗308

第十三章 对焊缺陷形貌及其影响310

第一节 对焊外部缺陷形貌及其影响310

一、焊件错位与失稳310

二、表面烧伤310

三、焊件外观环向与纵向开裂、疏松310

第二节 对焊内部缺陷形貌及其影响311

一、未焊透311

二、白斑与灰斑312

三、过热、过烧、疏松与脆性组织313

四、层状撕裂316

第十四章 电阻焊质量管理与检验319

第一节 电阻焊质量管理319

第二节 接头质量检验的内容323

第三节 电阻焊接头的破坏性试验324

一、撕破检验324

二、低倍检验324

三、接头显微组织检验325

四、力学性能试验325

第四节 电阻焊接头的无损检验和气密性试验330

一、目视检验330

二、X射线检验331

三、超声波检验333

四、电磁检验334

五、渗透检验335

六、红外线检测336

七、气密性试验336

第五节 显微分析技术337

一、X射线显微分析技术337

二、电子显微分析技术 338

三、接头断口分析 338

第五篇 电阻焊参数测量及质量监控技术

第十五章 电阻焊质量监控概述 341

第一节 电阻焊接头质量的影响因素及解

决途径 341

一、电阻焊生产中存在的质量问题 341

二、提高接头质量的途径——采用质量

监控技术的必要性 342

第二节 电阻焊质量监控信息和基本的测

量与监控系统 342

一、电阻焊质量监控的信息 342

二、检测和监控系统的基本组成 345

第三节 电阻焊质量监控方法的分类 346

第十六章 焊接参数的测量及监控技

术 348

第一节 焊接电流的测量及监控技术 348

一、点焊电流波形分析及其数学表达式 348

二、焊接电流的测量仪器 349

第二节 焊接时间及电极力的测量 353

一、时间参数的测量 353

二、电极力测量 354

第三节 恒电流控制技术 355

一、监控原理 355

二、恒电流控制仪器 356

三、恒流监控的应用 356

第四节 电极间电压监控技术 357

一、监控原理 358

二、电压监控仪器 359

三、电极间电压与焊接规范的关系 360

四、监控技术及应用 360

第五节 动态电阻监控技术 363

一、动态电阻监控原理 363

二、动态电阻监控仪器 364

三、监控技术和应用 365

第六节 能量监控技术 368

一、能量监控原理 368

二、能量监控仪器 369

三、能量值与熔核直径和焊点强度的关
系 370

四、监控技术及应用 372

第十七章 有关熔核形成物理量的监
控技术 375

第一节 焊点热膨胀监控技术 375

一、焊点热膨胀监控原理 375

二、焊接参数与电极位移的关系 376

三、工艺因素对电极位移的影响 377

四、电极位移检测系统 379

五、电极位移监控技术及应用 382

第二节 点焊质量超声波监控技术 383

一、超声监控原理 383

二、焊点的超声波波形特征分析 384

三、超声波监控仪器 385

四、超声波监控技术及其应用 387

第三节 点焊质量声发射监控技术 388

一、声发射基本知识及监控原理 388

二、点焊熔核、飞溅和裂纹的声发射特
性 390

三、点焊声发射监控仪器 391

四、监控技术及应用 393

第四节 点焊质量的红外辐射和温度监控
技术 395

一、红外辐射与温度监控原理 395

二、红外辐射和温度监控仪器 396

三、应用 397

第六篇 电阻焊结构生产

第十八章 电阻焊结构的特点 399

第一节 电阻焊生产特点及结构 399

一、电阻焊结构生产特点 399

二、电阻焊接头举例 403

第二节 电阻焊焊接夹具和其他装置 403

一、圆筒纵缝的焊接夹具 404

二、筒形件环缝与平面环缝夹具 404

三、复杂型面结构点焊夹具 406

四、支撑装置 407

五、电极臂、电极型装夹结构 409

第十九章 电阻焊结构生产的机械化、
自动化 417

第一节 机械化、自动化的应用	417	置	466
一、机械化、自动化焊接生产的分类	417	一、车间部门的划分	466
二、机械化、自动化的基本设备	417	二、面积的分类	466
第二节 多点焊机的应用	421	三、车间面积的计算	467
一、多点焊机的工艺设计	421	四、零件存放周期和仓库面积	468
二、多点焊机的结构及其应用	426	五、车间区划和平面布置	468
三、多点焊机的次级回路及辅助工具	431	六、车间平面布置	469
四、多点焊机的维修、保养	432	七、厂房地面选择和地坪荷重	470
第三节 工业机器人在电阻焊领域中的应 用	433	第四节 各种动力介质消耗量计算	470
一、点焊机器人	434	一、电阻焊机的负荷计算	470
二、应用实例	435	二、电阻焊机开关、保护装置的选择	472
三、选用注意事项	436	三、电阻焊机焊接时限制电压波动的措 施	473
四、有关点焊机器人的数据	437	四、压缩空气的计算	475
第四节 微电子技术在电阻焊领域的应用	443	五、给水和排水	477
一、电阻焊电源	443	六、蒸气	479
二、控制和监控	443	第五节 起重运输	481
三、电阻焊机的群控	444	一、车间内部的起重运输方式的选型	481
第五节 机械化、自动化电阻焊接生产线	444	二、常用起重设备的技术参数	484
第二十章 电阻焊结构生产车间工艺 设计	447	三、运输设备需用量的计算	489
第一节 电阻焊结构生产车间工艺设计的 原则、程序和内容	447	第六节 电阻焊的时间定额	490
一、工艺设计原则	447	一、统计分析法	490
二、工艺设计的目标	448	二、技术分析法	490
三、生产性质的划分	448	第七节 电阻焊结构投产前的程序	505
四、工艺设计的基本程序	448	一、试生产的目的和任务	505
五、设计阶段的划分及内容	449	二、小批量试生产前必须具备的条件和 准备工作	506
六、设计任务书编制的内容	462	三、小批量试生产的批量	506
七、文件的深度及附件	462	四、小批量试生产的鉴定和验收	506
第二节 生产人员的配备和设备的计算	462	第八节 点焊机器人应用工程工艺设计	507
一、工作制度和年时基数	463	一、点焊机器人应用工程工艺设计所考 虑的问题	507
二、电阻焊结构生产车间人员分类	463	二、对点焊焊接接头设计的要求	507
三、人员的计算	463	三、点焊机器人焊接线工艺设计实例	508
四、生产设备的计算	465	参考文献	514
第三节 车间组成、面积、区划和平面布			

第一篇 电阻焊工艺基础

电阻焊工艺是用电阻焊方法焊接零件过程的总称。由于被焊零件的材料性质、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。电阻焊的主要方法包括点焊、凸焊、缝焊、电阻对焊及闪光对焊等，掌握了这些方法的过程机理，具体的工艺问题就不难处理。本篇将重点介绍电阻焊方法的基本理论和常用的工艺。

第一章 点焊、缝焊和凸焊

图1-1为点焊、缝焊和凸焊的原理图。由图可见，点焊、缝焊和凸焊有许多共同的特点，如接头多为搭接型式；以焊点或由焊点组成的焊缝连接焊件，通常焊点加热至熔化状态。凸焊和缝焊实质上与点焊类似，是由点焊演变来的。因此，本章将重点讨论点焊过程的基本理论和基本知识，对于凸焊和缝焊也将作应有的介绍。

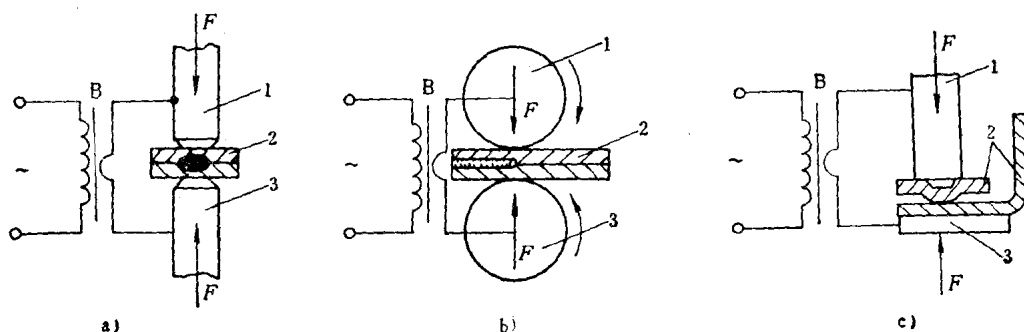


图1-1 点焊、缝焊、凸焊的原理图

a) 点焊 b) 缝焊 c) 凸焊

1、3—电极 2—焊件 F—电极力 B—变压器

第一节 点焊的应用及接头形成

一、点焊的应用

点焊广泛应用于薄板冲焊结构生产，如汽车驾驶室（图1-2 a）、轿车车身、飞机机翼、航空发动机扰流器（图1-2 b）、建筑用钢筋网（图1-2 c）、仪表壳体、电器元件引线等；另外，家用电器如电冰箱、洗衣机、电风扇及电炉、家具等也大量采用点焊工艺。

各类金属与合金一般都能获得良好的点焊质量。常用点焊零件的厚度为0.05~6mm，目前点焊最大厚度的钢件为30+30mm，铝合金件已达7~8mm。最薄的点焊件厚度以微米计算。

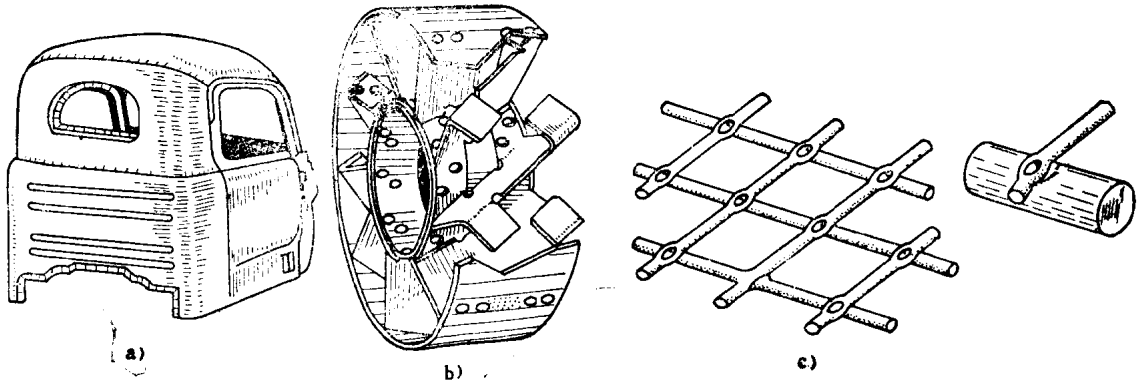


图1-2 点焊部件

a) 汽车驾驶室 b) 航空发动机扰流器 c) 钢筋网

二、点焊接头的形成

如图1-1 a所示,在电极力 F 和强大的焊接电流 I_w 作用下,在焊件接触面上形成真实的物理接触点,并随着通电加热的进行而不断扩大。塑变能与热能使相互接触的原子不断激活,消失了接触面,继续加热形成熔化核心,简称熔核。熔核中的液态金属在电动力作用下,发生强烈搅拌(见第十二章第一节),熔核内两板的金属成分均匀化,结合界面迅速消失。加热停止后,核心液态金属以自由能最低的熔核边界的半熔化晶粒表面为晶核开始结晶,然后沿散热相反方向不断以枝晶形式向中间延伸。一般熔核以柱晶形式生长,将合金浓度较高的成分排至晶叉及枝晶前端,直至枝晶相互抵住,获得牢固的金属键合,接合面消失了,得到了柱晶生长较充分的焊点,或因合金过冷条件不同,核心中心区同时形成等轴晶粒,得到柱晶、等轴晶两种晶粒区并存的焊点。一个点焊接头常由一个或多个焊点完成。接头质量决定于每个焊点的质量,加热和冷却对焊点质量有重要的影响。因而,研究点焊的热源及熔核形成的过程对控制和提高点焊质量具有重要意义。

第二节 点焊的热源

一、热源

电阻焊的热源是电流通过焊接区产生的电阻热。根据焦耳定律,热量 W 为

$$W = \int_0^{t_w} i^2(t) R(t) dt \quad (\text{J}) \quad (1-1)$$

式中 $i(t)$ ——通过焊接区的瞬时电流(A);

$R(t)$ ——焊接区的电阻(Ω);

t_w ——焊接时间(s)。

在点焊过程中,电流和电阻都是时间的函数,为了简化计算,通常取其平均值,即式(1-1)可简化为

$$W = I_w^2 R t_w \quad (\text{J}) \quad (1-2)$$

式中 I_w ——焊接电流方均根值的平均值(A);

R ——焊接区的平均电阻(Ω)。

点焊时, 单位时间内产生的热量称为热源强度, 可用下式表示:

$$w_0 = I_w^2 R = I_w U_2 \quad (\text{W}) \quad (1-3)$$

式中 U_2 ——电极间电压的方均根值(V)。

由式(1-3)可见, 热源强度等于焊接区所消耗的电功率。

单位时间在单位体积内产生的热量叫做体积热源强度 w_v , w_v 可用下式表示:

$$w_v = j_w^2 \rho_l \quad (\text{W/mm}^3) \quad (1-4)$$

式中 j_w ——点焊时的电流密度(A/mm^2);

ρ_l ——焊接区的电阻率($\Omega \cdot \text{mm}$)。

体积热源强度影响加热速度, 强度越大, 加热速度越大。

由式(1-3)和(1-4)可见, 标志热源特征的参数是焊接区的电阻、电阻率、电流和电流密度。

二、点焊时的电场

(一) 电场分布

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核形成与长大具有重要意义。若以电极中心线做为 z 轴, 则点焊电场对 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线分布, 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于以下微分方程:

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

式中 φ ——求解区域内某点的电势;

z 、 r ——该点轴向、径向坐标;

ρ ——该点的电阻率。

由于方程(1-5)是非线性的, 其中电阻率 ρ 在求解域的各点上都不是常量, 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1-3 a 是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, 例如, 80%的电流线是指它限定的范围内通过的电流占总电流的80%。

由图1-3可见, 在以电极直径 d 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, 因而电流不仅流过以接触面为底的圆柱体内, 在圆柱体以外也因电场的作用而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, 使电流场得以重新分布。

图1-3 b 表示焊件不同截面上的电流密度。在电极—焊件的接触面 I—I 上, 和焊件—焊件的接触面 III—III 面上, 由中心向外, 电流密度逐渐增大, 在边缘上电流密度最大(理论上应达无限大)。在接触面 III—III 上, 接触面边缘(A—A)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 d 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,

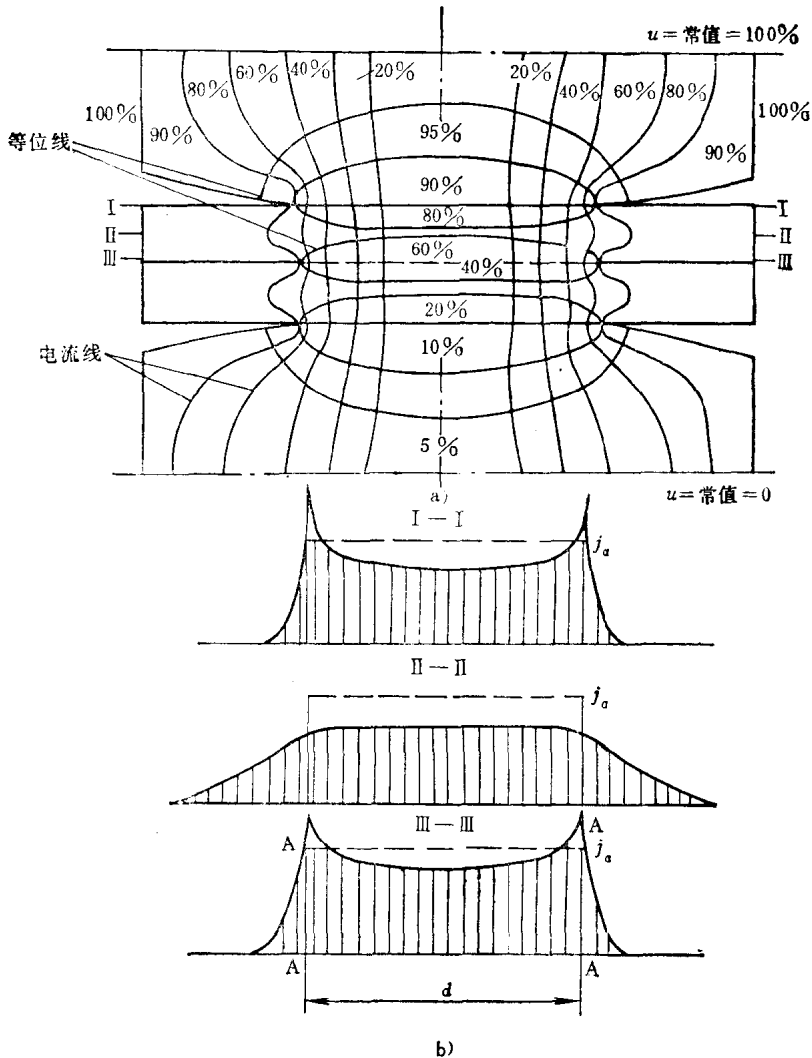


图1-3 点焊时电场和电流分布

a) 电场分布 b) 电流密度分布 j_a —平均电流密度

由于电流扩展的作用，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 $\frac{d}{\delta}$ 有关， $\frac{d}{\delta}$ 越大，电流密度分布越趋向均匀，分布至以 d 为直径的圆柱体外的电流越少。例如，当 $\frac{d}{\delta} = 3.3$ 时，约有25%的电流在圆柱体外通过，而当 $\frac{d}{\delta} = 5$ 时，仅有15%左右的电流在圆柱体外通过。由此可见，点焊时，焊接区的电场强度分布是不均匀的，其不均匀程度受焊件厚度和电极—焊件的接触面尺寸的影响。

温度分布的变化会引起电场的改变，温度升高，电阻率增大，电流密度减小。图 1-4 表示当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（参见图 1-5），按分配定律，电流向外至低温区扩展，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。

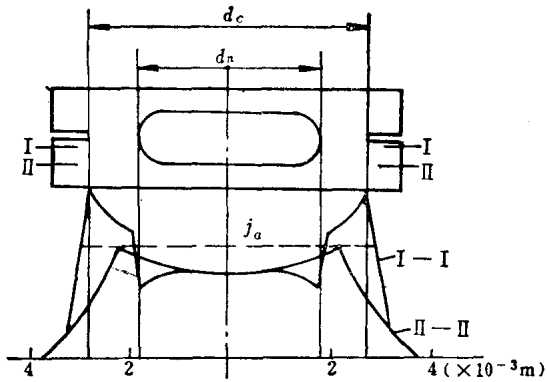


图1-4 熔核中沿径向的电流密度分布
 d_n —熔核直径 d_c —焊件间接触面的直径

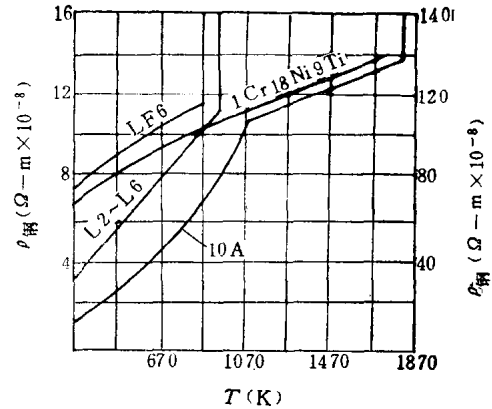


图1-5 几种材料的 \$\rho - T\$ 的关系曲线

(二) 电场的有限元计算

在点焊过程中，电场变化是复杂的，不仅与温度场互相影响，而且在力的作用下产生的弹—塑性变形及熔核的形成与长大都对电场分布有影响。因此，了解点焊电场分布规律，变得更为困难。目前，尚无完备的测试手段以实时测出点焊过程中电场变化规律。然而，了解电场变化规律，对于建立和完善点焊的基本理论，充分了解点焊过程中发生的各种现象，都具有重要作用。下面简单介绍有限元法求解电场的基本过程和步骤。

点焊接头的电场分布可以认为是轴对称的，因而，只计算接头 1/4 区域就可以了解整个电场分布。给定边界条件后，先求出接头的电场，然后由电场求出电流场。点焊的电场在焊接过程中随时间不断变化，计算中可划分出时间微量，在每一微量时间 (\$\Delta t\$) 内，可以认为接头的电场不变。这时接头的电场满足于微分方程式 (1-5)，由式中可见，接头中任一点的电势与其坐标值及该点的电导率有关。

利用有限元法，求解接头电场分布的步骤如下：

(1) 构造函数 先构造一个函数 \$u(\varphi)\$，使

$$u(\varphi) = \iint_G \frac{r}{2\rho} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 \right] dz dr \quad (1-6)$$

式中 \$G\$ ——求解区域的面积。

由于 \$\varphi\$ 是坐标 \$z\$、\$r\$ 的函数，而 \$u(\varphi)\$ 又是 \$\varphi\$ 的函数，所以 \$u(\varphi)\$ 是函数的函数，即泛函。泛函 \$u(\varphi)\$ 与 \$\varphi\$ 的关系，通过数学分析可以证明，在满足边界条件的情况下，当 \$\varphi\$ 满足式 (1-5) 时，它一定使 \$u(\varphi)\$ 取最小值，即 \$\frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0\$；反之，若对 \$u(\varphi)\$ 取最小值时，即 \$\frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0\$，由此所得到 \$\varphi\$ 一定满足方程式 (1-5)。因此，可以取 \$\frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0\$，来求得点焊接头的电场分布。

(2) 划分网格 利用方程式 (1-6) 求解，所遇到的问题仍然是边界条件，由于边界形状复杂，难以找到精确解。这个问题，可以通过在求解域内设定若干点 (\$e = 1, 2, \dots, L\$) 使得在这些点上其电势 \$\varphi_e\$ (\$e = 1, 2, \dots, L\$) 满足于条件 \$\frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0\$ 来解决。设定的

点越多, 计算结果就越精确。这实际上是从求无数个精确解转化为求有限个近似解(数值解)的问题。

为此, 必须先求解区域内划分网格, 从而得到许多单元, 相邻的单元之间形成有共同节点。单元的形状有多种形式, 最简单的单元形状是三角形单元。点焊接头的单元划分如图 1-6 所示。然后按照 $\frac{\partial u}{\partial \varphi_e} = 0$ ($e = 1, 2, \dots, L$) 联立求解,

所求得各节点的电势 φ , 为方程式 (1-5) 的近似解。

划分的网格越细, 单元和节点越多, 所得结果也就越准确, 但相应的计算工作量也越大, 实用中往往在电势变化梯度大的区域设置较小的单元, 而在电势变化梯度小的区域设置较大的单元, 这样既保证了一定的计算精度, 又减轻了计算工作量。

在划分网格之后, 须将所有的节点和单元分别按一定顺序进行编号。同时, 对于每一单元的三个节点, 也要按逆时针方向, 以 i 、 j 、 m 序列, 列出对应的编号及相应的轴向 z 、径向 r 的坐标值。

图 1-7 是单元接点编号的示意图, 图中, ④号单元对应有 2、3、8 三个节点, 但该单元的三个接点尚需以 i 、 j 、 m 逆时针方向加以区别。若以节点 2 作为单元④的 i 节点, 则节点 3 为该单元的 j 节点, 节点 8 为 m 节点。其余单元都要如此处理。并把相应的数据预先输入计算机内。

(3) 建立矩阵 前面, 我们从泛函的角度给出了方程式 (1-6), 并且划分网格, 建立了单元和节点。可以认为, 所求区域总的泛函等于各单元泛函之和。即:

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_N = \sum_{e=1}^N u_e \quad (1-7)$$

式中 N ——区域内单元的总数。

根据使泛函取最小值的要求, 各节点上的电势 φ , ($e = 1, 2, \dots, L$) 应当满足以下条件:

$$\frac{\partial u}{\partial \varphi_1} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial \varphi_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial u}{\partial \varphi_L} = 0$$

$$\text{即: } \frac{\partial u}{\partial \varphi_e} = \sum_{e=1}^N \frac{\partial u_e}{\partial \varphi_e} = 0 \quad (e = 1, 2, \dots, L) \quad (1-8)$$

每一单元的泛函可用下式表示:

$$u_e = \int_e \int \frac{r}{2\rho} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 \right] dz dr \quad (1-9)$$

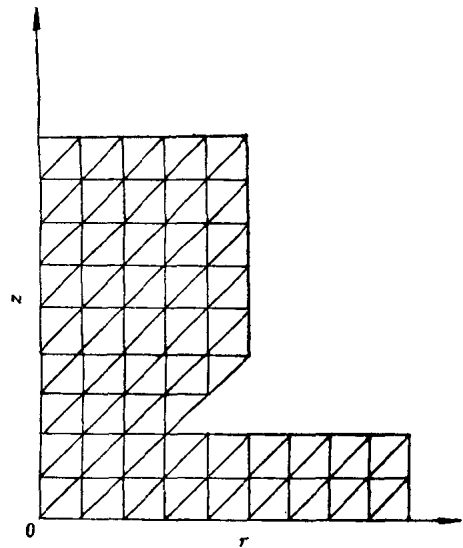


图1-6 单元的划分图

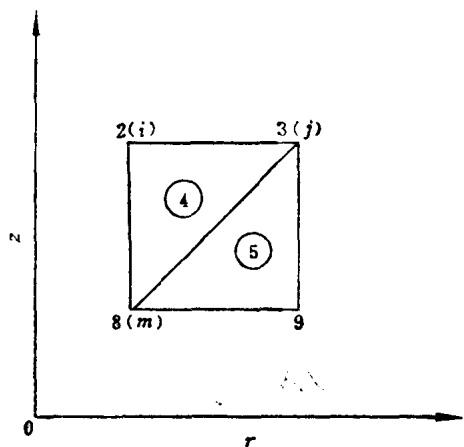


图1-7 单元、节点编号示意图