

职业技术学院规划教材

弧焊电源

任廷春 主编

第2版

4.1
2

 机械工业出版社
China Machine Press



职业技术学院规划教材

弧 焊 电 源

第 2 版

主编 任廷春
参编 胡永旺 曾金传 赵海霞
孙学杰 王现荣
主审 周玉生



机械工业出版社

本书主要论述了焊接电弧的电特性,弧焊工艺对弧焊电源的要求,弧焊变压器、弧焊发电机、弧焊整流器、脉冲弧焊电源、弧焊逆变器和矩形波交流弧焊电源的基本原理、结构特点、应用和故障排除,弧焊电源的选择、安装和使用等实用知识。

本书主要供职业技术学院焊接专业师生作教材使用,对焊接工程技术人员也有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

弧焊电源/任廷春主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2000.10
职业技术学院规划教材
ISBN 7-111-06099-7

I. 弧… II. 任… III. 电弧焊-高等学校:技术学校-教材 IV. TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第65291号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:董连仁 版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003年7月第2版第6次印刷

787mm×1092mm 1/16 · 12.5印张 · 300千字

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

第1版前言

本书是根据原机械委中等专业学校《弧焊电源》教学大纲编写的。

书中主要论述焊接电弧的电特性，弧焊工艺对弧焊电源的基本要求，以弧焊变压器、弧焊整流器为重点，分别介绍了弧焊变压器、直流弧焊发电机、弧焊整流器、脉冲弧焊电源、晶体管式弧焊电源、逆变式弧焊电源、矩形波交流弧焊电源的基本原理和结构特点，对常用弧焊电源作了较详细的介绍，对弧焊电源的使用与维护也阐述得比较充分。本书主要供中等专业学校焊接专业师生作教材使用，对焊接工程技术人员也有一定的参考价值。

本书由沈阳市机电工业学校任廷春主编，四川省机械工业学校雷世明和新疆机械电子工业学校彭远江协编。雷世明编写第二章和第五章1~3节，彭远江编写第三章，其余部分由任廷春编写。主审为华中理工大学卢本。

在编写和审稿过程中得到许多兄弟学校有关同志的大力支持，在此向他们表示感谢。此外，编写时查阅了大量参考资料，也在此向原作（编）者表示谢意。

限于编者的水平，书中缺点和错误在所难免，衷心希望读者给以批评指正。

编者 1988年9月

第 2 版前言

《弧焊电源》第 1 版是根据原机械委 1987 年 5 月制定的中等专业学校《弧焊电源》教学大纲编写的，于 1989 年 10 月由机械工业出版社出版。

考虑到近几年来职业技术教育的兴起和弧焊电源不断的发展、更新，《弧焊电源》第 1 版已不能适应当前教学工作的要求。为此，对《弧焊电源》第 1 版进行了必要的修订。此次修订主要有：

1. 大幅度删减焊接电弧的导电机理。
2. 适当增加变压器工作原理内容。
3. 对弧焊发电机内容做适当删减。
4. 删除了不常用的硅弧焊整流器，以 ZX5 系列晶闸管式弧焊整流器代替 ZDK-500 型晶闸管式弧焊整流器。
5. 对脉冲弧焊电源内容做了必要删改。
6. 对近年来出现的新型弧焊电源做了适当介绍。
7. 将弧焊电源的故障排除分散到各章讲述。
8. 每章后留有适量的思考题。

本书除作为职业技术学院焊接专业教材外，对焊接工程技术人员也有一定参考价值。

本书由任廷春主编，哈尔滨工业大学威海分校周玉生主审。赵海霞编写第一章；曾金传编写第三章；胡永旺编写第四章；孙学杰编写第五章；王现荣编写第七章；其余部分由任廷春编写。全书最后由任廷春整理定稿。

本书在编写和审稿过程中承蒙各兄弟学校有关同志的大力支持，在此向他们致以衷心的感谢。此外，编写时查阅大量参考文献，也在此向原作（编）者表示谢意。

限于编者水平，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1997 年 12 月

常用符号说明

符号	名称	符号	名称
U_0	空载电压有效值 (或平均值)	W	绕组
$U_y (U)$	电源电压有效值 (或平均值), 阳极压降	N	绕组匝数, 运算放大器
U_{yh}, u_{yh}	引弧电压的有效值、瞬时值	N_k	控制绕组匝数
U_h, u_h	电弧电压的有效值 (或平均值) 和瞬时值	N_j	交流绕组匝数
U_j	交流绕组电压有效值	N_B	补偿绕组匝数
U_k	控制电压	V	晶体管, 三极管
U_{min}	恢复电压最低值	VD	二极管
I_h, i_h	电弧电流的有效值 (或平均值) 和瞬时值	VS	稳压二极管, 稳压器
I_f, i_f	负载电流的有效值 (或平均值) 和瞬时值	VT	晶闸管
I_{fk}	反馈电流	VU	单结晶体管
I_k	控制绕组电流	VF	场效应晶体管 (FET)
I_d	短路电流	VI	绝缘栅双极晶体管 (IGBT)
I_{sd}	空载至短路瞬时短路电流峰值	T	变压器
I'_{sd}	经 0.05s 后的瞬时短路电流	TA	电流互感器
I_{hd}	负载至短路瞬时短路电流峰值	TC	控制变压器
I_{wd}	稳态短路电流	TV	电压互感器
I_j, i_j	交流绕组电流的有效值 (或平均值) 和瞬时值	TI	脉冲变压器
R	电阻 (器)	FU	熔断器, 熔体
RP	电位器	G	发电机
RS	分流器	M	电动机
L	电感 (器), 电抗器	HL	指示灯
L_B	平衡电抗器	KA	电流继电器
AM	磁放大器, 磁饱和电抗器	KV	电压继电器
C	电容 (器)	KM	接触器
Φ	磁通	A	电流表
Φ_{fk}	反馈磁通	V	电压表
Φ_j	交流绕组磁通	SA	控制开关, 选择开关
Φ_k	控制绕组磁通	SB	按钮开关
Φ_n	内桥绕组磁通	SW	风压开关
B	磁感应强度 (磁通密度)	UR	整流器, 整流桥
B_m	磁感应强度最大值	UI	逆变器
H	磁场强度	G	给定电路

目 录

第1版前言	
第2版前言	
常用符号说明	
绪论	1
一、弧焊电源在电弧焊中的作用	1
二、弧焊电源的分类、特点及用途	1
三、弧焊电源的现状和发展	3
四、本课程的性质和任务	4
第一章 焊接电弧及对弧焊电源的要求	5
第一节 焊接电弧的物理本质	5
一、电弧中带电粒子的产生	5
二、焊接电弧的引弧	7
第二节 焊接电弧的结构及伏安特性	9
一、焊接电弧的结构	9
二、焊接电弧的伏安特性	9
第三节 交流电弧	13
一、交流电弧的特点	14
二、交流电弧连续燃烧的条件	14
三、影响交流电弧燃烧的因素和提高电弧稳定性的措施	15
第四节 焊接电弧的分类及特点	17
一、自由电弧	17
二、压缩电弧	18
三、脉冲电弧	19
第五节 对弧焊电源的要求	20
一、对弧焊电源外特性的要求	20
二、对弧焊电源空载电压的要求	24
三、对弧焊电源调节特性的要求	25
四、对弧焊电源动特性的要求	28
思考题	30
第二章 弧焊变压器	31
第一节 弧焊变压器的原理及分类	31
一、变压器的工作原理	31
二、弧焊变压器的工作原理	33
三、弧焊变压器的分类	35
第二节 正常漏磁式弧焊变压器	35
一、分体式弧焊变压器	36
二、同体式弧焊变压器	40
第三节 增强漏磁式弧焊变压器	44
一、动圈式弧焊变压器	44
二、动铁式弧焊变压器	48
三、抽头式弧焊变压器	54
第四节 弧焊变压器的维护及故障排除	56
一、弧焊变压器的维护	56
二、弧焊变压器的常见故障及其排除	56
思考题	58
第三章 直流弧焊发电机	59
第一节 直流弧焊发电机的基本原理及分类	59
一、直流弧焊发电机的基本原理	59
二、直流弧焊发电机的分类	63
第二节 差复励式弧焊发电机	64
一、他励差复励式弧焊发电机	64
二、并励差复励式弧焊发电机	66
第三节 裂极式弧焊发电机	68
一、结构特点	68
二、工作原理	69
三、工艺参数调节	70
四、动特性	70
五、产品介绍	70
第四节 换向极式弧焊发电机	71
一、结构特点	71
二、工作原理	71
三、工艺参数调节	73
四、产品介绍	73
第五节 直流弧焊发电机的维护与故障排除	74
一、直流弧焊发电机的维护保养	74
二、直流弧焊发电机的常见故障排除	75

思考题	77	一、硅弧焊整流器	125
第四章 弧焊整流器	78	二、晶闸管式弧焊整流器	125
第一节 弧焊整流器的组成及分类	78	思考题	127
一、弧焊整流器的组成	78	第五章 脉冲弧焊电源	129
二、弧焊整流器的分类	79	第一节 脉冲弧焊电源概述	129
第二节 磁饱和电抗器	79	一、脉冲弧焊电源的特点及应用范围	129
一、磁饱和电抗器的作用	80	二、脉冲电流的获得方法	129
二、磁饱和电抗器的结构和基本工作		三、脉冲弧焊电源的分类	130
原理	80	第二节 单相整流式脉冲弧焊电源	131
第三节 无反馈磁饱和电抗器式弧焊		一、基本形式及特点	131
整流器	84	二、产品介绍	133
一、结构	84	第三节 磁饱和电抗器式脉冲弧焊	
二、工作原理	85	电源	133
三、产品介绍	90	一、基本原理及特点	133
第四节 全部内反馈磁饱和电抗器式		二、脉冲励磁型磁饱和电抗器式脉冲弧焊	
弧焊整流器	91	电源	134
一、结构	91	三、产品介绍	134
二、工作原理	92	第四节 晶闸管式脉冲弧焊电源	135
三、偏移绕组	94	一、基本原理、种类及特点	135
四、电压负反馈绕组	96	二、典型电路介绍	136
五、产品介绍	97	第五节 晶体管式脉冲弧焊电源	140
第五节 部分内反馈磁饱和电抗器式		一、概述	140
弧焊整流器	100	二、模拟式晶体管脉冲弧焊电源	141
一、结构	100	三、开关式晶体管脉冲弧焊电源	144
二、工作原理	101	思考题	146
三、产品介绍	104	第六章 新型弧焊电源	147
第六节 磁饱和电抗器式弧焊整流器		第一节 逆变式弧焊电源	147
的动特性	107	一、概述	147
一、动特性存在的问题	107	二、晶闸管式弧焊逆变器	151
二、动特性的改善	107	三、晶体管式弧焊逆变器	154
第七节 其它型式硅弧焊整流器	109	四、MOSFET 式和 IGBT 式弧焊逆	
一、动圈式弧焊整流器	109	变器	156
二、抽头式弧焊整流器	111	第二节 矩形波交流弧焊电源	158
第八节 晶闸管式弧焊整流器	112	一、概述	158
一、组成	112	二、逆变式矩形波交流弧焊电源	159
二、特点	112	三、晶闸管电抗器式矩形波交流弧焊	
三、主电路分析	113	电源	160
四、触发电路分析	117	思考题	162
五、反馈电路分析	121	第七章 弧焊电源的选择与使用	163
六、ZX5 系列晶闸管式弧焊整流器	123	第一节 弧焊电源的选择与安装	163
第九节 弧焊整流器的故障排除	125	一、弧焊电源的选择	163

二、附件与弧焊电源的安装	167	二、安全用电	180
第二节 弧焊电源的使用	172	思考题	182
一、使用和维护常识	172	附录	183
二、弧焊电源的串、并联使用	173	附录 A 电焊机型号编制方法	183
三、弧焊电源的改装	175	附录 B 常用弧焊电源的主要技术 数据	186
第三节 节约用电和安全用电	179	参考文献	192
一、节约用电	179		

绪 论

一、弧焊电源在电弧焊中的应用

焊接是一种不可拆卸的联接方法，是金属热加工方法之一。焊接与铸造、锻压、热处理、金属切削等加工方法一样，是机器制造、石油化工、矿山、冶金、航空、航天、造船、电子、核能等工业部门中的一种基本生产手段。没有现代焊接技术的发展，就不会有现代的工业和科学技术。

电弧焊是焊接方法中应用最为广泛的一种。据一些工业发达国家的统计，电弧焊在焊接生产总量中所占的比例一般都在60%以上。根据其工艺特点不同，电弧焊可分为焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护电弧焊和等离子弧焊等多种。

不同材料、不同结构的工件，需要采用不同的电弧焊工艺方法，而不同的电弧焊工艺方法则需用不同的电弧焊机。例如，操作方便，应用最为广泛的焊条电弧焊，需要由对电弧供电的电源装置和焊钳组成的手弧焊机；锅炉、化工、造船等工业广为使用的埋弧焊，需要由电源装置、控制箱和焊车等组成的埋弧焊机；适用于焊接化学性活泼金属的气体保护电弧焊，需要由电源装置、控制箱、焊车（自动焊）或送丝机构（半自动焊）、焊枪、气路和水路系统等组成的气体保护电弧焊机；适用于焊接高熔点金属的等离子弧焊，则需要由电源装置、控制系统、焊枪或焊车（自动焊）、气路和水路系统等组成的等离子弧焊机。

由上述可知，各种电弧焊方法所需的供电装置，即弧焊电源是电弧焊机的重要组成部分，是对焊接电弧供给电能的装置，它应满足电弧焊所要求的电气特性，这正是本课程将要系统讲述的内容。与弧焊电源配套的其它装置和设备部分，将在《焊接方法与设备》课程中讲述。

显然，弧焊电源电气性能的优劣，在很大程度上决定了电弧焊机焊接过程的稳定性。没有先进的弧焊电源，要实现先进的焊接工艺和焊接过程自动化也是难以办到的。因此，应该对弧焊电源的基本理论、结构特点和电气性能进行深入的研究，真正了解和正确使用弧焊电源，进而研制出新型的弧焊电源，使焊接质量和生产效率得到进一步提高。

二、弧焊电源的分类、特点及用途

弧焊电源种类很多，其分类方法也不尽相同。本书按弧焊电源输出的焊接电流波形的形状将弧焊电源分为交流弧焊电源、直流弧焊电源和脉冲弧焊电源三种类型。每种类型的弧焊电源根据其结构特点不同又可分为多种型式，如图0-1所示。

（一）交流弧焊电源

交流弧焊电源包括工频交流弧焊电源（弧焊变压器）、矩形波交流弧焊电源。下面分述其特点及用途。

1. 工频交流弧焊电源 即是弧焊变压器，它把电网的交流电变成适合于电弧焊的低电压交流电，它由变压器、调节装置和指示装置等组成。弧焊变压器具有结构简单、易造易修、成本低、磁偏吹小、空载损耗小、噪声小等优点。但其输出电流波形为正弦波，因此，电弧稳定性较差，功率因数低，一般用于焊条电弧焊、埋弧焊和钨极惰性气体保护电弧焊等方法。

2. 矩形波交流弧焊电源 它利用半导体控制技术来获得矩形交流电流的。由于输出电流

过零点时间短，电弧稳定性好，正负半波通电时间和电流比值可以自由调节，因此特点适合于铝及铝合金钨极氩弧焊。

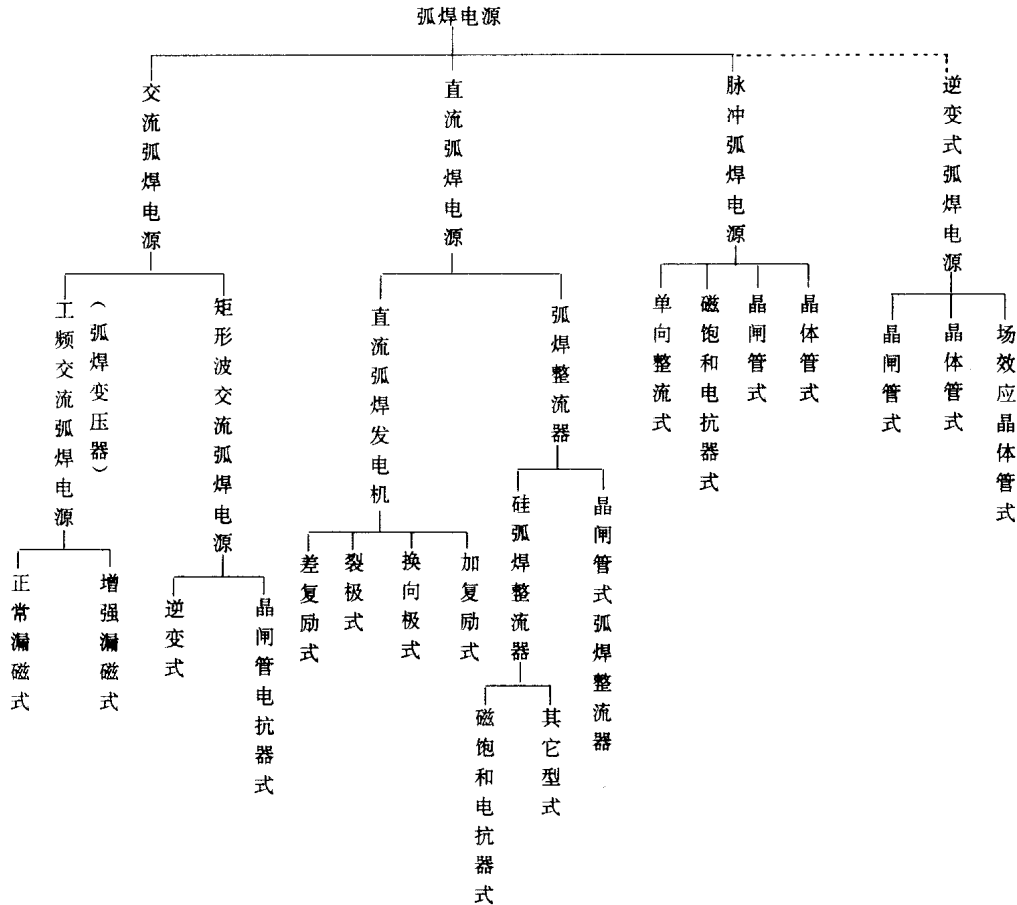


图 0-1 弧焊电源分类

(二) 直流弧焊电源

1. 直流弧焊发电机 一般由特种直流发电机、调节装置和指示装置等组成。按驱动动力的不同，直流弧焊发电机可分为两种：以电动机驱动并与发电机组成一体的称为直流弧焊电动发电机；以柴（汽）油驱动并与发电机组成一体的，称为直流弧焊柴（汽）油发电机。它与弧焊整流器相比，制造复杂，噪声及空载损耗大，效率稍低，价格高；但其抗过载能力强，输出脉动小，受电网电压波动的影响小，一般用于碱性焊条电弧焊。

2. 弧焊整流器 是由变压器、整流器及为获得所需外特性的调节装置、指示装置等组成。它把电网交流电经降压整流后获得直流电。与直流弧焊发电机相比，它具有制造方便、价格低、空载损耗小、噪声小等优点，而且大多数弧焊整流器可以远距离调节焊接工艺参数，能自动补偿电网电压波动对输出电压和电流的影响。它可作为各种弧焊方法的电源。

3. 逆变式弧焊电源 它把单相（或三相）交流电经整流后，由逆变器转变为几百至几万赫兹的中频交流电，经降压后输出交流或直流电。整个过程由电子电路控制，使电源获得符合要求的外特性和动特性。它具有高效节能、重量轻、体积小、功率因数高等优点，可应用

于各种弧焊方法，是一种很有发展前途的普及型弧焊电源。

顺便指出，逆变式弧焊电源既可以输出交流电，又可以输出直流电，但目前常用后一种形式，因此又可把它称为逆变式弧焊整流器。

（三）脉冲弧焊电源

焊接电流以低频调制脉冲方式馈送，一般由普通的弧焊电源与脉冲发生电路组成。它具有效率高、输入线能量较小、线能量调节范围宽等优点。它主要用于气体保护电弧焊和等离子弧焊，对于焊接热敏感性大的高合金材料、薄板和全位置焊接具有独特的优点。

三、弧焊电源的现状和发展

焊接技术的发展是与近代工业和科学技术的发展相紧密联系的。弧焊电源又是弧焊技术发展水平的主要标志，它的发展与弧焊技术的发展也是互相促进，密切相关的。

1802年俄国学者发现了电弧放电现象，并指出利用电弧热熔化金属的可能性。但是，电弧真正应用于工业，则是在1892年出现了金属极电弧焊接方法以后。当时，电力工业发展较快，弧焊电源本身也有了很大的改进。到20世纪20年代，除直流弧焊发电机外，已开始应用结构简单、成本低廉的弧焊变压器。

随着生产的进一步发展，不仅需要焊接的产品数量增加了，而且许多产品对焊接质量要求也提高了，加之焊接冶金科学的发展，20世纪30年代，在薄药皮焊条的基础上研制成功了焊接性能优良的厚药皮焊条，更显示了焊接方法的优越性。这个时期，由于机器制造、电机制造工业及电力拖动、自动控制等新科学技术的发展，也为实现焊接过程机械化、自动化提供了物质条件和技术条件，于是在30年代后期，研制成功了自动埋弧焊。20世纪40年代初，由于航空、核能等技术的发展，迫切需要轻金属或合金，如铝、镁、钛、锆及其合金等。这些材料的化学性能活泼，产品对焊接质量的要求又很高，氩弧焊就是为了满足上述要求而发展起来的新的焊接方法。50年代又相继出现了CO₂焊等各种气体保护电弧焊，以及随后出现的焊接高熔点金属材料的等离子弧焊。

各种焊接方法的问世，促进了弧焊电源的飞速发展，40年代开始出现了用硒片制成的弧焊整流器。到了60年代，由于大容量的硅整流器件、晶闸管的问世，为发展新的弧焊整流器开辟了道路。70年代以来，又相继成功研制了脉冲弧焊电源、逆变式弧焊电源、矩形波交流弧焊电源。

弧焊电源的飞速发展，不仅表现在弧焊电源种类的大量增加，还表现在广泛应用电子技术、控制技术、电子计算机技术等方面的理论知识和最新成就，来不断提高弧焊电源的质量，改善其电气性能。例如，采用单旋钮调节，即用一个旋钮就可以对电弧电压、焊接电流和短路电流上升速度等同时进行调节，并获得最佳配合；通过电子控制电路获得多种形状的外特性，以适应各种弧焊工艺的需要；提供多种电压、电流波形，以满足某些弧焊工艺的特殊需要；采用电压和温度补偿控制；设置电流递增和电流衰减环节，以防止引弧冲击和提高填满弧坑的质量；采用计算机控制，具有记忆、预置焊接参数和在焊接过程中自动变换焊接参数等功能，使弧焊电源智能化。

此外，在弧焊电源的结构和制造工艺方面也有不断的改进和提高。例如，提高主要零、部件的通用化程度和加工精度，改进铁心叠装和绕线工艺，采用优质绝缘材料，改革铁心结构形式等，使弧焊电源在结构、体积、重量和质量等方面均有明显的改善。

目前，我国弧焊电源和弧焊机的制造、研究的状况，与正在蓬勃发展的国民经济的需要

仍不相适应，产品的品种、数量、质量、性能和自动化程度还远远不能满足使用部门的要求；与世界工业发达国家比较，尚存在较大的差距。为了适应我国社会主义四个现代化的需要，必须努力从事弧焊电源的研制，充分利用电子技术、计算机技术和大功率电子器件，不断提高产品质量；大力发展高效、节能、性能良好的新型弧焊电源，从而把弧焊电源的发展推向一个新阶段。

四、本课程的性质和任务

本课程以“电工学”、“工业电子学”等课程为基础，是焊接专业理论性和实践性较强的一门专业课。其内容包括焊接电弧及对弧焊电源的要求，常用弧焊电源的种类、结构、工作原理、性能、特点及使用、维护等内容。学生在学完本课程后，应能达到以下要求：

1. 了解焊接电弧的产生机理及电特性，掌握交流电弧的特点及稳定燃烧条件。
2. 深入了解弧焊电源的性能和常用弧焊方法对弧焊电源的要求。
3. 掌握常用弧焊电源基本结构和工作原理，熟悉其性能和特点，并且有正确选择、安装和使用的能力。
4. 能测试常用弧焊电源的主要性能指标，并对常见故障具有分析和排除的能力。

第一章 焊接电弧及对弧焊电源的要求

本章论述焊接电弧的物理本质，它的形成机理、结构和伏安特性及对弧焊电源的要求；讲授焊接电弧的电特性和交流电弧燃烧的特点；讲授弧焊工艺对弧焊电源外特性、空载电压、调节特性和动特性的要求。

第一节 焊接电弧的物理本质

焊接电弧并不是一般的燃烧现象，而是在一定条件下电荷通过两电极间气体空间的一种导电过程（图 1-1），或者说是一种气体放电现象。正是这种特殊的气体放电过程，使电能转换为热能、机械能和光能。焊接时主要是利用其热能和机械能来达到联接金属的目的。弧焊电源则是能量的提供者，其电特性的好坏会影响到电弧燃烧的稳定性。电弧是否稳定燃烧又直接影响焊接过程的稳定性和焊缝质量。因此，必须首先了解焊接电弧的物理本质，进而才能论述电弧对弧焊电源的要求。

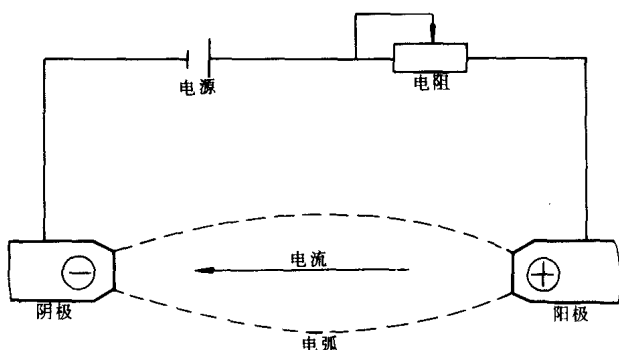


图 1-1 电弧产生示意图

一、电弧中带电粒子的产生

正常状态下，气体不含带电粒子（电子、正离子、负离子），是由中性分子或原子组成的。它们虽然可以自由移动，但不会受电场作用而产生定向运动，所以是不导电的。因此，要使正常状态的气体产生电弧导电，必须先有一个产生带电粒子的过程，即气体电离；同时，为了使电弧维持“燃烧”，要求电弧的阴极不断发射电子，这就必须不断地输送电能给电弧，以补充所消耗的能量。

电弧中气体电离和阴极电子发射是最主要的物理现象，同时也伴随着激励、复合、负离子产生等其它一些现象。

（一）气体电离

在外加能量作用下，中性气体分子或原子分离成正离子和电子的现象称为电离。气体分子或原子在常态下是由数量相等的正电荷（原子核）和负电荷（电子）构成的一个稳定系统，对外界呈中性。要使其电离就要破坏这种稳定系统，需要对这个系统施加外来能量。常态下的气体粒子（分子或原子）受到外加能量的作用，就会使原子中的电子获得足够能量，从而摆脱原子核对它的静电吸引而成为自由电子；同时气体原子变成带正电荷的正离子。这样，气体就处于可导电状态。

气体原子分离出一个外层电子所需要的最小能量称为电离能或电离功。当用电子伏特

(eV) 来衡量它时, 又称为电离势或电离电位, 以 E_i 表示。一个电子伏特, 相当于一个电子在电场中移动电位差为 1V 的路程所产生的能量变化。气体电离势的高低说明电子脱离原子或分子所需要外加能量的大小, 亦即说明在某种气氛中产生带电粒子的难易程度。电离势大, 表示气体难电离, 也就是难导电; 电离势小, 表示气体易电离, 导电也容易。不同气体原子内部的结构不同, 其电离时所需的电离势也不同。碱金属的电离势较低; 气体的电离势都较高; 惰性气体的电离势更高。这就是为什么在含 K、Na 等稳弧剂的气氛中比较容易导电、引弧, 电弧燃烧也比较稳定的重要原因。

在常态下的中性气体粒子内部的原子核与电子构成一个稳定系统, 若受到外来能量作用失去电子而产生电离, 这只是这个稳定系统被破坏的一种形式; 另一种破坏的可能形式, 即当中性粒子受到外来能量作用尚不足以使电子完全脱离气体原子或分子时, 电子从较低的能级转移到较高的能级, 则中性粒子内部的稳定状态也被破坏, 这种状态称为激励。受激励的电子处于一种不稳定状态, 若不能继续得到外界能量, 它就要自动返回原来低能级的轨道上去, 并放出光辐射能。

在焊接电弧中, 根据引起电离的能量来源, 气体有三种电离形式:

(1) 碰撞电离 这种电离的特点是, 在电场中被加速的带电粒子与原子和分子相碰撞而产生电离。

(2) 光电离 它是由于原子吸收光辐射的能量, 提高其内能并改变其内部结构, 使气体产生的电离。

(3) 热电离 即在热能作用下, 气体粒子具有很高的动能, 它们在无规则的相互碰撞中产生的电离。

在高温焊接电弧中, 主要是热电离, 而且进行激烈。根据气体分子运动理论可知, 气体温度高低意味着气体粒子 (包括中性粒子、电子和离子) 总体动能的大小, 亦即气体无规则运动的强弱。气体温度越高, 气体粒子的运动速度也越高, 即动能也越大。在一定温度下, 气体粒子的质量越小, 其运动速度越高。若粒子的运动速度足够高, 粒子之间就会发生频繁碰撞, 从而引起电离或激励。

应该指出, 原子或分子除释放出电子形成正离子和自由电子外, 有时在电离气体中还存在着原子或分子与电子结合而成为负离子的过程。气体原子或分子吸附电子形成负离子时, 其内部能量减少。减少的这部分能量称为电子亲和能, 以 E_e 表示。中性粒子吸附电子时将释放出这部分电子亲和能, 并以热或辐射能 (光) 的形式释出。电子亲和能越大的元素, 形成负离子的倾向越大。而元素的电子亲和能的大小是由原子构造所决定的。惰性气体 Ar、He 的电子亲和能最小, 所以不可能形成负离子。

另外, 电弧空间的正负带电粒子 (正离子、负离子、电子) 在一定条件下相遇可能复合成中性原子。复合包括电子与正离子的复合和正离子与负离子的复合。电弧中产生负离子及与带电粒子的复合作用, 将导致电弧导电困难, 从而使电弧的稳定性下降。

(二) 阴极电子发射

阴极表面在外加能量作用下连续向外发射出电子的现象称阴极电子发射。一般金属中, 原子构成晶格且呈紧密排列, 所以离原子核较远的最外层电子要受到周围原子核的静电吸引力作用而易形成自由电子。在一般情况下, 电子是不能离开金属表面向外发射的。要使其逸出金属电极表面而产生电子发射, 必须加给电子一定能量。使一个电子由金属表面飞出所需要

的最低外加能量称为逸出功，用 ϕ_s 表示。物质的逸出功一般为电离能的 $1/2 \sim 1/4$ 。逸出功不仅与元素种类有关，也与物质表面状态有很大关系。表面有氧化物或其它杂质时，均可使逸出功大大降低。

阴极电子发射是引弧和维持电弧稳定燃烧的一个很重要因素。只有气体电离而阴极不发射电子，则电流微弱，这样电弧就不能形成。按其能量来源不同，可分为热电子发射、场致电子发射、光电子发射和撞击电子发射等四种形式。根据阴极所用的材料不同，其主要的发射形式也不同，有的以热电子发射为主，有的以场致电子发射为主，而光电子发射和撞击电子发射在焊接电弧中占次要地位。

1. 热电子发射 阴极表面受热后，其中某些电子具有大于逸出功的动能而逸出到表面外的空间中去的现象称为热电子发射。实验证明：当阴极表面温度达到 $2000 \sim 2500\text{K}$ 时就能产生明显的热电子发射。热电子发射在焊接电弧中起着重要的作用，它随着温度上升而增强。另外，当金属表面有氧化物及杂质时，其逸出功大大降低，故电弧焊接时，阴极表面的电子发射能力可以通过掺入某些物质或氧化物来提高。例如，钨极上含有钍或铈的氧化物时，电子发射能力在高温下能增加数千倍。

2. 场致电子发射 由于阴极表面附近有强电场存在时，在强电场作用下阴极表面的电子可以获得足够能量，克服阴极内部正电荷对它的静电吸引力而从阴极表面发射出来。这种由于在电场作用下而产生的电子发射称为场致电子发射。电场越强，场致电子发射也越强，甚至可以在室温时发生。场致电子发射在焊接电弧中也起着重要的作用，特别是在非接触式引弧或电极为低熔点材料时，其作用更明显。例如，当采用铜或铝等熔点较低的材料做阴极（称冷阴极）进行焊接时，由于受材料本身熔点的限制，阴极表面无法达到很高温度，在这种情况下其热电子发射作用较弱，主要靠场致电子发射。当采用钨、碳等熔点较高的材料做阴极（称热阴极）时，由于它们可以被加热到很高温度，表面温度可达 $4000 \sim 5000\text{K}$ ，使电子获得足够能量而进行强烈的热电子发射，这时场致电子发射就退于次要地位了。

3. 光电子发射 阴极表面接受光射线的能量而释放出自由电子的现象称为光电子发射。

4. 撞击电子发射 运动速度较高、能量大的重粒子（如正离子）撞击阴极表面，将能量传递给阴极而产生的电子发射称为撞击电子发射。

综上所述，焊接电弧的形成和维持是由于在热、光、电场和质点动能的作用下，气体原子不断地被激励、电离以及阴极电子发射的结果。显而易见，引燃焊接电弧的能量来源主要靠电场及由其产生的热、光和动能。而这个电场就是由弧焊电源提供的空载电压所产生的。

二、焊接电弧的引弧

上面讨论的气体电离和阴极电子发射是电弧燃烧的必要条件。把造成两电极间气体发生电离和阴极电子发射而引起电弧燃烧的过程称为焊接电弧的引弧（或引燃）。焊接电弧的引弧一般有两种方式：接触引弧和非接触引弧。

（一）接触引弧

弧焊电源接通后，电极（焊条或焊丝）与工件直接短路接触，随后拉起电极，使电弧引燃，这种引弧方式称为接触引弧，它是一种最常用的引弧方式。

当电极与工件短路接触时，由于电极和工件表面都不是绝对平整的，所以只是在少数凸点上接触（见图 1-2）。通过这些接触点的短路电流，比正常的焊接电流要大得多，加之接触

点的面积又小，因此电流密度极大。根据焦耳—楞次定律 ($Q=I^2Rt$)，就能产生大量的电阻热，使电极金属表面发热、熔化，甚至汽化，引起热发射和气体的热电离。随后在拉开电极的瞬间，由于电弧间隙极小，电源电压作用在此小间隙上使其电场强度达到很大数值。这样，即使在室温下亦能产生明显的场致电子发射，同时，又使已产生的带电粒子被加速、互相碰撞，引起撞击电子发射。在上述因素的作用下，电弧引燃。随着温度的增加，光电离和热电离也进一步加强，使带电粒子的数量猛增，从而能维持电弧的稳定燃烧。在电弧引燃之后，电离和复合处于平衡状态。由于弧焊电源不断供给能量，新的带电粒子不断得到补充，才能维持电弧不断燃烧。

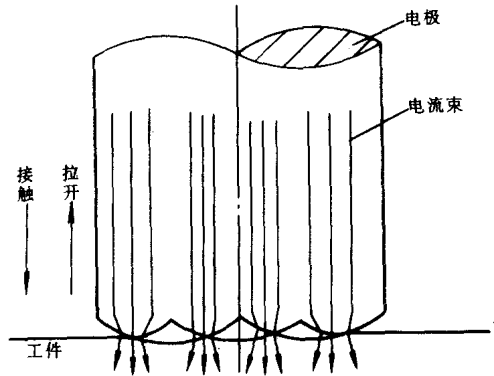


图 1-2 接触引弧示意图

焊条电弧焊和熔化极气体保护焊都采用这种引弧方式。

(二) 非接触引弧

引弧时，电极与工件之间保持一定间隙，然后在电极与工件之间施以高电压而击穿间隙使电弧引燃，这种引弧方式称为非接触引弧。

非接触引弧需要采用引弧器才能实现。根据工作原理可分为高频高压引弧和高压脉冲引弧两种，如图 1-3 所示。高频高压引弧则需要用高频振荡器，它每秒振荡 100 次，每次振荡频率为 150~260kHz，电压峰值为 2000~3000V；高压脉冲引弧的频率一般为 50 或 100Hz，电压峰值为 3000~5000V。可见，非接触引弧是一种依靠高电压使电极表面产生场致电子发射来引燃电弧的方法。这种引弧方式主要应用于钨极氩弧焊和等离子弧焊。引弧时，电极不必与工件接触，这样不仅不会污染工件上的引弧点，而且也不会损坏电极端部的几何形状，有利于电弧的稳定燃烧。

在一定介质条件下，空气隙的击穿电压与间隙大小和气体压力有关。间隙越大，所需击穿电压越高；气体压力越高，所需击穿电压越高。但是，在接近真空状态时，由于气体碰撞电离作用下降，引弧也有一定困难。

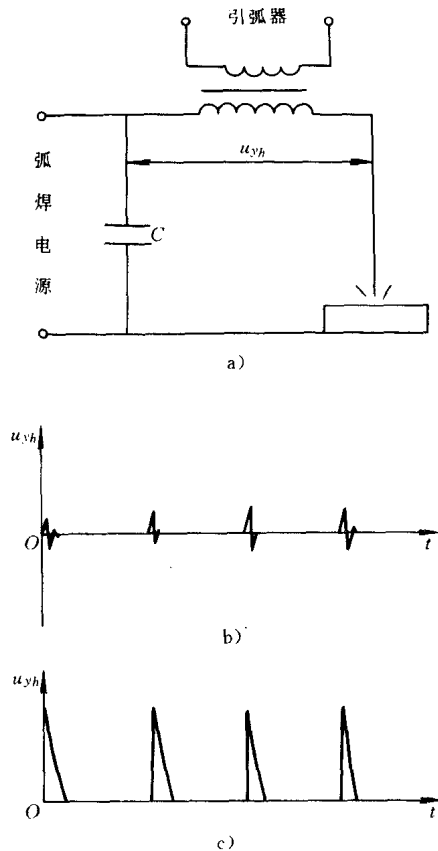


图 1-3 高频和脉冲引弧示意图

a) 引弧器接入方式 b) 高频引弧电压波形
c) 脉冲引弧电压波形 u_{yh} —引燃电压瞬时值