

● 全国电焊机行业培训教材

空气等离子弧切割机 的原理和设计

天津大学 赵家瑞
山东工业大学 李中友 编著
惠州大学 赵举东

机械工业出版社

357.75

全国电焊机行业培训教材

空气等离子弧切割机 的原理和设计

天津大学 赵家瑞
山东工业大学 李中友 编著
惠州大学 赵举东



机械工业出版社

本书系统地介绍了等离子弧产生的物理基础,空气等离子弧切割工艺特点及其对电源的要求;分别介绍了硅整流式、晶闸管整流式及逆变式空气等离子弧切割电源的原理及其设计,空气等离子弧切割割炬原理及其设计。最后一章介绍空气等离子弧切割的安全防护。附录中介绍了等离子弧切割机部颁标准及空气等离子弧切割机主要生产厂家明细表。

本书可供从事机械工程设计、生产及维修电焊机与切割机的工程技术人员使用,还可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气等离子弧切割机的原理和设计/赵家瑞等编著.

—北京:机械工业出版社,1996

全国电焊机行业情报网培训教材

ISBN 7-111-05501-2

I. 空… II. 赵… III. 等离子切割-切割设备-技术培训-教材 IV. TG483

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 23619 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:金晓玲 版式设计:冉晓华 责任校对:肖新民

封面设计:姚毅

北京市房山区印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年4月第1版·1997年4月第1次印刷

850mm×1168mm $1/32$ ·15.75印张·423千字

0 001—4000册

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

空气等离子弧切割(又称空气等离子切割)自 80 年代以来发展迅速,当前已经成为机械制造业中不可缺少的新工艺。然而迄今为止,还未见有一本系统地介绍这种新工艺及设备的专著,本书正是为了适应这个需求而编写的。

为了使读者对等离子弧的物理过程有较深入的理解,本书在第一章等离子弧的物理基础中着重从热物理和电物理相结合的角度来阐明热等离子体的特点、性质及其工程上的应用;第二章主要介绍空气等离子弧切割工艺及设备的特点;第三、四、五章分别介绍硅整流式、晶闸管整流式、逆变式空气等离子弧切割机的结构原理及其设计;第六章介绍空气等离子弧切割割炬的结构原理及其设计;第七章介绍空气等离子弧切割的安全防护,这是安全生产必备的知识。附录中还介绍了等离子弧切割机部颁标准及空气等离子弧切割机主要生产厂厂家明细表。

撰写本书时,考虑到读者的广泛性,力求深入浅出,通俗易懂,各章安排既注意了系统性,也力图保持相对的独立性,以适应读者要求不同的需要。

本书收集了国内外有关资料并结合作者十几年对等离子弧和空气等离子弧切割机的研究与生产实践编写而成。目的是想藉此书能使我国等离子弧在切割和其它应用中起到加速发展的作用。

本书由天津大学赵家瑞教授、山东工业大学李中友副教授及惠州大学赵举东博士共同负责编著。其中绪论由赵家瑞教授撰写,并负责全书统稿,第一、二、三章由李中友副教授执笔,第四、五章由赵举东博士执笔,第六、七章由天津市中环电器厂厂长高学章工程师及赵家瑞教授共同撰写,天津大学胡绳荪副教授,蔡国瑜、孙栋高级工程师柳刚博士,李义丹硕士也参加了各章部分编

写工作。

本书在撰写和出版过程中，得到成都电焊机研究所信息中心王小宝副主任全国电焊机行业情报网秘书长的大力支持，并帮助审查了本书的大纲；天津电焊机总厂齐绍荣高级工程师帮助审查了一些重要章节，提出了许多宝贵意见；复旦大学郭文康教授给本书提供了有关资料，在此一并致以衷心的感谢。

由于作者水平所限，加上撰写时间较仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳求读者批评指正。

作 者

1996.9

常用元器件专用文字符号^①

FA	风扇	VB	双向晶闸管
FU	熔断器	VD	二极管
HF	高频引弧器	VF	场效应晶体管(MOSFET)
LEM	电流传感器	VG	可关断晶闸管(GTO)
KR	热继电器	VH	晶闸管(SCR)
PDK	平衡电抗器	VI	绝缘栅双极晶体管(IGBT)
RP	电位器	VP	程控单结晶体管
RS	分流器	VS	稳压管
RV	压敏电阻器	VT	晶体管(GTR)
SF	风压开关	VU	单结晶体管
TA	互感器	VW	三端稳压管
UZ	整流器	YV	电磁气阀

^① 这些专用文字符号中,大部分符号采用 GB 7159 的规定,只有极个别的采用了行业惯用符号。——编者注

目 录

前言

常用元器件专用文字符号

绪论	1
第一章 等离子弧的物理基础	10
第一节 电弧的物理本质	10
一、气体放电的基本概念	10
二、电弧的区域组成	33
三、阴极斑点与阳极斑点	33
四、最小电压原理	38
第二节 等离子弧的特点及特性	39
一、等离子弧的特点	39
二、等离子弧的热特性	41
三、等离子弧的焰流速度	49
四、等离子弧的电特性	53
第二章 空气等离子弧切割工艺及设备	58
第一节 空气等离子弧切割基本原理	58
第二节 等离子弧切割质量	61
一、等离子弧切割质量标准	61
二、等离子弧切割质量的实验研究	66
三、等离子弧切割质量的评价	68
第三节 等离子弧切割工艺特点	69
第四节 空气等离子弧使用的工作气体和电极	72
一、工作气体的选择	72
二、电极的选择	76
第五节 空气等离子弧切割设备	80
一、设备的组成	80

二、对电源的要求及其分类	81
三、气路和水路系统	84
四、自动切割小车	88
第六节 空气等离子弧切割工艺	89
一、切割工艺参数	89
二、切割准备工作和切割程序	100
三、常见故障	102
四、双弧问题	103
五、消除切口毛刺(熔渣)问题	108
六、关于消除切口倾斜和圆角问题	110
七、大厚度切割特点	111
第三章 硅整流式空气等离子弧切割电源	113
第一节 概述	113
第二节 有电抗器型硅整流式空气等离子弧切割电源	115
一、电路原理	115
二、ZXG2-400型切割电源的主变压器	119
三、磁放大器原理及设计	140
四、三相桥式整流器及其设计	153
五、输出电抗器的设计计算	159
六、等离子弧切割机的引弧电路	162
第三节 无电抗器型硅整流式空气等离子弧切割电源	178
一、电路原理	179
二、主变压器的设计计算	183
三、举例	191
第四节 混合型硅整流式空气等离子弧切割电源	192
一、主要技术参数	192
二、电气原理	193
三、主变压器	196
四、交流电抗器	196
第五节 硅整流式空气等离子弧切割电源的维修	197
一、空气等离子弧切割机的基本构造	197
二、常见故障的处理	200

第四章 晶闸管整流式空气等离子弧切割电源	202
第一节 概述	202
第二节 晶闸管特性和参数	203
一、晶闸管及其伏安特性	203
二、晶闸管的动态特性	205
三、晶闸管的主要参数	209
第三节 晶闸管整流式空气等离子弧切割电源的工作原理	213
一、晶闸管整流式电源的结构组成及分类	213
二、晶闸管三相桥式半控整流器	215
三、晶闸管三相桥式全控整流器	219
四、带平衡电抗器双反星形晶闸管整流器	225
五、晶闸管触发电路	231
六、外特性控制	256
第四节 晶闸管整流式等离子弧切割电源电路的设计	261
一、电路形式	261
二、整流变压器的设计	261
三、晶闸管元件的选择及其保护电路的设计	267
四、平衡电抗器的设计	278
五、触发电路的设计	285
第五节 晶闸管整流式电源举例	290
一、ZX5 系列晶闸管整流式弧焊电源	290
二、PCM-150 型晶闸管整流式空气等离子弧切割电源	296
第五章 逆变式空气等离子弧切割电源	313
第一节 概述	313
一、逆变的基本概念	313
二、逆变式空气等离子弧切割电源的现状与发展	314
三、逆变式空气等离子弧切割电源的基本组成	319
四、逆变式空气等离子弧切割电源的特点	323
五、逆变式空气等离子弧切割电源的分类	324
第二节 逆变器的基本原理	326
一、晶闸管逆变器主电路	326
二、晶体管类逆变器主电路	326
三、控制电路	334

四、驱动电路	340
第三节 晶闸管逆变式空气等离子弧切割电源	343
一、电源的主要特点及其组成	344
二、晶闸管逆变器主电路	346
三、晶闸管逆变器控制电路	357
四、晶闸管逆变式空气等离子弧切割电源举例	366
第四节 晶体管逆变式空气等离子弧切割电源	379
一、并联晶体管单端逆变式	381
二、半桥串联晶体管逆变式	388
第五节 场效应管(MOSFET)和IGBT 逆变式空气 等离子弧切割电源	393
一、晶体管与场效应管性能比较	394
二、IGBT 与场效应管性能比较	395
三、MOSFET 和 IGBT 逆变式切割电源工作原理	397
四、MOSFET 逆变器的驱动电路	405
五、IGBT 逆变器的驱动电路	409
六、产品实例	415
第六节 关子逆变式空气等离子弧切割电源 的设计原则及其关键技术	422
第六章 空气等离子弧切割割炬	438
第一节 概述	438
一、国内外现状	438
二、等离子弧切割割炬的分类	439
第二节 等离子弧切割割炬的设计	451
一、设计的原始数据及基本原则	451
二、设计的步骤及方法	451
三、空气等离子弧割炬设计举例	467
四、等离子弧割炬设计中存在的问题	474
第七章 等离子弧切割的安全防护	477
一、防电击	477
二、防臭氧、氮氧化物及金属烟尘	477
三、防光辐射	481
四、防噪声	482

五、防高频电磁场	484
附录 空气等离子弧切割机主要生产厂家	485
参考文献	489

绪 论

等离子弧是自由电弧通过压缩后形成的，因此有人称它为压缩电弧。自由电弧经压缩后，导电截面变小，故等离子弧比一般电弧能量更集中，温度更高。图 0-1 是产生等离子弧的装置示意图。从图 0-1 中可知等离子弧有三种型式：

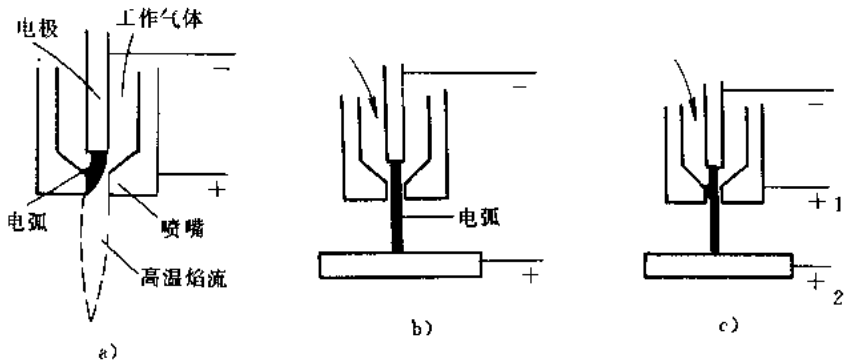


图 0-1 三种型式的等离子弧

a)非转移型 b)转移型 c)联合型

1. 非转移型(图 0-1a)

电源的正极(+)接割炬的喷嘴，负极(-)接电极，电弧燃烧于电极与喷嘴之间，连续送入的工作气体穿过电弧空间之后成为从喷嘴喷出的高温等离子焰流。这个等离子焰流可用于对导体和非导体材料进行热加工。因阳极斑点不直接作用在工件上，故又称间接弧。

2. 转移型(图 0-1b)

电源的正极(+)接在被加热的工件上，负极(-)接电极，电弧燃烧在工件与电极之间，阳极斑点落在工件上，对工件直接作用，因此也称直接弧。转移型弧在引燃时，首先需在电极与喷嘴

内壁之间由高频(或接触)引燃小弧,随即迅速通过喷嘴喷出的焰流转移到工件燃起大弧。这也是称转移型弧的来由。

转移型弧的能量更集中,温度更高,因此导电材料的切割皆采用转移型弧,而非转移型弧的能量较分散,温度较低,主要用于非金属的切割。当然,转移型弧和非转移型弧均可用于对工件的热处理、焊接、喷涂等加工。

3. 联合型(图 0-1c)

这种等离子弧是非转移型弧与转移型弧联合而成,在工作过程中,两种类型等离子弧同时存在。在微束等离子弧工作过程中,可使转移弧电流小到 0.5A 仍能保持电弧的稳定性。在粉末堆焊时,采用联合型等离子弧能提高粉末的熔化率及堆焊速度。在一般情况下,很少用于切割。

等离子弧这个名称来自等离子体(PLASMA)术语。等离子体是指电离的气体物质,它被称为物质第四态。物质存在的状态都是与一定数值的结合能相对应的。通常把固态称为第一态。此时原子(或分子)间结合能强,它们只能按照严格规律整齐地有自己固定位置排列着;当分子的平均动能超过分子在晶体中的结合能时,晶体结构就被破坏而转化成为液体,常称物质的第二态;当液体中分子平均动能超过范德瓦耳力键结合能时,液态就转变为气态,即第二态转化为第三态;当粒子的平均动能大于电离能时,在轨道上运动的束缚态的电子就能脱离原子或分子而成为自由电子,从而形成了物质第四态,即等离子体。

等离子体作为物质存在的一种独立形态,它具有以下基本特点:

(1) 导电性 由于存在自由电子和带正、负电荷的离子,因此等离子体具有很强的导电性。

(2) 电准中性 等离子体内具有很多荷电粒子,在足够小的空间和时间尺度上,粒子所带的正电荷数总是等于负电荷数,所以称之为电准中性。正因为被电离的气体中在每一个宏观区域中都呈电中性,正负带电粒子所带的电荷数量相等而符号相反,故

称等离子体。

(3) 与磁场的可作用性 由于等离子体是由荷电粒子组成的导体, 因此可用磁场控制它的位置、形状和运动。

等离子体常按不同方法进行分类。

按温度可分二类:

(1) 高温等离子体 粒子温度为 $10^6\text{K}\sim 10^8\text{K}$, 如太阳, 核聚变和激光聚变均属于高温等离子体。

(2) 低温等离子体 粒子温度为从室温到 $3\times 10^4\text{K}$ 左右, 按其重粒子温度水平还可分为两类:

1) 热等离子体, 其重粒子温度为 $3\times 10^3\text{K}\sim 5\times 10^4\text{K}$, 基本上达到热力学平衡, 具有统一的热力学温度, 本书所讨论的等离子弧属于此类。

2) 冷等离子体, 其重粒子温度只有室温左右, 而电子温度可达上万 K, 故远离热力学平衡状态, 如辉光放电即属此类。

按粒子密度分也可分为两类。

(1) 致密等离子体(或高压等离子体) 当粒子密度 $n > 10^{15}\sim 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 时, 就可称为致密等离子体, 这时粒子间的碰撞起主要作用。例如, 压力 $P = 0.1\text{MPa}$ 以上的电弧均可看作致密等离子体。

(2) 稀薄等离子体(或低压等离子体) 当粒子密度 $n < 10^{13}\sim 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 时, 粒子间碰撞基本不起作用, 这时称稀薄等离子体或低压等离子体。例如, 辉光放电就属于此类。

所谓等离子体是指气体电离度 e 达到一定程度的气体。在近代物理中, 规定电离度大于 0.1% 才称等离子体, 电离度 $\leq 0.1\%$ 为弱电离气体, 此时气体电离度很低, 电子与正离子相互作用的机会很少, 它们分布在大量的中性质点之中, 这种气体的性质和没有发生电离的气体很接近。当气体电离度大于 0.1% 时, 电子与离子间的相互作用占了统治地位, 它的性质就与中性气体大不相同了, 呈明显的电磁性能, 这种电离度高的气体才叫等离子体。因此等离子体的组成就不仅有电子与离子, 它可以包含不同比例的分 子、原子、分解产物、离子、自由电子和光子。

决定气体电离度最主要的因素是温度，其次是压力。当气体极其稀薄时，在不高的温度下就有很高电离度，宇宙空间中物质极其稀薄，所以整个宇宙绝大部分物质都处于等离子体状态。像我们生活的地球上物质主要以固、液、气三种状态存在，这只是宇宙中的个别现象。

从上所述，等离子体是一个范围很广的概念，但我们在本书中所叙述的等离子体不是这种广义的等离子体，而是由电弧放电经压缩形成的一种致密型、低温型热等离子体。

就其实质而言，普通手工焊电弧是一种自由电弧，但弧柱中气体一般电离度也在 0.1% 以上，也是等离子体。不过将自由电弧压缩后的等离子弧中气体的电离度更高，导电截面被压缩变小，能量密度更高，温度更高，焰流速度更高，加上又可通过调节工作气体种类，流量、改变喷嘴尺寸、控制电参数等方式进行调节，因此在许多场合能为人类更好地服务。

50 年代以来，热等离子体技术的应用发展很快。现在不仅应用于机械工业中的热加工如等离子弧切割、等离子弧焊接、等离子弧堆焊、等离子弧喷涂等。在冶金工业中应用热等离子体工艺直接制备各种难熔金属、金属陶瓷(氧化物、氮化物和碳化物等)的粉末和超细粉末。在该工业中用等离子体离心法进行同位素铀分离来生产浓缩铀。航天工业中应用等离子弧创造模拟高温飞行的环境。在化工工程中应用等离子弧直接合成乙炔、有机硅化合物等。从以上例子足以说明等离子弧在科学技术和国民经济中的重要地位。

等离子弧切割最早是 1955 年美国林德(Lirde)公司开始应用于铝合金的切割。此后，英、德、日、前苏联等国家相继研制成功，并应用于不锈钢、铝、铜及其合金等多种材料的切割。初期等离子弧切割工作气体主要采用氩气(Ar)。氩气是惰性气体，对切口具有良好的高温保护作用，可防止切口表面金属氧化或氮化，但氩气的携热性和热导率较低，对等离子弧的热压缩效应较差，弧柱的挺直度和气流的冲刷力较弱，弧短，且氩气的价格昂贵，因

此，若以氩气作为等离子弧切割的工作气体，其切割效果和经济指标均不高。

60年代，等离子弧切割用的工作气体种类有了新的开发，氮(N_2)气和氮(N_2)-氢(H_2)、氩(Ar)组成多元混合气体比纯氩切割效果和经济性都提高了。因为 N_2 、 H_2 都是双原子气体，分解时吸热，因此它们的携热性好，特别是 N_2 的导热性好，其热导率是氩的10倍。 H_2 以20%~35%的比例加入到 N_2 或Ar中可明显提高等离子弧切割的效果。例如，美国曾用Ar+ H_2 作为等离子弧切割的工作气体，成功地切割了200mm厚的不锈钢板。又以 N_2 + H_2 作为工作气体，切割170mm厚的铸铁和100mm厚的铜板。为了加强等离子弧的压缩效应，提高工作介质的携热性，在60年代后期，英国曾开发一种水与上述气体并用的等离子弧切割机，也获得好的切割效果。

空气等离子弧切割是利用空气作为工作气体的，这是60年代后期首先由前民主德国的门斯菲尔德(Mansfield)公司研制出PA系列空气等离子弧切割机。由于空气中除 N_2 外还有21%左右的氧气，因此用空气作为工作气体，除对电源、割炬作了改进外，最主要的是还要克服氧对电极的高温氧化问题，用钨作电极氧化烧损太严重，后来发现锆、铈作电极，由于它表面氧化后产生一层耐高温氧化的氧化物能保护里面金属不被烧损，这样才实现了空气等离子弧切割。与此同时，由于电极的氧化问题得到一定程度抑制，为了进一步提高切割速度和质量，人们又提出用氧作为工作气体，由于氧与铁氧化放出化学热，这对切割碳素钢确实获得好的效果。70年代中期，日本曾在焊切设备国际博览会上展出氧等离子弧切割自动化专用机，适于大量切割普通碳素钢用，切割速度快，且切口无渗氮问题，切口质量好，但电极烧损要比空气等离子弧切割严重，而空气不仅更廉价又易于获取，因此在大多数场合，人们还是选用空气等离子弧切割，氧等离子弧切割目前仍限于在少数场合使用。70年代后期，空气等离子弧切割已在许多国家如美、英、法、德、前苏联、日本等得到推广。主要是因

为这种切割方法经济、方便，设备简单，并且不仅能切割铝、不锈钢、铜等，而且切割的碳素钢质量也能保证。

80年代以来，小型空气等离子切割机发展迅速，特别是30A~100A空气等离子切割机几乎遍地开花，大有取代氧乙炔火焰切割的趋势，这主要是因为这类切割机使用方便、投资少，效率高，又能适应各种金属和不同厚度的切割，安全节能，经济实惠，深受用户欢迎。据统计，仅日本在1986年小型空气等离子切割机总生产量达2万台，规格型号达数十种，生产厂家(或公司)达数十家。与此同时，欧美各国也大量投产，如美国的林肯(Lincoln)、米勒(Miller)、宝固(Palco)、海宝(Hyper Therm)；德国的梅萨·格里斯海姆(Messer Griesheim)、门斯菲尔德(Mansfield)；英国的林德(Linde)；芬兰的卡比(Kemppi)；瑞典的伊萨(ESAB)；法国的沙富(Saf)；奥地利的佛罗尼斯(Fronius)等公司都生产各种小型空气等离子弧切割机。

我国自1984年在九江展出国产第一台小型空气等离子弧切割机以来，也发展迅速，现在全国有数十家工厂生产这种切割机，如天津中环电器厂、常州泛洋电器设备公司、减墅堰机车车辆工艺研究所、核工业部第六研究所机电设备总厂、中科院等离子物理研究所等单位都以生产中、小型等离子弧切割机为主，少量生产大型等离子弧切割机。还有许多生产空气等离子割炬和喷嘴等辅助设备和器件的专业厂家。对等离子弧技术的开发研究的学术团体有中国焊接学会第1专业委员会(其中第1B分委员会专门研究等离子弧切割)、天津市等离子技术研究协会、合肥中科院等离子物理研究所等。有的公司或厂家也专门设立自己的研究机构，例如天津中环电器厂组织一批技术力量专门从事割炬的研究，研究出无高频自由喷嘴接触引弧割炬，获国家专利，该新型割炬引弧可靠，操作简便，由于不用高频引弧器，也使切割机简化，既降低了成本，也提高了整机可靠性，深受用户好评。近年来我国在大型空气等离子弧切割割炬方面也有一些研究成果。例如常州泛洋电器设备公司研制出G 200~400D、G 200~600D空气等离子