



国家出版基金资助项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

广东省重点出版物扶持项目



学术前沿研究文库
Library for the Frontier of Academic Research

高效电弧

等离子体技术及其应用

王振民 等◎著

*High Efficiency
Arc Plasma Technology
and It's Application*



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目



学术前沿研究文库
Library for the Frontier of Academic Research

高效电弧

等离子体技术及其应用

王振民 等◎著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

内容简介

本书以电弧等离子体能量的可靠增强、高效变换以及精确控制为目标,以大功率逆变式等离子体电源为核心,较系统地阐述了大功率高效电弧等离子体系统的组成结构、工作原理,以及具体的实现方法、优化措施和应用情况。主要内容包括:电弧等离子体的特点、产生方法、工作方式等基础知识;电弧等离子体发生器的分类、基本工作原理、结构及特点;直流大功率电弧等离子体电源能量的高效变换技术;大功率变极性等离子体电源能量的高效变换技术;等离子体能量的精密数字功率转换技术;电弧等离子体电源系统功率增强方法;强等离子体能量可靠传递优化设计方法;电弧等离子体工艺过程的数字化管理;高效电弧等离子体技术在工业固废处理、核废料清洁处理、清洁点火、煤化工、焊接、切割、增材制造、喷涂、镀膜等领域的应用等。

本书可以作为高等院校机械工程、焊接工程、工程热物理等专业高年级学生及研究生的参考用书,也可以供从事等离子加工、特种电源、资源环保等方面研究的广大科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高效电弧等离子体技术及其应用/王振民等著. —广州:华南理工大学出版社, 2018. 4

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5390 - 4

I. ①高… II. ①王… III. ①电弧 - 等离子体 - 研究 IV. ①O461
②O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 210294 号

高效电弧等离子体技术及其应用

王振民等 著

出版人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

策划编辑: 潘宜玲

责任编辑: 刘 锋 詹志青

印刷者: 广州市天河穗源印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 19.75 字数: 430 千

版 次: 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

序一

等离子体技术具有清洁、环保、高效等特点，得到工业发达国家的高度重视，国内也正在逐步推广应用。大功率电弧等离子体系统一般长时间工作在高压大电流的严酷工艺环境下。为确保系统的可靠性，目前普遍采用效率较低、动态性能较差、体积庞大的传统整流式电弧等离子体系统，长期应用成本很高，大大限制了它的推广应用。要实现电弧等离子体技术的多种应用和全面推广，可靠性好、效率高、控制性能好的大功率等离子体电源是关键。目前，大功率等离子体电源的研制已经成为国内等离子体系统应用开发的瓶颈。然而，国内外在如何提高电弧等离子体技术的能效方面还缺乏系统的文献资料。

华南理工大学焊接电源课题组通过对多项关键核心技术的创新研究和有机集成，较好地解决了在电弧等离子体功率进一步增强情况下强能量的可靠传递和高效利用难题。课题组还将高效电弧等离子体技术推广应用于包括高性能机械加工、固体废弃物资源化处理、燃煤电站点火、增材制造等行业领域，开发了相关的工艺技术与装备，取得了较好的应用效果。本书就是这些研究内容和成果的结晶，充分体现了该课题组在大功率高性能特种逆变电源学科方向的研究特色。该书的主要作者是华南理工大学焊接电源课题组的骨干，他们长期工作在科研与生产的第一线，积累了较丰富的技术研发和工程应用的经验。

该书相关内容不仅能够为研发高效低耗、高性能、高可靠的大功率等离子体系统提供理论和技术支撑，对推动这一清洁环保生产技术在我国固体废弃物处理、火电站锅炉点火与助燃、冶炼、煤的汽化活化、机械加工等领域的广泛应用均具有积极的促进作用和重要意义，也能够为其他领域或者行业提供借鉴和参考，具有较高的工程应用价值。



2017年3月

序二

电弧等离子体具有温度高、能流密度高、化学活性高、可控性好等特点。部分工业发达国家已采用等离子体技术代替传统的工艺技术进行火电站锅炉点火与助燃、金属冶炼、固体垃圾以及危险废物的资源化处理、煤的清洁化、海水净化、船舶燃气轮机点火、机械加工等，而如何实现大功率电弧等离子体系统功率的可靠增强和能量的高效精确变换是大功率等离子体技术推广应用的关键所在。要实现电弧等离子体技术的多种应用和全面推广，可靠性好、效率高、控制性能好的大功率等离子体电源是关键。目前，大功率等离子体电源的研制已经成为国内等离子体系统应用开发的瓶颈。国内外在如何提高电弧等离子体技术的能效方面还缺乏系统的文献资料。本书以电弧等离子体能量的可靠增强、高效变换以及精确控制为目标，以大功率逆变式等离子体电源为核心，较系统地阐述了大功率高效等离子体系统的组成结构、工作原理，以及具体的实现方法、优化措施和应用情况。

本书充分吸收了华南理工大学焊接电源课题组多年来的研究成果和丰富积累，展现了华南理工大学在国内一直处于领先水平的大功率高性能焊接电源学科方向的学术特色和最新研究进展，具有很高的学术价值。本书主要作者是华南理工大学焊接电源课题组的骨干，长期工作在科研与生产的第一线，在大功率等离子体技术及装备方面取得了丰硕成果，充分体现了华南理工大学在大功率特种逆变电源学科的研究特色。本书内容能够为研发高效低耗、稳定可靠的高性能大功率等离子体系统提供理论和技术支撑，具有实际应用价值，值得推荐。

潘际琨

2017年7月12日

前 言

在高性能制造加工（焊接、切割、喷涂、刨削）、固废处理、危险废物处理、煤化工、燃煤点火等方面，电弧等离子体技术比传统工艺技术具有明显优势，得到了工业发达国家的高度重视。大功率电弧等离子体系统一般长时间工作于高压、大电流、强功率、强干扰甚至频繁高空载—短路等严酷工艺环境下。如何实现大功率电弧等离子体系统功率的可靠增强、能量的高效变换以及输出特性的精确调控已成为大功率电弧等离子体清洁生产技术推广应用的主要瓶颈所在。

近十多年来，笔者在国家自然科学基金项目（No. 50805051、51375173）、广东省应用型科技研发专项（No. 2016B090927008）、中央高校基本科研业务费培育项目（No. 2015ZP039）、广东省公益研究与能力建设重点项目（No. 2014B010104002）、广东省协同创新平台计划（No. 2014B090901030）、广东省工业攻关计划（No. 2013B010402007、2008B010400041）、广东省数控一代机械产品创新应用示范工程专项资金项目（No. 2013B011302006）、广东省战略性新兴产业计划项目（No. 2012A032300007）、省部产学研项目（No. 2011B090400081、2012B091000009、2017B090901023）等一系列课题的持续支持下，对大功率/特大功率电弧等离子体系统的关键技术进行了较深入的研究，重点在于等离子工艺过程高压、大电流、强功率、长负载持续率、强干扰等复杂严酷工况下的能量高效变换、可靠传递与控制技术，主要包括新型大功率软开关技术、波形变换技术、全数字控制技术、仿生控制技术、协同控制、新一代宽禁带功率器件应用技术、大功率高频驱动与低频调制技术、磁约束驱动技术等，通过集成创新研制出系列节能省材、稳定可靠、体积小巧、

控制精确和可扩展性好的大功率电弧等离子体清洁加工系统，并在焊接、切割、增材制造、固废资源化处理等领域进行推广应用。本书就是这些研究内容和成果系统整理后的结晶。笔者觉得非常有必要撰写出来与大家共享，希望能够进一步推动和促进高效大功率电弧等离子体清洁生产技术的进步和发展。

本书共分9章。第1章简要介绍电弧等离子体基础知识，包括电弧等离子体的产生方法、特点、工作形式以及相应的发展现状与趋势；第2章主要介绍电弧等离子体发生器，包括约束型、再约束型以及自由电弧等离子体发生器的基本原理、结构及特点；第3章着重介绍直流大功率电弧等离子体能量的高效变换技术，包括大功率等离子体电源存在的问题与解决对策、全桥硬开关技术、移相零电压软开关换流技术、零电压零电流软开关换流技术等，并进行了相应的仿真和实验研究；第4章重点介绍大功率变极性等离子体电源能量的高效变换技术，分析双逆变结构变极性电源的基本工作原理、稳弧措施、关键器件的设计与选型计算，并进行了仿真建模与实验测试；第5章主要介绍等离子体能量的精密数字功率转换技术，主要包括数字功率转换的基本概念与原理、数字化控制系统的基本结构及其功能、人机交互的数字化及其实现方法；第6章介绍电弧等离子体电源系统功率增强方法，主要阐述基于仿生学原理的能量传递可靠性机制，分析基于CAN总线网络的多功率模块数字协同方法，介绍基本的并联均流策略和智能冗余策略；第7章介绍强等离子体能量可靠传递的优化设计，主要从控制策略、主电路偏磁校正、核心功率器件的驱动保护、软硬件抗干扰措施、热设计方法以及新一代功率器件的

应用等方面阐述提高强等离子体能量传递效率和可靠性的措施与方法；第8章介绍电弧等离子体工艺过程的数字化管理，简要阐述电弧等离子体系统的数字化集成方法、综合管理系统的开发以及相应数据的采集、分析和综合管理；第9章主要介绍高效电弧等离子体技术的应用，包括工业固废处理、核废料清洁处理、清洁点火、煤化工应用、焊接、切割、增材制造、喷涂、镀膜等。

本书总结了笔者所在课题组十多年来在大功率高效电弧等离子体技术及装备方面的科研工作与成果。全书内容与结构由王振民规划和统稿，并编写全书主要内容，吴祥森编写第3章的部分内容，张芩编写第5、第8章的部分内容，广东省焊接技术研究所（广东省中乌研究院）的郭春富编写第1、第2章的部分内容，广东省智能制造研究所的刘晓光编写第3、第9章的部分内容。在实验室从事研究和学习工作的研究生白中启、李晋、霍明、叶慧、刘应满、罗伟伟、何淼磊、张栋、潘成熔、阙福恒、唐少杰、余欣仁、方小鑫、张新、郭文龙、何东炜、冯允樑、冯锐杰、李孟、王鹏飞、汪倩、朱磊、谢芳祥、蒋春、范文艳、张福彪、韦俊好、韩雷刚等以及本科生王宏辉、覃展斌、张亚、曾兴祥、徐德祥、何鑫、王志永、于文海等为相关课题研究做了大量具体工作。在本书的编写过程中参考了大量国内外学者的学术著作和研究成果，也得到了不少单位和个人的大力支持与帮助。清华大学的潘际銮院士、天津大学的罗震教授和华南理工大学的黄石生教授为本书的撰写提供了大力支持，其中潘院士和黄教授还在百忙之中抽空为本书作序。在笔者访美期间，美国宾夕法尼亚州立大学材料系 T. DebRoy 教授为本书的最终完稿也给予了大

力支持。在编写过程中还得到了时任华南理工大学出版社潘宜玲副总编辑的大力支持。在此一并表示感谢！

由于本书涉及的是一个快速发展的研究领域，因此各个章节的论述都还很不全面和深入；加之作者水平有限，书中恐有疏漏，敬请广大读者给予批评指正。

王振民
2017 年 2 月

目 录

1	电弧等离子体基础知识	1
1.1	电弧等离子体的产生	1
1.2	电弧等离子体的特点	3
1.3	电弧等离子体的工作形式	6
1.4	电弧等离子体特性	7
1.5	电弧等离子体系统及其现状	8
1.5.1	电弧等离子体系统的构成	8
1.5.2	电弧等离子体系统的现状及发展趋势	10
2	电弧等离子体发生器	12
2.1	约束型电弧等离子体发生器	12
2.1.1	约束型电弧等离子体发生器的特点	12
2.1.2	约束型等离子体发生器的设计要求	13
2.1.3	电弧等离子体发生器的基本结构形式	14
2.2	再约束型电弧等离子体发生器	20
2.2.1	机械约束	21
2.2.2	气体再约束	21
2.2.3	水再约束	21
2.2.4	磁场再约束	23
2.3	自由电弧等离子体发生器	28
3	直流等离子体电源能量的高效变换技术	30
3.1	等离子体电源的分类及其发展	30
3.1.1	等离子体电源的分类	30
3.1.2	等离子体电源的发展	31
3.2	主电路拓扑结构的选择	32
3.3	全桥硬开关逆变式等离子体电源	34
3.3.1	硬开关换流原理	34
3.3.2	驱动波形测试	35

3.3.3	主变压器二次侧波形测试	36
3.3.4	主变压器一次侧电流波形测试	36
3.3.5	快恢复整流电压波形测试	37
3.3.6	IGBT 电流及电压波形	38
3.4	全桥软开关等离子体电源技术	38
3.4.1	全桥软开关技术的发展	39
3.4.2	移相全桥软开关逆变拓扑结构分析	41
3.5	改进型的移相零电压软开关电路	45
3.5.1	软开关换流原理及过程	45
3.5.2	系统仿真研究	50
3.5.3	基于饱和电感阻断的 ZVS 软开关电路特点	53
3.5.4	谐振换流参数的设计	55
3.5.5	实验研究及分析	58
3.6	ZVZCS 软开关变换技术	64
3.6.1	软开关换流过程	64
3.6.2	实现 ZVS 和 ZCS 的条件及策略	67
3.6.3	仿真研究和功率实验分析	68
3.7	软开关与硬开关电源的比较	70
4	大功率变极性等离子体电源能量的高效变换技术	72
4.1	变极性拓扑基本结构及原理	72
4.1.1	变极性电源的结构组成	73
4.1.2	变极性电源工作原理分析	75
4.1.3	电流换向过程高压稳弧原理	77
4.2	关键部件参数设计与选型	78
4.2.1	工频整流桥的选择	78
4.2.2	输入滤波电容的选择	78
4.2.3	功率开关管 IGBT 的选择	79
4.2.4	功率变压器的设计	80
4.2.5	谐振电感的设计	82
4.2.6	快速整流二极管的选择	83
4.2.7	输出滤波电感的设计	83
4.2.8	后级逆变桥 IGBT 的选择	83
4.2.9	尖峰抑制吸收电路的设计	84

4.3	系统仿真及结果分析	85
4.3.1	仿真环境及仿真电路原理	85
4.3.2	前级逆变电路的仿真	86
4.3.3	后级逆变电路的仿真	88
4.4	实验研究及验证	90
4.4.1	双逆变桥驱动波形	90
4.4.2	主变压器波形测试	92
4.4.3	前级逆变桥开关波形	93
4.4.4	后级逆变桥输出波形	95
4.4.5	实际工艺过程波形	97
5	等离子体能量的精密数字功率转换技术	98
5.1	数字功率转换基础	98
5.2	数字化控制系统的结构与功能	99
5.2.1	DSC 控制器及其最小系统	101
5.2.2	JTAG 调试电路	103
5.2.3	外围电路供电电源	103
5.2.4	IGBT 驱动电路	104
5.2.5	一次侧过流保护电路	104
5.2.6	电流电压反馈电路	106
5.2.7	DA 光耦隔离与放大电路	107
5.2.8	系统故障检测与保护电路	109
5.2.9	通信接口电路	110
5.2.10	I/O 接口电路	111
5.3	人机交互的数字化	111
5.3.1	数字化面板	112
5.3.2	可视化人机交互系统	115
5.4	数字化控制软件的设计	120
5.4.1	Keil 软件开发工具	120
5.4.2	FreeRTOS 实时内核	122
5.4.3	任务设计及管理	123
5.4.4	数字 PWM 的产生	129
5.4.5	数字调节规律	134
5.5	电源性能测试	139

5.5.1	静特性测试	139
5.5.2	动特性测试	140
5.5.3	能效测试	141
6	电弧等离子体电源系统功率增强方法	143
6.1	基于仿生学的电源系统优化方法	143
6.1.1	人体系统的可靠性机制	143
6.1.2	电弧等离子体电源仿生优化的实践	144
6.2	多智能节点型功率模块的数字化协同	147
6.2.1	数字协同网络的选择	147
6.2.2	CAN 协同网络的延时问题	150
6.2.3	CAN 网络协同程序设计	152
6.2.4	CAN 网络协同控制实验	153
6.3	并联均流策略	154
6.3.1	常用均流方法工作原理	154
6.3.2	数字均流策略	157
6.3.3	实际均流效果	158
6.4	智能冗余策略	158
6.4.1	智能冗余的实现方法	158
6.4.2	智能冗余效果测试	161
7	强等离子体能量传递可靠性优化设计	163
7.1	双闭环控制策略	163
7.1.1	电流模式反馈控制	163
7.1.2	平均电流-峰值电流双闭环控制	164
7.1.3	双电流闭环控制的特征	171
7.1.4	峰值电流控制电路设计的关键问题	173
7.2	功率变压器的偏磁校正	176
7.2.1	变压器偏磁过程分析	176
7.2.2	隔直电容的偏磁抑制作用	177
7.2.3	双闭环控制的偏磁调节作用	177
7.3	驱动可靠性设计	178
7.3.1	高频驱动要求	178
7.3.2	脉冲变压器驱动电路	179
7.3.3	基于非神经超前反馈与保护的高频驱动技术	179

7.3.4	新型驱动器驱动实验	185
7.4	系统抗干扰措施	191
7.4.1	干扰源分析	191
7.4.2	硬件抗干扰措施	193
7.4.3	软件抗干扰措施	193
7.4.4	具体抗干扰措施实例	194
7.5	逆变器的热设计	196
7.5.1	IGBT 功耗和散热设计	196
7.5.2	功率变压器的热设计	198
7.5.3	过热保护	199
7.6	新一代宽禁带器件对等离子体系统综合性能的提升	199
7.6.1	WBG 半导体材料的特点	200
7.6.2	WBG 功率器件对等离子体逆变器性能的提升	201
7.6.3	基于 WBG 功率器件的新一代等离子体逆变器	203
8	电弧等离子体工艺过程的数字化管理	209
8.1	电弧等离子体系统的数字化集成	209
8.1.1	电弧等离子体系统的结构及功能	209
8.1.2	综合管理系统的构成	210
8.2	综合管理系统界面开发	212
8.2.1	MATLAB 与 VB 混合编程的实现方法	212
8.2.2	通信界面的设计	213
8.2.3	波形显示模块的设计	215
8.2.4	综合管理系统的通信接口及波特率的选择	217
8.2.5	通信界面任务的设计	217
8.2.6	联机实验	218
8.3	数据采集、处理及分析	220
8.3.1	数据采集与数字化处理	220
8.3.2	数据的分析方法	221
8.3.3	小波变换分析技术	223
8.3.4	数据采集及处理流程	225
8.4	图像与电信号的多信息协同感知与分析	226
9	高效电弧等离子体技术的应用	231
9.1	工业固废等离子体清洁处理技术	231

9.1.1	电子废弃物的等离子体资源化处理	231
9.1.2	工业固废的等离子体减量化、清洁化处理	235
9.1.3	危险固体废弃物的等离子体清洁处理	235
9.2	核废料等离子体清洁处理技术	237
9.2.1	等离子体离心处理系统	237
9.2.2	等离子体气化熔融废物处理技术	238
9.2.3	等离子体减容设备	238
9.2.4	废树脂等离子体处理技术	239
9.3	电弧等离子体清洁点火技术	240
9.3.1	等离子体无油点火技术	240
9.3.2	等离子体点火技术在发动机点火中的应用	245
9.4	煤化工中的等离子体清洁生产技术	245
9.4.1	热等离子体裂解煤制乙炔技术	246
9.4.2	等离子体煤气化制合成气技术	246
9.4.3	等离子法合成碳纳米管技术	247
9.4.4	等离子裂解煤制炭黑技术	247
9.5	高性能等离子弧切割技术	247
9.5.1	等离子弧切割特点	247
9.5.2	等离子弧切割分类及其应用	249
9.5.3	中厚板等离子弧切割设备及工艺	250
9.5.4	磁再约束等离子弧精细切割	265
9.6	等离子弧焊接	278
9.6.1	通用等离子弧焊接方法	278
9.6.2	等离子-复合热源焊接	280
9.6.3	机器人 VPPA 等离子弧焊接	282
9.6.4	等离子弧焊接的不足及缺陷	283
9.6.5	等离子弧焊接的应用范围	284
9.7	等离子弧增材制造	284
9.7.1	丝材熔积等离子弧增材制造原理	285
9.7.2	等离子弧增材制造的进展及问题	286
9.8	等离子弧喷涂	288
9.9	等离子体镀膜	289
参考文献		291

1 电弧等离子体基础知识

电弧等离子体是电弧的一种特殊形式，它具有温度高、能流密度高、化学活性高和可控性好等特点，在高性能制造加工(焊接、切割、喷涂、刨削、增材制造)、固废资源化处理、煤的清洁化处理、火电站燃煤点火等方面具有广阔的应用前景。

1.1 电弧等离子体的产生

通常把由电子、正离子、负离子、中性的分子或原子所组成的且其中粒子的正电荷与负电荷的总数相等的集合体称为等离子体。等离子体是由克鲁克斯在 1879 年发现的，1928 年美国科学家欧文·朗缪尔和汤克斯首次将“等离子体”(plasma)一词引入物理学，用来描述气体放电管里的物质形态。等离子体由于存在自由电子和其他带电粒子而具有一系列新的区别于固、液、气态的特征，作为物质的一种独立形态而存在，因此又把等离子体称为物质的第四态，也被称为等离子态、超气态或电浆体。

通常根据等离子体中电子温度和离子温度是否相等，可将等离子体分为高温等离子体和低温等离子体。两者温度相等称为高温等离子体；不相等则称为低温等离子体。高温等离子体主要用于核聚变领域，低温等离子体则广泛应用于各种生产领域。低温等离子体又分为热等离子体和冷等离子体。热等离子体的温度一般为 $10^3 \sim 10^5 \text{K}$ ，电弧放电等离子体就属于典型的热等离子体。目前，产生等离子体的方法主要有三大类：①热致电离，即用加热的办法使气体电离，而要使气体完全电离，一般要加热到几万华氏度以上；②光辐射电离，即用光辐射的能量使气体电离，这只有在非常稀薄的气体内才有意义；③放电电离或场致电离，即在电场作用下用气体放电的办法产生等离子体，这也是工业中和实验室中产生等离子体的常用方法。

电弧是中性气体电离并维持放电现象，是放电电离的典型例子。电弧等离子体则是电弧的一种特殊形式。普通的电弧是由一定数量的导电离子和不同比例的中性粒子所组成的混合体，通常称为自由电弧。自由电弧的弧柱截面随功率的增加而增大，电弧中的气体电离不充分。若在提高电弧功率的同时，对自由电弧进行压缩，使其横截面减小，则电弧中的电流密度大大提高，电离度也随之增大。如果气体充分电离，几乎达到全部等离子状态，形成由数量相等的带正电的正离子和带负电的

电子所组成的电离气体，就称为电弧等离子体(arc plasma)。

通过实验研究发现，在任何一种焊接电弧中，都存在温度超过3000℃的等离子体区域，但在自由电弧中，这一区域尺寸很小，且紧靠阴极。利用电弧等离子发生器(焊枪或喷枪)在阴极和水冷紫铜喷嘴之间或阴极和工件之间，使气体电离形成电弧。此电弧通过孔径较小的喷嘴孔道，直径受到限制，使弧柱受到强行压缩，如图1-1所示。与自由电弧相比，电弧被压缩后，会产生很大的变化，突出的特点是弧柱直径变细，从而促使弧柱的电流密度得到显著的提高。流经喷嘴孔道的气体，受到剧烈的碰撞和热作用，使气体充分电离，产生正负离子相等、电离度高达80%~100%的等离子体弧柱，从而产生了电弧等离子体。

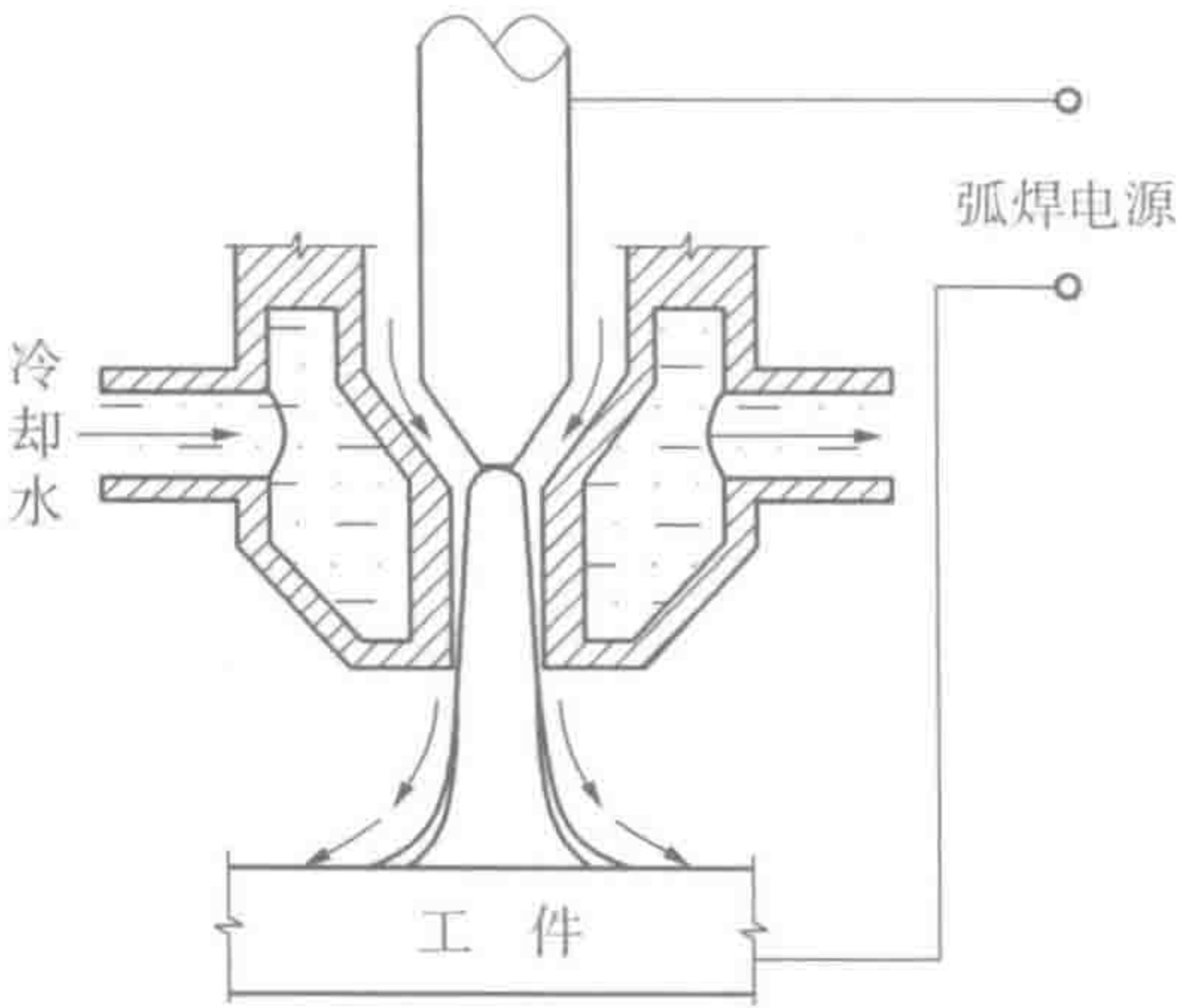


图1-1 压缩电弧示意图

- 对自由电弧进行的压缩作用称为压缩效应，主要有以下三种形式：
- (1)机械压缩效应，也称为“壁压缩”效应。当弧柱电流增大时，一般电弧的横断面也会随之增大，使其能量密度和温度难以进一步提高。如果在负极和正极之间加上一个高电压，使气体电离形成电弧，当弧柱区通过特殊孔型的喷嘴时，又施以一定压力的气体，强迫弧柱通过细孔。由于弧柱受到孔道尺寸的限制，无法任意地扩展，通过喷嘴孔道的弧柱横截面面积缩小，能量密度得到提高。这种利用机械压缩方式限制弧柱直径以提高能量密度的效应就称为机械压缩效应。
 - (2)热收缩效应。可以采用气流或者水流对电弧进行压缩。当电弧通过喷嘴时，在电弧的外围不断送入高速冷却气流，使弧柱区外围受到强烈冷却，电离度大大降低，迫使带电粒子进一步向电离度较高的弧柱中心移动，导致导电截面进一步缩小，使得电弧的电流密度大大增加，从喷嘴中流过的等离子体具有更大的径向温度梯度，电弧得到压缩。利用气流对电弧进行压缩的热收缩效应会受到气体种类和压力的影响。当然，也可以直接采用水流对电弧进行压缩，相比气流压缩的热收缩的效应更为明显，可以得到更高温度和能流密度的等离子弧。目前，利用大功率水稳电弧，可以得到温度高达50000 K的高能流密度的电弧。这种利用气流或者水流的冷却作用使电弧得到压缩的效应就是热收缩效应。
 - (3)磁收缩效应。这种收缩效应来自于弧柱自身的磁场。由于电流方向相同，在电流自身产生的电磁力作用下，彼此互相吸引，将产生一个从弧柱四周向中心压