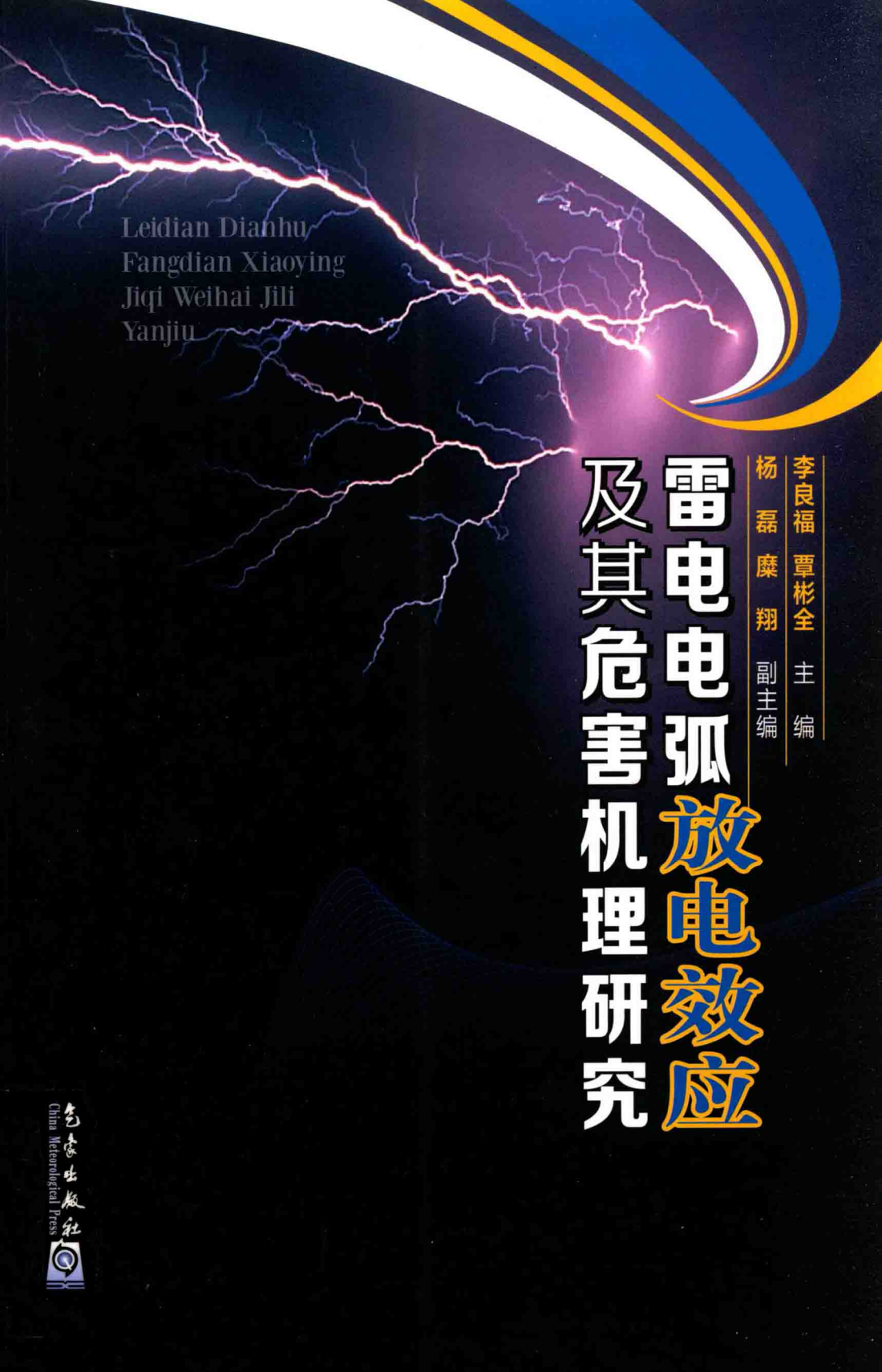




Leidian Dianhu  
Fangdian Xiaoying  
Jiqi Weihai Jili  
Yanjiu

# 雷电电弧放电效应 及其危害机理研究

李良福 覃彬全 主编  
杨磊 糜翔 副主编



项目

——“重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心(CSTC2013PT-GC00001)”资助

公益性行业(气象)科研专项

——“闪电活动特征及其在灾害天气预警中的应用方法研究(GYHY201006005-05)”资助

——“地基高精度总闪电探测系统和定位算法研究(GYHY201306069-03)”资助

# 雷电弧放电效应及其 危害机理研究

李良福 覃彬全 主 编

杨 磊 糜 翔 副主编

李良福 覃彬全 杨 磊 糜 翔 著  
刘青松 陈 宏 李家启 李 路



气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

作者根据重庆市科技平台与基地建设项目(CSTC2013PT-GC00001)和公益性行业(气象)科研专项(GY-HY201006005-05、GYHY201306069-03)资助的雷电电弧放电效应及其危害机理的研究成果和国家标准《桥梁工程防雷技术规范》研究与制定的科研成果,结合重庆市雷电灾害调查鉴定和雷电防护技术的具体实践经验,并参考国内外有关雷电监测、雷电物理、大气物理、大气电学、土壤电学、气体放电、高电压实验、混凝土结构耐久性、腐蚀电化学、金属腐蚀、钢筋锈蚀、钢结构技术、钢结构事故分析、OPGW 雷击试验及其防雷技术、金属学与热处理、金相分析、焊接冶金原理、电弧焊、电弧放电和雷电电弧放电等方面资料编著而成。全书共分六章二十五节,对电弧放电与雷电电弧放电的基本概念及其差异、雷电电弧放电的自然现象和产生方式及其形成机理、雷电电弧放电的锈蚀效应、雷电电弧放电的弧坑效应、雷电电弧放电的气孔效应、雷电电弧放电的裂纹效应、雷电电弧放电的一般电弧侵蚀危害机理、雷电电弧放电的应力电弧侵蚀危害机理、雷电电弧放电的疲劳电弧侵蚀危害机理,以及雷电电弧放电对缆索承重桥的缆索防雷影响与危害及其防御技术等方面进行了详细论述。可供从事雷电防护理论研究的科研人员和建(构)筑物防雷工程设计、施工、检测、验收以及建(构)筑物防雷设施维护与管理的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

雷电电弧放电效应及其危害机理研究/李良福,覃彬全主编.

北京:气象出版社,2014.4

ISBN 978-7-5029-5899-2

I. ①雷… II. ①李… ②覃… III. ①雷-放电-电弧-危害性-研究 IV. ①P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 045360 号

---

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:吴晓鹏 杨柳妮

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:700 mm×1000 mm 1/16

字 数:330 千字

版 次:2014 年 4 月第 1 版

定 价:50.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@cmp.cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cmp.cma.gov.cn)

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:17.5

印 次:2014 年 4 月第 1 次印刷



## 作者简介

**李良福**，博士、教授级高工，国家级注册安全工程师，成都信息工程学院兼职教授、硕士生导师；重庆市气象局副局长，重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心主任，全国雷电标准化技术委员会副主任委员，全国雷电灾害防御行业防护标准化技术委员会副主任委员，中国气象学会雷电委员会副主任委员，IEC/TC81/雷电防护系统构成部件标准化工作组中国专家；主要从事雷电防护、安全气象、土壤电学等方面研究工作和气象事业发展规划研究；主持完成了9项省部级科研课题，编著了《防雷新技术——消雷工程》、《计算机场地安全系统工程》、《计算机网络防雷技术》、《区县气象事业“四个一流”建设的思考与实践》、《拓展气象事业防雷减灾新领域的实践》、《森林雷电防护研究》、《气象信息与安全生产》、《易燃易爆场所防雷抗静电安全检测技术》、《雷电防护关键技术研究》、《土壤电学》等15部专著；主持制定了《自动气象站场室防雷技术规范》（QX30-2004）、《建筑防雷设计评价技术规范》（DB50/217-2006）、《建筑防雷施工质量控制与验收规程》（DBJ50-060-2006）、《跨座式单轨交通防雷技术规范》（DBJ/T 50-092-2009）、《应急抢险救援防雷安全技术规范》（DB50/333-2009）、《接地降阻剂》（QX/T 104-2009）、《气象灾害敏感单位安全气象保障技术规范》（DB50/368-2010）等16个标准；获得专利4个；发表了论文76篇，其中SCI、EI论文5篇；曾获重庆市科技进步三等奖、重庆市软科学成果二等奖、首届全国气象软科学二等奖、首届邹竞蒙气象科技人才奖，并获得全国优秀青年气象科技工作者、全国气象系统先进工作者等称号。

## 前 言

雷电是发生于大气中的一种天气现象,由于雷电发生、发展、消散过程的特殊性,常常引起重大的灾害事故,被联合国有关部门列为“最严重的十种自然灾害之一”。尤其是随着经济社会的高速发展,雷电灾害造成很多地区停工、停产、通讯中断以及财产损失和人畜伤亡的恶性事故时有发生。例如,2011年7月23日温州动车雷击后追尾导致脱轨坠落形成的特别重大安全事故。2011年7月23日19时,温州南站列控中心采集驱动单元采集电路电源回路中保险管F2遭雷击熔断后,采集数据不再更新,错误地控制轨道电路发码及信号显示,使行车处于不安全状态;同时雷击也造成5829AG轨道电路发送器与列控中心通信故障,使从永嘉站出发驶向温州南站的D3115次列车超速防护系统自动制动,在5829AG区段内停车。由于轨道电路发码异常,导致其三次转目视行车模式启车受阻,7分40秒后才转为目视行车模式以低于20 km/h的速度向温州南站缓慢行驶,未能及时驶出5829闭塞分区。因温州南站列控中心未能采集到前行D3115次列车在5829AG区段的占用状态信息,使温州南站列控中心管辖的5829闭塞分区及后续两个闭塞分区防护信号错误地显示绿灯,向D301次列车发送无车占用码,导致D301次列车驶向D3115次列车发生追尾。追尾造成动车脱轨坠落导致40人死亡、172人受伤,中断行车32小时35分钟,直接经济损失19371.65万元。经调查认定,该事故是一起因列控中心设备存在严重设计缺陷、上道使用审查把关不严、雷击导致设备故障后应急处置不力等因素造成的责任事故。因此开展雷电灾害形成机理研究,提升雷电防护科学与技术水平,对于减轻国民经济损失,促进经济社会科学发展、安全发展,保护国家和人民的生命财产安全具有十分重要的意义。

但是目前雷电灾害形成机理研究中,许多与防雷有关的理论研究人员和工程技术人员普遍对雷电灾害的认识还停留在一次性雷击直接引起灾害事故是雷击灾害事故的观念上,未能深刻理解《建筑物防雷设计规范》(GB 50057—2010)定义的雷击具有短时首次雷击、首次以后短时后续雷击、长时间雷击等三种危害方式的物理意义,尤其是未能科学理解大电流、高电压、短时间、高脉冲的短时雷击事故机理与小电流、长时间、高能量、连续性和准稳定性的长时间雷击事故机理的区别。前者的危害性主要取决于雷电流与雷电压的峰值、波头时间、半值时间的大小,是雷电流波形中的A分量起决定作用,表现为雷电大电流、高电压、电磁脉冲的危害机理,不需要其他因素的耦合效应协助就可以产生危害,其发生过程是瞬间发生,具有主导性、独立性、突发性,常常是一次性雷击引发建(构)筑物及其有关的电气、电子设施损坏,导致雷电灾

害事故,属于显性灾害因素;后者主要取决雷电流的雷击时间和长时间雷击转移的电荷量的大小,是雷电流波形中的C分量起决定作用,表现为对建(构)筑物和电气、电子设施的承重结构金属构件局部疲劳损伤的雷电电弧放电的危害机理,需要建(构)筑物和电气、电子设施的荷载、大气环境等其他因素的耦合效应协助才可以产生危害,其发生过程是缓慢发生,具有辅助性、协同性、渐进性,常常是一次雷击后延滞一定时期(小于建(构)筑物和电气、电子设施使用寿命)才引发建(构)筑物和电气、电子设施承重结构金属构件局部应力损伤和(或)疲劳损伤从而导致雷电灾害事故,相对雷电波形中的A分量雷击引发雷电灾害事故而言,它引发雷电灾害事故需与其他因素共同耦合作用才能发生,其发生过程是逐渐发生,属于隐性灾害因素。

而随着科学技术的发展,建(构)筑物和电气、电子设施的使用寿命也不断延长,建(构)筑物和电气、电子设施的养护也越来越重要,但是人们对建(构)筑物和电气、电子设施的承重结构力学性能退化而影响其使用性和耐久性的认识还仅仅停留在“建(构)筑物和电气、电子设施的承重结构金属构件的锈蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境下的物理化学作用”,尤其是对“钢筋锈蚀”对钢筋混凝土结构的使用性、耐久性影响,导致结构承重力降低,甚至结构失效的认识比较深刻。而对与“锈蚀破坏的钢筋锈蚀、钢筋应力腐蚀、钢筋腐蚀疲劳”类似的“长时间雷击电流形成的对钢筋混凝土结构的使用性、耐久性影响导致结构承重力降低,甚至结构失效的危害机理却视而不见,从而形成建(构)筑物和电气、电子设施安全事故隐患。其根本原因是不清楚雷电流波形中的C分量对建(构)筑物和电气、电子设施的承重结构金属构件的使用性、耐久性影响导致结构承重力降低,甚至结构失效的雷电电弧放电效应及其危害机理。然而国内外所能查到的文献资料中,目前还没有该方面系统研究的专著,因此有必要从长时间雷击电流角度详细论述雷电电弧放电效应及其对建(构)筑物和电气、电子设施的承重结构的危害机理。为此,作者根据重庆市科技平台与基地建设项目——“重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心(CSTC2013PT-GC00001)”和公益性行业(气象)科研专项——“闪电活动特征及其在灾害天气预警中的应用方法研究(GYHY201006005-05)”、“地基高精度总闪电探测系统和定位算法研究(GY-HY201306069-03)”资助的雷电电弧放电效应及其危害机理的研究成果和国家标准《桥梁工程防雷技术规范》研究与制定的科研成果,结合重庆市雷电灾害调查鉴定和雷电防护技术的具体实践经验,并参考国内外有关雷电监测、雷电物理、大气物理、大气电学、土壤电学、气体放电、高电压实验、混凝土结构耐久性、腐蚀电化学、金属腐蚀、钢筋锈蚀、钢结构技术、钢结构事故分析、OPGW雷击试验及其防雷技术、金属学与热处理、金相分析、焊接冶金原理、电弧焊、电弧放电和雷电电弧放电等方面资料,编著了《雷电电弧放电效应及其危害机理研究》一书,该书详细论述了电弧放电与雷电电弧放电的基本概念及其差异,雷电电弧放电的自然现象和产生方式及其形成机

理,雷电电弧放电的锈蚀效应、弧坑效应、气孔效应、裂纹效应,雷电电弧放电的一般电弧侵蚀危害机理、应力电弧侵蚀危害机理、疲劳电弧侵蚀危害机理以及雷电电弧放电对缆索承重桥的缆索防雷影响与危害及其防御技术等方面的理论知识。可供从事雷电防护理论研究的科研人员和建(构)筑物防雷工程设计、施工、检测、验收以及建(构)筑物防雷设施维护与管理的工程技术人员参考。

本书在编写过程中得到重庆市科技攻关重点科技平台与基地(省级重点工程研究中心)——重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心和重庆大学电气工程学院、西南大学资源环境学院、重庆市设计院、重庆万桥交通科技发展有限公司、招商局重庆交通科研设计院有限公司等单位的大力支持,重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心、重庆市防雷中心提供了大量的雷电电弧放电效应及其危害的试验研究和建(构)筑物和电气、电子设施防雷工程设计、施工、检测、验收及其维护与管理等方面的具体实践资料。中国气象科学研究院博士生导师张义军研究员、博士生导师董万胜研究员、上海交通大学电子与电气工程学院博士生导师傅正财教授、武汉大学电气工程学院博士生导师王建国教授、重庆大学电气工程学院博士生导师廖瑞金教授、博士生导师司马文霞教授、西南大学资源环境学院博士生导师李航教授、重庆市设计院周爱农教授级高工等审阅了本书,并提出了许多宝贵意见,在此一并致谢。此外,本书引用了同行在建筑承重结构技术、钢结构技术、钢结构事故分析、桥梁工程技术、混凝土结构耐久性、气体放电、电弧放电、电弧焊接技术、焊接电弧现象、焊接缺陷分析、腐蚀电化学、防腐蚀工程技术、金属腐蚀、钢筋锈蚀、金属学与热处理、金相实验技术、OPGW 雷击试验及其防雷技术、高电压实验技术、雷电监测、雷电物理、大气物理、大气电学、土壤电学、雷电电弧放电及其危害防护等方面的研究成果和经验总结,除个别文献外,均列出了参考文献,在此向文献作者致以衷心的感谢。

本书由李良福执笔撰写,覃彬全、杨磊、糜翔、刘青松参与本书第一章、第二章、第六章编写工作,覃彬全、杨磊、糜翔参与第三章、第四章、第五章的部分试验工作,陈宏、李家启、李路参与本书第一章、第六章编写工作,糜翔、杨磊参与本书部分试验工作,全书由李良福统稿和校订。

由于作者水平有限、时间仓促,本书难免有不足之处,敬请读者批评指正。

李良福

2013年12月于重庆

## 目 录

## 前言

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 第一章 电弧放电的基础知识         | (1)   |
| 第一节 物质的等离子体及其分类       | (1)   |
| 第二节 气体放电的基本概念         | (5)   |
| 第三节 电弧放电的基本性质         | (13)  |
| 第四节 电弧放电的结构及其特性       | (17)  |
| 第五节 电弧放电空间等离子体的辐射机制   | (27)  |
| 第六节 电弧放电的伏安特性         | (32)  |
| 第二章 雷电电弧放电的基础知识       | (37)  |
| 第一节 雷电的基本概念           | (37)  |
| 第二节 雷电火花放电的基本概念       | (61)  |
| 第三节 雷电电弧放电的基本性质       | (101) |
| 第三章 雷电电弧放电形成机理研究      | (111) |
| 第一节 雷电的电弧放电自然现象研究     | (111) |
| 第二节 雷电的电弧放电产生方式研究     | (136) |
| 第三节 雷电的电弧放电形成机理研究     | (138) |
| 第四章 雷电电弧放电效应研究        | (168) |
| 第一节 雷电电弧放电效应的基本概念     | (168) |
| 第二节 雷电电弧放电的电弧锈蚀效应研究   | (170) |
| 第三节 雷电电弧放电的电弧坑效应研究    | (178) |
| 第四节 雷电电弧放电的电弧气孔效应研究   | (191) |
| 第五节 雷电电弧放电的电弧裂纹效应研究   | (195) |
| 第五章 雷电电弧放电效应的危害机理研究   | (212) |
| 第一节 雷电电弧放电的一般电弧侵蚀危害机理 | (212) |
| 第二节 雷电电弧放电的应力电弧侵蚀危害机理 | (223) |
| 第三节 雷电电弧放电的疲劳电弧侵蚀危害机理 | (227) |
| 第四节 影响电弧侵蚀的主要因素       | (232) |



## 第一章

## 电弧放电的基础知识

历史上最初的电弧放电是在大气中产生的,在两个相隔很近的放电电极间加以电压,就会产生明亮的放电火焰,火焰中气体温度很高,因为热空气上升,冷空气从下方来补充,使发光部分向上形成拱形,所以将这种放电称为电弧放电或弧光放电(arc discharge)。电弧放电是在一定条件下电荷通过两电极间气体的一种导电过程,也是一种气体放电现象。借助这种特殊的放电现象,产生电弧等离子体,将电能转换为热能、机械能、光能。因此电弧放电的基础知识主要是重点介绍物质的存在状态及等离子体的物理特性、气体放电的基本概念、电弧放电的基本性质、电弧放电的结构及其特性、电弧放电空间等离子体的辐射机制、电弧放电的伏安特性等有关方面内容,以便深刻理解电弧放电基本概念。

## 第一节 物质的等离子体及其分类

## 一、物质的等离子体定义

众所周知,物质存在的常规状态可分为固态、液态、气态三类,每类物质状态都与构成物质分子的结合能相对应。当固态物质分子平均动能超过分子在晶体中的结合能时,晶体结构被破坏而转化成液态或直接转化为气态;当液态物质分子平均动能超过范德瓦尔斯键结合能时,液态转化为气态;但是当物质的粒子平均动能大于电离能时,在轨道上运动的束缚态电子就脱离原子或分子而成为自由电子,形成物质的等离子状态。而物质的等离子状态与物质的固态、液态、气态截然不同,故称为物质存在的另一种状态,即物质的等离子态,也称为物质的等离子体。例如水这种物质在不同温度条件下,有固体→液体→气体→等离子体(图 1.1)等变化,充分体现了物质的等离子体是与固体、液体、气体并列的物质第四态。

实际上,宇宙中约 90% 的物质都是等离子体,图 1.2 给出了宇宙、地球及人类生存环境中不同温度条件下人工与自然产生的等离子体密度变化。从图中可知,等离子体的温度跨越了 7 个数量级、密度跨越了 30 个数量级,并且无处不在。

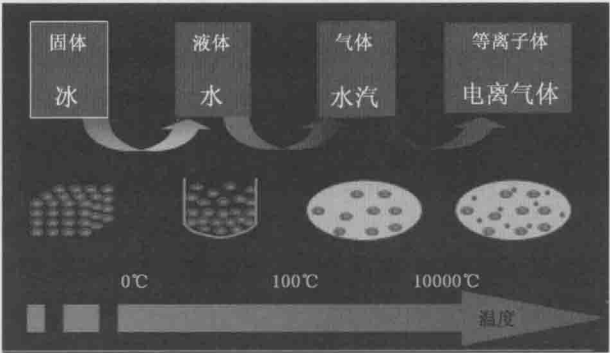


图 1.1 水在不同温度条件下的存在状态示意图

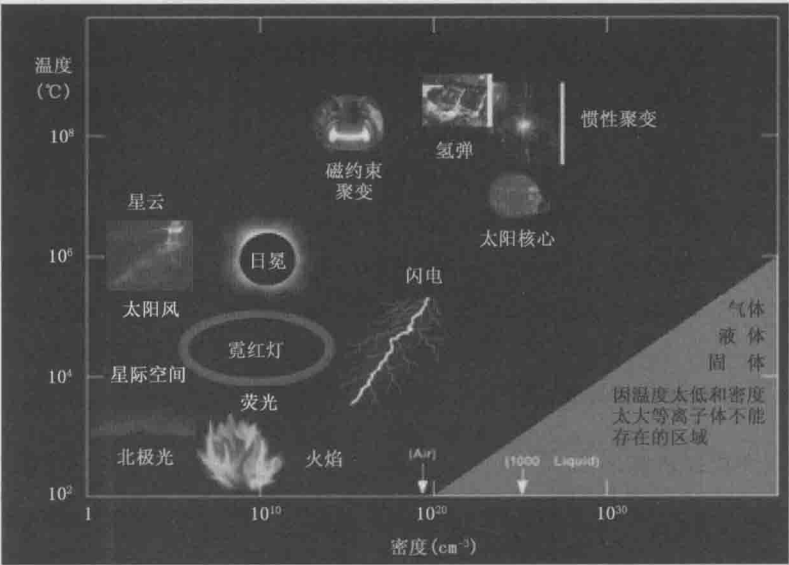


图 1.2 不同温度条件下人工与自然产生的等离子体密度变化示意图

目前物质的等离子体(plasma)概念已广泛地被用来描述对外呈现电中性的电离气体。当被激发电离气体达到一定的电离度时,气体处于导电状态,这种状态的电离气体就表现出整体行为,即电离气体中每一带电粒子的运动都会影响到周围其他带电粒子,同时也受到其他带电粒子的约束。由于电离气体整体行为表现出电中性,即电离气体内正负电荷数相等,所以称这种气体状态为等离子体态。而电弧放电现象从本质上讲是一种等离子体导电过程的放电现象。由于等离子体的自身特点、产生条件和应用领域不同,常常按照以下四种分类方法将等离子体分成不同的种类。

## 二、等离子体按温度分类

自然界中存在的等离子体按照温度差别可以分为高温等离子体和低温等离子体。

### (一) 高温等离子体

高温等离子体是指粒子温度在  $10^8 \sim 10^9$  K 的等离子体,如太阳、核聚变和激光聚变等产生的等离子体。

### (二) 低温等离子体

低温等离子体是指粒子温度从室温到  $3 \times 10^4$  K 左右的等离子体。而低温等离子体按重粒子温度水平又可分为热等离子体和冷等离子体。

#### 1. 热等离子体

低温等离子体中重粒子温度在  $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$  K,电子温度接近重粒子温度,达到热力学平衡或局部热力学平衡状态,即具有统一的热力学温度,这类等离子体被称为热等离子体。如在材料加工领域广泛应用的电弧等离子体、高频等离子体均属于热等离子体。

#### 2. 冷等离子体

在低温等离子体中,存在一类等离子体,其重粒子温度较低,只有室温左右,而电子温度可达上万开氏度,没有通过充分的能量交换达到平衡,远离热力学平衡状态,这类等离子体被称为冷等离子体。如照明上辉光放电产生的等离子体就属于冷等离子体。

## 三、等离子体按粒子密度分类

### (一) 致密等离子体

致密等离子体也称为高压等离子体。当等离子体粒子密度  $n > 10^{15} \sim 10^{18}$  个/cm<sup>3</sup> 时,称为致密等离子体。致密等离子体粒子间的碰撞起主要作用,例如,等离子体压力在 0.1 个标准大气压以上(即  $p \geq 0.1$  atm)(注:1 atm=101.325 kPa)的电弧均可看作致密等离子体。

### (二) 稀薄等离子体

稀薄等离子体也称为低压等离子体。当等离子体粒子密度  $n < 10^{12} \sim 10^{14}$  个/cm<sup>3</sup> 时,称为稀薄等离子体。稀薄等离子体粒子间碰撞基本不起作用,例如,辉光放电可看作稀薄等离子体。

## 四、等离子体按等离子的产生分类

### (一) 等离子体按等离子产生方法分类

等离子体按等离子产生方法不同,提供气体物质电离的能量来源不同可分为燃

烧等离子体、电弧等离子体、高频等离子体、激波等离子体、激光等离子体、聚变等离子体等。各种等离子体温度、电子密度的参数范围如图 1.3 所示。

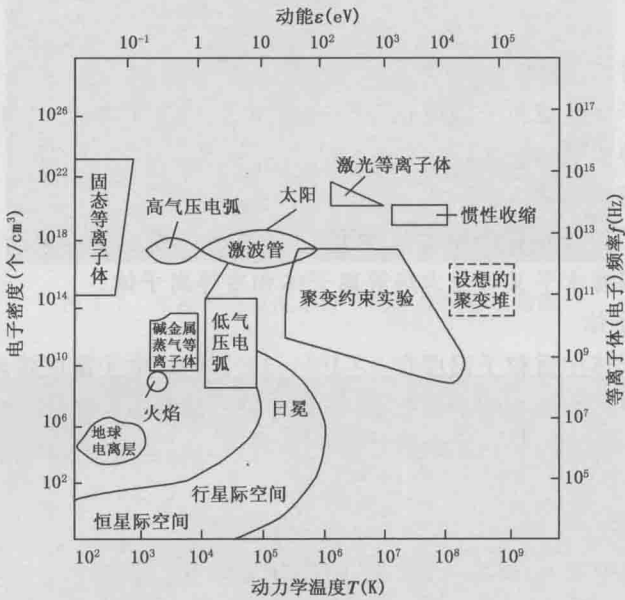


图 1.3 不同等离子体的温度和电子密度图

(二)等离子体按等离子产生方式分类

等离子体按等离子产生方式可分为自然等离子体和人工等离子体两大类。

1. 自然等离子体

自然等离子体是指自然方式产生的等离子体。自然等离子体广泛存在于宇宙中,宇宙中几乎有 99.9% 以上的物质以等离子体状态存在,如恒星星系、星云,又如地球附近的闪电、极光、电离层、范阿伦(Van Allen)辐射带等,其原因是在天体上,温度高达上百万开氏度使物质都处于等离子体状态;而地球上自然等离子体比较少,其主要原因是地球“寒冷”,温度低。例如空气温度  $T$  在 300 K 左右时,空气中的中性气体原子或分子中有百分之几电离成带电粒子,其电离度仅为  $10^{-122}$ ,因此一般温度下地球上空气电离度都比较低。

2. 人工等离子体

人工等离子体也称为实验室等离子体,是指人工方式产生的等离子体。如日光灯、霓虹灯中放电,高速飞行器尾迹,火箭发动机喷管中燃气,等离子炬中的电弧,气体激光、激波管中的电离气体,受控核聚变时产生的高温等离子体,原子弹或氢弹爆炸时产生的高温等离子体,某些化学反应(燃烧)产生的燃气等离子体,紫外线和 x 射

线辐射电离产生的等离子体等,它们都属于人工产生的等离子体。

### 五、等离子体按等离子体电离的程度分类

等离子体按等离子体电离的程度不同可分为三种:完全电离等离子体、弱电离等离子体和部分电离等离子体。

#### (一)完全电离等离子体

指几乎所有分子(或原子)都电离成电子和离子的等离子体。

#### (二)部分电离等离子体

指部分分子(或原子)电离成电子和离子,其他为中性分子的等离子体。实际上 1% 的电离度就可使部分电离等离子体的电导率接近完全电离等离子体的电导率。

#### (三)弱电离等离子体

指只有少量分子(或原子)电离的等离子体。由于不同原子在不同的温度下才能达到相同的电离度,例如铯(Cs)蒸气在 1500 K 时电离度已相当大,而氩(Ar)气要达到与铯差不多大小的电离度,则需要约 6000 K 的高温。在平衡条件下,温度在 20000 K 以上,几乎所有的气体均高度电离。当气体处于非平衡状态时,特别是在低压稀薄气体中放电时,在很低的气体温度下也可以有显著的电离度。

综上所述,当物质处于不同温度范围或粒子处于不同能量范围时,呈现出不同的聚集态。

## 第二节 气体放电的基本概念

### 一、气体放电的定义

不论固体、液体、气体还是等离子体,能否呈现导电性,取决于其在电场作用下是否具有可自由移动的带电粒子。金属本身拥有大量自由电子,所以在金属导体两端加上电压,自由电子便产生定向运动,形成电流。但正常状态下的气体不含带电粒子,是由中性分子或原子所组成。这些中性分子或原子虽然可以自由移动,但不会受电场作用而产生定向运动,所以不导电。因此通常气体是电的绝缘体。在常温下,由于高能宇宙射线、放射线和紫外线的作用,气体中存在少量游离态的带电粒子( $n < 10^{-8}$  电子数/ $\text{m}^3$ ),若在某些条件下导致气体绝缘被破坏,使正常状态的气体导电,就必须先有一个产生带电粒子的过程,也即将物质形态由气体向等离子体转变,然后才能让气体呈现导电特性。例如图 1.4 给出了由阴极、气体介质形成的放电空间、阳极和直流电源、限流电阻等组成的放电电路,在室温状态下,放电回路开关 S 合上的瞬间,依赖于电源电压  $E$ ,放电回路及气体介质形成的放电空间有微弱的电流

通过,此时可看作气体介质处于绝缘状态。然而,为了获得持续的电流,必须使放电空间气体介质生成更多的带电粒子,以提高其导电性能。一般通过提高电源电压(如达到  $5 \times 10^5 \text{ V/m}$ )即可在气体中迅速生成许多新的带电粒子,破坏了气体绝缘,形成了带电粒子的连续流动,导致气体介质形成的放电空间的气体介质放电。因此气体放电是指气体中存在自由带电粒子时,其绝缘性被破坏变为电的导体,此时如在气体中安置两个电极并加上电压,就有电流通过气体,这个现象称为气体放电。

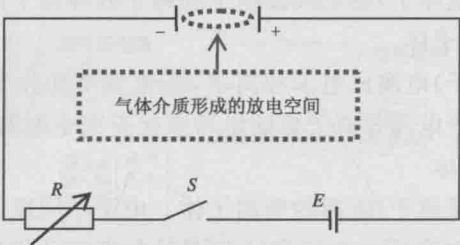


图 1.4 气体介质形成的放电空间的直流放电电路图

显然电弧放电现象是在两个电极间的气体介质中产生的强烈而持久的放电现象。因此电弧放电现象不是燃烧现象,也不是化学反应现象,而是气体在介质中的导电现象,此时的电流是由于气体中的电子和离子流动而形成的,而电弧放电现象是气体放电现象的具体表现之一。但是电弧放电空间的等离子体导电过程与金属导电明显不同,其原因是金属中自由电子可以自由移动,而离子则不能自由移动,但等离子体中所有组成粒子,皆可自由移动。

二、气体放电的类型

众所周知金属导电时,在金属中流过的电流与电压的关系遵守欧姆定律:  $I=U/R$ 。而气体放电则不然,不遵守欧姆定律,而是一个十分复杂的关系。最早研究的气体放电是低气压( $1 \sim 100 \text{ Pa}$ )直流放电,即在气体中置入两个电极,通以直流电压而得到的气体放电。

图 1.5 是在大气压为  $100 \text{ Pa}$ 、电极距离为数厘米时气体放电伏安特性曲线。

从图可知:在较小的电流区间( $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ A}$ ),气体放电所需要的带电粒子不能通过导电过程本身产生,而需要外部注入带电粒子,否则它将失去导电性,这种气体导电现象被称为非自持放电。当电流变大时,气体导电过程本身就可以产生维持导电所需的带电粒子,这种放电现象被称为自持放电。在自持放电区间,放电形式根据电流的不同,其特性具有显著的差异。自持放电又分为暗放电、辉光放电和电弧放电三种基本方式。暗放电时电压较高,电流很小,约为  $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{ A}$ ,没有光亮。电

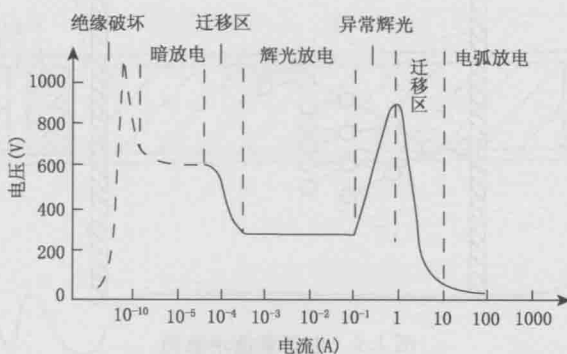


图 1.5 直流放电的电压与电流特性及放电形式图

流进一步提高到  $10^{-4}$  A 以上一直到 0.1 A 左右，具有明亮的辉光现象。电弧放电在几种自持放电现象中电压最低、电流最大 ( $10^0 \sim 10^4$  A)、温度最高，常常有耀眼的光辉。

上述分析表明气体放电形式按是否需要外界电离源来维持放电，可分为非自持放电和自持放电两大气体放电的类型。

### 三、气体放电的主要方式

依据气体压力、施加电压、电极形状、电源频率的不同，气体放电的方式多种多样。但常见的气体放电方式主要有暗放电、辉光放电、电弧放电、电晕放电、火花放电、高频放电、脉冲放电七种。20 世纪 70 年代以来激光导引放电、电子束维持放电等新的放电方式，也日益受到人们的重视。下面重点介绍目前比较常见的七种气体放电方式。

#### (一) 暗放电

暗放电主要是非自持放电，但自持放电的某些区域中也有暗放电存在。暗放电的理论是英国物理学家汤森(J. S. Townsend)于 1903 年第一个提出的气体击穿的理论——电子雪崩理论，故这种放电也称为汤森放电，并且通常非自持暗放电和自持暗放电均称为汤森放电或雪崩放电。

汤森理论的物理描述是：设外界电离素在阴极表面辐照出一个电子，这个电子向阳极方向飞行，并与分子频繁碰撞，其中一些碰撞可能导致分子的电离，得到一个正离子和一个电子。新电子和原有电子一起，在电场加速下继续前进，又能引起分子的电离，电子数目便雪崩式地增长，这称为电子繁流(图 1.6)。这些电子繁流最终导致气体放电现象发生，形成气体的暗放电。

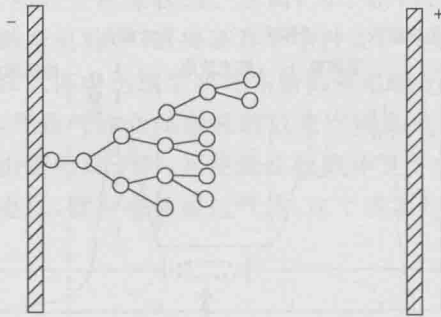


图 1.6 电子繁流示意图

(二)辉光放电

低压气体在击穿着火之后一般都产生辉光放电。若电极安装在玻璃管内,则在气体压力约为 100 Pa 且所加电压适中时,放电就呈现出明暗相间的 8 个区域(图 1.7)。图中下方的曲线表示光强、电位等参数的分布,按从阴极到阳极的顺序分为 8 个区。

1. 阿斯顿暗区

阿斯顿暗区是阴极前面的很薄的一层暗区,是 F. W. 阿斯顿于 1968 年在实验中发现的。在该区中,电子刚刚离开阴极,飞行距离尚短,从电场得到的能量不足以激发气体原子,因此没有发光。

2. 阴极辉区

阴极辉区紧接于阿斯顿暗区,由于电子通过阿斯顿暗区后已具有足以激发原子的能量,在该区造成激发而形成的区域。当激发态原子恢复为基态时就发光。

3. 阴极暗区

阴极暗区又称克鲁克斯暗区。抵达该区域的电子,能量较高,有利于电离而不利子激发,因此发光微弱。

4. 负辉区

负辉区紧邻阴极暗区,且与阴极暗区有明显的分界。在分界线上发光最强,后逐渐变弱,并转入暗区,即后述的法拉第暗区。负辉区中的电子能量较为分散,既富于低能量的电子也富于高能量的电子。

5. 法拉第暗区

法拉第暗区是负辉区到正辉柱区的过渡区域。在该区中,电子能量很低,不发生激发或电离,因此是暗区。

6. 正辉柱区

正辉柱区与法拉第暗区有明显的边界,是电子在法拉第暗区中受到加速,具备了