

DIANQI
FANGBAO
JISHU

电气防爆 技术

靳江红 王晓冬 庞磊 编著



化学工业出版社

DIANQI
FANGBAO
JISHU

电气防爆 技术

靳江红 王晓冬 庞磊 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《电气防爆技术》从安全技术人员角度出发,以最新标准为依据,介绍了常见电气防爆隐患以及防爆电气设备的应用技术。本书共8章,分别为爆炸性环境,爆炸危险区域划分,防爆电气设备及其选型,爆炸性气体环境用电气设备,爆炸性粉尘环境用电气设备,防爆电气设备安装,防爆电气设备维护和修理,防爆电气设备标准、认证及应用。

《电气防爆技术》可作为从事防爆电气理论研究和技术的专业人员参考书,也可作为高等院校安全专业电气安全方向的教学参考书,以及防爆电气特种作业人员的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

电气防爆技术/靳江红,王晓冬,庞磊编著. —北京:
化学工业出版社, 2016.1

ISBN 978-7-122-25781-9

I. ①电… II. ①靳…②王…③庞… III. ①矿用电
气设备-防爆电气设备 IV. ①TD684

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第284567号

责任编辑:徐雅妮 高震

责任校对:边涛

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张13 $\frac{3}{4}$ 字数243千字 2016年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

前言

PREFACE



随着工业生产中易燃易爆危险物质的用量大幅增加，气体及粉尘火灾爆炸事故频发且后果越来越严重，因此，爆炸预防与控制技术的研究已引起广泛重视。基于火灾爆炸原理，电气点燃源是引发火灾爆炸的重要因素，因此，电气防爆技术是预防火灾爆炸事故的重要技术措施。

2010年以来，国际防爆电气设备标准更新较快，尤其是粉尘防爆电气设备标准逐渐成熟而形成体系，防爆电气设备标志及选择方法亦发生改变。我国虽然不断更新采用国际新标准，但大部分标准仍然滞后于国际最新标准；另外，相比于气体防爆技术，粉尘防爆技术一直被忽视，目前，尚无专门著作阐述粉尘爆炸危险区域划分及粉尘防爆电气设备及其应用等相关内容；再者，我国从事防爆电气专业的人员仅有几百人，且由于国家对防爆电气设备安装无资质要求，防爆电气设备欠缺专业的安装、维护和修理，从而导致工程项目的电气防爆存在较多问题。此外，浙江、上海、北京等地已开展或即将开展电气防爆检测工作，开启了防爆电气设备维护的重要举措。综上所述，作者认为有必要及时将防爆电气标准及其应用的有关变化和实际项目中常见的电气防爆隐患与电气防爆专业技术人员及安全技术人员分享。

从根本上来说，电气防爆技术是针对爆炸三要素中的点燃源，采用隔离电气点燃源、防止产生电气点燃源或者限制电气点燃源能量的方法来实现防爆。本书首次从安全技术人员角度出发，阐述防爆电气设备的应用。本书共8章，第1章是爆炸性环境，着重讲述气体和粉尘火灾爆炸过程和机理、点燃源类别及其影响因素和影响规律，以及爆炸事故基本预防措施；第2章介绍爆炸危险区域划分，汇集了通用和典型爆炸危险区域划分图，并将功能安全引入防爆电气设备的安全装置；第3章着重讲述防爆电气设备的最新标志及选择原则和方法；第4、5章结合不同型式防爆电气设备的原理及结构特征，阐述其应用特点；第6、7章阐述了不同型式防爆电气的安装、修理和检修技术要求以及电气防爆检测技术；第8章介绍

了最新国内外防爆电气设备标准、认证制度，并总结归纳了我国电气防爆常见的隐患问题以及工程项目的“整体防爆”要求。

本书第1章由庞磊执笔，第2章、第3.1~3.5节由王晓冬执笔，第3.6节、第4~8章由靳江红执笔。

由于电气防爆技术相关知识积累有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编者
2015年6月

目录

CONTENTS



第 1 章	Page
爆炸性环境	1
1.1 概述	1
1.1.1 爆炸性环境分类	1
1.1.2 爆炸性环境的危险性	2
1.2 爆炸性环境形成的基本条件	5
1.2.1 爆炸性气体环境的形成条件	5
1.2.2 爆炸性粉尘环境的形成条件	5
1.3 爆炸过程的影响因素及其影响规律	5
1.3.1 气体、液体蒸气和薄雾爆炸	6
1.3.2 粉尘爆炸	17
1.4 点燃源	26
1.4.1 电气点燃源	26
1.4.2 非电气点燃源	32
1.5 爆炸极限理论	35
1.5.1 可燃气体的爆炸极限	35
1.5.2 可燃性粉尘的爆炸极限	42
1.6 爆炸事故预防技术	44
1.6.1 控制工艺参数	44
1.6.2 防止形成爆炸性混合物	45
1.6.3 隔离储存	48
1.6.4 控制点燃源	50
1.6.5 监控报警	52
第 2 章	Page
爆炸危险区域划分	53
2.1 爆炸性气体环境危险区域划分	53

2.1.1	危险区域划分	53
2.1.2	危险区域范围确定	59
2.1.3	危险区域划分典型示例	60
2.2	爆炸性粉尘环境危险区域划分	63
2.2.1	危险区域划分	63
2.2.2	危险区域范围确定	65
2.2.3	危险区域划分典型示例	66
2.3	典型场所爆炸危险区域划分	69
2.3.1	氢气站	69
2.3.2	汽车加油加气站	70
2.3.3	城镇燃气系统	76
2.3.4	涂装作业浸涂工艺	82
2.3.5	液化天然气 (LNG) 汽车加气站	83
2.3.6	粮食加工、储运	85

第3章

Page

防爆电气设备及其选型

87

3.1	可燃性物质分类、分级、分组	87
3.1.1	一般分类、分级、分组	87
3.1.2	多组分气体混合物的分级	89
3.2	防爆电气设备的分类、分级、分组	89
3.2.1	分类	90
3.2.2	分级	90
3.2.3	分组	90
3.3	电气设备防爆标志新方法	91
3.3.1	概述	91
3.3.2	电气设备的防爆标志组成	92
3.4	防爆电气设备的通用技术要求	94
3.4.1	运行环境温度	94
3.4.2	制造材料	95
3.4.3	通用结构	97
3.4.4	Ex 元件的通用要求	101
3.5	防爆电气设备选型	102
3.5.1	选型原则	102
3.5.2	选型步骤	103

3.6	防爆电气设备与功能安全	105
3.6.1	爆炸危险区域与 SIL 和故障裕度	106
3.6.2	功能安全要求	106
3.6.3	SIL 评估方法与步骤	108

第 4 章

Page

爆炸性气体环境用电气设备

110

4.1	隔爆型	110
4.1.1	隔爆机理	111
4.1.2	典型结构及其主要参数	114
4.1.3	应用特点	114
4.2	增安型	115
4.2.1	防爆原理	115
4.2.2	防爆结构特殊要求	115
4.2.3	典型应用	117
4.3	本质安全型	117
4.3.1	防爆原理	117
4.3.2	防爆结构特征	118
4.3.3	应用特点	119
4.3.4	本质安全系统认证及评定方法	121
4.4	正压型	125
4.4.1	防爆原理	126
4.4.2	通用防爆结构和安全要求	127
4.4.3	应用特点	128
4.5	浇封、油浸和充砂型	129
4.5.1	防爆原理	129
4.5.2	浇封型	129
4.5.3	油浸型	131
4.5.4	充砂型	131
4.6	“n”型	132
4.6.1	防爆结构及其防爆型式	132
4.6.2	防爆技术通用要求	133
4.6.3	典型应用	134
4.7	特殊型	135
4.8	复合型	136
4.8.1	概述	136

4.8.2	0区复合防爆电气设备	137
4.9	组合型	138
4.9.1	防爆安全水平的确定及其安全要求	138
4.9.2	组合防爆型蓄电池叉车	139
4.10	不同防爆型式的比较	140
第5章		Page
爆炸性粉尘环境用电气设备		144
5.1	本质安全型	144
5.2	外壳保护型	145
5.3	浇封保护型	147
5.4	正压保护型	147
第6章		Page
防爆电气设备安装		148
6.1	防爆电气设备采购验收	148
6.2	配电系统和电气保护	149
6.2.1	电气设备的配电	149
6.2.2	电气设备接地	149
6.2.3	等电位联结	150
6.2.4	其他要求	150
6.3	电气系统配线	150
6.3.1	电缆配线	150
6.3.2	导管配线系统	151
6.4	防爆电气设备安装	151
6.4.1	隔爆型电气设备	151
6.4.2	增安型电气设备	152
6.4.3	本安型电气设备	152
6.4.4	浇封型电气设备	152
6.4.5	正压型电气设备	153
6.4.6	粉尘防爆电气设备	153
第7章		Page
防爆电气设备维护和修理		154
7.1	防爆性能主要影响因素	154
7.2	电气防爆检测	155
7.2.1	基本要求	156

7.2.2	防爆电气设备检查检测内容	158
7.2.3	防爆电气设备安装检查检测内容	159
7.2.4	接地检查检测	160
7.2.5	电气设备环境适应性检查内容	163
7.2.6	检测仪器和检测方法	163
7.2.7	检测数据记录及检测报告	165
7.3	防爆电气设备检修	166
7.3.1	修理相关的基本术语	166
7.3.2	修理通用要求	167
7.3.3	隔爆型电气设备的修理	169
7.3.4	增安型电气设备的修理	173
7.3.5	正压型电气设备的修理	174
7.3.6	n型电气设备的修理	175
7.3.7	隔爆型电动机修理实例	175

第8章

Page

防爆电气设备标准、认证及应用

177

8.1	国际电气防爆标准化现状	177
8.2	国内防爆电气相关法规和标准化现状	180
8.3	电气防爆产品认证	184
8.3.1	CE认证、ATEX和IECEX认证	184
8.3.2	国内防爆产品认证	186
8.4	国内工程项目电气防爆现状	189
8.4.1	常见的电气防爆安全问题	189
8.4.2	防爆工程项目验收要求	194
8.4.3	工程项目“整体防爆”要求	194

附录

Page

196

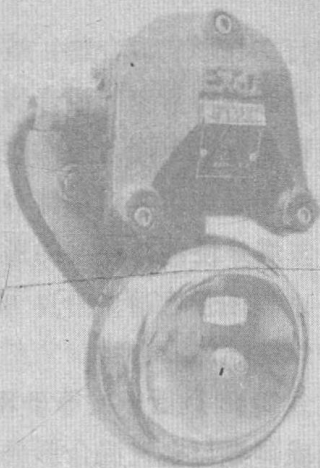
附录1	可燃性气体或蒸气爆炸性混合物分级、分组	196
附录2	可燃性粉尘特性举例	204
附录3	检测报告格式	208

参考文献

Page

209

第 1 章



爆炸性环境

由于工业企业生产现场不可避免地存在可燃性气体或粉尘的泄漏，因此爆炸性环境可能时常存在，只要遇到点燃源，就可能引发火灾爆炸事故。本章作为电气防爆技术的基础，主要阐述了爆炸性环境的基本概念和特征、气体和粉尘火灾爆炸过程和机理、点燃源类别及其影响因素和影响规律、爆炸事故基本预防措施。

1.1 概述

爆炸性环境是指在大气条件下，可燃物质以气体、蒸气、粉尘、薄雾、纤维或飞絮的形式与空气形成的混合物，被点燃后，能够保持燃烧自行传播的环境。常见的爆炸性环境有矿井、化工厂、加油站、加气站、爆竹厂及销售点等。在这些爆炸性环境中，电气设备必须根据爆炸危险场所的特点严格按照相关标准、规范进行设计，因地制宜地采取防爆措施。

1.1.1 爆炸性环境分类

爆炸性环境按照可燃性物质属性可以分为爆炸性气体环境和爆炸性粉尘环境。

(1) 爆炸性气体环境

爆炸性气体环境是指在大气条件下，可燃性物质以气体、蒸气或薄雾的形

式与空气形成混合物，被点燃后，能够保持燃烧自行传播的环境。气体爆炸包括可燃气体与空气混合物爆炸和单一气体分解爆炸两种。二者爆炸机理及反应过程虽有所不同，但本质上都是由于化学反应热快速释放，导致压力急剧升高而引起爆炸。本书仅针对前者加以论述。

爆炸性气体环境的形成通常有以下 3 种情况：

① 在大气条件下、可燃气体（如氢气、甲烷、乙炔等）与空气混合形成爆炸性气体混合物；

② 闪点低于或等于环境温度的可燃液体（如酒精、汽油、丙酮等）的蒸气或薄雾与空气混合形成爆炸性气体混合物；

③ 在物料操作温度高于可燃液体闪点的情况下，可燃液体（如苯、甲苯、乙二醇等）有可能泄漏时，其蒸气与空气混合形成爆炸性气体混合物。

（2）爆炸性粉尘环境

爆炸性粉尘环境是指在大气条件下，可燃性物质以粉尘、纤维或飞絮的形式与空气形成的混合物，被点燃后，能够保持燃烧自行传播的环境。能够形成爆炸性粉尘环境的粉尘通常有以下 3 种。

① 可燃性导电粉尘 与空气或氧气发生放热反应而燃烧的导电性粉尘，如镁、铝、石墨、炭黑、焦炭、煤、铁、锌、钛等粉尘；

② 可燃性非导电粉尘 与空气或氧气发生放热反应而燃烧的非导电性粉尘，如聚乙烯、苯酚树脂、小麦、玉米、砂糖、燃料、可可、木质、米糠、硫磺等粉尘；

③ 可燃纤维飞絮 与空气中氧气发生放热反应而燃烧的纤维，如棉花、麻丝、毛纤维、木质纤维、人造纤维等粉尘。

1.1.2 爆炸性环境的危险性

爆炸性环境的危险性主要体现在爆炸所产生的破坏作用上。爆炸通常伴随发热、发光、高温、高压、真空和电磁等现象，具有很强的破坏作用，并极易引发次生灾害。爆炸性环境的危险性主要有爆炸直接危险性和爆炸间接危险性。

1.1.2.1 爆炸直接危险性

爆炸直接危险性可表现为冲击波、火焰和高温、有毒有害气体产物、破片、噪声、振动和电磁等形式。

（1）冲击波

物质爆炸时，产生的高温高压气体以极高的速度膨胀，像活塞一样挤压周围空气，把爆炸反应释放出的部分能量传递给压缩的空气层，空气受冲击而发

生扰动,使其压力、密度等产生突变,这种扰动在空气中传播就称为冲击波。冲击波的传播速度极快,在传播过程中,可以对周围环境中的机械设备和建筑物产生破坏作用并使人员伤亡。冲击波还可以在它的作用区域内产生震荡作用,使物体因震荡而松散,甚至破坏。冲击波的破坏作用主要是由其波阵面上的超压引起的。在爆炸中心附近,空气冲击波波阵面上的超压可达几个甚至十几个大气压,在这样高的超压作用下,建筑物被摧毁,机械设备、管道等也会受到严重破坏。

当冲击波大面积作用于建筑物时,波阵面超压达到 $20\sim 30\text{kPa}$ 时,就足以使大部分砖木结构建筑物受到强烈破坏。超压在 100kPa 以上时,除坚固的钢筋混凝土建筑外,其余部分将全部被破坏。

(2) 火焰和高温

火焰和高温的破坏是爆炸的主要危险因素。火焰峰面和高温气流对人员的皮肤、视网膜、呼吸系统以及机械设备和围堰结构都将造成严重破坏。

在煤矿井下巷道内,如果在巷道端头点燃达到爆炸极限的瓦斯-空气混合气体,火焰面开始以点燃源为中心呈球面向外扩张,一部分火焰随之向开口方向传播,其余部分以壁面和端头为反射面,反射后强度加大也向巷道开口方向传播。火焰附近气体因火焰加热压力升高,到达一定距离后,可形成冲击波。

当瓦斯浓度为 9.5% 时,爆炸的瞬间温度在自由空间内可达 1850°C ,封闭空间内最高可达 2650°C 。井下巷道呈半封闭状态,其爆炸温度将在 $1850\sim 2650^{\circ}\text{C}$ 之间,这样的高温灼热,不但人的皮肤和肌肉会被烧伤,就连呼吸器官和消化器官的黏膜也会遭到严重损伤;电气设备遭到毁坏,尤其是电缆和易燃材料,容易形成“二次火源”,引发火灾,还会引爆煤尘。

(3) 有毒有害气体产物

爆炸过程是在极短时间内完成的,会导致很多物质发生不完全反应。井下发生瓦斯爆炸事故,在井下巷道中会产生大量有毒有害气体,其中 CO 是最主要的致死性气体。当空气中含有 0.4% 的 CO 时,人就会失去知觉。 CO 与血液中的血红蛋白的亲合力比氧大 $200\sim 300$ 倍。当人体吸入 CO 后, CO 迅速与血红蛋白结合,大大降低血红蛋白的吸氧功能,使得人体缺氧,严重时造成死亡。

炸药爆炸后生成的有毒有害气体产物更多,如 CO 、 NO 、 HCN 、 CH_4 、 NH_3 、 SO_2 、 NO_2 、 H_2S 等。

(4) 破片

机械设备、装置、容器等爆炸后产生许多碎片,飞出后会在相当大的范围内造成危害。一般碎片在 $100\sim 500\text{m}$ 内飞散。

(5) 噪声

爆炸产生的噪声为脉冲噪声，其特点是持续时间短，持续时间与爆炸TNT当量有关，一般为微秒至毫秒级；大当量的爆炸，如原子弹，可达几秒。爆炸产生的噪声对人员的耳膜易造成直接伤害，引发严重的听力损伤。

(6) 振动

爆炸性环境中发生爆炸时产生的冲击波在建筑结构中传播，将引起结构振动，进而对厂房、设备都会产生不利的影晌，更可能引发坍塌等次生灾害。

(7) 电磁

爆炸事故产生的能量会通过微波器件转换成高功率微波辐射能，发射出峰值功率在几瓦以上、频率为1~300GHz的脉冲微波束，在裸露的导体（如裸露的电线、印刷电路板的印制线）上产生数千伏的瞬变电压，从而造成电子设备的损坏。

1.1.2.2 爆炸间接危险性

爆炸间接危险性的表现形式多种多样，主要的形式有火灾、二次爆炸（如粉尘爆炸）、坍塌和环境污染等。

(1) 火灾

爆炸发生后，爆炸气体产物的扩散只发生在瞬间，对一般可燃物来说，不足以造成起火燃烧，而且冲击波造成的高速气流还有灭火作用。但是爆炸时产生的高温高压，建筑物内遗留大量的热或残余火苗，会把从破坏的设备内部不断流出的可燃气体、易燃或可燃液体的蒸气点燃，也可能把其他易燃物点燃引起火灾。当盛装易燃物的容器、管道发生爆炸时，爆炸抛出的易燃物有可能引起大面积火灾，这种情况在油罐、液化气瓶爆破后最易发生。正在运行的燃烧设备或高温的化工设备被破坏，其灼热的碎片可能飞出，点燃附近储存的燃料或其他可燃物，引起火灾。

(2) 二次爆炸

粉尘爆炸可能出现的范围很大，化工、木材加工、粮食和饮料加工等企业时有发生。粉尘爆炸破坏力大，容易产生二次爆炸。第一次爆炸气浪把沉积在设备或地面上的粉尘吹扬起来，在爆炸后短时间内爆炸中心会形成负压，周围的新鲜空气便由外向内填补进来，与扬起的粉尘混合，从而引发第二次爆炸。二次爆炸时，粉尘浓度一般比较高，故威力较大。

(3) 坍塌

爆炸可破坏建筑物的结构和非结构系统，因结构破坏导致的建筑物渐进坍塌是造成财产损失和人员伤亡的主要原因。2013年2月1日，连霍高速渥池段服务区附近一辆载满烟花爆竹的货车发生爆炸，引起桥面断裂，多车坠毁，

事故造成 26 人死亡。

(4) 环境污染

发生爆炸事故后，爆炸产生的有害气体会造成周围建筑被毁和人员伤亡。2005 年 11 月 13 日，中国石油天然气股份有限公司吉林石化分公司双苯厂硝基苯精馏塔发生爆炸，造成 8 人死亡，60 人受伤，直接经济损失 6908 万元，并引发松花江水污染事件。

1.2 爆炸性环境形成的基本条件

据统计，煤矿井下约有 60% 的场所属于爆炸性环境；石油开采现场和精炼厂约有 60%~80% 的场所属于爆炸性环境；在化学工业中，约有 80% 以上的生产车间是爆炸性环境。根据爆炸性混合物的分类，可以将爆炸性环境的形成条件分为两类：气体爆炸性环境的形成条件和粉尘爆炸性环境的形成条件。

1.2.1 爆炸性气体环境的形成条件

- ① 存在助燃气体，如空气、氧气、氯气。
- ② 存在可燃气体、可燃液体的蒸气或者薄雾，浓度在爆炸极限以内。
- ③ 存在足以点燃爆炸性气体混合物的火花、电弧或高温等。

1.2.2 爆炸性粉尘环境的形成条件

- ① 助燃剂，如氧气、空气或氧化剂。
- ② 存在爆炸性粉尘混合物，其浓度在爆炸极限以内。
- ③ 存在足以点燃爆炸性粉尘混合物的火花、高温、电弧、静电放电或者能量辐射。
- ④ 存在一定的封闭环境，如设备、容器、厂房等有限空间。

1.3 爆炸过程的影响因素及其影响规律

爆炸是一种极为迅速的物理或化学的能量释放过程。在此过程中，空间内的物质以极快的速度把其内部所含有的能量释放出来，转变成机械功、光和热等能量形态。所以一旦发生爆炸事故，就会产生巨大的破坏。

爆炸可以由不同的原因引起，但不管是何种原因引起的爆炸，归根结底必

须有一定的能量。按照能量的来源，爆炸可分为三类：物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。

当可燃性物质与氧气的混合浓度处于爆炸极限范围内时，若存在点燃源，将会发生爆炸。能与氧气（空气）反应的物质，包括气体、液体和固体。按照爆炸反应相的不同，爆炸可分为三类：气相爆炸、液相爆炸和固相爆炸。气相爆炸，如氢气、乙炔、甲烷等；液相爆炸，如酒精、汽油等；固相爆炸，如粉尘、纤维等。

1.3.1 气体、液体蒸气和薄雾爆炸

可燃气体燃烧产生的热使燃烧峰面前方的气体受到压缩，产生一个超前于燃烧峰面的压力波，该压力波以当地音速向前传播，行进在燃烧峰面前，称为前驱冲击波。压力波作用于未燃气体使其温度升高，从而使火焰的燃烧速度进一步增大，这样就产生压力更高的压力波，从而获得更高的火焰传播速度。层层产生的压力波相互追赶并叠加，形成具有强烈破坏作用的冲击波，这就是爆炸。

气体、液体蒸气和薄雾的爆炸规律主要决定于其在空气中的浓度。当可燃气体浓度小于爆炸极限范围下限时，由于在混合气体中含有过量的空气，过量的空气的冷却作用及可燃物浓度的不足，导致系统得热小于失热，反应不能延续下去，因此，其遇到火源不能爆炸。当可燃气体浓度大于爆炸极限范围上限时，则会有过量的可燃物，过量的可燃物不仅因缺氧而不能参与反应，放出热量，反而起冷却作用，阻止了火焰的蔓延，因此，在混合气体内遇到火源不能燃烧，也不能爆炸。如有新鲜空气供给，在可燃气体与新鲜空气的接触面上，遇火就会燃烧。当其浓度在爆炸极限范围内时，遇火源就会爆炸。

1.3.1.1 可燃气体爆炸类型

可燃气体爆炸有以下四种模式：定压燃烧、定容爆炸、爆燃和爆轰。

(1) 定压燃烧

定压燃烧是指无约束的敞开型燃烧。燃烧过程中，由于燃烧产物能够及时向后排放，其压力始终与初始环境压力相平衡，因此系统的压力是恒定的，不会形成压力波，也不会形成具有破坏性的冲击波，属于稳定的燃烧过程。定压燃烧的特征参量是定压燃烧速度（或称基本燃烧速度），只取决于燃料的输运速率和化学反应速率。大多数烃类气体与空气的混合物，在化学计量浓度下，基本燃烧速度为 0.5m/s 量级；而与氧气的混合物，则要高约一个数量级。

(2) 定容爆炸

定容爆炸是可燃混合物在刚性容器中均匀地同时点燃时所发生的燃烧过

程，这是理想模型，而实际情况中是不大可能均匀地同时点燃，常见的是局部点燃，然后扩展到整体。由于爆炸过程进行得很快，密闭容器中局部点燃所形成的参数与定容爆炸相差无几，可用定容爆炸模型来处理。定容爆炸过程中，容器体积保持不变，混合气密度也就不变，压力随释放的化学能的增加而增大。对大多数烃类气体与空气的混合物，在化学计量浓度下，定容爆炸的压力大约为初始压力的7~9倍。

(3) 爆燃

如果气体在燃烧过程中，火焰遇到约束，或者由于扰动而使火焰在预混气体中逐渐加速，则会建立起一定的压力，形成压力波，这样的过程就叫爆燃。它是一种带有压力波的燃烧，与定压燃烧不同的是爆燃有压力波产生。压力波以亚音速向前传播，通常行进在火焰阵面前，而火焰阵面相对于未燃气体以亚音速传播，这是与爆轰的一个重要区别。外界环境和物理因素对爆燃过程有较大的影响。工业爆炸事故中绝大多数以爆燃的形式出现，如密闭容器内可燃气体爆炸过程通常属于爆燃过程。以亚音速传播的火焰阵面前方有前驱冲击波扰动，即火焰在已被扰动的介质中传播，从而形成两波三区结构，如图1-1所示。

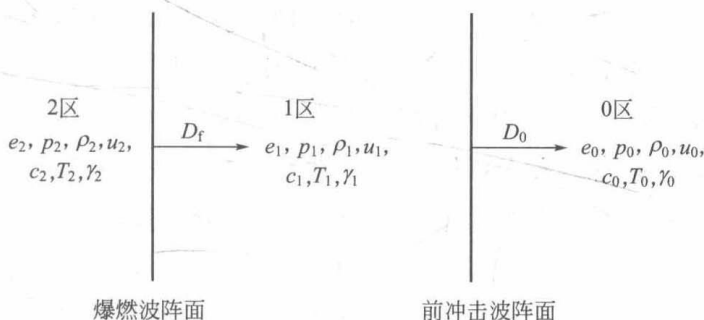


图 1-1 爆燃过程的两波三区结构

e —比内能； p —压力； ρ —浓度； u —粒子速度， c —音速； T —温度； γ —等熵指数

(4) 爆轰

爆轰是可燃气体爆炸的最高形式，其特征是形成超音速传播（相对于波前未反应混合物）的带化学反应的冲击波。在传播过程中，由于具有化学反应区能不断地补充能量而不衰减，因此是一个稳定传播的过程。烃类气体与空气混合物的爆轰速度大多为1800m/s量级，爆轰压力为1.5MPa量级。

在这几种爆炸模式中，爆燃是一种不稳定的燃烧波传播过程，它可以因约束的减弱，排气及时而使压力波减弱，直至压力波消失，而变为定压燃烧；相反，如果爆燃的后边界约束加强，压力波强度增加，火焰加速，直至火焰阵面追赶上前驱压力波阵面，两者合二为一，成为一个带化学反应的冲击波，就演变为爆轰。对可燃气体，若有形成湍流的加速条件，或外加强刺激源，均有可