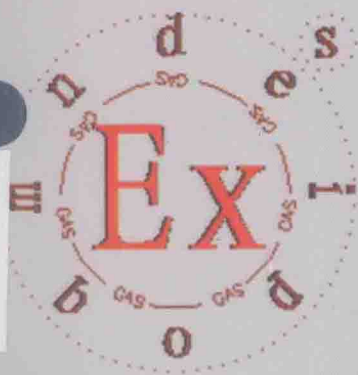


防爆电气概论

第2版

张显力 张海鸥 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

防爆电气概论

第2版

张显力 张海鸥 编著



机械工业出版社

本书简要地叙述了与防爆电气理论、防爆电气技术有关的可燃性气体(蒸气)燃烧与爆炸的一般概念;详细地讨论了各种防爆型式电气设备的安全技术措施和安全技术要求、防爆结构设计原则、防爆安全性能试验方法;概略地介绍了复合防爆型电气设备和组合防爆型电气设备(装置)的基本概念、设计原则,以及爆炸性气体环境中电气设备的防爆型式选择和电气安装方法、安全运行和日常维护的技术要点。

本书可供从事防爆电气理论研究和防爆电气技术应用的工程技术人员学习与参考,也可作为高等工业院校有关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

防爆电气概论/张显力,张海鸥编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2014.12

ISBN 978-7-111-48616-9

I. ①防… II. ①张…②张… III. ①防爆电气设备—概论 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第271208号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:时静 责任编辑:时静 张利萍

版式设计:霍永明 责任校对:陈越

责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·25印张·672千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-48616-9

定价:65.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第2版前言

在本书再版之际，作者在这里试图说明以下几个问题，供读者在阅读本书时参考。

1. 第2版与第1版在结构和内容方面的差异

本书的第2版与第1版，在框架结构上没有大的差异，仅增加第12章（爆炸性气体环境中电气设备的运行与维护），章数由原来的11章变为现在的12章；在具体内容上略有变化，除订正了第1版中的技术瑕疵和印刷讹误外，还增加和补充了一些必要的内容。

(1) 增加第12章

爆炸性气体环境中电气设备的安全运行与日常维护依然是爆炸性气体环境中防爆安全的重要保证。它涉及运行人员的操作方法和维护技能，当然还有一些管理层面的问题（这不属于本书的讨论范围）。因而，本书第2版给予简单而原则性的介绍。

至于防爆电气设备的修理，本书不作讨论，尽管它与防爆安全有关。因为防爆电气设备的修理不是必须进行的，有一些可以修复再用，有一些就未必可以进行修理；这是一种两可的事情，这里没有必要进行过多的考究。读者如有需要，可参阅国家标准 GB 3836.13《爆炸性气体环境用电气设备 第13部分 爆炸性气体环境用电气设备的检修》和相关文献。

(2) 增加一些知识难点的解释和例题

尽管防爆电气技术是一门应用技术学科，但是它却是一个多门学科基本知识的综合体，对于涉此不深的人们来说，仍存在着一些需要解决的问题。因而，根据读者的意见和建议，作者根据长期从事防爆电气理论研究和防爆电气技术应用的体会，以及多年从事“防爆技术”工业现场培训教学的经验，对本书第1版中的一些知识难点给予简单的解释，并在合适的地方配以例题，企图把问题说得明白一些。

(3) 增加电气设备防爆结构的部分设计内容

在本书第1版的应用中，有不少读者询问有关电气设备防爆结构的设计问题。根据读者的意见，作者在适当的章节中增加防爆结构的一般设计原则，供人们在实际工作中参考。

这里的所谓“设计”，主要是指电气设备防爆结构的一般设计原则。由于防爆电气设备的性能和结构千差万别，不可能而且也没有必要进行详细的讨论，至于设备基本性能的设计，则是相关专业人员的专业职责。

尽管如此，有一点还是必须指出的：不管情况如何，在设计中防爆安全性能和基本性能出现矛盾时基本性能必须服从防爆安全性能。这是一个原则。

除此之外，本书的第2版与第1版的异同或许还向人们表示，第2版更适用于工程专业人员，而第1版则较适用于非工程专业人员。显然，这里没有一个明确的界限。

2. 有关气体防爆及其他

本书所涉及的内容范围正如书名所说的那样，是讨论“可燃性气体电气防爆”的，没有牵扯到“可燃性粉尘防爆”和“非电气防爆”及一些其他问题。但是，不管是什么样情况的“防爆”，燃烧与爆炸的基本概念是一致的，同样都是“可燃性物质、空气（氧气）和点燃源同时同地存在”才能够导致燃烧与爆炸发生，同样是采取一切必要的技术手段和安全措施来破坏燃烧与爆炸的这些发生条件才能够实现“防爆”。

因此，只要把“可燃性气体电气防爆”很好地理解和掌握了，其他什么样的“防爆”就都可较为容易地理解和掌握了。

(1) 可燃性粉尘防爆问题

可燃性粉尘，与可燃性气体相比，在物理特性上，有着十分不同的特征。可燃性粉尘具有可以看得见的形态，是一种固态物质，而可燃性气体则不同，它是一种气态物质，无法以一般视觉觉察到；而且，气体是无孔不入的，而粉尘则不然。

正是根据可燃性粉尘的这些特征，人们在处理可燃性粉尘防爆时常常采用“隔离”的措施，使用具有一定防护等级（IP 保护）的外壳把粉尘和内装的电气元器件隔离开，只要外壳的外部表面温度不大于堆积在它上面的粉尘和周围粉尘云的最小点燃温度，燃烧与爆炸便不可能发生。

在实际的粉尘防爆技术中，人们常常就是采用这种简单而有效的技术手段和安全措施来实现粉尘防爆的，至于其他的过多的解读，则没有实质性意义。

至于粉尘云在外力作用下可能产生的静电积累和静电放电引起的点燃，也是一个十分值得关注的问题。消除静电有多种方法，例如，空间加湿就可以消除粉尘云的静电，如此等等。

(2) 非电气防爆问题

非电气防爆是近年来提出的防爆技术。它的本质是可燃性物质的热点燃（危险温度）和如何遏制出现有效热点燃源（危险温度）。在电气防爆中，可燃性物质的点燃源，一般认为是“电气火花（包括静电火花）、电弧和危险温度”。这里的危险温度，就是热点燃源，对于电气防爆和非电气防爆来说，只是产生和表现的方式不同而已。另外，机械火花，对于电气防爆和非电气防爆来说，都是认可的点燃源。

控制热点燃源（无论是热表面、火焰、炽热流体，还是摩擦热、绝热压缩热、化学反应热），只要它的发热温度不能成为危险温度，就不能发生点燃。采取各种必要的技术手段和措施就可以控制和隔离这种热点燃源，于是就“防爆”了。

(3) 其他点燃源问题

作为可燃性物质的点燃源，除电气火花、电弧和危险温度外，还有一些其他的点燃源，例如，光辐射、冲击波（包括超声波、电磁波）、雷电、太阳磁暴和异常高温等。这些异常的点燃源无时无刻不在威胁着爆炸性环境的安全；一些无名的爆炸皆源于此。因此，人们应该时刻对这些情况予以关注。

(4) 特殊环境条件下的防爆问题

本书所讨论的“可燃性气体电气防爆”，是指在大气环境，即大气的温度为 $-20 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 、压力为 $80 \sim 110\text{kPa}$ 和氧气标准含量为 21% 条件下的防爆，而事实上有很多异常环境也需要防爆，例如，高温、高压或（和）富氧环境。

异常环境对可燃性气体的燃烧与爆炸有着不同寻常的影响。有文献指出，异常环境可以导致某些可燃性气体发生“跳级”现象，即从危险性低的级别“跳到”危险性高的级别。这是一个十分值得关注的问题，应该引起研究人员和应用人员足够的注意。

3. 引用标准文献问题

本书第 2 版参考和引用一些现行的国家标准和行业标准的内容和图表（参见“后记”）。所有标准随着时间的推移和技术的进步都会被修订，因此，读者在使用本书时应该随时注意这些标准的最新版本。

由于本书仅仅是讨论防爆电气理论和防爆电气技术的基本概念的，因此，人们在处理防爆电气技术（例如，设计和检验等）问题时应该以有关的现行标准文本为依据。

另外，在本书修订时，作者参阅和采用一些散见于各种技术文献中的著作和论文的论点；在这里，向相关著作和论文的作者致以谢意。

本书由张显力主编，参与本书修订工作的还有张海鸥（第2章、第5章、第7章、第8章和第12章、全书插图）。

由于作者学术水平有限，书中不妥之处在所难免，诚请读者批评指正。

第 1 版前言

本书是一本论述防爆电气理论和防爆电气技术的著作；初稿完成于 20 世纪末叶。由于近年来不管是国内还是国外防爆电气理论和防爆电气技术的研究与发展日臻完备，作者根据自身长期从事这一领域的理论研究和实践经验，将本书的初稿补充完善，予以出版，以期对防爆电气领域的发展有所裨益。

大家知道，在一些工业部门，尤其是在石油化工、钢铁冶炼和煤炭生产等行业，工艺过程中产生了大量的可燃性气体和易燃性液体的蒸气（有 2000 多种），在工艺设备周围形成了爆炸性气体环境。随着现代大工业的快速发展，生产过程的高度自动化，电气设备和仪器仪表的应用无处不有、无处不在。而电气设备是可燃性气体（蒸气）的点燃源。因此，可燃性气体（蒸气）发生燃烧与爆炸的概率大大地增高。

事实上，在爆炸性气体环境中，由于电气放电而引起的爆炸多次发生，给人类生命和社会财产造成了极大的灾难。

在爆炸性气体环境中使用所谓的防爆电气设备就可以避免由“电气”引起可燃性气体（蒸气）发生燃烧与爆炸。因此，正确地认知、掌握和运用防爆电气理论和防爆电气技术，合理地设计、制造和使用防爆电气设备，是从事这一领域的研究人员和技术人员的重要任务。

为此，本书试图从以下几个方面来讨论一些问题：可燃性气体燃烧与爆炸的一般概念，防爆电气设备综述，隔爆型电气设备，增安型电气设备，正压型电气设备，本质安全型电气设备和电路，浇封型电气设备，油浸型电气设备，充砂型电气设备，“n”型电气设备，复合型电气设备，组合型电气设备（装置）和特殊型电气设备，以及爆炸性气体环境中电气设备的选型和安装。

在爆炸性气体环境中，电气安全是一个安全的系统工程。它不仅包括电气设备的设计、制造和试验，而且还包括电气设备的防爆型式选择和电气系统安装。另外，正确地运行防爆电气设备和严格地管理防爆电气设备，也是极其重要的。所有这些都是保证防爆电气安全不可或缺的重要手段。后者不属于本书的讨论范围。

这里还需指出的是，本书仅仅是对防爆电气理论和防爆电气技术的一般性概述，只是希望让人们了解和掌握这一领域的基本理论和基本技术。然而，人们在设计、制造、试验和安装、使用防爆电气设备时则必须遵照相应的国家标准 [GB 3836-《爆炸性气体环境用电气设备》（系列标准）] 和国际标准 [IEC-60079《爆炸性气体环境用电气设备》（系列标准）]。

本书由张显力担任主编，负责全书的内容选择、结构设计和书稿审定。参加本书编著的有：张显力（第 1~5 章，第 8 章的 8.3 节，第 9 章，第 10 章的 10.1 节、10.2 节和第 11 章），杨宝祥（与张显力合作，第 6 章），张海鸥（第 7 章，第 8 章的 8.1 节、8.2 节和全书插图绘制，其中图 10.2 由蒋建勋绘制），陈文岳（与张显力合作，第 10 章的 10.3 节）。

由于作者学术水平有限，书中不妥之处在所难免，诚请读者批评指正。

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 可燃性气体燃烧与爆炸的一般

概念 1

1.1 概述 1

1.2 燃烧与爆炸发生的充分必要条件 2

1.3 可燃性气体 5

1.4 点燃源 9

1.4.1 电气放电 9

1.4.2 静电放电 14

1.4.3 碰撞与摩擦 17

1.4.4 固体热表面 21

1.4.5 激光辐射 22

1.5 可燃性气体的分级分组 26

1.5.1 可燃性气体的分级 26

1.5.2 可燃性气体的分组 33

1.5.3 可燃性气体分级分组举例 34

第2章 防爆电气设备 37

2.1 概述 37

2.2 防爆电气设备的通用技术要求 37

2.2.1 防爆电气设备运行的环境条件 37

2.2.2 防爆电气设备的分类、分级及分组 39

2.2.3 防爆电气设备的设备保护级别 41

2.2.4 防爆电气设备的制造材料 43

2.2.5 防爆电气设备的通用结构 47

2.2.6 Ex 元件的通用要求 56

2.2.7 防爆标志 58

2.3 防爆电气设备设计与制作的一般原则 59

2.3.1 设计原则 60

2.3.2 制作原则 62

2.4 防爆电气设备的检查与试验 63

2.4.1 机械性能检查与试验 63

2.4.2 电气性能检查与试验 64

2.4.3 外壳的防护性能试验 66

2.4.4 设备的发热试验 66

2.4.5 塑料外壳的有关试验 69

2.4.6 机械火花点燃性能试验 73

2.4.7 电缆引入装置的有关试验 75

第3章 隔爆型电气设备 77

3.1 概述 77

3.2 隔爆外壳的隔爆机理 77

3.2.1 耐爆性能 77

3.2.2 隔爆性能 82

3.3 隔爆外壳的典型结构和结构参数 86

3.3.1 间隙式隔爆结构 86

3.3.2 其他形式的隔爆结构 90

3.4 隔爆型电气设备防爆结构的一般设计原则 94

3.4.1 设计方案的确定 94

3.4.2 隔爆外壳的相关计算 97

3.4.3 隔爆外壳上的特殊结构 104

3.4.4 隔爆接合面的防锈处理和外壳内表面的涂覆 108

3.4.5 隔爆型电缆引入装置 108

3.4.6 工程图样标注的特殊性 110

3.4.7 隔爆型旋转电机的最小径向间隙 k 和最大径向间隙 m 计算 110

3.4.8 常用隔爆结构示例 117

3.4.9 几种特殊隔爆结构的分析与思考 125

3.4.10 隔爆型电气设备设计时的禁忌结构 132

3.5 隔爆型电气设备防爆结构的一般制造原则 133

3.6 隔爆安全性能试验 135

3.6.1 隔爆外壳的耐爆性能试验 135

3.6.2 隔爆外壳的隔爆性能试验 137

第4章 增安型电气设备 143

4.1 概述 143

4.2 增安型电气设备的通用防爆结构和 安全要求 144

4.2.1 外壳防护 144

4.2.2 导线连接 144

4.2.3 极限温度 146

4.2.4 固体绝缘材料 147

4.2.5 绕组	147	措施和安全要求	192
4.2.6 电气间隙和爬电距离	148	5.6.1 内置系统及其释放工况	192
4.3 增安型电气设备的防爆型式通用试验	150	5.6.2 内含释放源的正压型电气设备 正压保护技术的特殊性	193
4.3.1 接线端子热试验	150	5.6.3 内置系统的设计原则	194
4.3.2 介电强度试验	151	5.7 正压型电气设备防爆结构的一般 设计原则	196
4.4 增安型交流电动机	152	5.7.1 设备保护级别的评价原则和正压 保护系统的控制原则	196
4.4.1 专用结构和特殊要求	152	5.7.2 正压型电气设备防爆结构的设计 原则	198
4.4.2 堵转温升与 t_E 时间	155	5.8 正压型电气设备的防爆型式试验	200
4.4.3 笼型电动机放电火花危险性的 评价	162	5.8.1 正压型电气设备的通用试验	200
4.4.4 试验	164	5.8.2 正压型电气设备的吹扫试验和 稀释试验导则	201
4.5 增安型照明灯具	167	5.8.3 无内部释放源的正压型电气设备 的充气试验和吹扫试验	202
4.5.1 专用结构和特殊要求	167	5.8.4 有内部释放源的正压型电气设备 的吹扫试验和稀释试验	203
4.5.2 温度限制	171	5.8.5 内置系统的试验	204
4.5.3 增安型发光二极管照明灯具防爆 结构的一般设计原则	171	第6章 本质安全型电气设备与电路	206
4.5.4 试验	172	6.1 概述	206
4.6 增安型电阻加热器	174	6.2 本质安全型电气设备的防爆结构和 安全要求	207
4.6.1 专用结构和特殊要求	174	6.2.1 外部导线连接	207
4.6.2 漏电和温度保护系统	175	6.2.2 内部连接导线	211
4.6.3 防爆型电阻加热器防爆结构的 一般设计原则	177	6.2.3 间距、电气间隙和爬电距离	213
4.6.4 试验	179	6.2.4 结构上的特殊要求	218
第5章 正压型电气设备	181	6.3 本质安全电路中的元器件	219
5.1 概述	181	6.3.1 定额(三分之二原则)	219
5.2 正压型电气设备的通用防爆结构和 安全要求	182	6.3.2 电池及电池组	219
5.2.1 通用结构和安全要求	182	6.3.3 熔断器和半导体器件	222
5.2.2 电气间隙、爬电距离和极限温度	183	6.3.4 可靠元器件及其连接	226
5.2.3 正压保护系统中自动安全装置 的防爆型式	184	6.3.5 二极管安全栅	232
5.3 保护性气体和正压保护技术	185	6.3.6 本质安全电路中的模拟电感和 模拟电容	239
5.3.1 保护性气体	185	6.4 本质安全电路的故障评价	241
5.3.2 正压保护技术	185	6.5 本质安全电路的分析与评价	243
5.4 静态正压型电气设备的安全措施和 安全要求	186	6.5.1 分析与评价的基本原则	243
5.5 非静态正压型电气设备的安全措施 和安全要求	186	6.5.2 电感性电路安全火花性能的分析 与评价	246
5.5.1 正压外壳内压力变化状态示意图	187	6.5.3 电容性电路安全火花性能的分析 与评价	248
5.5.2 保护系统和保护功能的描述	189	6.5.4 综合性电路安全火花性能的分析	
5.5.3 检测最低正压和气体流量	190		
5.5.4 检测吹扫时间	191		
5.6 内含释放源的正压型电气设备的安全			

与评价	250	9.2 “n”型电气设备的通用防爆结构和 安全要求	294
6.6 本质安全型电气设备防爆结构的一般 设计原则	252	9.2.1 通用结构	295
6.6.1 设计的一般原则	252	9.2.2 温度限制	296
6.6.2 设计示例	254	9.2.3 电气强度	297
6.7 本质安全型电气设备的防爆型式试验 ...	259	9.3 “n”型电气设备防爆型式通用试验 ...	299
6.7.1 火花点燃试验	259	9.3.1 外壳综合试验	299
6.7.2 介电强度试验	263	9.3.2 引入电缆夹紧试验	300
第7章 浇封型电气设备	264	9.4 “nA”无火花型旋转电机	300
7.1 概述	264	9.4.1 专用结构和特殊要求	300
7.2 浇封型电气设备的通用防爆结构和 安全要求	264	9.4.2 气隙火花点燃危险性的评价	302
7.2.1 浇封化合物	264	9.4.3 定子绕组绝缘系统点燃危险性的 评价	303
7.2.2 防爆结构和安全要求	265	9.4.4 试验	304
7.2.3 特殊结构和安全要求	268	9.5 “nA”无火花型照明灯具	305
7.3 故障评价和保护措施	270	9.5.1 专用结构和特殊要求	305
7.3.1 故障与可靠部件	270	9.5.2 试验	309
7.3.2 温度极限和保护装置	271	9.6 “nA”无火花型蓄电池和蓄电池组 ...	312
7.4 浇封型电气设备的防爆型式通用试验 ...	273	9.6.1 专用结构和特殊要求	313
7.4.1 浇封化合物耐候性试验	273	9.6.2 试验	314
7.4.2 浇封型电气设备温度测定	274	9.7 “nA”无火花型电气单元(或组件) ...	314
7.4.3 浇封型电气设备保护装置试验 ...	274	9.7.1 “nA”型熔断器	314
7.4.4 介电强度试验	275	9.7.2 “nA”型仪器和小功率元器件 ...	315
7.4.5 其他试验	276	9.7.3 “nA”型插接装置	316
7.5 浇封型蓄电池	276	9.7.4 “nA”型电流互感器	316
7.5.1 专用结构和特殊要求	277	9.8 “nC”有火花型电气单元(或组件) ...	316
7.5.2 试验	278	9.8.1 “nC”型封闭断路器和非点燃 元件	317
第8章 油浸型、充砂型和特殊型电气 设备	279	9.8.2 “nC”型密封或浇封组件 (包括气密组件)	318
8.1 油浸型电气设备	279	9.9 “nL”限制能量型电气设备和“nA nL” 自保护限制能量型电气设备	321
8.1.1 概述	279	9.10 “nR”限制呼吸型电气设备	323
8.1.2 防爆结构和安全措施	279	第10章 复合防爆型和组合防爆型 电气设备	325
8.1.3 试验	281	10.1 复合防爆型电气设备	325
8.2 充砂型电气设备	281	10.1.1 概述	325
8.2.1 概述	281	10.1.2 0 区用复合防爆型电气设备	325
8.2.2 防爆结构和安全措施	281	10.1.3 检查与试验的一般原则	326
8.2.3 故障工况	283	10.2 组合防爆型电气设备	327
8.2.4 试验	285	10.2.1 概述	327
8.3 特殊型电气设备	286	10.2.2 组合防爆型电气设备设计与制作 的一般原则	327
8.3.1 概述	286		
8.3.2 特殊型防爆铅酸蓄电池组	287		
第9章 “n”型电气设备	294		
9.1 概述	294		

10.2.3	检查与试验的一般原则	330	11.4.2	电缆敷设	358
10.3	组合防爆型电气设备：防爆型工业 车辆	331	11.4.3	电气设备安装	363
10.3.1	概述	331	11.5	爆炸性气体环境中本质安全电气系统 的设计和相关参数的核查	369
10.3.2	防爆结构和安全要求	331	11.5.1	本质安全电气系统设计和核查的 基本原则	369
10.3.3	示例(一)：蓄电池式防爆叉车	334	11.5.2	本质安全电气系统电气设计的 基本方法	370
10.3.4	示例(二)：内燃机式防爆叉车	335	11.5.3	本质安全电气系统相关参数检查 与核算的基本方法	374
10.3.5	检查与试验	337	第12章	爆炸性气体环境中电气设备 的运行和维护	377
10.4	组合防爆型电气设备：本质安全型 现场总线	340	12.1	概述	377
10.4.1	概述	340	12.2	防爆电气设备的安全运行	377
10.4.2	本质安全型现场总线的结构和 安全要求	340	12.2.1	新安装设备的调试	377
10.4.3	检查与试验	343	12.2.2	在线设备的运行	381
第11章	爆炸性气体环境中电气设备 的选择与安装	344	12.2.3	特殊类型防爆电气设备的运行	383
11.1	概述	344	12.3	防爆电气设备的日常维护	384
11.2	爆炸性气体环境中危险区域的 划分	344	12.3.1	防爆电气设备日常维护和保养 的通用要求	384
11.2.1	危险区域的划分原则和定义	344	12.3.2	防爆电气设备日常维护和保养 的专用要求	385
11.2.2	危险区域划分的原则方法	345	12.4	爆炸性气体环境中特殊情况的 处理	387
11.2.3	危险区域划分示例	346	后记	388	
11.3	爆炸性气体环境中电气设备的 选型	350	参考文献	389	
11.4	爆炸性气体环境中电气设备的 安装	353			
11.4.1	供电系统和电气保护	353			

第 1 章 可燃性气体燃烧与爆炸的一般概念

1.1 概述

物质世界是由各种各样不同性质的物质构成的。这一点是众所周知的。

所有这些物质，在通常情况下，按照它们的燃烧性能来分类，可以分为不燃性物质、难燃性物质和可燃性物质。

一般来讲，所谓不燃性物质，是指在一般条件下不能发生燃烧或传播燃烧的物质，例如，钢材、水泥、砂石等；难燃性物质是指这样的物质，它在点燃源作用下仅在点燃源作用区域内发生燃烧，当点燃源消失后就不能继续发生燃烧，也就是说燃烧不能蔓延下去，例如，某些工程塑料；可燃性物质是指可以被点燃源点燃，在点燃源消失后，仍然能够自行继续燃烧的物质，例如，煤、木头、甲烷、氢气等。

可燃性物质，还可以按照这些物质的点燃能量划分为两大类：难以点燃的和容易点燃的。火灾危险性低的，也就是不容易点燃的，点燃能量很高的可燃性物质，被称作难以点燃的物质；容易点燃的物质，可以在一个相当微弱的点燃源极短时间的作用下被点燃，并且燃烧能够很快地传播下去。

对于安全使用电气设备来说，使我们非常感兴趣的是可燃性物质中容易点燃的物质，例如，可燃性气体和易燃性液体。这些可燃性气体和易燃性液体挥发出来的蒸气（统称为可燃性气体）同空气混合后可以形成一种所谓的“爆炸性气体-空气混合物”。如果工业现场中存在这样的爆炸性气体-空气混合物，并且同时同地又存在足够能量的点燃源（例如，电气开关装置），那么，燃烧与爆炸就可能发生。

一般意义上，燃烧与爆炸是一种可燃性物质与氧气发生的氧化反应，反应过程中释放出热、光、压力；但是，燃烧与爆炸又有很大的不同，燃烧时，氧化反应的速度要慢一些，或者说，火焰的传播速度慢，而爆炸时，氧化反应的速度极快，火焰的传播速度极快，同时伴随着高温和高压，极具破坏性。氧化反应速度的快慢，主要与参与氧化反应的可燃性物质的物理-化学性质有关。因而，同样是可燃性物质，一些被点燃以后只能发生所谓的“燃烧”，例如，木头、煤炭等；另一些被点燃以后由燃烧迅速形成爆炸，例如，甲烷、氢气等。

国家标准 GB/T 2900.35《电工术语 爆炸性环境用电气设备》指出，爆炸是一种因氧化反应或其他放热反应而引起的压力和温度骤升的现象。

在现代工业中，大量存在着可燃性气体，大量使用着电气设备、电工仪表，给现代工业生产带来了极大的安全危害。事实上，无论是工厂还是煤矿，都曾经发生过很多爆炸灾难，造成了极大的人员和财产损失。

为了避免这些可燃性气体、易燃性液体和蒸气被生产过程中出现的电气放电火花和危险温度点燃而发生灾难，从 20 世纪初叶，人们就开始了大量的试验研究，提出了各种各样的防止这种爆炸的技术措施。

我们在这里提出燃烧与爆炸这一命题，无意深究燃烧与爆炸的深邃理论，仅仅是从了解可燃性气体、易燃性液体和蒸气燃烧与爆炸的初始概念出发，从而掌握人们迄今为止已经提出的各种各样的防爆电气技术措施的实质内涵，进一步推动工业防爆电气技术的更大发展。

1.2 燃烧与爆炸发生的充分必要条件

我们已经知道，可燃性物质在空气中的燃烧是一种化学反应变化，即可燃性物质和空气中的氧气在热能的作用下发生氧化反应的现象。在这种反应过程中，释放出来的热能又加热了未反应的混合物，使之进一步进行氧化反应，如此连续地使反应进行下去。爆炸是一种极其迅速的燃烧过程，伴随这一过程出现了强大的压力冲击波和极高的温度。

1. 燃烧与爆炸发生的充分必要条件

根据燃烧与爆炸的基本理论可知，燃烧与爆炸发生的充分必要条件是：

- 存在可燃性物质。
- 存在空气（21%的氧气，79%的氮气及其他惰性气体）。
- 存在点燃源。
- 同时同地存在可燃性物质、空气和点燃源。

燃烧与爆炸发生的充分必要条件是人们预防和避免可燃性气体发生燃烧与爆炸的原始理论依据。

这是一个众所周知的、简单而原始的问题。没有可燃性气体（物质），显然无法发生燃烧与爆炸；没有点燃源，即使存在可燃性气体（物质）和空气，显然也是无法发生燃烧与爆炸的。然而，我们正是在这个极其浅显的问题中找到了预防和防止可燃性气体发生燃烧与爆炸的基本答案，发现了预防和防止现代工业生产中可能出现的可燃性气体燃烧与爆炸的重要途径。

根据燃烧与爆炸发生的充分必要条件，我们在这里提出防爆电气技术的“守候定理”。

守候定理：在大气条件下，假若可燃性物质连续或长期地存在，不管点燃源如何，只要一出现，点燃就可能发生；同样，假若点燃源连续或长期地存在，不管可燃性物质如何，只要一出现，就可能被点燃。

这正像甲（乙）一直在等候乙（甲）一样，只要乙（甲）一出现就会和甲（乙）会面，故曰“守候”。守候定理告诉我们，在思考和处理防爆电气技术问题时，人们不仅要考虑可燃性物质的存在所造成的危险，而且还应该考虑点燃源的存在所造成的危险，尤其是连续或长期存在可能造成的危险。然而，遗憾的是，后一种情况常常被人们所忽视。

守候定理是人们在思考和解决防爆电气技术时必须遵守的一个重要原则。

2. 爆炸极限及影响它的主要因素

在工业生产过程中释放出来的可燃性气体，常常逸散在周围环境大气中，同空气混合形成可燃性气体-空气混合物。可燃性气体在空气中的浓度积累到一定值时，一旦遇到足够能量的点燃源，就可能发生燃烧，甚至爆炸。这个浓度的“一定值”，就叫做可燃性气体-空气混合物的爆炸极限（下限）。

爆炸极限定义为，当可燃性气体-空气混合物被点燃时，燃烧火焰在点燃源消失后可以在混合物中自行蔓延下去，此时混合物中可燃性气体含量（以体积百分比或单位容积所含质量计）的范围。火焰能够自行蔓延的最低浓度叫做爆炸极限的下限，简称爆炸下限；可燃性气体的浓度大于某个值时便不能发生燃烧爆炸，这“某个值”被叫做爆炸极限的上限，简称爆炸上限。例如，氢气-空气混合物的爆炸极限是4%~77%（体积比），即爆炸下限为4%，爆炸上限为77%。

燃烧火焰之所以在浓度低于爆炸下限的混合物中不能自行蔓延下去，是因为混合物中可燃性气体的数量太少，在点燃源作用下燃烧的可燃性气体所产生的热量不能够维持在点燃源消失之后

燃烧继续进行下去，尽管氧气十分充足。浓度高于爆炸上限的混合物，由于混合物中助燃性物质——氧气太少，无法被点燃源点燃，即使点燃源有足够的点燃能量。

爆炸极限，有时候，也称燃烧极限，不是一个物理量。它只是表征可燃性气体物理-化学性质的一个参数。一种可燃性气体-空气混合物的爆炸极限，不仅与这种可燃性气体-空气混合物的物理-化学性质有关，而且还与混合物的初始压力、初始温度、点燃源的功率、混合物中存在的惰性杂质诸因素有关。

(1) 单一型可燃性气体的爆炸极限

单一型可燃性气体是指某一种可燃性气体。它与空气混合后形成“单质”可燃性气体-空气混合物。这里，我们简要地讨论一下，除可燃性气体的物理-化学性质之外，试验条件对爆炸极限的影响。

1) 混合物初始压力对爆炸极限的影响

在可燃性气体-空气混合物爆炸极限的测试时，混合物的状态，即初始压力，对爆炸极限有着很大的影响。随着初始压力的升高，因混合物种类的不同，初始压力对爆炸极限的影响也是各不相同的。

对于碳氢化合物-空气混合物，通常情况下，随着初始压力的升高，爆炸极限逐渐拓宽。例如，氢气-空气混合物的爆炸极限，在初始压力升高至 1MPa 以前，是收缩的，再继续提高初始压力，开始逐渐拓宽；甲烷-空气混合物的爆炸极限，随着压力的升高，开始迅速增加，接着基本维持不变（图 1.1）；而对于一氧化碳-空气混合物，随着初始压力的升高，爆炸极限稍微有点收缩。

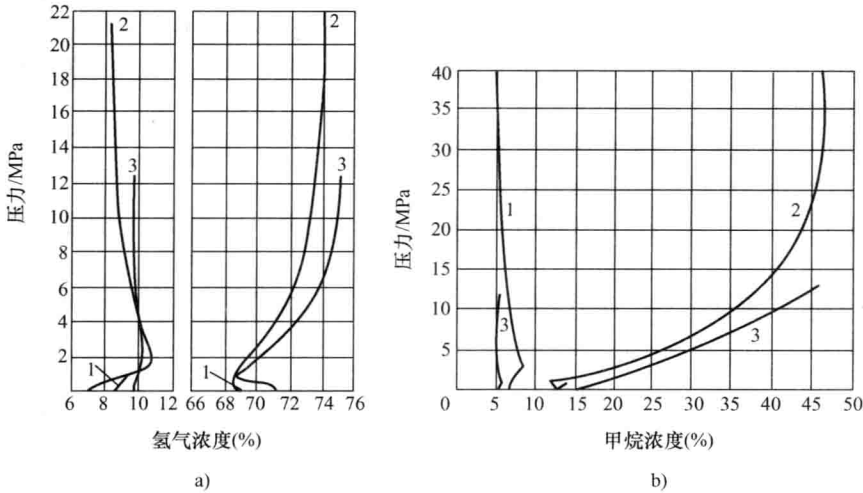


图 1.1 初始压力与爆炸极限的关系
a) 氢气-空气混合物 b) 甲烷-空气混合物

当减小混合物的初始压力低于大气压力至某个极限值 (p_0) 时，爆炸极限的上限与下限会合并在一起。碳氢化合物，除甲烷外，都明显地有这样一个极限压力 p_0 。对于碳氢化合物来说，当温度为 15 ~ 20℃ 时，这个极限压力为 $4 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ MPa。

2) 混合物初始温度对爆炸极限的影响

在测试可燃性气体-空气混合物的爆炸极限时发现，随着可燃性气体-空气混合物初始温度的增高，爆炸极限在拓宽，下限在减小，上限在增加。几种可燃性气体-空气混合物的爆炸极限与初始温度的关系如表 1.1 所示。

表 1.1 混合物初始温度与爆炸极限

混合物初始温度/℃	爆炸极限(%, 体积比)			爆炸极限/(mg/L)
	二硫化碳	丙酮	乙醇	汽油
0	4.2 ~ 27.8	4.2 ~ 8.0	2.55 ~ 11.80	65 ~ 150
100	1.25 ~ 33.4	3.2 ~ 10.0	2.25 ~ 12.53	50 ~ 203
200	—	3.2 ~ 10.0	2.0 ~ 12.50	50 ~ 203

3) 点燃源功率对爆炸极限的影响

在测试可燃性气体-空气混合物的爆炸极限时发现，点燃源的点燃功率同样对爆炸极限有着一定的影响。例如，增加点燃混合物的电气火花的功率，混合物的燃烧浓度范围（爆炸极限）就会拓宽。但是，这个燃烧浓度范围存在一个极限值，一旦达到这个值，不管电气火花点燃功率如何增加，爆炸极限都不会再发生变化。这时，如此功率的火花，通常被称作“饱和火花”。

4) 惰性杂质对爆炸极限的影响

在测试可燃性气体-空气混合物的爆炸极限时，令人特别感兴趣的是惰性杂质对混合物爆炸极限的影响。

在测试时发现，如果在混合物中添加不燃性气体或蒸气的话，那么，随着不燃性气体或蒸气数量的增加，可燃性气体-空气混合物的爆炸极限的上、下限会彼此靠近，最终会重合在一起。惰性杂质，例如，二氧化碳 (CO₂)、氮 (N₂) 或氩 (Ar)，改变了混合物中氧的数量，而且还吸收了初始点燃能量，使燃烧不能发生。然而，由于惰性杂质的不同，它们的这种熄焰效果也是不同的。

惰性杂质的熄焰效果是由它们的热容量所确定的，二氧化碳的热容量大于氮的，氮的大于氩的。其他种类的惰性杂质的熄焰效果可能比上述的还要大一些。例如，某些卤素有机化合物就具有极强的熄焰效果。

惰性杂质的熄焰效果常常被应用在火灾安全技术上。

(2) 混合型可燃性气体的爆炸极限

上面我们讨论了单一型可燃性气体的爆炸极限，下面再简单地介绍一下混合型可燃性气体的爆炸极限。

由几种可燃性气体混合在一起形成的混合物被称为混合型可燃性气体。它的爆炸极限可以用下式求得：

$$LEL = \frac{100}{\frac{c_1}{lel_1} + \frac{c_2}{lel_2} + \dots + \frac{c_n}{lel_n}} \% \tag{1.1}$$

$$UEL = \frac{100}{\frac{c_1}{uel_1} + \frac{c_2}{uel_2} + \dots + \frac{c_n}{uel_n}} \% \tag{1.2}$$

式中 LEL, UEL ——混合型可燃性气体-空气的爆炸下限和爆炸上限 (%)；

c_1, c_2, \dots, c_n ——混合型可燃性气体中各成分的浓度，(%)，而且， $c_1 + c_2 + \dots + c_n = 100\%$ ；

$lel_1, lel_2, \dots, lel_n$ ——混合型可燃性气体中各成分的爆炸下限 (%)；

$uel_1, uel_2, \dots, uel_n$ ——混合型可燃性气体中各成分的爆炸上限 (%)。

式 (1.1) 和式 (1.2) 告诉我们，混合型可燃性气体的爆炸极限，不仅与混合型可燃性气体中各成分的爆炸极限有关，而且还与混合型可燃性气体中各成分的浓度有关。因而，人们在确定混合型可燃性气体的爆炸极限时不仅要注意各成分的爆炸极限，而且还要特别考虑各成分在混合型可燃性气体中的浓度。这些浓度不同时混合型可燃性气体的爆炸极限就会不同，尽管混合型

可燃性气体中各成分相同。

这里举例计算混合型可燃性气体的爆炸极限。

【例 1.1】 计算表 1.4 中环氧树脂热分解时形成的混合型可燃性气体的爆炸极限，并分析一下它的各成分的浓度对混合型可燃性气体爆炸极限的影响。

表 1.4 指出，1g 某种牌号的环氧树脂在热分解时释放出：二氧化碳 8.3cm^3 、一氧化碳 28.2cm^3 、甲烷 30.2cm^3 、乙炔 2.9cm^3 、乙烯 8.8cm^3 、丙烯 4.1cm^3 、乙醛 1.9cm^3 。计算可知，除二氧化碳以外，可燃性气体的总体积为 76.1cm^3 ；在这种混合型可燃性气体中，各成分所占比例为：一氧化碳 37.0%、甲烷 39.7%、乙炔 3.8%、乙烯 11.6%、丙烯 5.4%、乙醛 2.5%。将这些数据和这些成分的爆炸极限代入式 (1.1) 和式 (1.2) 中计算，便可得出这种混合型可燃性气体的爆炸极限为

$$\begin{aligned}LEL &= \{100/[37.0\%/10.9\% + 39.7\%/4.4\% + 3.8\%/2.3\% + 11.6\%/2.3\% + 5.4\%/2.0\% + \\ & 2.5\%/4.0\%]\}\% \\ &\approx 4.5\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}UEL &= \{100/[37.0\%/74.0\% + 39.7\%/17.0\% + 3.8\%/100\% + 11.6\%/36.0\% + 5.4\%/ \\ & 11.0\% + 2.5\%/60.0\%]\}\% \\ &\approx 26.8\%\end{aligned}$$

假若我们用另一种牌号的环氧树脂进行试验。这种牌号的环氧树脂热分解释放出的可燃性气体依然是上述的几种，但是它们的体积是不同的，例如，它们的体积在混合型可燃性气体中所占比例为：一氧化碳 50.2%、甲烷 26.5%、乙炔 5.1%、乙烯 10.3%、丙烯 5.4%、乙醛 2.5%。将这些数据和它们的爆炸极限代入式 (1.1) 和式 (1.2) 中计算得出这种混合型可燃性气体的爆炸极限却为 4.8% ~ 32.2%。

由此可见，混合型可燃性气体中各成分的体积和它们的爆炸极限一样，在影响着它的爆炸极限。这一点应该引起人们的注意。

这里需要特殊指出的是，环氧树脂在热分解时会释放出二氧化碳（表 1.4 显示，表中所列环氧树脂释放的二氧化碳体积为 8.3cm^3 ）。二氧化碳对爆炸极限会产生一定的影响，随着它的体积的增加，混合型可燃性气体的爆炸极限将会缩小。因而，在上述的计算中去掉二氧化碳的数量，不会对混合型可燃性气体的爆炸极限产生不利的影响。

3. 爆炸性气体-空气混合物

当可燃性气体在同空气混合后形成的混合物中的浓度在爆炸极限以内时，这种混合物被称作爆炸性气体-空气混合物（简称爆炸性气体混合物）。

通常情况下，环境中出现了爆炸性气体混合物，这就意味着，这种环境已经处于一种非常危险的状态。因为，“爆炸性气体混合物”表示了“燃烧与爆炸发生的充分必要条件”中的“存在可燃性物质”和“存在空气（21%的氧气，79%的氮气及其他惰性气体）”两个条件已经“同时同地存在”，倘若此时此地“存在点燃源”具有足够的能量，显然，“燃烧与爆炸”必然发生。

在工业生产过程中或在日常生活的某些领域中，如果形成了爆炸性气体混合物，那将是一种十分严重的事件。因为环境中可能存在的点燃源是各种各样的，稍有不慎，它就会立即点燃这种爆炸性气体混合物，造成灾难。

1.3 可燃性气体

大家知道，无论在工业部门，例如，石油、化工、制药和煤矿开采等生产场所中，还是在日

常生活中，都存在大量的可燃性气体、易燃性液体和蒸气。迄今为止，在现代工业生产中，已经出现了 2000 多种可燃性气体和易燃性液体及蒸气。

1. 可燃性气体

在煤矿井下，煤层和围岩经常释放出天然气体；煤矿井下生产过程也会积累有害气体。例如，空气中的氧气同煤、岩石、木支架之间发生化学反应所产生的气体，有机物燃烧（例如，打眼放炮时和井下发生火灾时）所产生的气体等。

煤矿井下产生的所有这些有害气体，统称为矿井瓦斯。

矿井瓦斯的主要成分是甲烷（ CH_4 ）及其衍生物、二氧化碳（ CO_2 ）、一氧化碳（ CO ）、氮气（ N_2 ）及其氧化物。在这些气体中，最具有燃烧危险性的是甲烷（有时候浓度可能高达 98%）及其衍生物 [乙烷（ C_2H_6 ）、丙烷（ C_3H_8 ）和丁烷（ C_4H_{10} ）]。此外，矿井瓦斯中还可能含有数量不多的氢气（ H_2 ）以及其他可燃性气体形成的可燃性气体混合物。

在石油开采中，常常释放出与原油共生、在开采时与原油同时被开采出的油田气；此外，还有专门从纯油气田开采出的气田气。这些统称为“天然气”。事实上，天然气，从广义来讲，就是指自然界中天然生成、存在的一切气体；从狭义来讲，就是指天然蕴藏在地层中的烃类和非烃类气体的混合型气体。

天然气的成分和浓度，由于产地的不同，是不同的。它的主要成分是烷烃类，其中甲烷是主要成分，其次是乙烷、丙烷、丁烷，还有少量的硫化氢（ H_2S ）、二氧化碳、氮及其他微量的惰性气体。例如，我国东部和西部的天然气，它们的成分相同，但是含量却不同，如表 1.2 所示。

表 1.2 某些天然气的主要成分

气体名称		甲烷	乙烷	丙烷	正丁烷	异丁烷	戊烷	硫化氢	二氧化碳	氮
浓度(%)	西部气体	96.23	1.77	0.30	0.06	0.08	0.13	0.002	0.47	0.97
	东部气体	87.23	4.61	2.21	0.89	0.61	1.95	0	0.62	1.87

天然气是一种典型的混合型可燃性气体。

在石油化学工业中，系统和装置常常处理着大量的各种各样的可燃性气体和易燃性液体。在正常运行条件下，由于工艺操作的需要，有时候，这些可燃性物质会从工艺管道和设备装置中释放出来。当系统和装置发生故障时，不管是人为的操作故障还是系统和装置固有隐患造成的固有故障，可燃性物质的大量释放和泄漏是毫无疑问的。

不管系统和设备装置处于什么运行状态，释放出来的可燃性气体就会笼罩在系统和设备装置的周围；泄漏出来的易燃性液体就会积聚在设备和设备附近的地面上。易燃性液体，尤其是闪点低的易燃性液体，挥发出来的可燃性蒸气同样弥散在系统和设备装置的周围。

这些可燃性气体和（或）易燃性液体的蒸气，同空气混合后就可能形成爆炸性气体混合物。

2. 可燃性蒸气

我们在讨论可燃性气体时常常提到易燃性液体的蒸气。对于易燃性液体，它具有燃烧的特征，而对于它的蒸气，它往往具有爆炸的性质。

易燃性液体的蒸发，不仅与它的物理-化学性质有关，而且还与它的环境条件（例如，温度）有关。

大家知道，闪点是评价易燃性液体危险性的一个重要指标，它表征了易燃性液体的物理-化学特性。所谓闪点，就是在某一标准条件下使易燃性液体挥发出一定量的蒸气同空气混合后形成爆炸性蒸气-空气混合物时液体所具有的最低温度。显然，闪点越低，易燃性液体越容易挥发出