

防爆电气 上册

防爆电气概论

上册

中国矿业大学出版社



防爆电气概论

张显力 主编



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、防爆安全性能试验原则;概略地介绍了复合型防爆电气设备和组合型防爆电气设备(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系统安装。

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相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

防爆电气概论/张显力主编. —北京:机械工业出版社, 2008.1
ISBN 978-7-111-23281-0

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第004637号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:时静 责任校对:张晓蓉
封面设计:刘吉维 责任印制:杨曦
三河市国英印务有限公司印刷

2008年4月第1版第1次印刷
184mm×260mm·18.25印张·452千字
0001—5000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23281-0
定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379753 88379739
封面防伪标均为盗版

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都日臻完备，作者根据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）]。本书所涉及的标准请读者参阅后记。

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

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 8
 - 1.4.1 电气放电 8
 - 1.4.2 静电放电 12
 - 1.4.3 碰撞与摩擦 15
 - 1.4.4 固体热表面 20
 - 1.4.5 激光辐射 22
- 1.5 可燃性气体的分级分组 24
 - 1.5.1 可燃性气体的分级 24
 - 1.5.2 可燃性气体的分组 29
 - 1.5.3 可燃性气体分级分组举例 30

第 2 章 防爆电气设备 34

- 2.1 概述 34
- 2.2 防爆电气设备的通用技术要求 34
 - 2.2.1 防爆电气设备的分类及分级分组 34
 - 2.2.2 防爆电气设备的运行环境温度 37
 - 2.2.3 防爆电气设备的制造材料 37
 - 2.2.4 防爆电气设备的通用结构 40
 - 2.2.5 Ex 元件的通用要求 49
- 2.3 防爆电气设备的检查与试验 51
 - 2.3.1 机械性能检查与试验 51
 - 2.3.2 外壳的防护性能试验 53
 - 2.3.3 防爆电气设备的发热试验 53
 - 2.3.4 塑料外壳的有关试验 54
 - 2.3.5 机械火花点燃性能试验 58
 - 2.3.6 电缆引入装置的有关试验 60
- 2.4 防爆电气设备设计与制作的一般原则 62
 - 2.4.1 设计原则 62
 - 2.4.2 制作原则 63

第 3 章 隔爆型电气设备 64

- 3.1 概述 64
- 3.2 隔爆外壳的隔爆机理 64

- 3.2.1 耐爆性能 64
- 3.2.2 隔爆性能 66
- 3.3 隔爆外壳的典型结构和结构参数 71
 - 3.3.1 间隙式隔爆结构 71
 - 3.3.2 其他形式的隔爆结构 75
- 3.4 隔爆型电气设备防爆结构的设计和制造原则 77
 - 3.4.1 设计的一般原则 77
 - 3.4.2 常用隔爆结构示例 88
 - 3.4.3 制造的一般原则 95
- 3.5 隔爆安全性能试验 96
 - 3.5.1 隔爆外壳的耐爆性能试验 96
 - 3.5.2 隔爆外壳的隔爆性能试验 97

第 4 章 增安型电气设备 101

- 4.1 概述 101
- 4.2 增安型电气设备的防爆结构和安全要求 101
 - 4.2.1 外壳防护 101
 - 4.2.2 导线连接 102
 - 4.2.3 极限温度 102
 - 4.2.4 固体绝缘材料 103
 - 4.2.5 绕组 104
 - 4.2.6 电气间隙和爬电距离 105
- 4.3 增安型电气设备的防爆型式通用试验 107
 - 4.3.1 接线端子绝缘材料的耐热和拉力试验 107
 - 4.3.2 介电强度试验 108
- 4.4 增安型交流电动机 108
 - 4.4.1 专用防爆结构和安全要求 109
 - 4.4.2 堵转温升与 t_E 时间 111
 - 4.4.3 笼型电动机定子-转子之间气隙放电危险性的评价 116
 - 4.4.4 试验 118
- 4.5 增安型照明灯具 120
 - 4.5.1 专用防爆结构和安全要求 120
 - 4.5.2 温度限制 123
 - 4.5.3 试验 123

4.6 增安型电阻加热器	124	6.2.3 间距、电气间隙和爬电距离	153
4.6.1 专用防爆结构和安全要求	124	6.2.4 结构上的特殊要求	158
4.6.2 漏电和温度保护系统	125	6.3 本质安全电路中的元器件	159
4.6.3 试验	127	6.3.1 定额	159
第5章 正压型电气设备	130	6.3.2 电池及电池组	159
5.1 概述	130	6.3.3 熔断器和半导体器件	162
5.2 正压型电气设备的通用防爆结构和 安全要求	131	6.3.4 可靠元器件及其连接	163
5.2.1 通用结构和安全要求	131	6.3.5 二极管安全栅	168
5.2.2 电气间隙、爬电距离和极限 温度	132	6.4 本质安全电路的故障评价	170
5.2.3 保护系统中自动安全装置的 防爆型式	133	6.5 本质安全电路的分析与评价	171
5.3 保护性气体	133	6.5.1 分析与评价的基本原则	172
5.4 非静态正压型电气设备的安全措施 和安全要求	134	6.5.2 电感性电路安全火花性能的分析 与评价	177
5.4.1 检测最低正压	134	6.5.3 电容性电路安全火花性能的分析 与评价	178
5.4.2 正压外壳内压力变化状态 示意图	135	6.5.4 综合性电路安全火花性能的分析 与评价	180
5.4.3 检测吹扫时间	136	6.6 本质安全型电气设备的防爆型式试验	182
5.4.4 保护功能的描述	137	6.6.1 火花点燃试验	182
5.5 静态正压型电气设备的安全措施和 安全要求	138	6.6.2 介电强度试验	185
5.6 内含释放源的正压型电气设备的安全 措施和安全要求	138	第7章 浇封型电气设备	187
5.6.1 内置系统及其释放工况	139	7.1 概述	187
5.6.2 内含释放源的正压型电气设备 的正压保护技术	139	7.2 浇封型电气设备的防爆结构和安全 要求	187
5.6.3 内置系统的设计原则	140	7.2.1 结构和安全要求	188
5.7 正压型电气设备的防爆型式试验	142	7.2.2 故障的评价与可靠部件	192
5.7.1 正压型电气设备的通用试验	142	7.2.3 温度极限和保护装置	193
5.7.2 正压型电气设备的吹扫试验和 稀释试验导则	143	7.3 浇封型电气设备的防爆型式通用试验	194
5.7.3 无内部释放源的正压型电气 设备的吹扫试验和充气试验	144	7.3.1 浇封化合物耐候性试验和浇封型 电气设备温度测定	194
5.7.4 有内部释放源的正压型电气 设备的吹扫试验和稀释试验	144	7.3.2 介电强度试验	195
5.7.5 内置系统的试验	146	7.3.3 其他试验	196
第6章 本质安全型电气设备与电路	148	7.4 浇封型蓄电池	197
6.1 概述	148	7.4.1 结构和安全要求	197
6.2 本质安全型电气设备的结构	149	7.4.2 试验	199
6.2.1 外部导线的连接	149	第8章 油浸型、充砂型和特殊型电 气设备	200
6.2.2 导线	151	8.1 油浸型电气设备	200
		8.1.1 概述	200
		8.1.2 防爆结构和安全措施	200
		8.1.3 试验	201
		8.2 充砂型电气设备	202

8.2.1	概述	202	9.8.2	“nC”型密封组件、浇封组件 及气密组件	239
8.2.2	防爆结构和安全措施	202	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	241
8.2.3	故障工况	204	9.10	“nR”限制呼吸型电气设备	244
8.2.4	试验	206	第10章 复合型和组合型防爆电气 设备		
8.3	特殊型电气设备	206			246
8.3.1	概述	206	10.1	复合型防爆电气设备	246
8.3.2	特殊型防爆铅酸蓄电池组	207	10.1.1	概述	246
第9章 “n”型电气设备			10.1.2	0区用复合型防爆电气设备	246
9.1	概述	214	10.1.3	检查与试验的一般原则	248
9.2	“n”型电气设备的通用防爆结构和 安全要求	214	10.2	组合型防爆电气设备	248
9.2.1	结构	215	10.2.1	概述	248
9.2.2	温度限制	216	10.2.2	组合型防爆电气设备设计与制作 的一般原则	248
9.2.3	电气强度	217	10.2.3	检查与试验的一般原则	252
9.3	“n”型电气设备的防爆型式通用 试验	219	10.3	防爆型蓄电池式工业车辆	252
9.3.1	外壳的综合试验	219	10.3.1	概述	252
9.3.2	引入电缆的夹紧试验	220	10.3.2	防爆结构和安全要求	253
9.4	“nA”无火花型旋转电机	220	10.3.3	蓄电池式防爆叉车	255
9.4.1	专用结构和特殊要求	220	10.3.4	检查与试验	256
9.4.2	气隙火花的评价	222	第11章 爆炸性气体环境中电气设备 的选择与安装		
9.4.3	额定电压大于1000V的旋转 电机	223			259
9.4.4	试验	224	11.1	概述	259
9.5	“nA”无火花型照明灯具	225	11.2	爆炸性气体环境中危险区域的划分	259
9.5.1	专用结构和特殊要求	225	11.2.1	危险区域定义	259
9.5.2	试验	229	11.2.2	危险区域划分原则	260
9.6	“nA”无火花型蓄电池和蓄电池组	233	11.2.3	危险区域划分示例	261
9.6.1	专用结构和特殊要求	233	11.3	爆炸性气体环境中电气设备的选型	265
9.6.2	试验	234	11.4	爆炸性气体环境中电气设备的安装	267
9.7	“nA”无火花型电气单元	235	11.4.1	供电系统和电气保护	267
9.7.1	“nA”型熔断器	235	11.4.2	电缆敷设	271
9.7.2	“nA”型仪器和小功率元器件	235	11.4.3	电气设备安装	275
9.7.3	“nA”型插接装置	236	11.4.4	本质安全电路系统相关参数的核 算与检查	281
9.7.4	“nA”型电流互感器	237	后记		
9.8	“nC”有火花型电气单元	237			285
9.8.1	“nC”型封闭断路器和非点燃 元件	237	参考文献		
					286

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，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“爆炸性气体混合物”。如果工业现场中存在这样的爆炸性气体混合物，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）的话，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，大量使用着的电气设备、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，已经发生了多次爆炸灾害，造成了极大的人员和财产灾难。

人们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，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防止可燃性气体发生燃烧与爆炸的原始理论依据。

这是一个谁都知道的、简单而原始的问题。没有可燃性物质，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物质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存在所造成的危险，而且还应该考虑点燃源存在所造成的危险，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%~74%，即爆炸下限为4%，爆炸上限为74%。

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。

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。

对于一氧化碳-空气混合物，随着初始压力的升高，爆炸极限少许有点收缩；而对于碳氢-空气混合物，随着初始压力的升高，爆炸极限逐渐拓宽。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，爆炸极限开始迅速增加，接着基本维持不变，如图1.1所示。

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

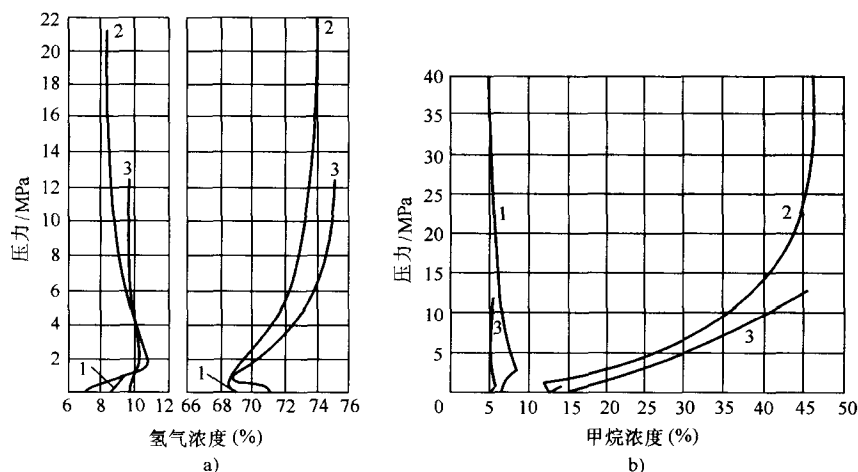


图 1.1 初始压力与爆炸极限的关系
a) 氢气-空气混合物 b) 甲烷-空气混合物

合物来说，当温度为 15 ~ 20℃ 时，这个极限压力大约为 4×10^{-3} MPa ~ 5×10^{-3} MPa。

(2) 混合物初始温度对爆炸极限的影响

在测试可燃性气体混合物的爆炸极限时发现，随着可燃性气体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 爆炸极限与混合物初始温度

混合物的初始温度/℃	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，混合物的爆炸极限范围就会拓宽。但是，这个爆炸极限范围存在一个极限值，一旦到达这个值，不管点燃功率如何增加，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、下限会被此靠近，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。然而，由于惰性杂质的不同，它们的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。

3. 混合型可燃性气体的爆炸极限

上面我们讨论了单一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形成的混合型可燃性气体的爆炸极限，可以用下式计算求得：

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

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

式中 LEL , UEL ——混合型可燃性气体混合物的爆炸下限和爆炸上限, %;

c_1, c_2, \dots, c_n ——混合型混合物中各组份的浓度, %, 而且, $c_1 + c_2 + \dots + c_n = 100\%$;

$lel_1, lel_2, \dots, lel_n$ ——混合型混合物中各组份的爆炸下限, %;

$uel_1, uel_2, \dots, uel_n$ ——混合型混合物中各组份的爆炸上限, %。

当可燃性气体同空气混合后形成的混合物的浓度在爆炸极限以内时, 这种混合物被称作爆炸性气体混合物。“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“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、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。

在煤矿井下, 煤层和围岩经常释放出来天然气; 煤矿井下生产过程也会积累起来有害气体, 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) 和一氧化碳 (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、丙烷和丁烷)、氢气 (含量不大) 以及其他可燃性气体形成的可燃性气体混合物。

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; 泄露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。

1. 易燃性液体的蒸发

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。闪点越低，易燃性液体越容易挥发出可燃性蒸气，越具有危险性。

几种易燃性液体的闪点如表 1.2 所示。

环境温度对易燃性液体的蒸发具有明显的影响。这是肯定的。尽管有一些易燃性液体的闪点较高，通常情况下，不容易蒸发，挥发出可燃性气体，但是，随着环境温度的升高，蒸发的作用逐渐增强，挥发出的可燃性蒸气数量增多。

表 1.2 某些易燃性液体的闪点

易燃性液体	分子式	闪点 / °C	易燃性液体	分子式	闪点 / °C
壬烷	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$	30	苯酚	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	75
硝基甲烷	CH_3NO_2	36	苯乙烯	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2$	30
硝基乙烷	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$	27	苯胺	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	75
甲醇	CH_3OH	11	丙酮	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	-20
乙醇	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	12	丁酮	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COCH}_3$	-9
甲酸	HCOOH	42	乙醛	CH_3CHO	-38
煤油	—	38	氯乙烯	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$	-78
水煤气	—	1.2	二己醚	$[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5]_2\text{O}$	75
苯	C_6H_6	-11	丙烯腈	$\text{CH}_2=\text{CHCN}$	-5
甲苯	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	4	乙腈	CH_3CN	2

从表 1.2 中可以看出，各种易燃性液体的闪点相差很大。有一些在常温下就可以蒸发成蒸气。闪点低的易燃性液体就具有更大的危险性。

2. 有机绝缘材料的热分解

除了工业生产过程中释放出来的可燃性气体和易燃性液体的蒸气外，在电气设备内使用的有机绝缘材料因放电火花或电弧作用分解出来的可燃性气体，同样具有极大的危险性。

在工矿企业中，有时候，在电气设备的外壳内发生一些与周围环境大气无关的可燃性气体爆炸现象。人们分析了这些爆炸，认为这是由于电气设备内使用的有机绝缘材料在设备故障状态下发生热分解析出了可燃性气体所造成的。

在电气设备中，塑料材料和其他的聚合材料获得了广泛的应用，既可以作为设备非导电部件的结构材料，又可以作为导电部件的绝缘材料。在电气设备的长期运行过程中，空气的高湿度，矿井水的浸蚀，温度的变化以及导电性尘埃的渗入，渐渐地造成绝缘材料的绝缘性能下降，接着，发生电气击穿。大功率的电气放电，例如，弧光短路引起的强功率放电，都是有机绝缘材料发生热分解的直接原因。

在国际上，有关的实验室进行了大量试验。例如，人们测试了 1g 树脂热分解时产生的

气体的成分和数量，如表 1.3 所示。

表 1.3 1g 树脂热分解时产生的气体成分和数量

气体成分	气体数量/cm ³		
	聚酰胺树脂	环氧树脂	苯乙烯-聚酯共聚物
二氧化碳	52.0	8.3	19.0
一氧化碳	100.0	28.2	—
氢气	80.6	—	—
甲烷	56.3	30.2	16.9
乙炔	—	2.9	—
乙烯	—	8.8	13.2
丙烯	—	4.1	—
1,3-丁二烯	—	—	3.2
乙醛	—	1.9	—
苯乙烯	—	—	21.5
气体总量	288.9	84.4	73.8
爆炸下限 ^① (%) (体积比)	7.7	6.1	2.6

① 使用式 (1.1) 计算的混合型可燃性气体-空气混合物的爆炸下限。

从表 1.3 中可以看出，假若在容积为 10L 的隔爆外壳内热分解：聚酰胺树脂 2.9g，或者环氧树脂 7.7g，或者苯乙烯-聚酯共聚物 3.6g，则这个外壳内就会形成混合型爆炸性气体-空气混合物。

人们对防爆电气设备中常用的 10 多种有机绝缘材料进行了热分解分析，得到了如表 1.4 中所示的可燃性气体成分和数量。

表 1.4 常用有机绝缘材料 (20g) 在温度为 500℃ 发生热分解时所产生的气体

材料名称	气体发生量/mL	气体的成分及含量 (%) (体积比)							
		H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄
牛皮纸	2552	3.75	5.67	18.56	7.48	27.79	1.27	34.71	0.78
木材	2360	3.73	4.92	18.0	10.54	22.67	0.73	38.70	0.71
乙烯薄膜	1440	19.94	8.51	33.01	18.39	1.40	7.96	6.89	3.90
尼龙酰胺	1365	16.71	8.52	30.91	8.55	6.72	6.70	14.93	6.96
涤纶	4140	1.71	2.50	13.08	1.73	31.22	0.11	47.34	2.31
绝缘漆布	2860	6.86	2.06	10.06	11.95	19.12	4.48	43.15	1.45
硅有机玻璃	618	4.99	11.75	59.61	17.80	1.15	0.49	3.98	0.26
赛璐珞	4090	0.61	3.40	13.78	1.96	29.29	—	47.40	3.50
酚醛塑料	2840	13.28	4.04	15.06	14.08	20.28	1.84	30.44	0.98
丙烯酸树脂	770	11.83	13.12	49.97	3.34	8.00	0.73	11.72	1.29

(续)

材料名称	气体发生量/mL	气体的成分及含量 (%) (体积比)							
		H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄
瓷漆	910	27.78	3.27	10.01	10.77	10.81	4.60	30.29	2.47
漆 1 (6 个月后) ^①	1900	12.34	3.98	19.92	18.39	13.48	6.33	23.30	2.26
漆 2 (6 个月后)	2190	6.75	4.16	23.97	13.19	16.96	5.55	26.06	3.37
漆 3 (2 个月后)	1800	28.36	4.50	27.24	12.67	6.78	4.86	12.31	2.27
漆 4	940	5.82	8.26	44.73	10.40	10.38	4.11	14.24	2.06
漆 5	1125	20.22	1.22	6.09	13.85	13.98	3.15	34.25	5.29

① 引用文件中漆的牌号不详,以漆 1、漆 2、漆 3、漆 4 和漆 5 代之。

从上述的分析可知,在防爆电气设备中有机绝缘材料热分解时产生的可燃性气体,同样是十分危险的,无论是研究人员还是设计人员都应该给以足够的关注。

1.4 点燃源

一切能够引起爆炸性气体混合物发生燃烧与爆炸的能量释放源都被叫做点燃源。例如,电气放电,高温热体等。在可燃性气体存在的场所中,电气设备就可能成为一种点燃源,例如,电气开关在接通或断开时就会产生电气放电。

在爆炸性气体环境中,电气设备的开关放电是一种十分危险的点燃源。

一般地讲,爆炸性气体混合物的点燃源可以分为以下几类:电气放电、静电放电、碰撞与摩擦、固体热表面、激光辐射等;当然还有一些其他的,这里不再赘述。

1.4.1 电气放电

电气开关放电,简称电气放电,作为爆炸性气体混合物的重要点燃源,主要是指电气装置中的开关元件在开与关时产生的放电。这种放电是在有源网络中发生的,是一种“有源”式放电,具有很大的能量。

有源网络的放电,不仅包括电气装置在正常工作状态下出现的放电,例如,开关元件在闭合或断开瞬间产生的电气火花(小功率时)、电弧(大功率时)、直流电机在换向时电刷与整流子之间产生的火花,而且还有电气线路中因绝缘破坏出现漏电或短路所引起的放电火花或电弧。这一类的放电对于点燃爆炸性气体混合物具有极大的危险性。

1. 电气放电的一般概念

根据燃烧与爆炸的热理论,电气放电点燃可燃性气体的过程是,在火花间隙处,电气放电把电气能量传递给可燃性气体的分子,使这些分子处于强烈激化和离子化状态。于是,燃烧过程——氧化放热反应开始,这一反应引起火花间隙处可燃性气体的温度急剧增高。

在球形的初始火焰核中所产生的热量正比于火焰核的体积(半径的立方),由于热辐射和热传导引起的热损失正比于火焰核的表面积(半径的平方),因此,火焰核表面的温度就反映了火焰核产生的热量与它表面损失的热量之间的平衡状态。

火焰核表面具有足够高的温度,对于燃烧的自行蔓延是比较有利的;在点燃源停止作用

以后，它就向周围可燃性气体分子释放出维持反应的必要的能量。为使燃烧自行蔓延开来，火焰核必须有一个相对恒定的温度和保证维持可燃性气体混合物所需这个恒定温度的某个临界半径。所以，尽管每次电气放电都能引起周围爆炸性气体混合物点燃，但是，火花放电后所产生的火焰核并不一定都能发展下去。只有在火焰核具有某个临界体积，热损失得到补偿，保持了必要的高温时，燃烧才能自行蔓延开来。火焰核形成的时间正比于化学反应进行的时间。

最小点燃能量可以从下式中计算求得，它是直径 $d = 0.08a/u_1$ 的临界火焰核燃烧时所必需的能量 (E):

$$E = 6.3d^2 = 4 \times 10^{-2} a^2 / u_1^2 \quad (1.3)$$

式中 a ——导温系数， m^2/s ;

u_1 ——火焰传播的法向速度， m/s 。

某些可燃性气体-空气混合物的燃烧特性和最小点燃能量如表 1.5 所示。

表 1.5 某些可燃性气体-空气混合物的燃烧特性

混 合 物	爆炸极限/% (体积比)		化学计算浓度 (%)	最小点燃能量 /mJ	燃烧温度 /K
	下 限	上 限			
甲烷	5.0	15.0	9.5	0.28	2316
乙烷	3.22	12.45	5.6	0.26	2370
丙烷	2.37	9.5	4.0	0.25	2383
丁烷	1.86	8.41	3.1	0.24	2391
戊烷	1.4	7.8	2.6	0.24	2392
己烷	1.25	6.9	2.2	0.23	2397
庚烷	1.0	6.0	2.26	0.22	2399
乙烯	2.75	28.6	6.56	0.1	2557
丙烯	2.4	11.1	4.5	0.25	—
氧化乙烯	3.0	80.0	7.8	0.062	—
甲苯	1.27	6.75	2.28	—	2484
乙炔	2.5	81.0	7.75	0.019	2893
氢	4.0	74.2	29.5	0.019	2483
汽油—70	0.79	5.16	2.9	0.23	—
丙酮	2.5	12.8	5.0	—	—

在有关燃烧与爆炸的理论著作中所描述的临界火焰核，人们用实验证明，它是存在的。

大量的试验确定，如果电气放电的初始能量足以形成临界火焰核的话，那么，放电火花就可以点燃爆炸性气体混合物。就甲烷在空气中的含量为 8.5% 的混合物来说，火焰核的临界直径为 0.1cm，形成时间为 140 μ s。有关著作指出，电极的熄焰作用对点燃能量的数值有着本质的影响。如果电极间的距离小于临界火焰核的直径的话，则点燃所需的能量应该大