

# “防爆安全技术”讲座

徐建平

(上海仪器仪表自控系统检验测试所,上海 200233)

随着社会经济的发展,大型现代化的石油化工、钢铁、煤炭等企业不断建成。由于其生产规模日益扩大和自动化程度的提高,在涉及爆炸性物质的储存、运输以及物料的生产、加工和处理工序的生产过程中,将不可避免地存在爆炸性危险物质。同时诸如选用、安装、检修、操作规范等人为因素也都构成了至关重要的防爆安全问题。据资料介绍,煤矿井下约有三分之二的场所属于爆炸性危险场所;石油开采现场和炼油厂约60%~80%的场所属于危险区域;在化学工业中约80%以上的生产车间为危险区域。另按国际电工委员会的定义,凡涉及防爆安全问题的领域有:炼油、化工企业、燃油燃气充装、制药业、气体管线和输配、分析实验室、表面喷涂工业、印刷工业、电子器件制造业、地下煤矿工业、污水处理厂、医院手术室、制糖业、木材加工、粮食处理与储存、金属表面研磨等。

在这些生产领域中,爆炸性危险物质的泄漏是不可避免的,它与空气混合将形成爆炸性混合物,生产现场一旦出现危险点燃源,将不可避免地导致灾难性爆炸事故。尤其是近年来随着城市中心区域的拓展、企业数量的增多、生产规模的增大、危险化学品使用量的增加,这无疑对人民生命、城市安全、国民经济生产安全构成重大潜在危险。

本讲座将以通俗、实用为宗旨,基于爆炸性混合物的基本特性、防爆基本原理,简要介绍自动化仪表及系统在爆炸危险场所安全应用相关的共性防爆技术问题,并重点讲述自动化仪表产品最为常用的隔爆型和本质安全型防爆技术要求和设计原则。

## 第1讲 防爆基础概要

### 1 爆炸性环境的形成

如前所述,在不少生产过程中有可能出现爆炸性混合物,具体有以下几种情况:

#### (1) 可燃性气体与空气形成爆炸性混合物

当物料中存在可燃性气体(如氢气、乙炔、乙烯、丙烷等)时,如遇盛装物料的容器密闭不良,管道、阀门泄漏;或安全阀、排气阀、呼吸阀等动作;或受热、保冷失效等引起容器内压力猛升,导致容器破裂或爆破片冲破;或使用不当、控制不严;或设计不良,排气未导入火炬等种种因素,都将致使可燃气体逸散到生产场所中;或储存、保管不当,电石吸潮逸出乙炔,或液化石油气残液随便倾倒等等,也会导致可燃性气体大量逸散,极易使场所中可燃性气体浓度升高,达到爆炸极限而产生爆炸危险。

#### (2) 易燃液体蒸气与空气形成爆炸性混合物

在某一标准条件下,使液体释放出一定量的蒸气而

形成可点燃的蒸气-空气混合物的液体的最低温度叫做该液体的闪点。不同的可燃性液体具有不同的闪点。例如,汽油的闪点约为 $-43^{\circ}\text{C}$ ,柴油为 $-20^{\circ}\text{C}$ ,乙醇的闪点为 $11^{\circ}\text{C}$ ,乙酸的闪点为 $40^{\circ}\text{C}$ ,而润滑油的闪点都高于 $100^{\circ}\text{C}$ 。可燃性液体的闪点低,表示可燃性液体在低温下可以形成爆炸性混合物,其危险程度高;反之,可燃性液体的闪点高,则在常温下不易形成爆炸性混合物,其危险程度也相对低一些。

在防火工程上将闪点小于等于 $28^{\circ}\text{C}$ 的可燃性液体(包括液化石油气)称为甲类液体,闪点介于 $28\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的可燃性液体称为乙类液体,闪点大于等于 $60^{\circ}\text{C}$ 的可燃性液体称为丙类液体。具有不同闪点的可燃性液体,其防火措施也各不相同。

在防爆工程上,对于环境中存在闪点小于等于环境温度的可燃性液体,或物料操作温度高于可燃性液体闪点的情况,当可燃性液体有可能泄漏时,其周围环境应考虑为爆炸危险环境。

易燃液体如苯、石油醚、乙醇、汽油、丙酮等,闪点较低,在生产、使用、储存过程中极易产生气化并与空气形成爆炸性混合物。

#### (3) 易燃固体蒸气与空气形成爆炸性混合物

作者徐建平,男,1962年生,1984年毕业于江苏理工大学,教授级高级工程师,享受国务院特殊津贴待遇专家、美国仪表学会防爆电气设备委员会高级会员、IECEX体系国际评审员;主要从事自动化仪表及工业防爆安全、防爆电器产品认证和工程项目防爆安全的评价和研究。

有些易燃固体(如萘)易升华。若遇通风不良,遇热升温,温度超过闪点,其升华的蒸气与空气能形成爆炸性混合物。易升华的易燃固体极少,此问题不太突出。

#### (4) 可燃性粉尘与空气形成爆炸性混合物

可燃性粉尘如淀粉、硫磺粉等,与空气混合达到一定比例时,能形成爆炸性混合物。一般情况下,可燃性粉尘的爆炸下限较高,这有利于安全。

某些金属如镁、铝、钛等呈固体块状时不易燃烧,但细粉状的金属粉尘是可燃的,它们与空气混合也能形成爆炸性混合物。特别需要说明的是,由于镁、铝、钛等粉尘系导电粉尘,粉尘一旦进入仪表或电气设备外壳内部不仅会严重影响产品的电气安全性能,更重要的是因为导电粉尘的进入有可能引起电路直接短路而产生火花,从而大大增加了产生爆炸的可能性。

## 2 爆炸的原因

### 2.1 燃烧与爆炸

燃烧是人们十分熟悉的一种自然现象,它是一种氧化反应,氧化反应放出热量;当反应放出的热量使反应介质温度升高到一定程度时可以形成可见的火焰。而这里所指的爆炸是燃烧的一种形式,当氧化反应的速度达到一定程度时,由于反应瞬时释放大量的热,造成气体激烈膨胀,形成冲击波,并伴有声响,这种现象称为爆炸。

#### (1) 易燃液体的燃烧与爆炸

易燃液体既易燃烧又能爆炸,两者差异在于燃烧条件、燃烧速度和燃烧表现不同。现以酒精为例加以说明。

酒精放在酒精灯内,用明火点燃灯芯,此时酒精在灯芯顶端燃烧,并不爆炸。这是因为酒精灯的燃烧经历以下几个过程:

① 在灯芯的毛细管引力作用下,酒精从下面吸引到灯芯顶端。因为毛细管引力作用下吸引液体的速度很慢,单位时间内到达顶端的酒精量很少。

② 灯芯顶端的酒精须经蒸发气化成酒精蒸气。

③ 酒精蒸气须经扩散,与空气混合。

④ 酒精蒸气与空气混合达到一定浓度,方能遇火燃烧。燃烧倒是很快的,但是酒精灯的燃烧受到毛细管引力限制,扩散又较慢,可燃物的量又很有限,因此只能燃烧,不会爆炸。

如果事先将酒精加热使之气化,在密闭容器内与空气混合成一定比例,此时点火,酒精蒸气与空气的混合物将立即迅猛燃烧,产生大量气体产物和热量,造成压力骤增,引起爆炸。

#### (2) 可燃气体的燃烧与爆炸

为便于说明起见,以气体打火机为例。丙烷在打火机内呈液态,使用时气化释出,扩散与空气混合达到一定比例时,遇火燃烧。因为扩散需要时间,而且打火机细孔中释出的丙烷气体速度较慢,数量有限,因此只能稳定地燃烧,不会爆炸。

如果事先把大量丙烷气体与空气混合,使浓度达到爆炸极限,此时遇明火,则燃烧不受丙烷扩散速度的限制而得以迅速进行,形成爆炸。

### 2.2 产生燃烧的根本原因

#### (1) 物态原因

气态爆炸性混合物中,可燃物质的分子高度分散,只要较小的能量就可以把部分气体分子加热活化到引起剧烈氧化反应的程度而引起燃烧。因此,可燃气体与空气的混合物,其着火能量比液态、固态都小。

粉尘与空气形成的爆炸性混合物中,虽然粉尘的分子数量大大超过气态,一般气体大都为单分子,蒸气大都为双分子或几个分子,而粉尘颗粒拥有的分子数以亿计,但是因为粉尘粒度细,因此使其升温活化达到燃烧所需的能量大大低于块状固体。

#### (2) 着火能量小

一般可燃气体和易燃液体其本身着火能量就小。可燃气体的着火能量在  $5 \times 10^{-1} \sim 10^{-2}$  mJ 之间,其中氢气、乙炔的最小着火能量仅为 0.019 mJ。易燃液体的最小着火能量大都在 0.2 ~ 0.8 mJ 之间,例如汽油为 0.2 mJ。毫焦耳级的能量是极小的。为使大家容易理解,现将其换算成热量卡为单位:

$$0.2 \text{ mJ} = 0.2 \times 0.24 \div 1000 = 4.8 \times 10^{-5} \text{ 卡}$$

汽油的最小着火能量仅为  $4.8 \times 10^{-5}$  卡(十万分之五卡都不到)!当然,这里是指最小着火能量,在一般条件下,着火能量要比这大些。

通常,点火源的方式与点燃能量也有关系,若以电火花作为点火源,则感抗电路中产生的火花最易点燃,容抗电路次之,阻抗电路第三。

#### (3) 闪点低

过去规定闪点在 45 ℃ 以下为易燃液体,现按 GB6944-2005《危险货物分类和品名编号》规定,闪点在 61 ℃ 以下均属易燃液体。部分常用易燃液体如丙酮、苯、石油醚、乙醚、汽油等的闪点都大大低于摄氏零度。即使是常温条件,温度早已超过了闪点,危险性很大。气体或粉尘形成的爆炸性混合物无闪点,在低温下遇火源也会爆炸。

#### (4) 有些易燃液体自燃温度低

例如二硫化碳的自燃温度为 102 ℃,乙醚为 170 ℃。

如果物体(如电气设备)表面温度超过或达到自燃温度,即可引起爆炸性混合物自燃而发生爆炸。

### 2.3 产生爆炸的原因

可燃气体、易燃液体蒸气、易燃固体蒸气、可燃性粉尘等与空气形成的爆炸性混合物的燃烧速度很快,为每秒数米至千米,大范围的强烈爆震速度可高达每秒数千米;这类燃烧的反应时间大多为  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  s;反应产物是大量气体,并放出大量热量。由于反应速度较快,产生的热量来不及散失冷却,于是温度迅速升高,达摄氏几百度到上千度,使气体膨胀、压力猛升,进而发生爆炸。

可见,爆炸是快速燃烧的结果。因此,采取措施消除包括自动化仪表在内的电气设备的电火花和危险高温,将有利于防止燃烧,避免爆炸的形成。

## 3 爆炸三角形原理

### 3.1 爆炸三要素

综上所述,具有潜在爆炸危险的环境产生爆炸必须具有点燃源(电火花、热表面等)、爆炸性物质(可燃性气体或粉尘等)、空气(氧气)三个条件。

如图1所示,当上述三个条件同时存在,而且当爆炸性物质与空气的混合浓度处于爆炸极限范围内(即处于爆炸下限和爆炸上限之间)时,将不可避免地产生爆炸。

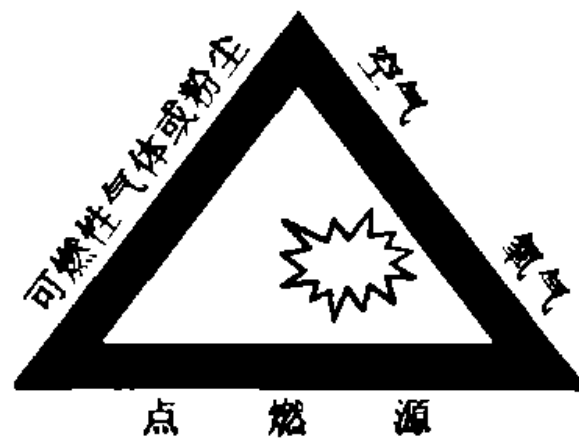


图1 爆炸三角形示意图

因此,在实践中,为了有效地防止爆炸事故的发生,人们总是设法避免上述三个条件同时存在,以达到防爆的目的。其中,最基本的技术应是将所有可能存在或产生点燃源(电火花和热表面)的电气设备安装在不具有爆炸危险的场所(即安全场所),或者设法使安装电气设备的场所不会形成爆炸性环境。这是着手进行化工厂设计或设备设计时首先应该考虑到的方面。但是,许多工业生产现场的实际情况和具体应用要求,决定了相当一部分过程测量与控制用电气设备必须安装在爆炸危险场所。此时,必须选用具有特定防爆技术措施的电气设备来保证生产现场的安全,避免灾难性爆炸事故的发生。

### 3.2 点燃源

根据目前技术水平所掌握的资料,涉及爆炸的点

燃源大致可分为电气设备相关的点燃源和非电气设备相关的点燃源两个方面。

电气设备相关的主要点燃源有:电火花、高温、电气设备的热表面、电弧、无线电电磁波辐射。

非电气设备相关的主要点燃源有:机械(撞击/摩擦)火花、热表面、火焰及热气体、化学热、静电、光辐射、离子辐射、超声波、雷电、绝热压缩和冲击波、放热反应及粉尘自燃、明火等。

## 4 爆炸性混合物的特性参数

### 4.1 爆炸极限

爆炸极限常用可燃性物质在可燃性混合物中的体积百分比(浓度)表示。试验表明,只有当可燃性气体或蒸气与空气的混合物浓度介于某个范围内时才能产生爆炸(燃烧),超出此范围就不会被点燃,这一范围的最高点和最低点分别称为爆炸上限(UEL)和爆炸下限(LEL)。例如,甲烷的爆炸下限是5.0%(体积比),爆炸上限是15%(体积比)。表1列出了几种常见的可燃性气体或蒸气的爆炸极限值。

表1 几种常见的可燃性气体或蒸气的爆炸极限

气体名称	vol%	
	爆炸上限	爆炸下限
甲烷	15.0	5.0
丙烷	9.5	2.1
汽油	约7.6	约1.4
柴油	约6.5	约0.6
乙醇	19.0	3.5
乙烯	34.0	2.7
氢气	75.6	4.0
乙炔	82.0	1.5

工程实践中可采用通风的方法降低环境中可燃性物质的浓度,以避免爆炸危险。有时人们将可燃性物质的浓度低于爆炸下限的混合物称作为“过稀”,将浓度高于爆炸上限的混合物称作为“过浓”,过浓或过稀的混合物不能形成爆炸或燃烧。根据有关规范规定,当环境中可燃性物质的浓度低于爆炸下限的10%时,可认为该环境是安全的。

### 4.2 最小点燃能量

图2所示为可燃性混合物(氢气和丙烷)的点燃特性曲线。在最易点燃混合物浓度下,一个电路的一次放电正好足够点燃混合物,这个电路总能量的最小值,表示为相应的物质与空气混合物的最小点燃能量(MIE)。最小点燃能量可以利用充电的电容器产生短路放电火花引燃爆炸性混合物的方法来测量最小点燃能量。

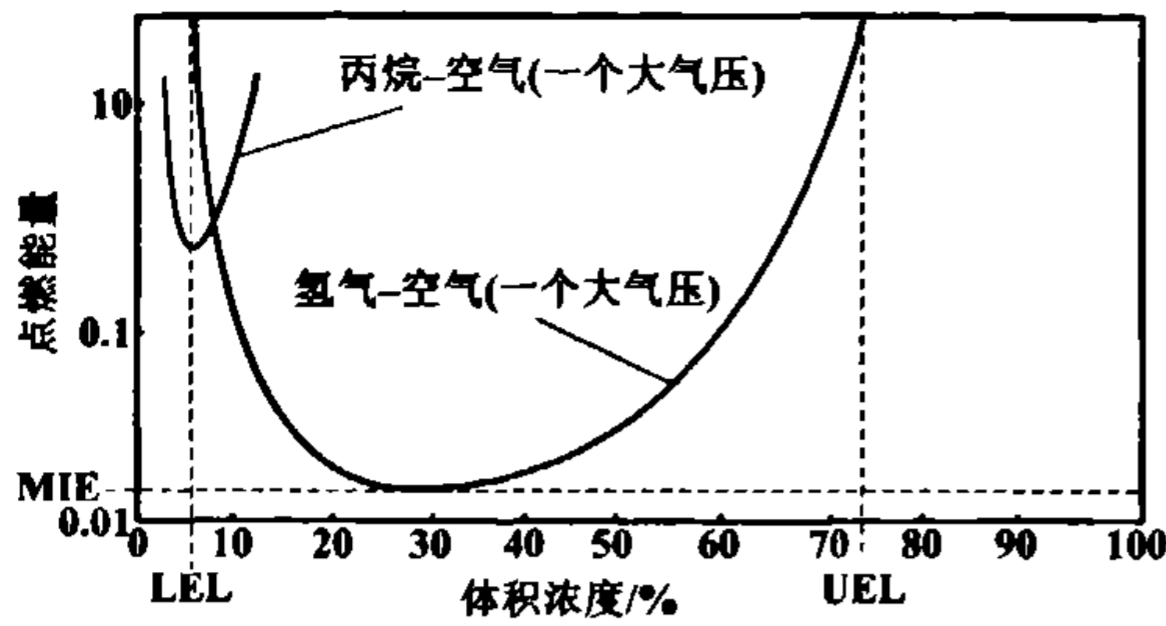


图2 火花点燃特性

假设电容器的电容量为  $C$ , 电容两端的电压为  $U$ , 则相应的放电能量  $E$  为相应的点燃能量:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

每一种可燃性物质均可作出相应的点燃特性曲线。当可燃性物质与空气形成的混合物浓度(%)处于爆炸下限(LEL)和爆炸上限(UEL)之间的可燃范围内时,总存在一个最小点燃能量点(MIE)。如果点燃能量大于 MIE 值时,则混合物就会被火花点燃,反之,如果点燃能量小于 MIE 值时,则是安全的。

由于可燃性气体或蒸气的点燃特性各不相同,它们被点燃所需的活化能不同,当它们被电火花点燃时,需要的电能量也不相同。例如,甲烷的最小点燃能量是 0.28 mJ,正丁烷是 0.25 mJ,异丁烷是 0.52 mJ,乙炔是 0.096 mJ,氢气是 0.019 mJ。

在实际应用中,可以采取限制电路或储能元件(电容器、电感器、电池等)中能量的方法来避免电路断开或闭合时产生的火花能量来避免爆炸性混合物的点燃。

#### 4.3 爆炸压力

爆炸性混合物被点燃爆炸后,释放的热量可使气体剧烈膨胀,因而产生很高的爆炸压力。由于可燃性气体的性质相异,最大爆炸压力也不尽相同。如表 2 所示,在常温常压下,大多数气体的最大爆炸压力在 0.6~0.8 MPa 之间,但需要注意的是乙炔的最大爆炸压力可以达到 1.03 MPa。

表 2 可燃性气体或蒸气与空气混合物的最大爆炸压力 MPa

气体名称	爆炸压力	气体名称	爆炸压力
硫化氢	0.50	丙烷	0.86
乙酸	0.54	丁烷	0.86
氨	0.60	乙烯	0.89
乙醇	0.75	丙酮	0.89
乙酸	0.75	苯	0.90
柴油	0.75	环氧乙烷	0.99
氢	0.74	乙醚	0.95
煤油	0.80	乙炔	1.03
汽油	0.80~0.85	硝酸乙酯	1.08

这里所说的最大爆炸压力值是指在常温常压下用容积为 8 L 的球形容器测得的数值。如果容器的形状复杂,容易产生压力重叠现象,则最大爆炸压力可以达到 2~3 MPa,甚至更大。同样,在较高压力和较高温度下,混合物的最大爆炸压力也会相应提高。

爆炸压力能对设备和建筑物造成破坏,人们在设计电气设备外壳和设计厂房时应考虑爆炸压力的作用。在实践中,对于内部存在潜在爆炸危险的建筑物,必需满足泄压面积比的要求,这是为了防止爆炸对建筑物破坏的措施之一。

#### 4.4 引燃温度

在没有明火等点火源的情况下,可燃性气体混合物的温度达到某一温度时,由于其内部氧化反应放热的加剧而自动引燃着火,即产生自燃。这一温度叫做引燃温度,有时也称之为自燃温度(AIT)。表 3 给出了几种常见的可燃性气体或蒸气的引燃温度。

表 3 几种常见的可燃性气体或蒸气的引燃温度

气体名称	引燃温度	气体名称	引燃温度
二硫化碳	102	乙烯	425
乙醚	170	环氧丙烷	430
乙醛	140	乙炔	305
辛烷	210	环丙烷	495
戊烷	285	苯	498
汽油	约 280	丙烷	466
乙醇(酒精)	363	甲烷	537
丁烷	365	氢	560
甲胺	430	氨	630

可燃性物质的引燃温度差异很大,例如二硫化碳的引燃温度是 102℃,乙醚是 170℃,丁烷是 365℃,甲烷是 537℃,氢气是 560℃,一氧化碳是 605℃。温度低于相应的引燃温度时,可燃性混合物就不会自燃。因此,工程实践中一般不允许设备的表面温度超过其周围环境中存在的可燃性物质的引燃温度,以避免由于过高温度引起点燃危险。

#### 4.5 最大试验安全间隙

在标准规定的试验条件下,一个外壳内所有浓度的被试气体或蒸气与空气的混合物点燃后,通过 25 mm 长的接合面均不能点燃壳外爆炸性气体混合物的外壳空腔两部分之间的最大间隙称为最大试验安全间隙(MESG)。表 4 列出了一些可燃性气体或蒸气的最大试验安全间隙(MESG)。

表4 典型可燃性气体或蒸气的最大试验安全间隙

		mm	
气体名称	MESG	气体名称	MESG
氨	3.17	氰化氢	0.80
甲烷	1.14	丙烯腈	0.87
异丙醇	0.99	环氧丙烷	0.70
醋酸甲酯	0.99	二甲醚	0.86
醋酸戊酯	0.99	丙烯酸甲酯	0.85
丁醇	0.94	丁二烯	0.79
甲醇	0.92	乙烯	0.65
丙酮	1.02	二硫化碳	0.34
丁烷	0.98	乙炔	0.37
丙烷	0.92	氢	0.29

影响气体爆炸火焰穿越狭小接合面引爆的因素很多,例如混合物的压力、温度、湿度以及点火源的位置等,但是影响最大的因素是可燃性物质的性质。乙炔、氢气、二硫化碳等气体的爆炸火焰穿越接合面的能力很强,即其最大试验安全间隙值较小,例如氢气的MESG

是0.29 mm;而甲烷等烷类物质的穿透能力相对较弱,其相应MESG值较大,例如甲烷的MESG为1.14 mm,丁烷为0.98 mm。

#### 4.6 最小点燃电流及最小点燃电流比

最小点燃电流是指在规定的试验条件下,采用火花试验装置,由电阻电路或电感电路引起最易点燃混合物点燃的最小电流。最小点燃电流比是指相应气体的最小点燃电流相对于甲烷最小点燃电流之比。

通常,可燃性气体或蒸气由电阻电路或电感电路的电火花点燃的难易程度可以用一定电压下的电流值来表示。例如,对于电压为24 V和电感为95 mH的电感性电路,甲烷的最小点燃电流为110 mA,戊烷为100 mA,乙烯为65 mA,氢气为30 mA。在实际电路设计时,通常需要用电压和电流来表征电路的参数;在防爆检验实践中,常利用最小点燃电压和最小点燃电流来判断电路的安全性能。

### 防爆安全技术基本术语

- 电气设备 **electrical apparatus**

系一切利用电能的设备的整体或部分,如发电、输电、配电、蓄电、电测、调节、变流、用电设备和电信工程设备等。

- 爆炸性环境 **potentially explosive atmosphere**

可能发生爆炸的环境。

- 爆炸性气体环境 **explosive gas atmosphere**

大气条件下,气体、蒸气或雾状的可燃物质与空气构成的混合物,在该混合物中点燃后,燃烧将传遍整个未燃混合物的环境。

- 爆炸性粉尘环境 **explosive dust atmosphere**

在大气条件下,粉尘或纤维状的可燃物质与空气形成混合物,点燃后,燃烧传至全部未燃混合物的环境。

- 爆炸性混合物 **explosive mixture**

在爆炸上、下限之间的可燃性气体、蒸气、薄雾、粉尘或纤维与空气的混合物。

- 爆炸下限 **lower explosive limit(LEL)**

空气中的可燃性气体、蒸气或薄雾的浓度,低于该浓度就不能形成爆炸性气体环境。

- 爆炸上限 **upper explosive limit(UEL)**

空气中的可燃性气体、蒸气或薄雾的浓度,高于该浓度就不能形成爆炸性气体环境。

- 最大试验安全间隙 **maximum experimental safe gap(MESG)**

在规定试验条件下,试验装置内设腔室里面各种浓度的被试气体或蒸气与空气的混合物点燃后,能阻止火焰通过内设腔室两部分之间25 mm长接合面点燃外部气体混合物的接合面最大间隙。

- (爆炸性环境的)爆炸 **explosion (of an explosive atmosphere)**

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。

- 闪点 **flash point**

在某一标准条件下使液体释放出一定量的蒸气而能形成可点燃的蒸气空气混合物的液体最低温度。