

瓦斯爆炸三角形理论 及其在矿山救护中的应用

储重苏 王建学 郭鑫禾 张祖领 编

河北煤炭建筑工程学院

前言

一、瓦斯爆炸三角形的基本概念和原理	2
1. 几个基本概念	2
2. 沼气与氧混合气体爆炸界限图示法	2
3. 瓦斯爆炸三角形原理	5
二、多种可燃性气体的混合气体的爆炸界限求算	5
1. 计算公式	5
2. 求算多种可燃性气体爆炸界限的方法	8
三、瓦斯爆炸三角形理论在救护中的应用	13
1. 灾区可燃气体和惰性气体的组合计算	13
2. 灾区中的混合气体的临界点的计算	16
3. 可燃性气体“惰化”所需惰气量的计算	17
4. 灾区气体爆炸性判别方法的应用	18
四、结语	27

爆炸三角形理论及其在煤矿救护中的应用

储重苏 王建学 孙经承 张祖领 编

煤矿在生产过程中，从煤层、岩层、采空区中将逸放出沼气和各种有毒有害气体，统称为矿井瓦斯。组成矿井瓦斯的有：沼气(CH_4)、二氧化碳(CO_2)、氮(N_2)和少量的乙烷(C_2H_6)、乙烯(C_2H_4)、氢(H_2)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H_2S)和二氧化硫(SO_2)等。

矿井沼气与空气混合到一定浓度范围时，遇火即行燃烧或爆炸。当沼气浓度在5%~16%时，遇火即发生爆炸。如有其他可燃气体混入，则混合气体爆炸范围扩大；如加入惰性气体，则混合气体的爆炸范围缩小，随着惰气量的增加，可使混合气体失去爆炸性。

根据这一特性给我们在矿井事故处理中一个极重要的启示，尤其在处理高沼气矿井中的火灾事故中，应严格地及时观察灾区和封闭区中的可燃性气体浓度的变化，尤其要注意沼气浓度的变化情况，防止沼气浓度增加到爆炸范围内，故在处理事故过程中，可以注入惰性气体，以抑制和防止火区中发生瓦斯爆炸。灾区或火区中的混合气体成分的浓度变化可以采用“爆炸三角形”法来断定是否具有爆炸性，以便决定救护行动计划。这一理论在许多国家的救护工作中得到了广泛的应用。

近年来抚顺所的吴志雄工程师等同志将这一理论和技术介绍到我国来，编者在学习本文最后所列的参考资料之后，根据个人的理解，并结合实用，力求通俗易懂地向读者同志们介绍这一理论和技术，以便让我国煤矿救护工作者了解爆炸三角形的原理并普及推广这一技术，应用它来指导我们的救护工作。限于自己的业务水平和对参考资料消化理解不够，故本文中的谬误一定很多，欢迎同志们批评指正。顺此向文后所列参考资料的译、著者表示感谢。

一、爆炸三角形的基本概念和原理

1. 几个基本概念

爆炸下限 (X_0): 能引起爆炸的可燃性气体最低浓度, 称之为该可燃气体的爆炸下限。

爆炸上限 (S_0): 能引起爆炸的可燃性气体最大浓度, 称之为该可燃气体的爆炸上限。

爆炸范围: 某可燃性气体的爆炸下限与上限之间称之为该可燃气体的爆炸范围。

如果在可燃性气体与空气的混合气体中掺入新的可燃性气体, 则此混合气体的爆炸下限降低, 而爆炸上限提高, 即爆炸范围扩大。

如果在可燃性气体与空气的混合气体中掺入惰性气体, 如掺入二氧化碳或氮, 则此混合气体的爆炸下限提高, 而爆炸上限降低, 即掺入惰性气体后使可燃性气体的爆炸范围缩小。

爆炸的临界浓度 (Z_0): 当可燃性气体中掺入的惰性气量增加, 使其混合比达到某一值时, 使该混合气体的爆炸下限与上限重合, 则此时混合气体的浓度称之为临界浓度。

窒息比 (Z_1): 为临界浓度时的情气量与可燃性气体的比称之为窒息比。当混合气体中的情气和可燃性气体的比大于窒息比时, 其中可燃性气体的浓度再大也不会爆炸。

2. 氧与沼气混合气体的爆炸界限图示法

在 1925 年到 1930 年期, 苏联学者对矿井沼气与氧气的混合气体的爆炸界限的变化进行了测定, 得出以下的规律。

如图 1 所示的为沼气与氧气的爆炸三角形原理图。以 CH_4 和空气的混合气体中的沼气体积百分比浓度为横坐标, 以混合气体中的氧气体积

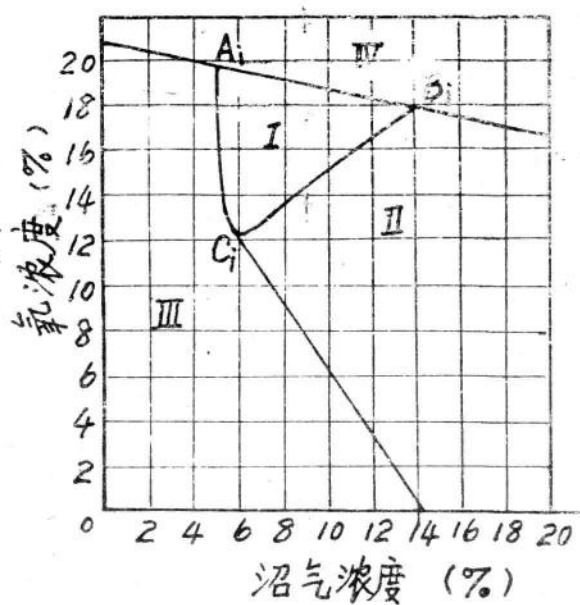


图 1

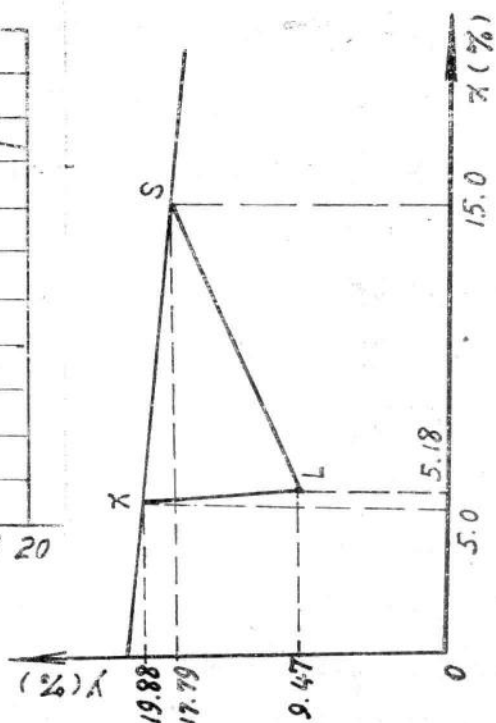


图 2

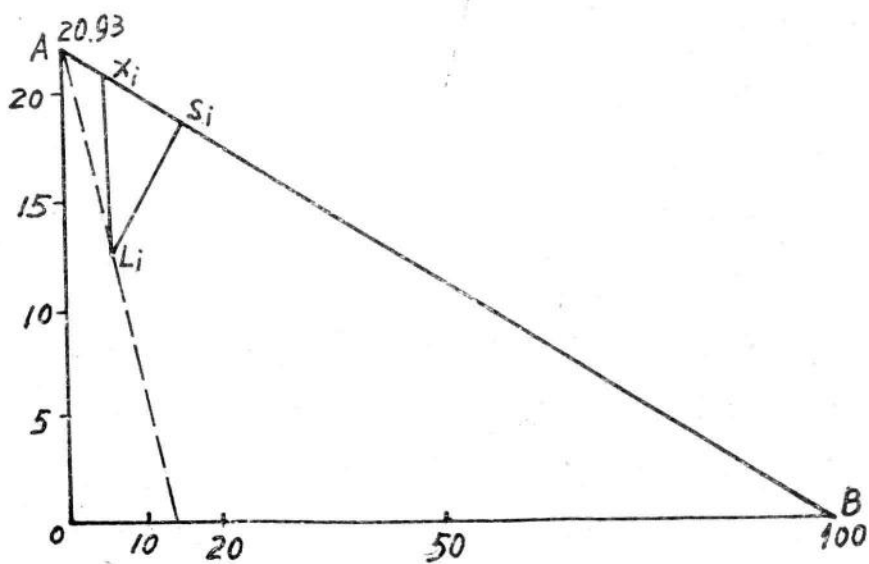


图 3

~ 3 ~

百分比浓度为纵坐标，将可燃性气体的下限浓度 (X_1)、上限浓度 (S_1) 和临界浓度 (L_1) 在此坐标图中标出，并将 X_1 S_1 L_1 连成一个三角形，则此三角形即为沼气三角形的基础原理图。

在图 1 中，I 区为爆炸区，II 区为与空气混合后成为易爆炸区，III 区为不爆炸区，IV 区为不会含有沼气的区域。

根据上述的原理，可以通过实验测定出各种可燃气体的 X_1 S_1 L_1 三个点的坐标值，如表 1 所列。故可以根据表 1 绘制各种可燃气体的爆炸三角形。根据表 1 中所给的 CH_4 三个坐标点绘制出 CH_4 的爆炸三角形如图 2 所示。

表 1

气 体	爆炸下限坐标		爆炸上限坐标		过氧时 爆炸临界值坐标		过二氧化碳时的临 界值坐标	
	可燃气体 X_x %	氧 % Y_x	可燃气体 X_s %	氧 % Y_s	可氧气体 X_L %	氧 % Y_L	可燃气体 X_L	氧 % Y_L
沼 气	5.00	19.38	15.00	17.79	5.18	94.7	5.96	12.32
氢 气	4.00	20.09	74.20	5.40	4.20	5.13	5.20	8.46
一氧化碳	12.50	18.31	74.20	5.40	13.06	5.16	15.67	8.01
乙 烯	2.75	20.35	28.60	14.94	2.89	6.06	3.53	9.45
乙 烷	3.00	20.30	12.50	18.31	3.12	3.41	3.82	11.17
丙 烯	2.00	20.51	11.10	18.61	2.09	7.62	2.50	10.92
丙 烷	2.12	20.49	9.35	18.97	2.21	8.36	2.61	11.57
丁 烷	1.86	20.54	8.41	19.17	1.93	8.39	2.29	11.57
乙 炔	2.50	20.41	80.00	4.19	2.63	5.07	3.27	8.51

3 柯沃特 (Coward) 瓦斯爆炸三角形

Coward 爆炸三角形的原理，和图 1 同理以混合气体中的可燃气体浓度的百分比（按体积计，下同）作为横座标，从 0 到 100% (C)；以混合气体中的氧含量浓度的百分比作为纵座标，从 0 到 20.96% (A)；连接 AC，则构成大的三角形，将可燃气体的下限浓度 (X_L) 上限浓度 (S_L) 和临界浓度 (L_L) 在此座标图中标出，连接 $X_L S_L L_L$ 三点即构成在大三角形 AOC 中的一个三角形 $X_L S_L L_L$ 。则此图称之为 Coward 瓦斯爆炸三角形。如图 3 所示。

在图 3 中大三角形 AOC 内划分成四个不同特性的区域。

I 区 ($X_L S_L L_L$)：为爆炸三角形区，即混合气体构成的座标落入此区内，则表明该混合气体具有爆炸性。

II 区：为氧气（空气）不足区域，如混合气体构成的座标位于此区域中，则不能爆炸，但当加入新鲜空气（即加入氧）后，该混合气体仍能发生爆炸，因为加入新鲜空气以后，该混合气体的座标位置发生了变化，即又落入 I 爆炸区内。

III 区：为氧过剩区，如混合气体构成的座标位于此区内，则该混合气体不会发生爆炸。但若该混合气体中的可燃性气体量再增加或者该混合气体中的氧含量被吸收而降低，则此混合气体仍能发生爆炸。

IV 区：为惰气过量区，混合气体在此区内即使被空气稀释也不会发生爆炸。

二、多种可燃性气体组成的混合气体爆炸界限的求算

1. 计算公式

在沼气与空气的混合气体中，如再掺入其他可燃性气体时，使爆炸性气体的总浓度增加，同时使混合气体的爆炸上限与下限发生变化，其

上、下限数值可根据下式求得。〔2·215〕

混合气体爆炸下限：

$$X_0 = \frac{100}{\frac{C_1}{X_1} + \frac{C_2}{X_2} + \frac{C_3}{X_3} + \dots} \quad \%, \quad (1)$$

混合气体爆炸上限：

$$S_0 = \frac{100}{\frac{C_1}{S_1} + \frac{C_2}{S_2} + \frac{C_3}{S_3} + \dots} \quad \%, \quad (2)$$

混合气体爆炸的临界浓度：

$$L_0 = \frac{100}{\frac{C_1}{L_1} + \frac{C_2}{L_2} + \frac{C_3}{L_3} + \dots} \quad \%, \quad (3)$$

式中： X_0 、 S_0 、 L_0 ——分别为混合气体的爆炸下限、上限和临界浓度，%；

C_1 、 C_2 、 C_3 …… ——为混合气体中各可燃气体占混合气体总体积的百分比，%， $C_1 + C_2 + C_3 + \dots = 100$ ；

X_1 、 X_2 、 X_3 …… ——分别为各可燃性气体的爆炸下限浓度，%；（由表2中查得）

S_1 、 S_2 、 S_3 …… ——分别为各可燃性气体的爆炸上限浓度，%；（由表2中查得）

L_1 、 L_2 、 L_3 …… ——为各可燃性气体的爆炸临界浓度，%

例1• 在井下某巷道中测得混合气体中有：

CH_4 ——80%， C_2H_6 ——10%， H_2 ——10%，求此混合气体的爆炸上、下限各为若干？

解：由表2中查得各可燃性气体的爆炸上限、下限并代入公式(1)、(2)得。

几种可燃性气体的爆炸界限

表2 [1, 215]

气体名称	化学符号	爆炸下限(%)	爆炸上限(%)
甲 烷	CH_4	5.00	16.00
乙 烷	C_2H_6	3.22	12.45
丙 烷	C_3H_8	2.37	9.35
丁 烷	C_4H_{10}	1.86	8.41
戊 烷	C_5H_{12}	1.40	7.80
己 烷	C_6H_{14}	1.20	7.0
乙 烯	C_2H_4	2.75	28.6
氢	H_2	4.00	74.20
一氧化碳	CO	12.50	75.00
硫化氢	H_2S	4.20	45.0

该混合气体的下限

$$X_0 = \frac{100}{\frac{80}{5} + \frac{10}{4} + \frac{10}{3.22}} = 4.6\%$$

同理可求得上限为： $S_0 = 16.9\%$ 。

例2。测得某混合气体由下列各可燃性气体组成。甲烷——80%，乙烷——15%，丙烷——4%，丁烷——1%。求该混合气体的爆炸上、下限？

解：下限：

$$X_0 = \frac{100}{\frac{80}{5} + \frac{15}{3.22} + \frac{4}{2.37} + \frac{1}{1.86}} = 4.37\%$$

同理可求得其上限为

$$S_0 = \frac{100}{\frac{80}{16} + \frac{15}{12.45} + \frac{4}{9.37} + \frac{1}{8.41}} = 21.56\%$$

2. 求算多种可燃性气体爆炸界限的方法

现有一混合气体由： CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2 和空气（ O_2 、 N_2 ）所组成，各占混合气体的百分比如表3中第(2)项所列。

求：该混合气体的爆炸下限和上限？

解：1) 将混合物中的各气体折算为无空气时各个气体所占的百分比，并填入表3中第(3)、(4)项。

①混合气体中的 $\text{O}_2 = 2.8\%$ ，折合空气量

$$20.96 : 100 = 2.8 : X$$

$$\therefore X = 13.4\%$$

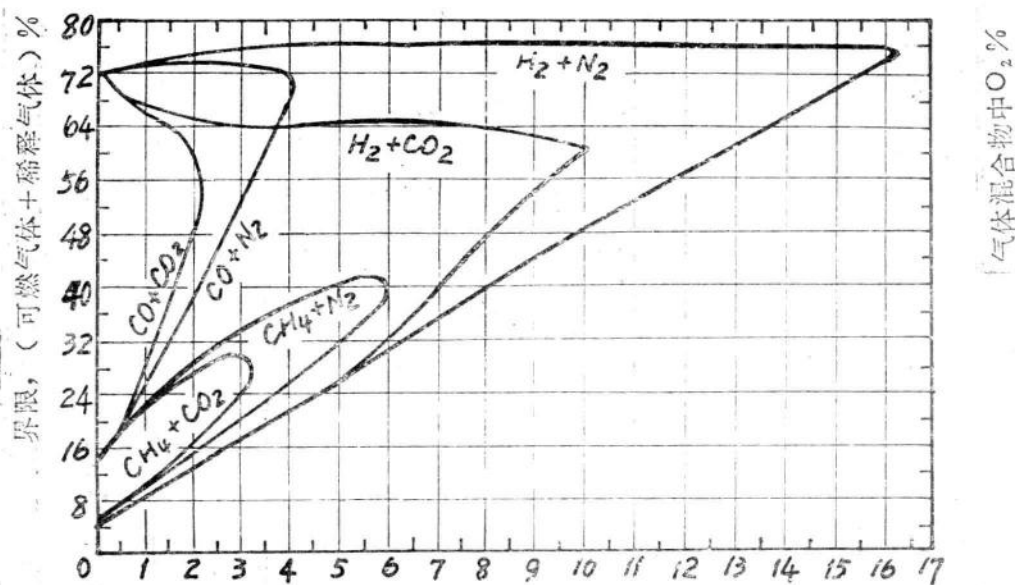
②无空气状态混合气体占总体积量

$$100\% - 13.4\% = 86.6\%$$

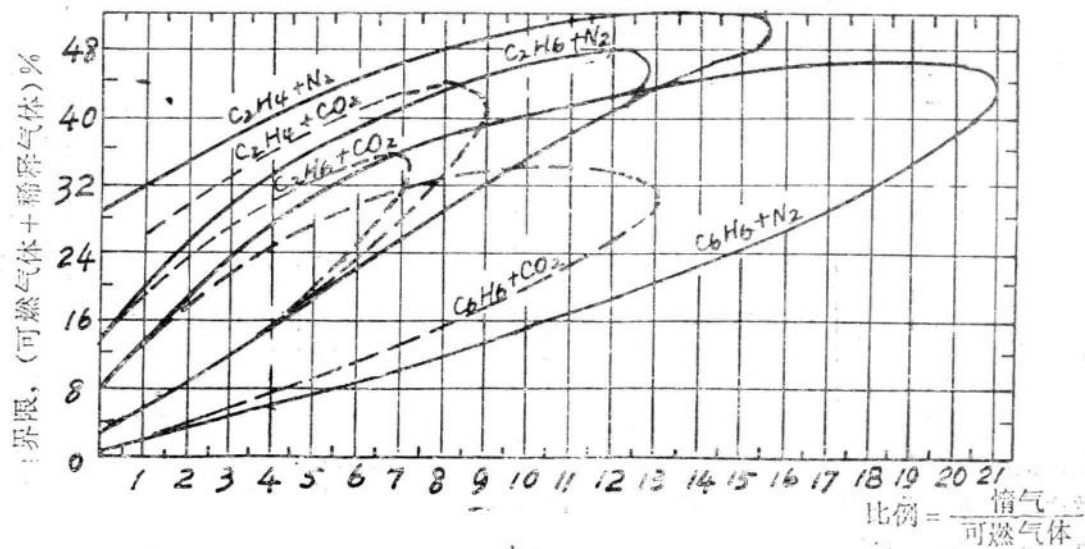
③无空气时混合气体中各气体的百分比

表 3

混合气体 种类	百分率 (%)	无空气时的 百分率 (%)	任意分割部分或全 部分配惰性气体		总百分率 (%)	惰气与可 燃物之比	从图 4 中查得 爆炸界限 (%)	
			N ₂ (%)	CO ₂ (%)			下限(X _L)	上限(X _H)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
CO ₂	13.8	15.9						(10)
CO	4.3	5	17.5 (14.6)		22.5 (19.6)	3.5 (2.92)	61% (52%)	78% (74%)
CH ₄	3.3	3.8	20.9 (20)		24.7 (23.8)	5.5 (5.3)	36% (35%)	41.5% (42%)
H ₂	4.9	5.7 { 3 2.7	31.2 (35)	15.9	34.2 (38) 18.6	10.4 (11.7) 5.9	50% (56%) (76%)	
N ₂	70.9	69.6						
O ₂	2.8	0						
总量	100	14.5	69.6	15.9	100			



a)



b)

图 4

$$\text{CO}_2: \quad 86.6 : 13.8 = 100 : X$$

$$X = 15.9$$

$$\text{CO}: \quad 86.6 : 4.3 = 100 : X$$

$$X = 5$$

$$\text{CH}_4: \quad 86.6 : 3.3 = 100 : X$$

$$X = 3.8$$

$$\text{H}_2: \quad 86.6 : 4.9 = 100 : X$$

$$X = 5.7$$

$$\text{N}_2: \quad 100 - (15.9 + 5 + 3.8 + 5.7) = 69.6$$

将以上各值填入表3中第(3)、(4)项。

2) 将无空气时的混合气体中的可燃性气体用惰性气体任意分别分配，则得一系列分割混合气体，使每一混合气体中仅含有一种可燃性气体及部分惰气 (N_2)，例如： CO ——5%，可以分配 N_2 ——17.5% (或14.6%)；或全部 CO_2 ，例如： H_2 2.7%，可以将 CO_2 ——15.9%全部配给。并填入表3第(5)、(6)项。

3)、求各分割的混合气体的下限和上限

例如：在 CO ——5%，分配 N_2 ——17.5% (或14.6%) 的混合气体中，首先求得 N_2 和 CO 的比值为 $\gamma = \frac{17.5}{5} = 3.5$ ($\frac{14.6}{5} = 2.92$)

根据此比值，从图4中查得 $\text{CO} \sim \text{N}_2$ 线上可查得其下限为6.1% (5.2%)，上限为7.8% (7.5%)，并填入表3第(9)、(10)项。

同理查得： CH_4 ——3.8%， N_2 ——20.9% (或2.0%)，

则 $\frac{20.9}{3.8} = 5.5$ (或 $\frac{2.0}{3.8} = 0.53$)，从图4中查得。

混合气体的爆炸下限为3.6% (3.5%) 和上限为41.5% (42%)。

同理查得: H_2 ——3.0%, N_2 ——31.2% (或35%)

则 $\frac{31.2}{3} = 10.4$ (或 $\frac{35}{3} = 11.7$), 故从图4查 H_2-N_2 曲线得此混合气体的爆炸下限为50% (56%), 上限为76% (76%)。

同理查得: H_2 ——2.7%, CO_2 ——15.9%

则 $\frac{15.9}{2.7} = 5.9$, 故从图4中查 $H_2 \sim CO_2$ 曲线得此混合物气体的爆炸下限为32%, 上限为64%。

将上述查得的下限、上限值填入表3第(9)、(10)项。

4)、求无空气时的混合气体的爆炸下限和上限

将表3中的第(7)、(9)、(10)项代入公式(1)、(2)

$$\text{得下限: } X'_0 = \frac{100}{\frac{22.5}{61} + \frac{24.7}{36} + \frac{34.2}{50} + \frac{18.6}{32}} = 43\%$$

$$\text{上限: } S'_0 = \frac{100}{\frac{22.5}{73} + \frac{24.7}{41.5} + \frac{34.2}{76} + \frac{18.6}{64}} = 61\%$$

5)、求在空气中或在矿井火灾气体中此混合气体的爆炸下限和上限。

已求得在无空气时混合气体的爆炸界限, 下限为43%, 上限为61%。但因无空气时的混合气体在全部气体中只占86.6%。故在空气中或在矿井火灾气体中的爆炸界限为:

下限: X_0

$$86.6 : 43 = 100 : X$$

$$\therefore X_0 = 50\%$$

上限: S_0

$$86.6 : 61 = 100 : S_0$$

$$\therefore S_0 = 70\%$$

三、瓦斯爆炸三角形理论在煤矿救护工作中的应用

在矿井救护工作中,例如在火区密闭或打开密闭的过程中,尤其在高沼气矿井的火灾事故的救护过程中,随着通风状态的变化,通风量减少或者增大,导致灾区内的空气中各种气体成份在数量上发生了新的变化。随着 O_2 的减少或可燃性气体的增加,使此时的混合气体浓度座标落入图2的三角形区内达到了爆炸危险程度,所以在救护过程中,救护指挥员及时了解并掌握灾区气体的变化情况,及时判断此时灾区中的混合气体是否具有爆炸性?及时判断出当时的危险程度,以便作出符合实际的判断和正确的指挥,并采取恰当的措施。所以及时准确地判定出混合气体的爆炸危险程度是救护过程中指挥员决策的先决条件和基础。

1. 灾区可燃性气体和惰性气体的组合计算

1)、某单一可燃性气体与惰性气体构成的混合气体的计算

①在图4a)中,我们以氢和氮($H_2 + N_2$)的混合气体作为例子来进行分析。

$\frac{N_2}{H_2} = 1.0$, 则从图4的横轴上的1.0点处作垂线,与图中的 H_2-N_2 曲线有两处相交,得下限 $X_0 = 50\%$, 下限 $S_0 = 76\%$ 。

由于 $\frac{N_2}{H_2} = 1.0$,

故, 下限: $X_0 = 50\%$ 时, 其中 $\begin{cases} H_2 = 4.5\%, \\ N_2 = 45.5\% \end{cases}$

上限: $S_0 = 7.6\%$ 时, 其中 $\begin{cases} H_2 = 6.90\% \\ N_2 = 6.91\% \end{cases}$

② 又例如: 由 CH_4 和 N_2 组成的混合气体, 且 $\frac{N_2}{CH_4} = 4$, 则从图 4 a) 中的横轴上在 4 点处作为垂线; 与图 4 中的 CH_4-N_2 曲线相交两点得: 下限: 2.6% , 上限: 3.8% 。

根据 $\frac{N_2}{CH_4} = 4$,

故当下限: 为 2.6% 时, 其中 $\begin{cases} CH_4 \text{ 为 } 5.2\% \\ N_2 \text{ 为 } 20.8\% \end{cases}$

上限: 为 3.8% 时, 其中 $\begin{cases} CH_4 \text{ 为 } 7.6\% \\ N_2 \text{ 为 } 30.4\% \end{cases}$

2) 多种可燃性气体与惰性气体构成的混合气体的计算

由 H_2 、 CH_4 组成的混合气体, 且 $\frac{N_2}{CH_4 + H_2} = 5$, 据此可从图 4 a)

中查得:

CH_4 、 N_2 混合气体的下限与上限:

下限: 3.2% , 其中 $\begin{cases} CH_4 = 5.3\% \\ N_2 = 26.7\% \end{cases}$

上限: 4.1% , 其中 $\begin{cases} CH_4 = 6.8\% \\ N_2 = 34.2\% \end{cases}$

$H_2 + N_2$ 混合气体的下限与上限:

下限: 2.2% , 其中 $\begin{cases} H_2 = 3.7\% \\ N_2 = 18.3\% \end{cases}$

上限: 76%, 其中 $\begin{cases} H_2 = 12.7\% \\ N_2 = 63.3\% \end{cases}$

①求CH₄、H₂与惰性气体组成的混合气体的下限

将CH₄=5.3%, H₂=3.7% H₂=26.7+18.3=45%代入表4中②④项。

求得各占总体积的百分比

混合气体总体积为54, 则CH₄= $\frac{5.5}{54}=9.82\%$ 。下目, 可求得各气体占总体积的百分比, 并填入表4第③、⑤项。

CH₄ + H₂ 与 N₂ 混合气体的下限计算

表4

混合气体的组分	百分率 (%)		N ₂ (%)		总百分率 (%)	从图4相应曲线上查得	
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
CH ₄	5.3%	9.82%	26.7%	49.44%	59.26%	32%	41%
H ₂	3.7%	6.85%	18.3%	33.88%	40.74%	22%	76%

故可求得CH₄、H₂混合气体的爆炸下限

$$X_0 = \frac{100}{\frac{59.26}{32} + \frac{40.74}{22}} = 27.03\%$$

同理, 可求得CH + H₂与N₂混合气体的上限值。

计算结果填入表5。根据表5可求得上限为:

$$S_0 = \frac{100}{\frac{35.04}{41} + \frac{64.96}{76}} = 58.14\%$$