

# 有机可燃气体爆炸极限的推荐计算方法

刘彬

(公安消防部队昆明指挥学校, 云南 昆明 650208)

**摘要:** 提出一种利用氧气系数计算纯净有机可燃气体和由多种有机可燃气体组成的混合气体爆炸极限的计算方法, 对目前常用的经验公式进行了整合与修正, 简化了对混合气体爆炸极限的计算, 也提供了对复杂组成的混合有机可燃气体爆炸极限的快速估算, 估算结果与实测值能较好吻合。

**关键词:** 可燃气体; 爆炸极限; 氧气系数; 计算方法

**中图分类号:** X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2007)01 - 0119 - 06

## Recommended Calculation of Explosion Limitation for Organic Burning Gas

L U B in

(Kunming Commanding School of Public Security Fire Force, Kunming 650208, China)

**Abstract:** An introduction is made on calculating the explosion limitation of the purely organic burning gas and the mixture made of many organic burning gases by using oxygen coefficient. Also it systematizes the old formulas in common use, and simplifies the calculation. At the same time, it offers the speed calculation for the explosion limitation of complicated organic burning gas, whose result is fit for the practice.

**Key words:** burning gas; explosion limitation; oxygen coefficient; calculating method

### 0 引言

有机可燃气体 (或蒸气) 在空气中具有燃烧爆炸的危险, 爆炸浓度极限是判断其爆炸危险性的一个重要参数。爆炸极限一般采用传播法进行测定<sup>[3~5]</sup>, 也可用经验公式进行近似计算。

对于纯净有机可燃气体的爆炸极限, 可通过 1 mol 有机可燃气体完全燃烧所需氧原子的物质的量  $N$  来计算:

$$X_{\text{下限}} = \frac{100}{4.76(N - 1) + 1} \% \quad (1)$$

$$X_{\text{上限}} = \frac{400}{4.76N + 4} \% \quad (2)$$

而对于由多种有机可燃气体组成的混合气体的爆炸极限, 则采用理 - 查特列 (Le Chatelier) 法则来计算:

$$X = \frac{100}{\frac{V_1}{X_1} + \frac{V_2}{X_2} + \dots + \frac{V_n}{X_n}} \% \quad (3)$$

收稿日期: 2006 - 02 - 22

作者简介: 刘彬 (1975 ~), 男, 讲师。主要研究方向: 消防燃烧学。E-mail: xfxlb@yahoo.com.cn

式中,  $X$  为混合气体的爆炸极限;

$X_1, X_2, \dots, X_n$  为各组分的爆炸极限;

$V_1, V_2, \dots, V_n$  为各组分的体积百分数.

目前常用的教科书中介绍的上述经验公式,能较好地适用以饱和烃为主的有机可燃气体爆炸极限的计算,但也存在以下一些问题:

1) 计算爆炸下限和爆炸上限的经验公式:(1)式和(2)式表观上是孤立的,缺乏联系,通常只能靠机械性记忆,往往导致混淆.

2) 计算值与实测值之间有一定误差,尤其是爆炸上限的误差较大.

3) 理 - 查特列法则的适用有限.对于已知各组分的爆炸极限和体积百分数的混合气体爆炸极限的计算比较简便,直接将相关数值代入(3)式即可.但对于只知各组分体积百分数的混合气体爆炸极限的计算,首先得利用(1)式和(2)式分别计算出各组分的爆炸极限,才能利用(3)式计算出混合气体的爆炸极限.对于含有  $n$  种组分的混合气体,要经过  $2n + 2$  个步骤的计算,才能求出其爆炸下限和爆炸上限,组分越多,计算就越烦琐.而对于复杂组成的混合有机可燃气体,在无法确知其组成的情况下,就无法计算.

在长期的教学实践中,针对这些问题作了专题研究,在借鉴上述经验公式的基础上,给出了一种利用有机可燃气体完全燃烧所需的氧气系数  $A$  计算爆炸极限的方法.

### 1 纯净有机可燃气体爆炸极限的推荐计算方法

从表观上看,(1)式和(2)式是两个不同的公式,完全没有联系,其实不然.

用  $1 \text{ mol}$  有机可燃气体完全燃烧所需的氧气系数(摩尔数)  $A$  替代(1)式和(2)式中的  $N$ ,并进行一定的变形,可得:

$$X_{\text{下限}} = \frac{1}{4.76(2A - 1) + 1} \times 100\% \quad (4)$$

$$X_{\text{上限}} = \frac{1}{4.76 \frac{A}{2} + 1} \times 100\% \quad (5)$$

而有机可燃气体在空气中完全燃烧的化学计量浓度为:

$$X_0 = \frac{1}{4.76A + 1} \times 100\% \quad (6)$$

对比(4)式,(5)式和(6)式,可以看出:

在化学计量浓度时,  $1 \text{ mol}$  的有机可燃气体完全燃烧需要  $A \text{ mol}$  的氧气,因此需要  $4.76A \text{ mol}$  的空气(空气中,氧气与空气之比约为  $21/100 = 1/4.76$ );有机可燃气体处于爆炸下限时,氧气供给过量,为  $2A - 1 \text{ mol}$ ;有机可燃气体处于爆炸上限时,氧气供给不足,仅为  $\frac{A}{2} \text{ mol}$ .

那么,  $1 \text{ mol}$  有机可燃气体分别处于爆炸下限和爆炸上限时,实际供给的氧气是否为  $(2A - 1)$  和  $\frac{A}{2} \text{ mol}$

呢?可根据其爆炸极限实测值进行验证(如表1).爆炸极限值与氧气供给  $K$  值符合  $K = \frac{1 - X_{(\text{下限或上限})}}{4.76X_{(\text{下限或上限})}}$  的关系.

将各类有机可燃气体爆炸极限时的氧气供给  $K$  值与对应的  $A$  值作图 1~图 4.

表 1 常见有机可燃气体 (或蒸气) 的氧气供给值  
Tab 1 Oxygen figure of common organic burning gas( or steam)

可燃气体	化学计量浓度 / %		爆炸下限 / %		爆炸上限 / %		
	浓度	氧气供给 /A	实测值	氧气供给 /K	实测值	氧气供给 /K	
烷烃	甲烷	9.5	2.0	5.0	4.0	15.0	1.2
	乙烷	5.7	3.5	3.0	6.8	12.5	1.5
	丙烷	4.0	5.0	2.1	9.8	9.5	2.0
	丁烷	3.1	6.5	1.6	12.9	8.5	2.3
烯烃	乙烯	6.5	3.0	3.1	6.6	32.0	0.45
	丙烯	4.5	4.5	2.0	10.3	11.1	1.7
	1-丁烯	3.4	6.0	1.6	12.9	9.3	2.0
	1-戊烯	2.7	7.5	1.4	14.8	8.7	2.2
芳香烃	苯	2.7	7.5	1.4	14.8	8.0	2.4
	甲苯	2.3	9.0	1.2	17.3	7.0	2.8
	乙苯	2.0	10.5	1.0	20.8	6.8	2.9
	丙苯	1.7	12.0	0.85	24.5	6.0	3.3
醇类	甲醇	12.3	1.5	6.0	3.3	44.0	0.3
	乙醇	6.5	3.0	3.3	6.2	15.0	1.2
	丙醇	4.5	4.5	2.3	8.9	13.5	1.3
	丁醇	3.4	6.0	1.7	12.1	11.3	1.6

从图 1 ~图 4可以看出,有机可燃气体爆炸下限时氧气供给  $K$  值较好地分散在  $K = 2A$  曲线周围,爆炸上限时氧气供给  $K$  值较好地分散在  $K = \frac{A}{3}$  曲线周围. 因此,计算有机可燃气体爆炸极限的公式应修正为:

$$X_{\text{下限}} = \frac{1}{4.76 \times 2A + 1} \times 100\% \tag{7}$$

$$X_{\text{上限}} = \frac{1}{4.76 \times \frac{A}{3} + 1} \times 100\% \tag{8}$$

(8) 式和 (9) 式还可进一步合并为:

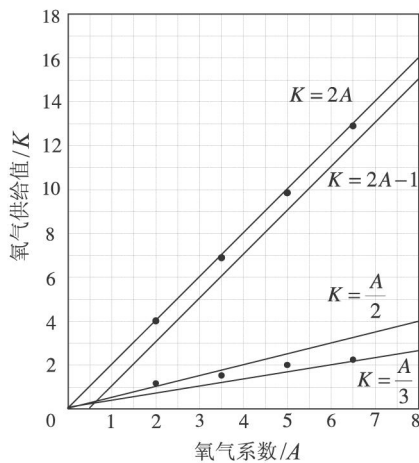


图1 烷烃的氧气供给值  
Fig.1 Oxygen figure of paraffin

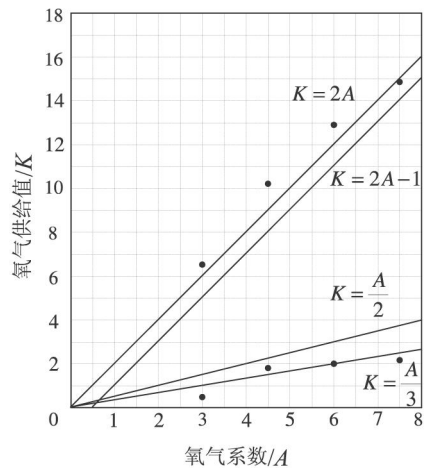


图2 烯烃的氧气供给值  
Fig.2 Oxygen figure of olefin

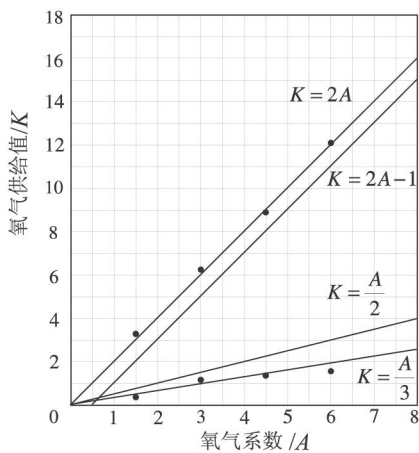


图3 芳香烃的氧气供给值  
Fig.3 Oxygen figure of aromatic

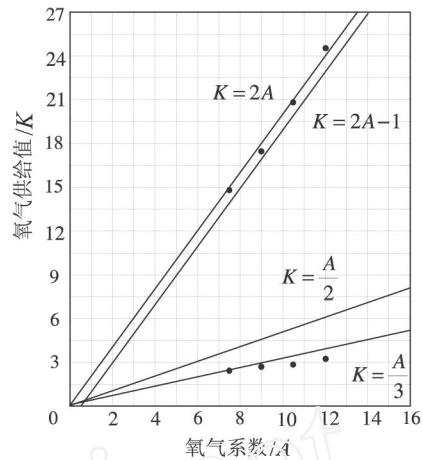


图4 醇类的氧气供给值  
Fig.4 Oxygen figure of alcohol

$$X_{(\text{下限或上限})} = \frac{i}{4.76A + 1} \times 100\% \quad (9)$$

式中,  $i$  为空气(氧气)供给系数,化学计量浓度时  $i = 1$ ,爆炸下限时  $i = 2$ ,爆炸上限时  $i = \frac{1}{3}$ 。

## 2 混合有机可燃气体爆炸极限的推荐计算方法

理 - 查特列法则成立的前提条件是假设  $n$  种处于爆炸极限的混合物互相混合后得到的复杂混合物仍然处于爆炸极限<sup>[5]</sup>。一种由  $n$  种有机可燃气体组成的混合气体,其各组分的体积百分数分别为  $V_1, V_2, \dots, V_n$ , 各组分完全燃烧所需要的氧气系数分别为  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , 则 1 mol 体积的混合气体处于爆炸极限时所需的空气体积应当为各组分处于爆炸极限时所需的空气体积之和,即:

$$V_{\text{空气}} = V_{\text{空气}_1} + V_{\text{空气}_2} \dots V_{\text{空气}_n} = 4.76 A_1 V_1 + 4.76 A_2 V_2 + \dots + 4.76 A_n V_n = 4.76 \sum A_i V_i$$

则混合气体的爆炸极限为:

$$X_{(\text{下限或上限})} = \frac{1}{4.76 \sum A_i V_i + 1} \times 100\% \quad (10)$$

设 1 mol 混合气体完全燃烧所需的氧气系数  $A_{\text{混}} = \sum A_i V_i$ , 则 (10) 式可表示为:

$$X_{(\text{下限或上限})} = \frac{1}{4.76 A_{\text{混}} + 1} \times 100\% \quad (11)$$

## 3 计算方法的特点

### 3.1 统一了计算公式

从 (6) ~ (9) 式, (11) 式可以看出:

1) 无论是纯净气体还是混合气体爆炸极限的计算,无论是爆炸下限还是爆炸上限以及化学计量浓度的计算,其计算公式在结构上都是完全一致的,便于记忆和理解掌握。

2) 爆炸下限、爆炸上限以及化学计量浓度之间存在本质联系,区别仅仅是空气供给系数的不同。化学计量浓度时,空气供给为理论值,  $i = 1$ ; 爆炸下限时,空气供给过量,  $i = 2$ ; 爆炸上限时,空气供给不足,

$i = \frac{1}{3}$ ; 空气供给系数  $i$  在  $\frac{1}{3} \sim 2$  范围内,有机可燃气体都可以发生爆炸。

3.2 减小了计算误差

通过对经验公式的修正,减小了计算误差,使计算值与实测值更加吻合(如表 2)。

对修正前后的计算值进行比较,可以看出:

- 1)修正后的爆炸下限计算值较小,且与实测值更加吻合;
- 2)修正后的爆炸上限计算值较大,除甲烷、乙烷外,其余可燃气体修正后的计算值更加接近实测值;

3.3 简化了混合有机可燃气体爆炸极限的计算

对于已知各组分体积分数的混合有机可燃气体爆炸极限的计算,只需先计算出混合气体的氧气系数  $A_{混}$ ,再根据 (11)式即可直接计算出混合气体的爆炸极限。

表 2 常见有机可燃气体(或蒸气)爆炸极限的修正值

Tab 2 Explosion limitation amending figure of common organic burning gas(or steam)

可燃气体	爆炸下限 /%			爆炸上限 /%			
	实测值	计算值		实测值	计算值		
		修正前	修正后		修正前	修正后	
烷烃	甲烷	5.0	6.5	5.0	15.0	17.4	24.0
	乙烷	3.0	3.4	2.9	12.5	10.7	15.3
	丙烷	2.1	2.3	2.0	9.5	7.8	11.2
	丁烷	1.6	1.7	1.6	8.5	6.1	8.8
烯烃	乙烯	3.1	4.0	3.4	32.0	12.3	17.4
	丙烯	2.0	2.6	2.3	11.1	8.5	12.3
	1-丁烯	1.6	1.9	1.7	9.3	6.5	9.5
	1-戊烯	1.4	1.5	1.4	8.7	5.3	7.8
芳香烃	苯	1.4	1.5	1.4	8.0	5.3	7.8
	甲苯	1.2	1.22	1.15	7.0	4.5	6.5
	乙苯	1.0	1.04	0.99	6.8	3.8	5.7
	丙苯	0.85	0.91	0.87	6.0	3.4	5.0
醇类	甲醇	6.0	9.5	6.5	44.0	21.9	29.6
	乙醇	3.3	4.0	3.4	15.0	8.5	12.3
	丙醇	2.3	2.6	2.3	13.5	6.5	9.5
	丁醇	1.7	1.9	1.7	11.3	5.3	7.8

例如,已知某天然气的组成:  $CH_4$  为 88%,  $C_3H_8$  为 7%,  $C_4H_{10}$  为 5%,则该天然气的爆炸极限的计算为:

1)从表 1可知,  $A_{CH_4} = 2.0, A_{C_3H_8} = 5.0, A_{C_4H_{10}} = 6.5$

则  $A_{混} = A_i V_i = 2.0 \times 0.88 + 5.0 \times 0.07 + 6.5 \times 0.05 = 2.435$

2)将  $A_{混}$  值代入 (11)式可得:

$$X_{下限} = \frac{1}{4.76 \times 2.435 + 1} \times 100\% = 4.1\%$$

$$X_{上限} = \frac{1}{4.76 \times \frac{1}{3} \times 2.435 + 1} \times 100\% = 20.6\%$$

3.4 可以估算复杂组成的混合有机可燃气体的爆炸极限

对于复杂组成的混合气体,可先近似处理为纯净气体,求算出其  $A_{混}$ ,再根据 (11)式估算出其爆炸极限值。

例如,液化石油气、汽油、煤油、柴油分别是含  $C_{3-4}, C_{5-12}, C_{9-16}, C_{15-20}$ 的烃类混合物,其成分主要为烷

烃,同时含有少量的环烷烃、芳香烃及烯烃.则液化石油气、汽油、煤油、柴油可近似处理为平均分子式为  $C_{3.5}H_9$ ,  $C_{8.5}H_{19}$ ,  $C_{12.5}H_{27}$ ,  $C_{17.5}H_{37}$  的烃类,其  $A_{混}$  值分别为 5.75, 13.25, 19.25, 26.75, 分别代入 (11) 式则可估算出其爆炸极限值 (如表 3).

表 3 常见混合有机可燃气体(或蒸气)的爆炸极限的估算值

Tab 3 Explosion limitation estimation figure of common mixture organic burning gas( or steam)

可燃气体	爆炸下限 / %		爆炸上限 / %	
	实测值	估算值	实测值	估算值
液化石油气	1.7	1.8	9.7	9.9
汽油	1.1	0.8	7.0	4.5
煤油	0.6	0.5	8.0	3.2
柴油	0.6	0.4	6.5	2.3

从表 3 可以看出,液化石油气的爆炸下限和上限的估算值与实测值非常吻合,汽油、煤油、柴油的爆炸下限的估算值与实测值较好吻合,而爆炸上限的估算值与实测值有一定误差.

#### 4 结束语

本计算方法利用氧气系数  $A$  来计算纯净有机可燃气体和由多种有机可燃气体组成的混合气体的爆炸极限,在结构上对公式进行了统一,并显著提高了爆炸极限(尤其是爆炸下限)计算值的准确度,也大大简化了对混合气体爆炸极限的计算,同时也解决了对复杂组成的混合有机可燃气体爆炸极限的估算问题,估算结果与实测值能较好吻合.与目前常用的经验公式相比,能更好地指导有机可燃气体爆炸极限的计算.

#### 参考文献:

- [1] 刘永基.消防燃烧原理[M].沈阳:辽宁人民出版社,1992.
- [2] 公安消防部队指挥学校统编试用教材.消防燃烧学[M].北京:群众出版社,1993.
- [3] 伍作鹏.消防燃烧学[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [4] 杜文锋.消防燃烧学[M].北京:中国人民公安大学出版社,1997.
- [5] 王海福,冯顺山.防爆学原理[M].北京:北京理工大学出版社,2004.

(上接第 118 页)

#### 参考文献:

- [1] 庞皓.计量经济学[M].成都:西南财经大学出版社,2001:132-141.
- [2] 分析家网站[EB/OL].<http://www.fxj.com.cn>
- [3] 易丹辉.数据分析与 Eviews 应用[M].北京:中国统计出版社,2002:141-143.
- [4] 张晓峒.计量经济学软件 EViews 使用指南[M].天津:南开大学出版社,2003:248-251.