

# 煤层气开发利用要害之探讨 ——增压—脱氧—增压集输装置

四川华西通用机器公司 (四川 641400) 李存绪

**摘 要:** 煤层气混杂高组分的氧气 (或空气), 对其利用具有爆炸危险性, 压力低, 其组分与蕴藏量具有不确定性, 投资风险性大。本文提出以增压—脱氧—增压集输来确保煤层气利用的安全。

**关键词:** 煤层气 氧气 安全

## 一、概 述

中国煤层气资源十分丰富, 据专家估算, 陆上埋深 200m 以下的煤层气蕴藏量为 32 ~ 35 万亿  $\text{m}^3$ , 多于陆上常规天然气的资源量 (29 万亿  $\text{m}^3$ ), 在世界上位于前列。

我国政府十分重视发展煤层气产业, 早已批准成立了跨行业的中联煤层气有限责任公司, 并赋予其对外合作勘探、开发生产煤层气的专营权, 并提供优惠的经济激励政策。中联煤层气公司从 1996 年 5 月成立后, 把启动自营勘探和快产气作为公司的主要工作之一, 经过论证后确定把山西沁水盆地作为近期的主要突破重点, 目前沁水南部地区 1200 $\text{km}^2$  的面积内已可控制约 2000 亿  $\text{m}^3$  的煤层气储量。

中联公司已与美国德士古、阿科公司和菲利普公司签署了淮北、三交、三交北、石楼、临兴区块共 5 个区块的合作开发煤层气合同。合同面积约 11 300 $\text{km}^2$ , 预测煤层气资源超过 7000 亿  $\text{m}^3$ , 外方风险勘探投资 5000 万美元以上, 预测规模产气 20 ~ 40 亿  $\text{m}^3$ 。煤层气资源的开发重点是山西省, 并打算建设环山西省管网, 为周边省市供气, 初步设想沁水盆地南部拟修建 200km 管道至安阳或郑州与中原油田的天然气管网联网, 从寿阳修 70km 管道至太原, 河南管道一方面与

陕京天然气联网, 另一方面与沁南天然气管道联网。

我国煤层气资源评估和示范工程项目已经完成。煤层气有五大聚气区、30 个聚气带, 115 个目标矿区 (以矿区为单位计算储量), 中联煤气公司在山西沁水地区、寿阳地区, 贵州六盘水地区, 鄂尔多斯—韩城地区和辽宁朝阳地区等初步有了勘探成果, 并分别与美国阿科石油、德士古公司、飞利浦公司等签订了 5 个引进技术和进行风险勘探协议, 按协议沁南地区 2002 年正式进行商业性开采。

我国煤层气的利用有一个重要环节没有突破, 这就是煤层气渗混空气。煤层气的组分见表 1。

表 1 中氧气含量达 10%, 增加了利用煤层气的风险, 由于其成分特殊, 处于爆炸极限范围内。煤层气开采压力仅 0.0035 MPa, 要输送到城市, 必须由压缩机增压后, 才能用输气管输送, 压缩机的压缩过程和管道输送过程均存在爆炸风险。

表 1 煤层气的组份

| 气体组分     | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|----------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 摩尔体积 (%) | 51.8            | 1.47                          | 0.1                           | 1.5             | 10             | 35.13          |

## 二、利用煤层气的风险性

煤层气是指煤矿开采过程中, 从煤层气及岩层内涌出的可燃气体, 又称为矿井气或矿井瓦斯气, 煤田在采掘过程中, 必须排出煤层及岩层内的瓦斯, 以确保生产安全, 排放煤层气主要采用抽吸法, 因为煤层气是瓦斯和空气的混合气。

表 2 列出了各类煤气的一般组分与低热值。

煤气规划设计手册对除焦油设备规定, 进入煤气滤清器的煤气含氧量应控制在 1% 以内, 否则有爆炸危险。





表 2 煤气一般组分与低热值

| 天然气类别 |              | 组份 (%)          |                               |                                |                               |      |                |                 |                |                |                               | 热值                    |                         | 备 注                                 |
|-------|--------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------|
|       |              | CH <sub>4</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>n</sub> H <sub>n</sub> | CO   | H <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | MJ<br>/m <sup>3</sup> | kcal<br>/m <sup>3</sup> |                                     |
| 天然气   | 气田气          | 98              | 0.3                           | 0.3                            | 0.4                           |      |                |                 |                | 1.0            |                               | 36.22                 | 8650                    | 四川                                  |
|       | 油田伴生气        | 81.7            | 6.2                           | 4.86                           | 4.94                          |      |                | 0.3             | 0.2            | 1.8            |                               | 45.47                 | 10 860                  | 大庆                                  |
|       | 凝析气田气        | 74.3            | 6.75                          | 1.87                           | 14.9                          |      |                | 1.62            |                | 0.55           |                               | 48.36                 | 11 550                  | 新疆牙哈                                |
|       | 煤层气 I        | 52.4            |                               |                                |                               |      |                | 4.6             | 7.0            | 36             |                               | 18.84                 | 4500                    | 抚顺、鹤壁、焦作                            |
|       | 煤层气 II       | 51.8            | 0.1                           |                                |                               |      |                | 1.5             | 10.0           | 35.13          | 1.47                          |                       |                         | 贵州                                  |
| 人工煤气  | 固定燃料<br>干煤气  | 焦炉气             | 27                            |                                | 2.0                           | 6    | 56             |                 | 1.0            | 5.0            |                               | 18.25                 | 4 360                   | 抚顺、鹤壁、焦作                            |
|       |              | 连续式直立碳化炉煤气      | 18                            |                                | 1.7                           | 17   | 56             | 5               | 0.3            | 2.0            |                               | 16.16                 | 3 860                   | 贵州                                  |
|       |              | 立箱炉煤气           | 25                            |                                |                               | 9.5  | 55             | 6               | 0.5            | 4.0            |                               | 17.58                 | 4 200                   |                                     |
|       |              | 发生炉煤气           | 1.8                           |                                | 0.4                           | 30.4 | 8.4            | 2.2             | 0.4            | 56.4           |                               | 5.74                  | 1 370                   |                                     |
|       |              | 水煤气             | 1.2                           |                                |                               | 34.4 | 52             | 8.2             | 0.2            | 4.0            |                               | 10.38                 | 2 480                   |                                     |
|       |              | 压力汽化煤气          | 18                            |                                | 0.7                           | 18   | 56             | 3.0             | 0.3            | 4.0            |                               | 15.41                 | 3 680                   |                                     |
|       | 两级式<br>气化工煤气 | 水煤气型两段炉煤气       | 5.8                           |                                | 1.6                           | 30.9 | 42.2           | 9.6             | 0.6            | 9.3            |                               | 11.93                 | 2 850                   |                                     |
|       |              | 发生炉型两段炉煤气       | 3.2                           |                                | 1.2                           | 23.6 | 15.5           |                 | 0.5            | 50.4           |                               | 6.11                  | 1 460                   | 北京、天津、<br>南京、武汉、<br>上海、抚州、<br>贵州、长沙 |
|       | 油煤气<br>重油蓄热  | 催化裂解深煤气         | 19.6                          |                                | 6.6                           | 13.6 |                | 1.0             | 1.0            | 6.7            |                               | 18.92                 | 4 520                   |                                     |
|       |              | 催化裂解浅煤气         | 24.8                          | 5.1                            | 12.8                          | 7.0  |                |                 | 0.8            | 4.8            |                               | 27.05                 | 6 460                   |                                     |
|       |              | 热裂解煤气           | 34                            | 8.3                            | 1.5                           | 28.7 | 3.8            |                 | 0.4            | 3.0            |                               | 41.53                 | 9 920                   |                                     |
|       |              | 重油部分氧化法煤气       | 0.4                           |                                |                               | 44.8 | 47.6           | 5.9             | 0.1            | 1.2            |                               | 10.89                 | 2 600                   |                                     |
|       | 高炉煤气         |                 | 0.3                           |                                |                               | 28   | 2.7            | 10.5            |                | 58.5           |                               | 3.94                  | 940                     |                                     |
|       | 液化石油气        |                 |                               | 50                             | 50                            |      |                |                 |                |                |                               | 108.44                | 25 900                  |                                     |

建设矿井气利用工程可以附建一种机动调节气源，但需注意两点，即煤层气基本上为甲烷和空气的混合物，渗混其他燃气气体时，应保证混合气的气质在爆炸极限之外，并采取安全措施；二是混合气与煤层气两种气体的华白指数差额比宜小于 10%。

目前大多数中、小型煤矿的煤层气利用工程，主要是供本矿区或附近城镇居民生活用气。实践证明，经储气柜加配重后，压力可达 3.2 ~ 4.0kPa；适当增大输气管径，在输气距离 1 ~ 2km 范围内采用不附设压缩机的全低压供气系统是经济的。开滦矿务局等已有成功经验确保用户灶前煤气压力的稳定。

在《容积式压缩机技术手册》中曾介绍了液环压缩机（也称液环泵）。其特点是气体直接与工作液体环接触，压缩过程冷却良好，可接近等温压缩；叶轮与工作腔无摩擦、磨损，宜于处理易

燃易爆或高温时易分解的气体；对气体中含有水分或固体微粒不敏感；工作腔密封性好，对零件精度要求不高。由于工作时压力损失大，总效率低，工作液体吸收热量而挥发成气体，并混入被压缩气体，因此排出气体应进行气—液分离，并且工作腔内也需不断补充液体；液环压缩机单级排压一般为 0.2MPa（表压），最大可达 0.4MPa（表压）；两级排气压力可达 0.6MPa（表压），特殊设计可达 2MPa。容积流量最大可达 80m<sup>3</sup>/min。转速视叶轮大小而定，一般  $n = 250 \sim 3000\text{r/min}$ 。

由于煤层气含氧组分（或称混杂空气组份），曾征求各方面专家意见，大部分均认为“危险”，“小心为妙”。关于脱氧到什么程度，也有提出 0.0005%，也有认为 1%，就可通过往复式压缩机进行压缩、输送。

笔者从事 40 年往复压缩机设计，曾接触百种



压缩介质,但其中任何一种含氧量均未超过 0.5%。

### 三、关于煤层气的爆炸极限

根据煤气规划设计手册,可燃气体中含有氧气组分时的爆炸极限的计算方法是当可燃气体中含有氧气组分时,可视为混入了空气,应先扣除氧气组分含量,以及按空气中的氧气、组分比例求得的氮气组分含量,经重新调整可燃气体的体积组分,再按图 1 和图 2 和式 (1)、式 (2) 计算可燃气体的爆炸极限

$$L = \frac{100}{\sum \frac{V_i}{L_i}} \quad (1)$$

式中  $L$ ——煤层气的爆炸极限的上限或下限 (体积%);

$L_i$ ——可燃气体各组分的爆炸极限的上限或下限 (体积%);

$V_i$ ——可燃气体各体积组分 (体积%)。

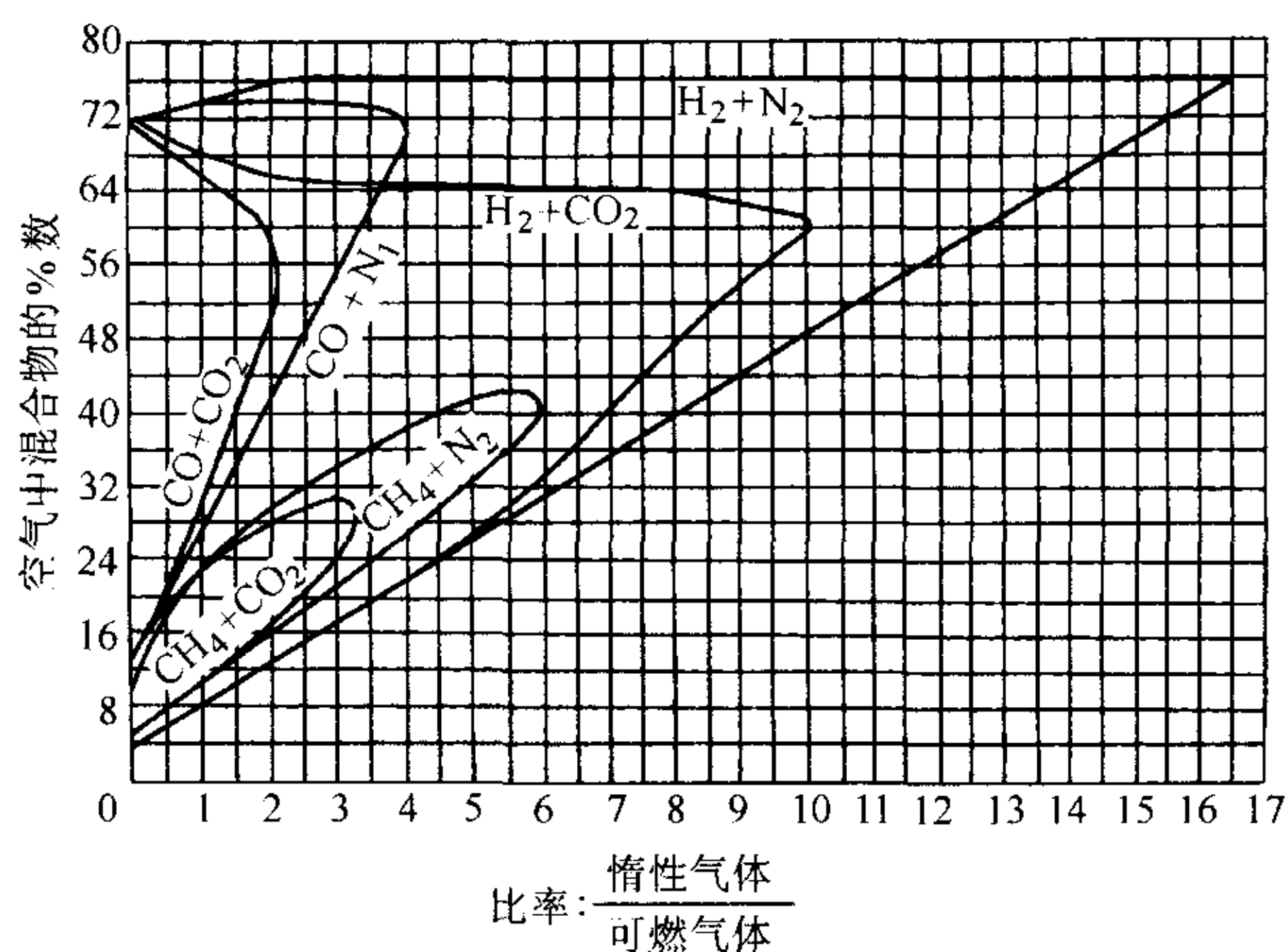


图 1  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$  与  $N_2$ 、 $CO_2$  混合时的爆炸极限

$$L = \frac{100}{\frac{V'_1}{L'_1} + \frac{V'_2}{L'_2} + K + \frac{V'_n}{L'_n} + \frac{V_1}{L_1} + \frac{V_2}{L_2} + K + \frac{V_n}{L_n}} \quad (2)$$

$V'_1$ 、 $V'_2$ 、 $\dots$ 、 $V'_n$ ——由某一可燃气体组分与某一惰性气体组分组成的混合组分,在混合气体中的体积组分 (体积%);

$L'_1$ 、 $L'_2$ 、 $\dots$ 、 $L'_n$ ——由某一可燃气体组分与某一惰性气体组分组成的

混合组分,在该混合比时的爆炸上限或下限 (体积%);

$V_1$ 、 $V_2$ 、 $\dots$ 、 $V_n$ ——未与惰性气体组合的可燃气体在混合气体中的体积组分 (体积%);

$L_1$ 、 $L_2$ 、 $\dots$ 、 $L_n$ ——未与惰性气体组合的可燃气体各组分的爆炸上限或下限 (体积%)。

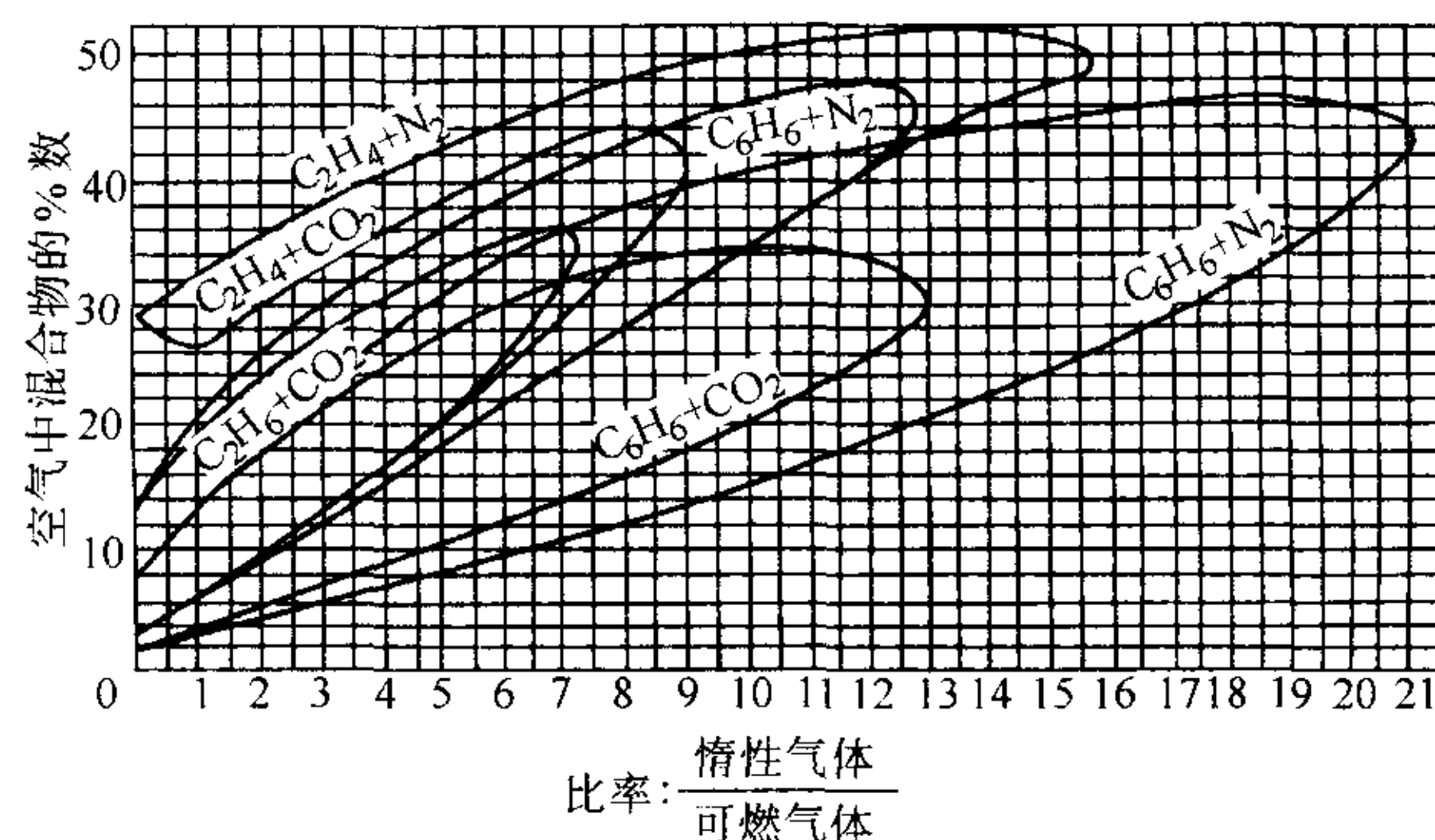


图 2  $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_6H_6$  与  $N_2$ 、 $CO_2$  混合时的爆炸极限例: 已知某煤层气的体积组分百分比。

解: (1) 先扣除煤层气中含  $O_2$  量 10%。

(2) 按空气中  $O_2$ 、 $N_2$  比例求得  $N_2$  含量 ( $3.76 \times 10\% = 37.6\%$ ) 这与煤层气中的  $N_2$  含量 35.13% 相近,故扣除其全部  $N_2$  含量,即扣除  $35.13\% + 10\% = 45.13\%$

(3) 然后重新调整煤层气的体积组分 (见表 3)。

表 3

| 煤层气组分          | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_3H_8$  | $CO_2$ | $N_2$ | $O_2$ | $\Sigma$ |
|----------------|--------|----------|-----------|--------|-------|-------|----------|
| 摩尔体积 (%)       | 51.8   | 1.47     | 0.1       | 1.5    | 35.13 | 10    | 100      |
| 爆炸极限 (%)       | 5 ~ 15 | 2.9 ~ 13 | 2.1 ~ 9.5 |        |       |       |          |
| 调整后煤层气组份体积 (%) | 94.4   | 2.679    | 0.187     | 2.734  |       |       | 100      |

(4) 将  $CO_2$  与可燃气体  $C_2H_6$  组合为  $V_{CO_2} + V_{C_2H_6} = 2.734 + 2.679 = 5.413$

根据  $V_{CO_2} / V_{C_2H_6} = 2.734 / 2.679 = 1.02$

由图 2 查得上述组合气体的爆炸极限  $L_{下} = 6\%$ ,  $L_{上} = 19\%$

(5) 根据式 (2) 和表 3 计算煤层气的爆炸极限





$$L_{\text{下}} = \frac{100}{\frac{94.4}{15} + \frac{5.413}{6} + \frac{0.187}{2.1}} = 5\%$$

$$L_{\text{上}} = \frac{100}{\frac{94.4}{15} + \frac{5.413}{6} + \frac{0.187}{2.1}} = 15\%$$

根据计算结果可以认为该煤层气组分不在爆炸极限范围内。

通过表 4，可查得在一个大气压下在氧气中的着火极限  $\text{CH}_4$  为 5.1% ~ 61%，煤层气内含氧气 10%，显然是在着火极限范围内，也即处于爆炸极限范围之内。

表 4 常见燃气在 1 大气压下的着火极限

(%)

| 常见燃气                         | 在空气中着火极限 |      | 在氧气中的着火极限 |      |
|------------------------------|----------|------|-----------|------|
|                              | 下限       | 上限   | 下限        | 上限   |
| 氢气 $\text{H}_2$              | 4        | 75.0 | 4         | 94   |
| 一氧化碳 $\text{CO}$             | 12.5     | 74.0 | 15.5      | 94   |
| 甲烷 $\text{CH}_4$             | 5.8      | 14.9 | 5.1       | 61   |
| 乙烷 $\text{C}_2\text{H}_6$    | 3.0      | 12.5 | 3.0       | 66   |
| 丙烷 $\text{C}_3\text{H}_8$    | 2.2      | 9.5  |           |      |
| 丁烷 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ | 1.9      | 8.5  |           |      |
| 戊烷 $\text{C}_5\text{H}_{12}$ | 1.5      | 7.8  |           |      |
| 乙烯 $\text{C}_2\text{H}_4$    | 3.1      | 32.0 | 8.0       | 80.0 |
| 乙炔 $\text{C}_2\text{H}_2$    | 2.5      | 80.0 |           |      |
| 人工燃气                         | 4        | 40   |           |      |

#### 四、采用增压—脱氧—增压集输装置 可以实现高效利用煤层气

煤层气与氧气（空气）的混合物形成的爆炸、通常由燃烧的三个条件即一定数量的可燃物质、足够数量的氧气（空气）或其他氧化剂和足以引起可燃物质着火的火源形成，燃烧不一定发生爆炸，只有当煤层气与氧气（空气）的混合物处于爆炸极限范围之内才发生爆炸。爆炸极限又与温度和压力有关，压力越高风险越大。根据以上分析，本文提出利用煤层气增压—脱氧—增压集输装置来解决煤层气的开发利用问题。

由于煤层气的压力很低，一般为 0.0035 MPa 以下，用深冷法、膜式渗透法、变压吸附法及普里森法脱氧均必须先行增压。膜式渗透法：中压脱氧压力为 2.0 ~ 3.0 MPa，经膜式渗透法脱氧后，含氧量可以达到  $\leq 2\%$ ，用深冷低温法脱氧，如 LWQ—650 装置， $6.50\text{m}^3/\text{h}$ ，操作压力 5.88 MPa，能耗高设备复杂。变压吸附法：装置进口压力低仅

需 0.15 ~ 0.2 MPa，除氧后气体压力为 0.05 MPa，除氧后氧气含量可  $\leq 1\%$ 。从安全性考虑，变压吸附法效果最佳，为增压—脱氧—增压集输装置提供了安全保障。根据以往经验，变压吸附装置投资成本最低。而且还可以进行简化降低成本，如加碳脱氧  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ ， $\text{C} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$  后，可否取消或不需设吸附装置，为此将煤层气的利用设为增压—脱氧—增压集输装置。

对于低压增压往复式压缩机的设计，根据前面的分析，可以把足以引起可燃物质着火的火源除掉，如液环压缩机是用水来灭火对煤层气进行压缩。在此我们也可从材料和结构上采取措施，绝对避免任何火星的产生。在此阐明一点，在有关产品目录中有许多的煤气压缩机，应提醒注意其含氧组分。

2003 年 9 月 15 日 18 日在成都市召开“2003 年煤化工工程技术研讨会”，这次会议盛况空前被称之为“迎来 21 世纪煤化工产业发展的春天”。因此，煤层气产业是一种高投入，高风险，回收期长，但综合效益明显的产业。关于煤层气的开发和利用势必走上日程。由于煤层气的开发利用具有很多的不确定性和风险性，国家应把开发利用煤层气作为重点扶持的新型能源项目才可行。

在科技方面，煤层气产业属于技术密集型产业，有许多问题急待攻克，国家必须多渠道增加科研基金的支持力度，选定一批煤层气勘探理论和开发技术的关键项目，列入国家重点基础发展规划，列入国家重大科学技术攻关计划和国家新技术产业发展规划等。

(收稿日期：2004/06/30)

~~~~~

(上接第 63 页)

#### 参考文献

- 1 雷天觉主编. 新编液压工程手册 (上册). 北京: 北京理工大学出版社, 1998
- 2 林建亚, 何存兴主编. 液压元件. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 3 王艳珍等. 水压锥阀流场的 CFD 解析. 机械, 2003 (5)
- 4 江孔华等. Cosmos Works 软件在复杂结构梁分析中的应用. 机械工程师, 2003 (7)

(收稿日期：2004/03/15)