

氧气呼吸器高压部件着火燃烧机理的研究与探讨

周方年

(中煤科工集团重庆研究院有限公司)

摘要 针对氧气呼吸器在实际使用中时有着火燃烧事故发生的情况, 本文将氧气呼吸器高压系统简化为激波管数学模型, 从理论上研究和探讨了高压系统高温产生的原因; 并以结构改进前后的高压限流体进行试验验证, 试验结果表明: 当高压系统产生激波(冲击波)时, 高压系统内产生高温并产生着火燃烧现象。

关键词 氧气呼吸器 高压系统 激波 着火燃烧

1 问题的提出

氧气呼吸器在实际使用中时有着火爆炸事故的发生, 例如: 2004年甘肃某救护队在呼吸器常规检测时发生着火, 死亡2人并烧毁矿山救护车一辆; 宁夏某救护队发生呼吸器着火, 受伤1人; 贵州、云南、江西等地都发生过呼吸器着火事故, 给救护队员的生命安全造成了极大的隐患。笔者亲自参与了甘肃某救护队、宁夏某救护队等呼吸器着火燃烧事故的调查工作。

氧气呼吸器着火燃烧实际上是高压氧气系统引起的, 行业内对高压氧气系统着火机理的研究很少, 笔者仅看到1982年十一期《煤矿安全》杂志刊登了题为“氧气苏生器减压器着火原因的探讨”一文。该文章对减压器着火原因分析得出的结论是“高压氧气以高速气流喷出与易燃橡胶摩擦产生了温度, 由于有了温度、助燃的氧气以及有机可燃物质, 具备了着火的三大因素”。笔者通过研究发现, 这一结论中对高温产生原因的分析并不正确。

高速气流与固体摩擦生热可以用公式 $Q = FS$ 来表示, 式中: Q 是气体摩擦所做的功, F 是气体与固体的滑动摩擦力, S 是距离。由于 F 和 S 非常小, 所以 Q 也是非常小的。我们可以用非常简单的实验来证明高速气流与固体摩擦不会产生高温。

2 高压系统高温产生原因的分析

那高压系统的高温是如何产生的呢? 当高压氧气通过阀口向低压腔体流动时, 可以简化成如图1所示的激波管模型。

其中低压区参数为 P_1 、 T_1 , 高压区参数为 P_4 、 T_4 ; 当在某一瞬间突然鼓破膜片(或瓶阀开启), 这样低压区和高压区(膛压区)连通, 便产生气体高速流动。当气团的一部

分边界以很大的加速度运动时，气体内便发生局部较显著的状态参数的改变，并且以波的形式向前传播，这波就是激波。我们知道，在压强比大于 1.893 的两个管路中，由高压区流向低压区的气体会在低压区迅速膨胀而变成超音速流，从而形成激波。因此，图 1 模型可以近似地比拟为激波管，它的气体状态参数变化可应用激波管基本方程式进行理论计算。

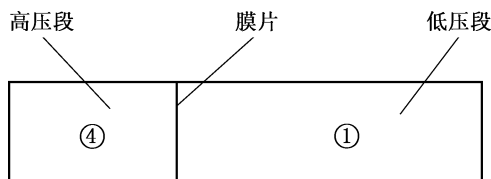


图 1 激波管流原理示意图

根据激波管基本方程可得式 (1)。

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \left[1 - \frac{(r_4 - 1)(P_2/P_1 - 1)(a_1/a_4)}{\sqrt{2r_1} \sqrt{2r_1 + (r_1 + 1)(P_2/P_1 - 1)}} \right]^{-\frac{2r_4}{r_4 - 1}} \quad (1)$$

式中 P_2/P_1 ——入射激波压强比；

r_1 ——低压气体的绝热指数，空气/氧气为 1.4；

r_4 ——高压气体的绝热指数，空气/氧气为 1.4；

P_1 ——低压气体原始压强，取 $P_1 = 1$ 绝对大气压；

P_4 ——高压气体原始压强；

a_1 ——低压气体介质的音速，m/s；

a_4 ——高压气体介质的音速，m/s， $a_1/a_4 \approx 1$ 。

当高压区原始压强为 20 MPa 时，可以计算出 $P_2 \approx 0.8$ MPa，因此入射波压强比 $P_2/P_1 \approx 8$ 。应用郎金 - 雨果尼奥关系式可得式 (2)。

$$T_2 = T_1 \frac{1 + \frac{r_1 - 1}{r_1 + 1} \cdot \frac{P_2}{P_1}}{1 + \frac{r_1 - 1}{r_1 + 1} \cdot \frac{P_1}{P_2}} \quad (2)$$

式中 T_1 ——气体初始温度；

T_2 ——入射波对气体产生的绝热压缩温度。

可以计算出 $T_2 = 687$ K，所以入射波绝热压缩温度 $t_2 = 687 - 273 = 414$ °C，根据反射波与入射波压强关系式^[1,3]得式 (3)。

$$P'_2/P_2 = \frac{(3r - 1) - (r - 1)P_1/P_2}{(r - 1) + (r + 1)P_1/P_2} \quad (3)$$

式中 P'_2 ——反射波压强， $P'_2/P_2 \approx 4.5$ 。

从激波流动的参数表中可查得 $T'_2/T_2 = 1.688$ ， $T'_2 = 1.688 \times 687 = 1159$ K。

则反射波绝热压缩温度 $t'_2 = 1159 - 273 = 886$ °C。

几种有机材料在氧气中的着火温度见表 1。

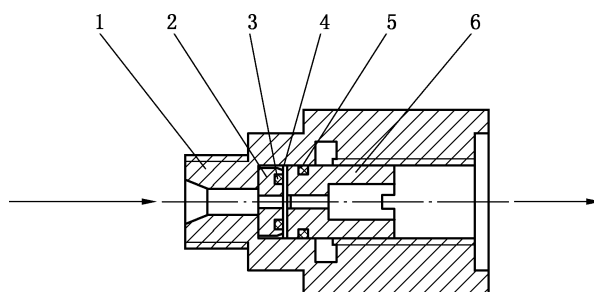
表 1 几种有机材料在氧气中的着火温度

材料名称	温度/℃	材料名称	温度/℃
氟橡胶	425	硅橡胶	430
丁腈橡胶	359 ~ 387	一般橡胶	345
氯丁橡胶	385		

从以上理论计算可以知道，高压系统产生正激波时的温度 414 ℃，如果有反射波的存在，则温度可达到 886 ℃，这样的高温足以使高压氧气系统内有机密封材料着火燃烧。

3 高压系统着火燃烧试验验证

例如氧气呼吸器高压系统中的限流体，原来采用的结构如图 2 所示。



1—限流阀体；2—通气座；3—O 形圈（ $\phi 3.15 \times 1.8$ ）；4—限流片；
5—O 形圈（ $\phi 5 \times 1.8$ ）；6—限流螺塞

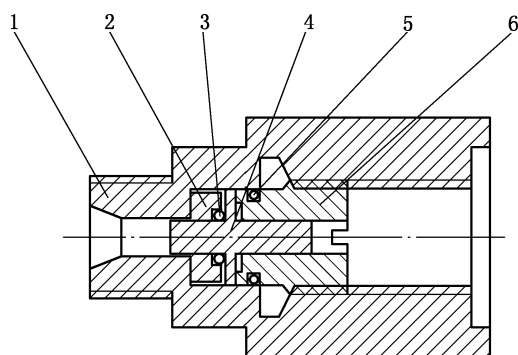
图 2 老限流体结构图

图 2 中，限流作用是通过限流片表面的粗糙度与限流螺塞的端面而形成的，随着呼吸器的不断训练和使用，限流片会产生疲劳破坏，破坏点位于中心位置。此时限流片左边腔体的高压气体会以超音速流直接进入右边腔体，产生激波（冲击波）现象，造成限流体内瞬间高温，引燃限流器内可燃物燃烧。

笔者通过在限流片中心打小孔模拟限流片疲劳破坏时产生激波（冲击波）的状况。当氧气输入压力为 18 ~ 22 MPa，限流流量分别调整为 1 L/min、5 L/min、10 L/min 时，限流体发生着火燃烧。

将高压限流体结构进行重新设计，如图 3 所示。

改进后的高压限流体取消了限流片，增加了限流杆，消除了限流片疲劳破坏的可能性；高压氧气经过限流杆 4 及限流螺塞 6 之间的间隙进入限流体右腔体。在此过程中，高压气体的流向经过了 4 次改变，大大降低了可能产生的激波（冲击波）的强度；O 形圈 3 和 5 的材质由普通橡胶改为优良的阻燃橡胶。限流体结构形式与材料的改进从根本上避免了限流体产生正激波（冲击波）从而引起着火燃烧的可能性。经过实验测试，限流体未



1—限流阀体；2—通气座；3—O形圈（ $\phi 3.15 \times 1.8$ ）；4—限流杆；
5—O形圈（ $\phi 5 \times 1.8$ ）；6—限流螺塞

图3 限流体改进设计后结构图

发生着火燃烧现象。

4 结论

氧气呼吸器高压系统的高温是由激波（冲击波）产生的；在高压氧气系统设计时，高压气流进入到低压区的轨迹不能是直线的，以避免正激波的产生，低压区的腔体长度要足够短，以避免激波反射波的形成。阀芯和密封材料均需采用阻燃、防静电材料。

参 考 文 献

- [1] 陈强. 激波管流动的理论和实验技术[M]. 合肥：中国科技大学出版社，1979.
- [2] 张瑜. 膨胀波与激波[M]. 北京：北京大学出版社，1983.
- [3] 钱冀稷. 空气动力学[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2004.