

文章编号:1673-5005(2011)05-0061-04

# 柴油机尾气钻井注气量定量分析

侯学军<sup>1,2</sup>, 高德利<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 重庆科技学院 石油天然气工程学院, 重庆 401331)

**摘要:**柴油机尾气钻井是利用柴油机尾气作为循环介质的一种气体钻井。对钻井常用柴油机 Z12V190 的尾气成分、排量、含氧量、尾气钻井最小注气量进行计算分析。结果表明:柴油机尾气排量随尾气含氧量增加而增加,可通过增加吸入阻力和负载降低含氧量;柴油机尾气钻井最小注气量随关键点压力增加而增加;尾气含氧量必须低于 14% 才能安全钻进;因受尾气排量限制,柴油机尾气钻井只适用于低压钻井,即使 3 台柴油机同时工作所提供的最大尾气排量也仅能满足关键点压力为 4 MPa 时的最小注气量要求,当只有 2 台或 1 台柴油机工作时,其钻井压力会更低,甚至不到 1 MPa。

**关键词:**钻井; 柴油机尾气; 注气量; 含氧量

中图分类号:TE 21 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.011

## Quantitative analysis of gas injection volume for diesel engine tail gas drilling

HOU Xue-jun<sup>1,2</sup>, GAO De-li<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Petroleum Engineering in Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Diesel engine tail gas drilling is a kind of gas drilling with engine tail gas as circulating medium. The Z12V190 diesel engine tail gas composition, exhaust rate, oxygen content and minimum gas injection rate of tail gas drilling were analyzed and calculated. The results show that the diesel engine tail gas exhaust rate increases with the oxygen content increasing, and the oxygen content in tail gas can be reduced by increasing suction resistance and diesel engine load. The minimum gas injection rate increases with the pressure at key point increasing. The oxygen content in tail gas must be below 14% in tail gas drilling. The diesel engine tail gas drilling applies only to low pressure condition because of the limited diesel tail gas rate. When all the three diesel engines are working, the total tail gas rate just reaches the minimum gas injection rate at 4 MPa, but when one or two diesel engines are working, the tail gas rate is only suit to the minimum gas injection rate at 1 MPa.

**Key words:** drilling; diesel engine tail gas; gas injection volume; oxygen content

柴油机尾气钻井是用柴油机尾气作为循环介质的一种特殊的欠平衡钻井方式,在保护储层、提高机械钻速、防止井下燃爆、降低钻井成本等方面效果明显<sup>[1-3]</sup>。中国川西南地区和西南石油大学开展了柴油机尾气钻井工艺技术理论和试验研究,四川油气田还在现场钻井修井作业中进行了实际应用,并取得了较好的经济效益。但是,柴油机尾气钻井也面

临着一些问题,如尾气排量是否满足钻井最小注气量要求,尾气含氧量是否满足井下燃爆的安全性能要求等<sup>[4]</sup>。笔者针对这两个问题对钻井常用 Z12V190 柴油机尾气进行分析,在满足安全钻进的含氧量范围内,计算并比较柴油机尾气理论排量和气体钻井通常所需最小注气量,得出柴油机尾气钻井可行适用范围。

收稿日期:2010-11-23

基金项目:国家“973”计划课题(2010CB226703)

作者简介:侯学军(1973-),男(汉族),湖北黄冈人,讲师,博士研究生,主要从事油气井工程与石油装备方面的教学和科研工作。

## 1 柴油机尾气成分分析

### 1.1 柴油机性能参数

钻井现场常用柴油机大多为 Z12V190B 型 4 冲程直喷式水冷增压大功率柴油机,分析用到的主要性能参数为:12 h 功率 1200 PS(882 kW),持续功率 1080 PS(794 kW),选用 0 号轻柴油时燃油消耗率(209.4±5%) g/(kW·h),原油中各成分质量分数 C 为 0.87、O 为 0.004、H 为 0.126(其中的氧可分解并参加燃烧反应)。

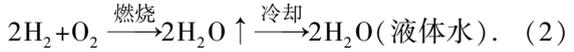
### 1.2 柴油机尾气成分

柴油机燃烧废气中主要成分有  $N_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $O_2$  和少量的 CO(为使燃烧充分,采用过量的  $O_2$ ,因此柴油机尾气中含有大量  $O_2$ )。柴油机尾气中  $O_2$  含量理论上为 12% 左右,实际钻井中,随柴油机使用时间长短、性能差异、转速、负载等不同,从尾气中测得的含氧量为 9%~19%,而且负载越大,进气阻力越大,尾气含氧量越低。用柴油机尾气进行钻进时,控制井下燃爆安全钻井的含氧量为 5%~12%,在低压流畅条件下上限为 12%,高压流动受阻情况下为 5%~8%。现场钻井在低压且井眼流体流动通畅情况下,安全的含氧量可提高到 14%。同时可增加柴油机进气阻力,提高柴油机运转负荷,尽可能使尾气含氧量控制在低于 14% 的安全范围内<sup>[4]</sup>。尾气中 CO 含量很少,对钻井和环境基本没有影响,可忽略不计。

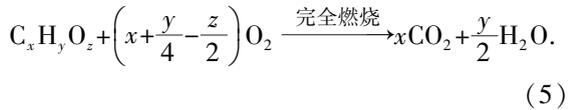
## 2 柴油机尾气量计算

### 2.1 柴油燃烧反应

柴油机工作时,柴油燃烧反应式为



由于供氧充分,反应式(3)中生成的 CO 最终绝大部分通过反应式(4)转化为  $CO_2$ ,剩下的 CO 很少,基本上可忽略不计。因此,根据质量守恒,上述 4 个反应式可等效为



### 2.2 燃烧尾气量计算

以 0 号轻柴油为例进行计算分析:根据各主要成分的含量以及对应的摩尔质量,计算 1 kg 柴油各主要成分摩尔数:碳原子摩尔数为  $x_{\text{kmol}} = 0.87/12 = 0.0725$  kmol;氢摩尔数为  $y_{\text{kmol}} = 0.126/1 = 0.126$  kmol;氧摩尔数为  $z_{\text{kmol}} = 0.004/16 = 0.00025$  kmol;完全燃烧需氧量为  $x_{O_2} = x_{\text{kmol}} + y_{\text{kmol}}/4 - z_{\text{kmol}}/2$ 。

设总尾气量为  $m$  (kmol,即千摩尔),根据质量守恒关系式(5)得含氧量(百分含量)表达式为

$$w_{O_2} = \frac{6.4 \left[ m - x_{\text{kmol}} - 4 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) - \frac{y_{\text{kmol}}}{2} \right]}{28.95 \left[ m - x_{\text{kmol}} - 4 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) - \frac{y_{\text{kmol}}}{2} \right] + 112 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) + 44x_{\text{kmol}} + 9y_{\text{kmol}}}. \quad (6)$$

$w_{O_2}$  理论上等价于尾气中氧含量的测量值。根据测量值,计算其总量为

$$m = x_{\text{kmol}} + 4 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) + \frac{y_{\text{kmol}}}{2} + \frac{\left[ 112 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) + 44x_{\text{kmol}} + 9y_{\text{kmol}} \right] w_{O_2}}{6.4 - 28.95w_{O_2}}. \quad (7)$$

除去水后的含氧量为

$$w'_{O_2} = \frac{6.4 \left[ m - x_{\text{kmol}} - 4 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) \right]}{28.95 \left[ m - x_{\text{kmol}} - 4 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) \right] + 112 \left( x_{\text{kmol}} + \frac{y_{\text{kmol}}}{4} - \frac{z_{\text{kmol}}}{2} \right) + 44x_{\text{kmol}}}. \quad (8)$$

式中,  $w_{O_2}$  和  $w'_{O_2}$  分别为柴油机尾气在除水前和除水后的含氧量。

根据公式进行理论计算,结果如图 1 所示。在满足安全钻井含氧量不能超过 14% 的条件下,单台 Z12V190 柴油机最小排气量为 46.0 m<sup>3</sup>/min,最大排气量为 88.1 m<sup>3</sup>/min,而井队上正常钻井时最少能保证 1 台柴油机正常运转,基本上能满足浅井尾气

钻井最小注气量要求。对于深井钻井,所需功率比较大,需 2 台或者 3 台柴油机同时工作,2 台时最小排气量为 92.0 m<sup>3</sup>/min,最大排气量为 176.3 m<sup>3</sup>/min;3 台时最小排气量为 138 m<sup>3</sup>/min,最大值排气量为 264.4 m<sup>3</sup>/min。图 1 显示柴油机尾气排量随尾气中氧含量的增加而增加。

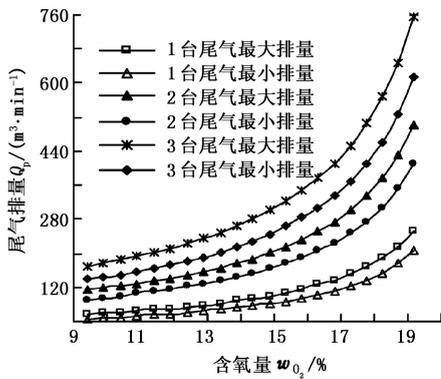


图 1 尾气排量与含氧量关系

Fig. 1 Relationship between diesel engine tail gas rate and oxygen content

### 3 最小注气量计算

气体钻井中,如果环空气体返速过低,岩屑就会向井底回落,在井内堆积,造成扼流现象,致使钻井无法进行,因此气体钻井供气量必须不小于井中携岩能力最差处的最小气体返速,一般情况下越往井底,环空气体流速越低,但压力越大,密度也越大。在钻铤与钻杆交接处,气体密度及压力有一个突然的下降,出现对岩屑的最小举升能力,因此通常以该处为计算最小注气量的关键点<sup>[5]</sup>,当然也有些特殊情况,最小携岩能力不出现在钻铤与钻杆接头处,而是上部的某点<sup>[6]</sup>。无论携岩能力最差的关键点在哪里,都可以根据关键点处的不同压力来计算最小注气量。计算最小注气量的方法有最小动能法、最小速度法、解析法等<sup>[7-11]</sup>,这里以最小动能法举例计算。

某井采用柴油机尾气钻井,钻头尺寸 200 mm,钻杆尺寸 114.3 mm,确定最小注气量关键点处的压力根据井深不同设为从 0.5 MPa 开始,以 0.1 MPa 梯度逐渐增加至 5 MPa。根据最小动能法关键点处的气体密度、最小返出流速、所需气体量、最小注气量的计算公式<sup>[7-11]</sup>为

$$\rho = \frac{pM}{RT}, v_g = \sqrt{\frac{\rho_{g0}v_{g0}^2}{\rho_g}}, Q_g = \frac{\pi}{4}v_g(D_h^2 - D_{p0}^2),$$

$$Q_{g0} = Q_g \frac{pT_0}{p_0T}$$

式中, $\rho_{g0}$ 和 $\rho_g$ 分别为标准状态(压力 101.325 kPa,温度 0 °C)下和压力 $p$ 、温度 $T$ 下的气体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $v_{g0}$ 和 $v_g$ 分别为标准状态下和压力 $p$ 、温度 $T$ 下的气体速度,m/s;  $Q_g$ 和 $Q_{g0}$ 分别为标准状态下和压力 $p$ 、温度 $T$ 下的最小注气量,m<sup>3</sup>/min;  $D_h$ 和 $D_{p0}$ 分别为井眼直径和钻杆外径,m;  $M$ 为空气的摩尔质量;  $R$ 为通用气体常数。

利用上述公式计算得到的关键点处不同压力下最小注气量与尾气排量的关系如图 2 所示。图 2 表明:关键点处最小注气量随压力增加而呈线性增加;在最小注气量曲线以上部分的柴油机尾气排量才能满足该压力条件下的最小注气量要求,能进行尾气钻井;尾气钻井只适合低压钻井,即使 3 台柴油机同时工作所提供的最大排气量也仅能满足关键点处压力为 4 MPa 时所需的最小排气量,当关键点压力继续升高超过 4 MPa 时,3 台柴油机同时工作的供气量也不能满足最小注气量要求,不能进行尾气钻井。

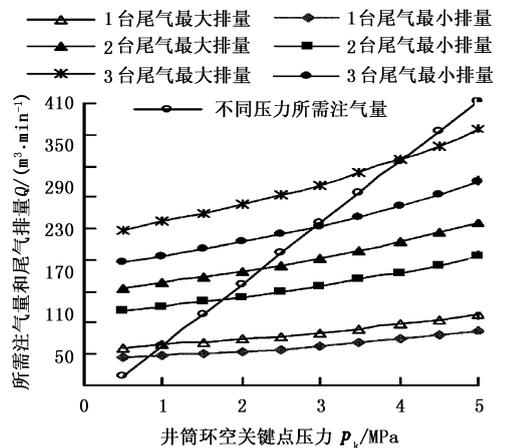


图 2 关键点处不同压力下最小注气量与尾气排量的关系

Fig. 2 Relation between minimum gas injection rate at key point with different pressure and tail gas rate

### 4 现场应用

柴油机尾气钻井在中国四川油气田钻井修井作业中进行了现场实际测试和应用,并取得了较好的经济效益。现场曾对威 100 井、威 27 井使用的两台 Z12V190 型柴油机尾气含氧量进行测试,因柴油机使用年限过久,经过 3 次大修,性能较差,实测时负荷较低,以致柴油机尾气含氧量一般高于安全极限值 14%,后对 1 台 6135 型柴油机进行了不同工况下尾气含氧量测试<sup>[4]</sup>,测试结果如图 3 所示。随负荷增大,含氧量下降,只要柴油机带足负荷,则尾气含氧量能降到 14% 以下,能满足作业的安全要求(图 3);随着柴油机进气管阻力增加,柴油机尾气含氧量下降,故增加进气阻力,可以使尾气含氧量降到 14% 以下。由于修井作业的复杂性和变化性,实际控制载荷方法难度较大,因此主要通过增设进口阻力来调节尾气含氧量。

柴油机尾气排量和尾气钻井最小注气量的对比分析表明,柴油机尾气钻井只适合于低压钻井,在四

川威远构造、西昌七里坝构造、成都龙泉山构造带的钻井修井作业中,完成地层压力系数为0.4~0.6的低压井的开窗侧钻修井作业6口,地层压力系数约为0.3的低压开发气井1口,治理严重井漏作业井数十口(包括海外作业2口)以及负压作业井数口<sup>[4]</sup>,在提高钻井速度、发现和保护油气层、提高采收率等方面起到积极作用,并取得了较好的经济效益。

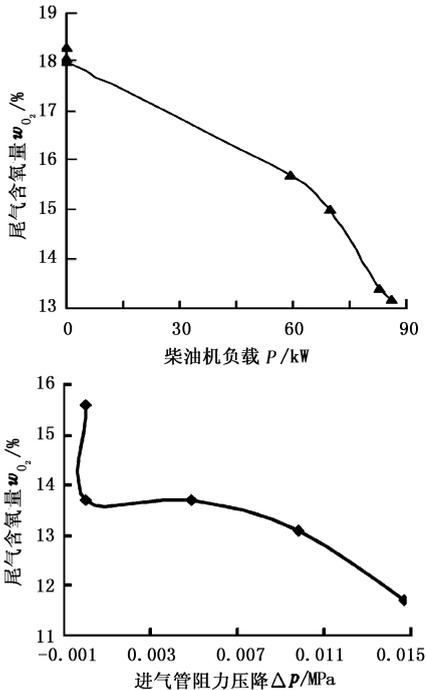


图3 柴油机尾气含氧量与柴油机负荷及进气管阻力的关系

Fig.3 Relation between oxygen content in diesel engine tail gas and load and intake pipe resistance

## 5 结论

(1) Z12V190 柴油机尾气排量随尾气含氧量升高而增大,为使含氧量低于14%,满足安全钻井要求,可增加柴油机进气阻力,并使其满负荷运行。

(2) 气体钻井所需最小注气量随井眼环空钻铤与钻杆接头处关键点的压力增加而增大。

(3) 在满足含氧量要求前提下,柴油机尾气排量只适合低压钻井;即使3台柴油机同时工作所提供的最大尾气排量也仅能满足关键点压力为4 MPa时的最小注气量要求,当只有2台或者1台柴油机工作时,其钻井压力会更低,甚至不到1 MPa。

(4) 柴油机尾气钻井在中国低压油气田进行钻井修井应用切实可行,在提高钻井速度、发现和保护油气层、提高采收率等方面作用显著,有较好的技术经济效益,应用前景广阔。

## 参考文献:

- [1] 沈忠厚,黄洪春,高德利,等.世界钻井技术新进展及发展趋势分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(4):64-70.  
SHEN Zhong-hou, HUANG Hong-chun, GAO De-li, et al. Analysis on new development and development trend of worldwide drilling technology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(4):64-70.
- [2] 高德利.油气钻井技术展望[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(1):29-33.  
GAO De-li. Prospects for drilling technologies [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(1):29-33.
- [3] MEHTA S A, MOARE R G, LAURESHEN C J, et al. Safety considerations for underbalanced drilling of horizontal wells using air or oxygen-containing gas [R]. PETSOC-95-135-P, 1995.
- [4] 魏武,乐宏,许期聪,等.气体钻井应用技术[M].东营:中国石油大学出版社,2008:157-171.
- [5] 袁兆广,周开吉,孟英峰,等.气体钻井大斜度水平井最小注气量计算方法研究[J].天然气工业,2007,27(4):65-68.  
YUAN Zhao-guang, ZHOU Kai-ji, MENG Ying-feng, et al. Calculating the minimum gas volume used in high-angle horizontal wells during gas drilling[J]. Natural Gas Industry, 2007,27(4):65-68.
- [6] 陶谦,柳慧慧,毕胜宇,等.气体循环钻井注气量计算与影响因素分析[J].石油天然气学报,2010,32(1):97-100.  
TAO Qian, LIU Gong-hui, BI Sheng-yu, et al. Calculation of gas injection volume of gas-cycling drilling and analysis on its influential factor [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010,32(1):97-100.
- [7] TABATABAEI M, GHALAMBOR A, GUO B. The minimum required gas-injection rate for liquid removal in air/gas drilling[R]. SPE 116135, 2008.
- [8] 郭柏云,格兰伯.欠平衡钻井气体体积流量的计算[M].胥思平,译.北京:中国石化出版社,2006:9-12.
- [9] JOHNSON P W. Design techniques in air and gas drilling: cleaning criteria and minimum flowing pressure gradients [R]. SPE 23550, 1991.
- [10] MACHADO Carlos J, IKOKU Chi U. Experimental determination of solids fraction and minimum volume requirements in air and gas drilling[R]. SPE 9983,1982.
- [11] ANGEL R R. Volume requirements for air or gas drilling [R]. SPE 0873, 1957.