文章编号：1000-5773(2012)02-0189-10

气相井喷的泄漏源模型及其仿真*

郑远攀[1,2]，苏晓珂[1]，刘新新[1]，张亚丽[3]，孙 垦[4]

(1. 郑州轻工业学院计算机与通信工程学院，河南郑州 450002；
2. 应急平台信息技术河南省工程试验室，河南郑州 450002；
3. 郑州轻工业学院，河南郑州 450002；
4. 华北水利水电学院，河南郑州 450011)

摘要：钻井过程的井喷是气田开发中最严重的事故之一，研究气相井喷的泄漏和扩散进而为现场应急提供科学依据，必须首先明确钻井过程中井喷的泄漏源模型。采用流体力学特别是气体动力学理论与计算流体力学技术相结合的方法，分析和模拟了气相井喷的泄漏源模型。通过基于理论分析的数值仿真，得到了气相井喷的温度、静压和马赫数分布等气体动力学参数，仿真结果与理论分析以及相关实验的结论具有很好的一致性。研究表明，钻井过程中气相井喷的泄漏源可以用塞流模型表征，气相井喷可视为欠膨胀射流。

关键词：井喷；泄漏源；模型；仿真；塞流；欠膨胀射流
中图分类号：O354；X937 **文献标识码**：A

1 引 言

在油气勘探和开发过程中不可控井喷是最危险的情形之一，含有各种毒害成份如 H_2S 等的天然气井一旦发生井喷，会在一定范围内造成窒息、燃爆等事故[1-2]。2003 年 12 月 23 日，重庆市开县高桥镇的川东北气矿 16 号井发生特大井喷事故(以下简称“12·23”事故)，井内喷射出的大量含有剧毒 H_2S 的天然气，造成 243 人中毒死亡、2 142 人入院治疗、65 000 人被紧急疏散安置，此次灾难造成的直接经济损失高达 6 400 余万元[3]。

较早的井喷研究是基于经验公式或评价模型推导流场，理论与数值计算多是基于不可压缩射流理论，但这种假定不能真实反映井喷发展过程。周开吉等将失控井喷流在井口的喷出流动视为一元等熵流动，提出了预测喷口速度的“短管”模型，并得出喷流出口速度不会大于音速[4-5]，以及失控井喷流可视为一束紊动射流，其形态特征尺寸、速度分布和计算方法可按轴对称圆形紊动射流确定等结论[4-6]。

实验和流体力学计算方法(CFD)可以较为详尽地研究井喷流场[7]。罗音宇等人[3]为研究高含硫气田发生井喷事故后 H_2S 的扩散运动规律，以“12·23”井喷事故为研究对象，利用环境风洞，制做了缩比模型，进行了井喷事故后 H_2S 扩散的风洞试验，获得了低风速下 H_2S 浓度分布随时间的演化过程。意大利埃尼油气勘探开发公司(ENI)曾专门制定了研发计划，利用 CFD 方法进行井喷风险分析，主要目标是对井喷相关的现象进行系统分析[8]。Zhu 等人[2]基于大涡模拟对高含 SO_2 天然气井的井喷进行了数值仿真。王其华等人[9]基于 CFX 求解器研究了井喷失控喷射火，进而得出井喷失控喷射火温度和热辐射场。艾志久等人采用 CFD 方法，利用 k-ε 模型作为湍流控制方程，采用有限体积法进行数值求解，

* **收稿日期**：2011-02-16；**修回日期**：2011-05-19
基金项目：国家自然科学基金(61163017)；河南省教育厅科技攻关项目(2011B620003)；郑州轻工业学院博士科研基金(2010BSJJ009)
作者简介：郑远攀(1983—)，男，博士，讲师，主要从事公共安全与应急管理科学研究. E-mail：y. p. zheng@foxmail. com

求解得出井喷失控后所形成的气云[10]。刘振翼等人[11]以及刘墨山等人[12]基于特定假设将井喷视为一元等熵流动,并通过仿真得到了井喷过程中整个计算域的浓度场。艾志久等人[12]基于 k-ε 模型和改进的 EBU 模型,建立了井喷失控 CH_4 喷射流扩散的理论模型。练章华等人[14]采用大涡模拟运动方程对井喷 H_2S 气体的扩散和运移规律进行了数值模拟并获得了浓度场。罗音宇等人为研究气田井喷失控污染物扩散规律,建立了井喷失控射流的 Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型,用以改进标准的 k-ε 双方程湍流模型在描述轴对称射流时与实验值偏离较大的状况[15-16]。目前由于风洞试验以及其它小型实验的昂贵性和技术复杂性,对井喷的研究主要基于 CFD 手段的分析,但这些研究存在值得进一步讨论的空间,包括:① 多数研究是针对生产状况下的井喷,即仅考虑流体有初始动量的情形,而实际上大多数实际井喷出现在钻井过程中[17];② 现有的研究主要关注井喷流体在射流阶段的浓度场及其衍生的温度场、辐射场和有毒区域[1,18-20],较少系统分析井喷的气体动力学机制(如喷口附近的压强和马赫数分布),而动力学参数对井喷数值研究的可靠性论证具有重要意义,因为在特定情况下,喷口存在塞流、欠膨胀射流和超音速流动等气体动力学现象;③ 已有的可靠性分析主要是以特定事故的伤亡分布或个别实验室小型实验作为评价依据,而没有进行气体动力学机制方面的可靠性分析。

对于流体扩散,精确的泄漏源模型是进行扩散分析和应急准备的前提和基础。井喷流场特性的研究是确定各类安全防护距离的基础,如喷流出口速度是喷流形态描述及速度场、温度场预测的基本数据。另外,出于井控的需要,有必要掌握井喷条件下的流量以及沿着井架轴线的压强与温度分布[2]。

基于上述分析,本研究根据流体力学特别是气体动力学理论,提出了面向钻井过程中气相井喷的流场泄漏源模型,即井喷在形成的初始阶段符合塞流模型,随后的近源流场可视为可压缩高度欠膨胀射流[21],并对模型的可行性进行全面的理论分析和基于既有欠膨胀射流实验的仿真验证,得到气相井喷喷口附近的气体动力学特征量,包括压强分布、马赫数分布以及流场结构等,这些量的研究是井喷浓度场等标量场分析的前置条件[15],将使气相井喷的研究更趋精细、准确和全面,进而提高井喷相关事故应急处置的科学性。

2 泄漏源模型理论分析

2.1 速率和质量流量

泄漏源模型是根据描述物质释放时所表现出来的物理化学过程的理论或经验方程而建立的。源模型将定量给出流出速率、流出总量(或流出的总时间)和流出状态(即固体、液体、气体或某一组合)的表达。流体的释放机理可分为大孔和有限孔释放。在大孔释放事件中,在短时间内大量物质释放完毕,如储罐超压爆炸;对于有限孔释放,物质以非常慢的速率释放,上游条件并不因此而立即受到影响,上游压强不变的假设往往是可以接受的[22]。

在开放空间内,井口尺度相对较小,研究中可把井喷处视为一个稳定的气流点源。当高压井喷气体喷向周围开放空间时,由于压力的作用,气体含有的能量在从小孔泄漏和扩散出去时,一部分转化为动能[23]。分析气相井喷的特点,在有限孔条件下蒸气经孔洞流出的源模型是适合的,气体或蒸气通过有限孔的流动可以分为滞留释放和自由扩散释放,在自由扩散释放情况下,气体的大多数压能转化为动能,过程通常假设为等熵。在钻井过程中,井喷发生的瞬时,井口内静止气体的绝大部分静压能转化为动能,这一过程可假定为自由扩散释放[12,23]。

描述自由扩散等可压缩气体流动的机械能守恒方程是

$$\int \frac{\mathrm{d}p}{\rho} + \Delta\left(\frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c}\right) + \frac{g}{g_c}\Delta z + F = -\frac{W_s}{m} \tag{1}$$

式中:p 是压强,Pa;ρ 是密度,kg/m^3;$\bar{u}$ 是平均瞬时速率,m/s;α 是无量纲速率轮廓修正系数,对于层流和塞流,α 分别取值 0.5 和 1.0;g_c 是万有引力常数,m^3/(kg·s^2);g 是重力加速度,m/s^2;z 是高于基准面的高度,m;F 是静摩擦损失项,m^2/s^2;W_s 是轴功,m^2·kg/s^2;m 是质量,kg;Δ 函数表示终态减去始态。

假设可以忽略潜能的变化,也没有轴功,经过孔洞可压缩流动的机械能守恒方程的简化形式为

$$\int \frac{\mathrm{d}p}{\rho} + \Delta\left(\frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c}\right) + F = 0 \tag{2}$$

流出系数的表达式为

$$-\int \frac{\mathrm{d}p}{\rho} - F = C_1^2\left(-\int \frac{\mathrm{d}p}{\rho}\right) \tag{3}$$

式中:C_1 是流出系数,无量纲。

(3)式与(2)式联立,并在任意两个方便的点之间进行积分。初始点(下标为 0)选在速度为零、压强为 p_0 处,到任意的终止点(无下标)积分。其结果是

$$C_1^2\int_{p_0}^{p} \frac{\mathrm{d}p}{\rho} + \frac{\bar{u}^2}{2\alpha g_c} = 0 \tag{4}$$

对于任何等熵膨胀的理想气体

$$pv^{\gamma} = \frac{p}{\rho^{\gamma}} = C \tag{5}$$

式中:v 是比容,$\mathrm{m^3/kg}$;$\gamma = c_p/c_v$ 是比热比,无量纲。将(5)式代入(4)式,定义新的流出系数 $C_0 = C_1\sqrt{\alpha}$ 并积分,得到等熵扩散中任意点处流体速率方程

$$\bar{u}^2 = 2g_cC_0^2\frac{\gamma}{\gamma-1}\cdot\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right] = \frac{2g_cC_0^2R_gT_0}{M}\cdot\frac{\gamma}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right] \tag{6}$$

式中:C_0 是流出系数,无量纲;p_0、ρ_0、T_0 分别是初始压强、密度和温度,单位依次是 Pa、$\mathrm{kg/m^3}$ 和 K;M 是摩尔分子量,kg/mol。

质量流率的推导:对于等熵膨胀,理想气体定律可写成下述形式

$$\rho = \rho_0\cdot(p/p_0)^{1/\gamma} \tag{7}$$

连续性方程为

$$Q_m = \rho\bar{u}A \tag{8}$$

式中:Q_m 为质量流量,kg/s;A 是面积,$\mathrm{m^2}$。

将(6)式、(7)式、(8)式联立,得到质量流量

$$Q_m = C_0Ap_0\sqrt{\frac{2g_cM}{R_gT_0}\cdot\frac{\gamma}{\gamma-1}\left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/\gamma}-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{(\gamma+1)/\gamma}\right]} \tag{9}$$

对(9)式进行分析,可以确定引起最大流量的压强比为

$$p_{\mathrm{choked}}/p_0 = [2/(\gamma+1)]^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{10}$$

式中:p_{choked}是孔洞最大流量发生时的最大下游压强,Pa。

将(10)式代入(9)式中,最大流量$(Q_m)_{\mathrm{chocked}}$是

$$(Q_m)_{\mathrm{choked}} = C_0Ap_0\sqrt{\frac{\gamma g_cM}{R_gT_0}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \tag{11}$$

当下游压强小于 p_{chocked}时,泄漏口处流体流速为当地声速;通过降低下游压强不能进一步增加其流速和质量流量,呈现出与下游环境条件的无关性,该类型的流动称为塞流或临界流。

对井喷条件下泄漏到大气环境的情形,根据(10)式,则要发生最大流量的泄漏即塞流,井口内静压的最小值 $p_{0,\min}$计算式为

$$p_{0,\min} = \frac{p_a}{[2/(\gamma+1)]^{\gamma/(\gamma-1)}} \tag{12}$$

式中:$p_{0,\min}$是引起塞流的最小井口内静压,Pa;p_a 是当地大气压强,Pa。

以常规天然气(比热比 1.27)泄漏到环境大气中(压强为 0.101 325 MPa)为例,根据(12)式,井口内侧压强达到 0.183 823 4 MPa,即约 1.8 倍的大气压强即可出现塞流泄漏状态。基于此,可以认为钻井过程中的井喷符合塞流泄漏的特征。

2.2 塞流状态参数

塞流条件下,泄漏口处的临界温度比是[4-5]

$$T'/T_0 = 2/(\gamma+1) \tag{13}$$

式中:T'、T_0 分别是临界温度和初始温度,K。临界速率是

$$\omega' = c' = \sqrt{[2\gamma/(\gamma+1)] \cdot p_0/\rho_0} \tag{14}$$

式中:ω'是临界速率,m/s;c'是临界状态下的声速,m/s。等熵气体在自由扩散过程中的临界压强比是

$$p'/p_0 = [2/(\gamma+1)]^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{15}$$

式中:p'是临界压强,Pa。

3 数值仿真

3.1 控制方程及求解

建立井喷泄漏数值模拟的控制方程组,包括可压缩理想流体的运动方程(质量、动量、能量守恒方程)和组分质量守恒方程,其通用形式是

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \boldsymbol{u} \varphi) = \mathrm{div}(\Gamma \cdot \mathrm{grad}\,\varphi) + S \tag{16}$$

式中:φ 是通用变量,表示压强、温度等变量;t 是时间,s;$\boldsymbol{u}$ 是速度矢量,m/s;Γ 是广义扩散系数;S 是广义源项,对于特定方程,S 具有特定的形式,如对于组分质量守恒方程, S 表示系统内部单位时间、单位体积内通过化学反应产生的该组分的质量,单位是 kg/(m^3 · s)。

湍流使用 S-A 模型。在气体动力学中,对于有固壁边界的流动,利用 S-A 模型计算边界层内的流动以及压强梯度较大的流动都可得到较好的结果。

综合上述基本方程,还需要补充一个联系压强与密度的状态方程,方程组才能封闭。理想气体的等熵过程表达式为

$$p = c \cdot \rho^{\gamma} \tag{17}$$

式中:c 表示常量。

对控制方程组在 FLUENT CFD 平台中采用基于密度的求解器进行求解,选择该方法是因为它比较适合求解亚音速和高超音速等流场的强可压缩流问题。

3.2 几何模型及网格

流场计算域几何模型是三维圆柱,由于对称性,可简化为二维问题,流场半横截面如图 1 所示。模型的轴向(z 轴)高度是 400 m,径向(x 轴)尺度是 40 m,井喷口是直径为 0.062 m 的圆面,圆心坐标是(0,0)。

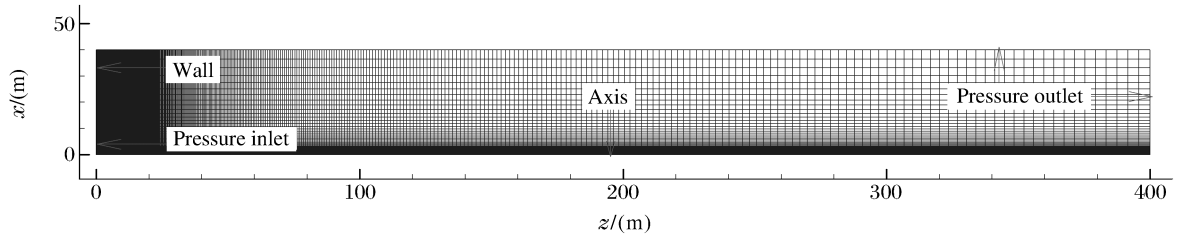


图 1 几何模型、网格及边界类型

Fig. 1 Geometrical model, grid and boundary type

网格收敛是确保数值计算可信的必要条件。理论上说,计算域填充较多的尺寸尽可能小的单元,会有更多的节点可供计算,物理离散误差可减小(当网格尺寸逼近零时,各个节点上的离散误差将趋近于零),进而得到较准确的结果。但实际上也有极限,在收敛性分析过程中,网格尺寸一再缩减也不一定对提高精确性有帮助。本研究为确保网格收敛性主要基于两方面考虑:① 合适的网格疏密程度应通过逐渐加密网格并观察若干关键点上的解是否随网格的加密而发生变化来决定;② 网格细化仅限于需要更

多网格的解域,如大梯度区域。为了说明网格密度对数值计算结果的影响,对比分析了 3 种不同网格数量(分别是 10 万、40 万和 80 万网格单元)条件下的流场。表 1 给出了不同网格数量条件下的流场中若干关键量。从表 1 可知,流场关键参数的相对偏差不超过 1%。

综合考虑内存、CPU 消耗以及数值精度等因素,采用四边形单元和结构化非均匀方法划分网格,网格单元数量 40 万,网格单元最小和最大面积分别是 1.6 mm^2 和 14 m^2,这种网格方案可以基本满足网格无关性的要求。

表 1　不同网格单元数量对数值解的影响

Table 1　Impact of different cell quantities on numerical resolutions

Cell quantity /($\times 10^4$)	Critical flux /(kg/s)	Critical temperature /(K)	Orifice velocity /(m/s)	Mach disk /(m)	Max Mach number
10	76.82	265.76	277.90	0.417	6.106
40	76.90	264.70	279.30	0.415	6.070
80	76.98	266.02	278.46	0.416	6.076

3.3　初边值条件

计算中假定整个计算域在 $t=0$ 时均匀分布着静止的环境气体,在速度为零的井口内,气体在 $t=0$ 时从圆形井口沿 z 轴正向喷出。喷口初始速度为零的假设基于下述考虑:即绝大多数井喷发生在钻井过程中,而不是在正常生产过程中[17]。本研究中井喷口内初始静压是 10 MPa,外界大气压是 0.101 325 MPa,属于高度欠膨胀喷流[5-7]。边界类型设置见图 1,其中假定壁面(Wall)边界具有无滑移和绝热特征。

表 2 给出了数值仿真中涉及的气体在标准状态和初始井喷工况下的物性参数,表中标准状态指温度 273 K,绝对压强 0.101 325 MPa,工况指温度 304 K,压强 10 MPa。

表 2　井喷气体在标准状态和初始工况下的物性参数

Table 2　Physical properties of blowout gas under standard and initial working conditions

Fluids	Molar mass /(kg/mol)	Gas constant /([J/(kg·K)]	Specific heat ratio	Density/ (kg/m^3)	
				Standard conditions	Working conditions
Air	0.029	287.0	1.402	1.293	114.616
Blowout gas	0.037	224.7	1.300	1.650	146.400

4　结果及讨论

4.1　井口塞流参数

表 3 给出了井喷口塞流参数理论计算值与数值仿真值的对比。其中,临界流量、临界温度、临界速度和临界压强的理论解分别依据(11)式、(13)式、(14)式和(15)式进行计算。从表 3 可知,数值仿真中的关键临界状态参数与理论计算值吻合很好。

表 3　井喷口临界流参数的理论解与数值解

Table 3　Theoretical and numerical critical parameters at orifice

Method	Flux/(kg/s)	Temperature/(K)	Velocity/(m/s)	Pressure/(MPa)
Theoretical calculation	77.1	264.3	277.9	5.46
Numerical simulation	76.9	264.7	279.3	5.45

4.2　温度分布

图 2 给出了井喷口附近的温度分布。气体从井口喷出后其温度从井口临界温度 $T'=264.7$ K 持续

下降，在轴向 $z=0.44$ m 处降至最低温度 60 K，通过马赫碟后迅速恢复到周围大气温度 304 K。温度的这种分布符合正激波的特征，即气流主要参数在经过马赫碟前后发生突跃。McDaniel 等[8]在采用自由射流风洞设施和 GASP 平台研究欠膨胀喷流时，发现了类似的温度变化现象。

依据焦耳-汤姆森效应(Joule-Thomson Effect)，井喷气体初始喷出时绝热膨胀对外做功，由于同外界没有热量交换或者热量传递相对较小，可以忽略，对外膨胀做功必然以系统内能的减少为代价，导致作为度量内能的温度必然下降[24]。

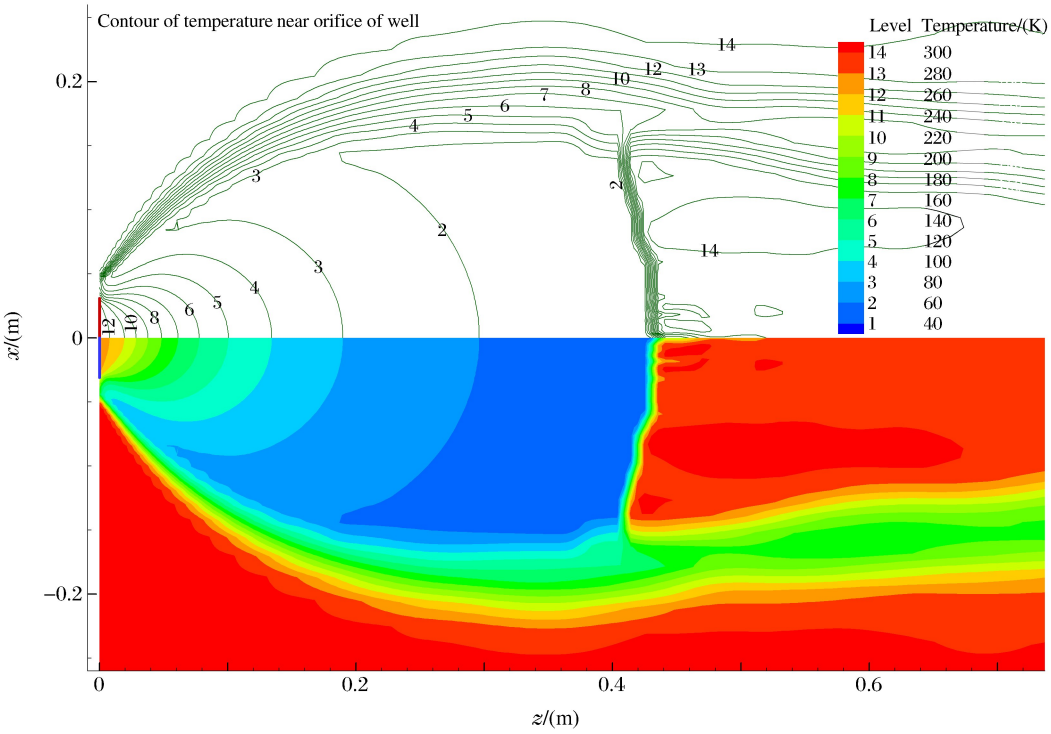


图 2 井喷口附近温度分布

Fig. 2 Temperature distribution near orifice

4.3 压强分布

图 3 给出了井口附近流场的绝对静压及速度矢量分布。从图 3 可知，井喷气体膨胀发生在距离井口非常小的范围内，轴向尺寸最大约为 2 倍井口直径，即 $z=0.12$ m 处；而径向尺寸最大与井口直径大致相等，即 $x=0.06$ m 处。在此范围内，井口附近压强从临界压强 5.386 MPa 急剧降低到环境压强为 0.101 325 MPa。压强的这种变化与 McDaniel 等[8]以及 Ashkenas 等[25]对欠膨胀轴对称喷流的研究结论一致，即喷口附近压强会有一个从临界压强急剧降低到周围环境压强的过程。

由于井喷出口的流动具有塞流特征，则根据等熵膨胀理论，从喷口到下游大约 2 倍出口直径的位置，井喷气体压强将衰减到周围环境压强[26]。在本研究的数值仿真中，下游等熵膨胀距离与喷口直径的比例是 1.93，与等熵膨胀的理论计算和相关实验结果[8]吻合很好。另外，在数值仿真中还发现，侧向的最大等熵膨胀距离相对较小，与井喷口直径大致相同，本研究中侧向膨胀距离与井喷直径的比例是 0.97。

同时，由于井喷气体的压能转化为动能，气体速度急速增加。井喷口附近的速度矢量分布表明，喷出气体的高速运动在喷口附近形成了负压区，周围大气以相对较低的速度向井喷口方向运动。

4.4 马赫数分布

为了便于说明问题，引入射流压强比 $R_{J,p}$ 作为射流核心特征参数

$$R_{J,p} = p_e / p_a \tag{18}$$

式中:p_e 是喷口静压, Pa;p_a 是喷射环境的压强,Pa。

根据 3.3 节的基础数据以及射流压强比计算公式(18)式,结合高度欠膨胀射流的定义,本文的算例中射流压强比为 98.7,属于高度欠膨胀射流的范畴。图 4 给出了仿真井喷口附近的马赫数分布。

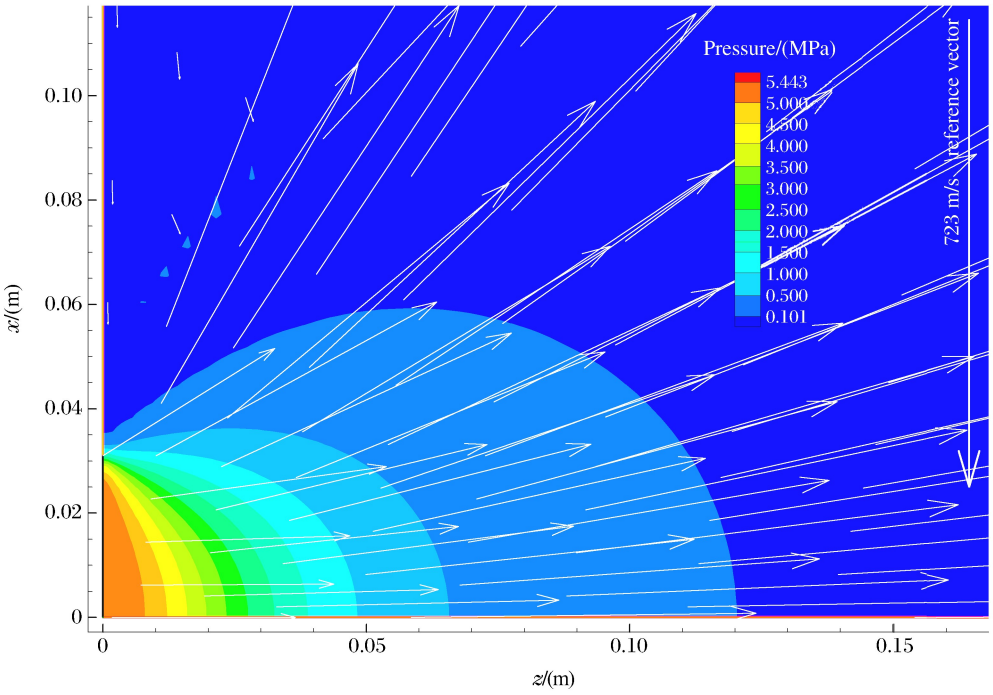


图 3　井口附近流场绝对静压及速度矢量分布

Fig. 3　Distributions of absolute static pressure and velocity vector near orifice

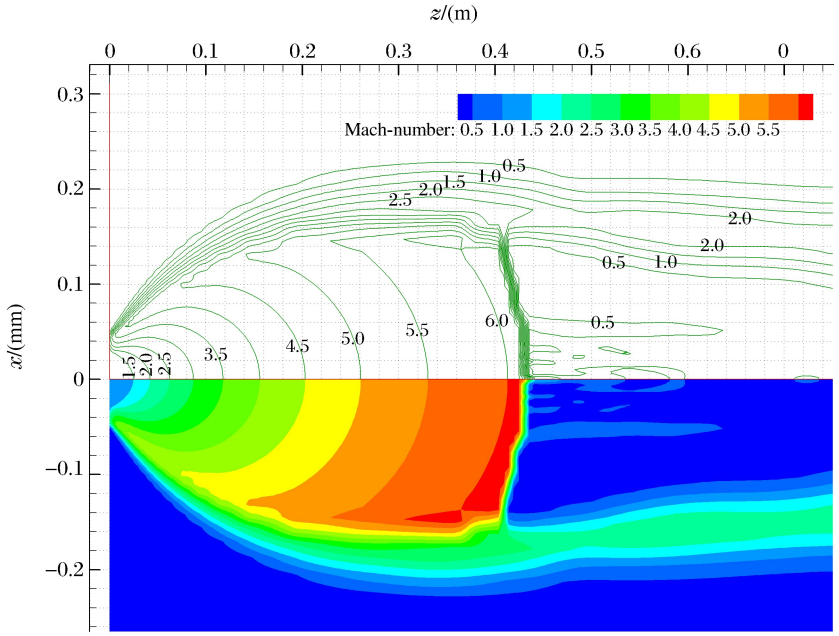


图 4　井喷口附近马赫数分布

Fig. 4　Distribution of Mach number near orifice

Wilkes 等[5]使用基于荧光成像的流场可视化技术研究了欠膨胀射流的流场结构。在射流压强比大于 2 的情况下,泄漏流动结构呈现出一个透镜状的正激波,有时也称为马赫碟或者黎曼波。高压气体以 1 马赫的临界速度离开被"阻塞"的喷口并通过膨胀扇在井口边缘迅速扩展,这些膨胀波从自由射流边界作为压缩波返回并结合成桶状冲击波结构。当桶状冲击波遇到马赫碟时,产生倾斜反射波。此外,当倾斜波从自由射流的边界反射回来时,会产生弱化的膨胀/压缩波。通过马赫碟的气体将变成亚音速流动,而通过桶状冲击波和倾斜反射冲击波区域的气体仍然具有超音速的流动,导致在射流核心的亚音速气体与沿着射流外边缘的剪切层中的超音速气体之间产生了边界。

从图 4 的马赫数场可以观测到下述气体动力学特征现象:① 马赫数为 1 的喷口;② 厚度很小的马赫碟;③ 马赫数在喷口到马赫盘之间从 1 增大至 6.07,并形成桶状冲击波区域;④ 马赫数梯度在流体喷射方向单调递减;⑤ 在桶装冲击波的外缘形成了比较薄的射流边界层,该区域的马赫数从大于 1 衰减到小于 1;⑥ 尽管马赫盘厚度很小,但其前后的马赫数出现了剧烈变化。这些气体动力学现象与 McDaniel等[8]采用平面激光诱导碘荧光测量方法在自由射流风洞中观察到的欠膨胀射流马赫数分布规律一致,而且也符合 Wilkes 等[5]关于欠膨胀射流结构的研究结论,如通过马赫碟的气体将变成亚音速流动,而通过桶状冲击波和倾斜反射冲击波区域的气体仍然具有超音速流动。

4.5 近源流场结构

在欠膨胀射流结构尺寸的定量研究方面,关键参数包括喷口直径 D_e,马赫碟直径 D_M,喷口到马赫碟的距离 X_M、射流主波长度 W 和射流压强比 $R_{J,p}$,参数的含义见图 5 及(18)式。

尽管还没有参数 D_e、D_M、X_M、W 和 $R_{J,p}$之间定量关系的精确表达式,但是目前已有的实验和 CFD 研究表明,无量纲尺寸参数比例 D_M/D_e、X_M/D_e、W/D_e 随 $R_{J,p}$的增大而增大[5,27]。本研究的射流结构尺寸参数与部分已公开发表的数据对比见表 4,无量纲尺寸参数比例在趋势上符合与 $R_{J,p}$值正相关的规律。

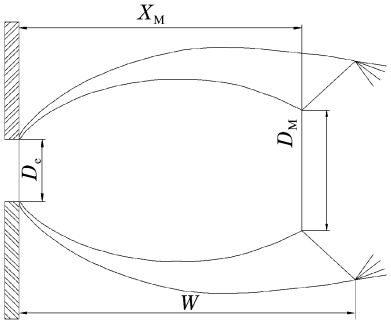


图 5 欠膨胀射流流场结构特征参数示意图

Fig. 5 Sketch of characteristic parameters of under-expanded jet flow structure

表 4 射流结构无量纲参数比例

Table 4 Ratio of jet structure dimensionless parameters

$R_{J,p}$	D_M/D_e	X_M/D_e	W/D_e
18.2[5]	1.7	3.7	4.2
31.4[5]	2.0	4.7	5.6
98.7	4.5	6.9	7.7

5 结 论

对钻井过程中气相井喷的泄漏源模型进行了气体动力学理论分析和数值仿真。理论方面,推导了采用塞流模型刻画气相井喷泄漏源的适用条件以及塞流参数的计算方法。采用 CFD 数值仿真方法,分析了井口塞流参数、温度分布、压强分布、马赫数分布以及近源流场结构(如马赫碟直径、喷口到马赫碟的距离与射流压强比的关系)等气体动力学参数及现象。将井喷形成的温度场、压强场、马赫场、近源流场结构与相关欠膨胀射流实验以及基于其它 CFD 平台的仿真结论进行了一致性分析。理论分析、数值仿真以及相关实验三者的结论吻合很好,论证了采用塞流模型描述气相井喷泄漏源以及采用欠膨胀射流理论分析井喷口近源区流场的合理性。研究表明,可将钻井过程中气相井喷的泄漏源视为塞流,井喷口近源区流场结构具有欠膨胀射流的典型特征。本工作有助于气相井喷现象研究的深化,同时也可为井喷事故的应急处置提供科学参考。

References:

[1] Wu Q S,Qian X M,Guo Z F. Probability of receptor lethality in blowout of sour gas wells [J]. Petroleum Exploration and Development,2009,36(5):641-645. (in Chinese)
吴庆善,钱新明,郭再富. 含硫气井井喷事故受体致死概率分析 [J]. 石油勘探与开发,2009,36(5):641-645.

[2] Zhu Y,Chen G. Simulation and assessment of SO_2 toxic environment after ignition of uncontrolled sour gas flow of well blowout in hills [J]. J Hazard Mater,2010,178(1-3):144-151.

[3] Luo Y Y,Jiang Z A,Cai S J,et al. Research on wind tunnel test of hydrogen sulfide diffusion for uncontrolled blowout in gas field [J]. China Safety Science Journal,2008,18(5):36-40. (in Chinese)
罗音宇,蒋仲安,蔡嗣经,等. 气田井喷硫化氢风洞模拟试验研究 [J]. 中国安全科学学报,2008,18(5):36-40.

[4] Anderson J D. Modern Compressible Flow:With Historical Perspective [M]. 3rd ed. Boston:McGraw-Hill,2003.

[5] Wilkes J A,Glass C E,Danehy P M,et al. Fluorescence imaging of underexpanded jets and comparison with CFD [R]. Reston,VA:American Institute of Aeronautics and Astronautics,2006.

[6] Hu X Q. Numerical simulation of the multicomponent nature gas diffusion on the high pressure leaking pipeline [D]. Qingdao:China University of Petroleum,2006. (in Chinese)
胡夏琦. 含硫化氢高压天然气管道泄漏的数值模拟 [D]. 青岛:中国石油大学(华东),2006.

[7] Liu P Q. Theory of Free Turbulent Jet [M]. Beijing:Beihang University Press,2007. (in Chinese)
刘沛清. 自由紊动射流理论 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.

[8] McDaniel J,Glass C,Staack D. Experimental and computational comparison of an underexpanded jet flowfield [A]//AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit,40th,Reno,NV [C]. US,2002.

[9] Wang Q H,Li Z W,Lei W Z,et al. Simulation of the blowout jet fire temperature field and radiation field based on CFD [J]. Fire Safety Science,2009,18(1):34-38. (in Chinese)
王其华,李占稳,雷文章,等. 基于 CFD 的井喷失控喷射火温度场和辐射场模拟仿真 [J]. 火灾科学,2009,18(1):34-38.

[10] Ai Z J,Wu G W,Wang Q H,et al. Simulative emulation of deflagration in well blow-out based on CFD [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition),2009,31(4):180-183. (in Chinese)
艾志久,吴光武,王其华,等. 基于 CFD 的井喷失控爆燃模拟仿真 [J]. 西南石油大学学报, 2009,31(4):180-183.

[11] Liu Z Y,Zhang Y A,Qian X M,et al. Numerical simulation on available ignition range of well blowout in sour gas field [J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(4):621-624. (in Chinese)
刘振翼,张应安,钱新明,等. 酸性气田井喷点火有效空间范围数字模拟 [J]. 石油学报,2009,30(4):621-624.

[12] Liu M S, Huang P, Liu Z Y. Ignition range of natural gas well blowout and its heat radiation effect on circumjacent facilities [J]. Science & Technology Review,2010,(9):59-62. (in Chinese)
刘墨山,黄　平,刘振翼. 天然气井喷点火空间范围和热辐射对井场周边设施的影响 [J]. 科技导报,2010,(9):59-62.

[13] Ai Z J,Wu G W,Wang Q H,et al. Three-dimensional numerical simulation of gas cloud explosion induced by well blowout [J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(1):96-100. (in Chinese)
艾志久,吴光武,王其华,等. 井喷失控气云爆炸的三维数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2010,30(1):96-100.

[14] Lian Z H,Zhou Z M,Wang H,et al. Numerical simulation analysis of H_2S diffusion in a catastrophic gas blowout accident:A case study of kai County in Chongqing [J]. Natural Gas Industry,2009,(11):112-115. (in Chinese)
练章华,周兆明,王　辉,等. 特大井喷 H_2S 扩散的数值模拟分析 [J]. 天然气工业,2009,(11):112-115.

[15] Luo Y Y,Jiang Z A,Xi X J,et al. Research on simulation of jet flow for uncontrolled blowout in gas field based on FLUENT [J]. Journal of Safety Science and Technology,2008,4(3):30-33. (in Chinese)
罗音宇,蒋仲安,席学军,等. 基于 S-A 模型的气田井喷失控射流数值模拟的研究 [J]. 中国安全生产科学技术,2008,4(3):30-33.

[16] Xi X J. Numerical simulation preview on release dispersion of the H_2S blowout [J]. Journal of Safety Science and Technology,2005,1(1):21-25. (in Chinese)
席学军. 关于井喷 H_2S 扩散数值模拟初步研究 [J]. 中国安全生产科学技术,2005,1(1):21-25.

[17] Hsieh B,Chen T,Tseng C,et al. Case study of estimating gas loss from a producing well blowout [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2010,70(3-4):327-333.

[18] Li J F,Yao X H,Liu X Q. Kaixian blowout accident simulation and analysis using fluent code [J]. Research of Environmental Sciences,2009,(5):559-566. (in Chinese)

李剑峰,姚晓晖,刘晓琴. 基于 Fluent 的开县井喷事故后果模拟与分析 [J]. 环境科学研究,2009,(5):559-566.

[19] Lei W Z,Wu G W,Ai Z J,et al. Research on numerical simulation of flammable vapor cloud diffusion in well blowout [J]. Journal of Safety Science and Technology,2008,4(6):66-69. (in Chinese)
雷文章,吴光武,艾志久,等. 井喷失控可燃性蒸气云形成数值模拟研究 [J]. 中国安全生产科学技术,2008,4(6):66-69.

[20] Li Z W,Wang Q H,Lei W Z,et al. Simulate and forecast consequences of the out-of-control gas well fire accident [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology,2008,24(5):29-31. (in Chinese)
李占稳,王其华,雷文章,等. 井喷失控着火事故后果模拟预测 [J]. 石油化工安全环保技术,2008,24(5):29-31.

[21] Liu Z Y,Zhang Y A,Zheng Y P,et al. Flow fields in the blowout of natural gas wells containing carbon dioxide [J]. Petroleum Exploration and Development,2011,38(1):90-96. (in Chinese)
刘振翼,张应安,郑远攀,等. 含 CO_2 天然气井井喷流场特征 [J]. 石油勘探与开发,2011,38(1):90-96.

[22] Crowl D A,Louvar J F. Chemical process safety:Fundamentals with applications [M]. 2nd Ed. Englewood Cliffs,New Jersey:Prentice Hall PTR,2001.

[23] Zheng Y P. Studies on explosion characteristics and hazards of dispersion of natural gas containing carbon dioxide [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2009. (in Chinese)
郑远攀. 含二氧化碳天然气燃爆特性及扩散危险性研究 [D]. 北京:北京理工大学,2009.

[24] Connolly S,Cusco L. Hazards from high pressure carbon dioxide releases during carbon dioxide sequestration processes [A]//12th International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries [C]. Edinburgh,Scotland,2007.

[25] Ashkenas H,Sherman F S. The structure and utilization of supersonic free jets in low density wind tunnels [A]//Rarefied Gas Dynamics,Proceedings of the Toronto [C]. Canada,1964.

[26] Bricard P,Friedel L. Two-phase jet dispersion [J]. J Hazard Mater,1998,59(2-3):287-310.

[27] Love E S,Grigsby E,Lee L P,et al. Experimental and theoretical studies of axisymmetric free jets,NASA 19980228067 [R]. Hampton:National Aeronautics and Space Administration,1959.

Study on Leakage Model of Gas Blowout and Its Numerical Simulation

ZHENG Yuan-Pan[1,2],SU Xiao-Ke[1],LIU Xin-Xin[1],ZHANG Ya-Li[3],SUN Ken[4]

(1. *Zhengzhou University of Light Industry*,*Zhengzhou* 450002,*China*;
2. *Engineering Laboratory of Henan Province for Emergency Management Platform Oriented Information Technology*,*Zhengzhou* 450002,*China*;
3. *Zhengzhou University of Light Industry*,*Zhengzhou* 450002,*China*;
4. *North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*,*Zhengzhou* 450011,*China*)

Abstract:Blowout is one of the most serious accidents of gas wells during drilling. To investigate leakage and dispersion of gas blowout and to provide scientific guidance for on-site emergency response,it is necessary to identify what model should be used to describe the leakage source. Leakage source model of gas blowout was theoretically analyzed by fluid dynamics and aerodynamics,and was also numerically demonstrated by computational fluid dynamics. Distributions of temperature,static pressure and Mach number were obtained from simulation based on theoretical analysis. These numerical results agree well with both theoretical results and related experimental results done by other researchers. The present study shows that leakage source of gas blowout during drilling stage can be characterized by model of choked flow and gas blowout can be recognized as under-expanded jet flow.

Key words:well blowout;leakage source;model;simulation;choked flow;under-expanded jet