

LNG 泄漏扩散模拟研究

苑伟民¹ 袁宗明² 毕建伟³ 常 兴³ 王小尚⁴

1. 中国石化天然气分公司工程建设管理处, 山东 济南 250000 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500

3. 中国石化天然气分公司工程技术部, 北京 100011

4. 中国石化青岛液化天然气有限公司, 山东 青岛 266400

摘要:

为了准确描述环境因素对液化天然气(LNG)泄漏后扩散的影响, 研究和比较了各种气体扩散模型, 将板模型和高斯模型相结合建立液化天然气泄漏扩散模型; 重点讨论了泄漏后蒸气扩散的运动规律及重要影响因素, 结合大气湍流理论和气体运动状态方程对 LNG 蒸汽的重气扩散和被动扩散过程进行了详细论述。运用 Microsoft Visual Basic 和 MATLAB 语言开发了液化天然气泄漏扩散模拟软件, 通过模拟不同情况下 LNG 泄漏的危险性区域, 分析了环境因素对 LNG 泄漏后果的影响。将模型计算结果进行了结果分析, 总结了风速和大气稳定度相互作用对液化天然气泄漏的影响规律, 为该类事故的风险定量计算提供了可借鉴的方法, 可为有关部门制订和完善事故的应急救援措施和风险管理提供参考。

关键词:

LNG; 泄漏; 扩散; 气体扩散模型; 数值模拟; 安全评价

文献标识码: A

文章编号: 1006-5539(2011)04-0001-05

0 前言

研究液化天然气(LNG)扩散的规律, 计算 LNG 重气扩散的浓度并预测其影响范围是进行风险评估的基础, 也是采取应急措施的依据。现场发生的管道破裂等事故中 LNG 的泄漏多属于连续性泄放, 选取从描述连续性泄放过程的板模型入手分析 LNG 的泄漏扩散过程, 将板模型和高斯模型相结合建立液化天然气泄漏扩散模型, 通过描述不同因素对 LNG 泄漏后的各种影响, 模拟 LNG 气云爆炸极限区域。

1 LNG 扩散模型

气体扩散形成原始气团主要有喷射扩散和绝热

扩散两种形式。当液化气出现泄漏, 原始气团释放形成易燃、易爆的有毒气体与空气混合的气云。混合气云在大气中的扩散模式按照混合气体的密度等差异, 主要有: 重气云模型、中性气云模型和羽状烟流模型。常用的气体模型有高斯模型、唯象模型、箱板模型、三维 CFD 数值方法和浅层理论等^[1-5]。

2 泄漏速率计算

2.1 气相泄漏

气体从裂口泄漏的速度与其流动状态有关, 因此, 在计算泄漏前, 首先应判断泄漏气体的流动性质^[6-7]。当 $p_0/p \leq [2/(r+1)]^{r/(r-1)}$ (p_0 为环境压力, Pa; p 为容器中的绝

收稿日期:

2011-01-08

基金项目:

中国石油化工股份有限公司 LNG 资助项目(702081B0712)

作者简介:

苑伟民(1981-), 男, 河南南阳人, 硕士, 主要研究油气储运系统仿真与优化。

对压力, Pa; r 为气体介质的绝热指数, 对于液化天然气可取绝热指数为 1.32) 时, 为音速流动; 反之, 为亚音速流动。对于音速流动, 气体泄漏量可用式(1)表示:

$$Q = C_0 A p \sqrt{\frac{M r}{R T} \left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{r+1}{r-1}}} \quad (1)$$

式中 Q ——泄漏速度, kg/s;
 C_0 ——泄漏系数, 圆形取 1.00, 三角形取 0.95, 长方形取 0.90;
 A ——泄漏口面积, m²;
 M ——气体分子量, kg/mol;
 R ——通用气体常数, 8.314 J/mol·K;
 T ——气体温度, K。

对于亚音速流动, 气体泄漏量可用式(2)表示^[4-5, 7]:

$$Q = Y C_0 A p \sqrt{\frac{M r}{R T} \left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{r+1}{r-1}}} \quad (2)$$

式中的 Y 为气体膨胀因子, 由式(3)计算:

$$Y = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{r}} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{r-1}{r}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{2}{r-1} \right) \left(\frac{r+1}{2} \right)^{\frac{r+1}{r-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

当容器内物质随泄漏而减少或压力降低时, 泄漏速度的计算比较复杂。如果流速小或泄漏时间短, 在后果计算中可采用最初排放速度, 否则应计算其等效泄漏速度。

2.2 液相泄漏

液化气储运作业中各种储罐、液货舱等危险源发生液体泄漏的速度除与罐内外压差有关外, 影响因素还有: 液面与泄漏口的高度差及泄漏口的面积, 即泄漏的驱动力来自于罐内外压力差与破损孔高度以上液体的压力之和。

根据伯努利方程, 液体储罐的泄漏速率可由式(4)计算^[8-9]:

$$Q = C_0 A p \sqrt{2gh + \frac{2(p-p_0)}{\rho} - \frac{\rho g C_0^2 A^2}{A_0} t} \quad (4)$$

$$V = \frac{Q}{A \cdot \rho}$$

式中 V ——泄漏处泄漏速度, m/s;
 Q ——液化气泄漏源强即泄漏的质量速率, kg/s;
 ρ ——液化气密度, kg/m³;
 h ——液面与泄口的高度差, m;
 A_0 ——储罐横截面积, m²;
 t ——泄漏时间, s。
 g ——重力加速度, m/s²

2.3 两相流泄漏

在过热液体发生泄漏时, 有时会出现气液两相流

动。均匀两相流的泄漏速率可按式计算^[7]:

$$Q_0 = C_0 A \sqrt{2\rho(p-p_c)} \quad (5)$$

式中 Q_0 ——两相流泄漏的质量速率, kg/s;
 C_0 ——两相流泄漏系数, 一般取 0.8;
 p ——两相混合物的压力, Pa;
 p_c ——临界压力, 可取 $p_c = 0.55p$;
 ρ ——两相混合物的平均密度, kg/m³。

3 重力扩散到被动扩散阶段的转变^[9-12]

LNG 在泄漏后会产生冷而重的气体, 瞬时泄漏时形成重气云团, 连续泄漏时形成重气云羽, 气云在此扩散过程中主要体现重量沉降的径向作用, 空气夹带和能量交换为辅助作用。LNG 气云的外形尺寸、空气卷吸及分布起支配作用的是重力塌陷引起的湍流, 大气湍流起辅助作用。这个阶段的气体扩散过程可以结合箱板模型进行模拟。

随着空气的不断掺入, 重气云羽的密度将不断减小, 环境湍流引起的扩散逐步替代重力塌陷引起的湍流, 最终扩散转变为环境湍流驱动扩散, 此时应采用高斯模型进行描述。

高斯模型用来描述危险物质泄漏形成的非重气云扩散行为, 或重气云在重力作用消失后的远场扩散行为, 除了需满足箱板模型中的一般假设外, 还需满足下面的假设:

- 气云密度与环境空气密度相当, 气云不受浮力作用;
- 云团中心的移动速度或云羽轴向蔓延速度等于环境风速;
- 云团内部或云羽横截面上的浓度、密度等参数服从高斯分布。

3.1 虚源计算

计算虚源是为了确定虚源与转变点之间的距离。计算虚源时应遵循: 在相同的泄漏和扩散条件(源强、地形、气象等条件)下, 利用重气云扩散模型对实源泄漏进行分析得到的转变点所在位置的物质浓度, 要与利用高斯模型对虚源泄漏进行扩散分析得到的转变点所在位置物质浓度相等。

3.2 模型控制方程

设泄漏源有效高度为 H , 取其地面为坐标原点, x 轴指向风向, 考虑地面反射作用, 根据高斯模型可得到泄漏源下风向某点在 t 时刻的浓度分布。

对于连续泄漏^[6]:

$$C(x,y,z,t,H)=\frac{Q}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left\{\exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]+\exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\}\quad(6)$$

式中 C ——气云中物质浓度(虚源), kg/m^3 ;
 Q ——泄漏速率(源强), kg/s ;
 u ——风速, m/s ;
 t ——泄漏时间, s ;
 $\sigma_x,\sigma_y,\sigma_z$ ——虚源计算时假设转变点的下风向扩散系数、横风向扩散系数和垂直方向扩散系数。

泄漏源有效高度采用 Wilson 根据管道破裂泄漏试验所得到的经验公式:

$$\Delta H=2.4v_s\frac{d}{v}\quad(7)$$

式中 ΔH ——泄漏源抬升的高度, m ;
 v_s ——出口速度, m/s ;
 d ——出口直径, m ;
 v ——环境风速, m/s 。

此公式适用于出口喷射竖直向上,喷射路径上无障碍物阻碍的情况。当泄漏后扩散的气云是液池的蒸汽时,计算时选取出口速度为零,抬升高度为零。泄漏源抬升高度与泄漏源实际高度之和就是泄漏源的有效高度。

3.3 扩散系数的确定

3.3.1 连续源

对于连续源,平均扩散时间取 10 min 。有效粗糙度 $Z_0\leq 0.1\text{ m}$ 地区的扩散参数按表 1 选取;有效粗糙度 $Z_0>0.1\text{ m}$ 的粗糙地形扩散系数为, $\sigma_y=\sigma_{y0}\cdot f_y,\sigma_z=\sigma_{z0}\cdot f_z,f_y(Z_0)=1+a_0Z_0,f_z(x,Z_0)=(b_0-c_0\ln x)(d_0+e_0\ln x)^{-1}\cdot Z_0^{(f_0-g_0\ln x)}$,其中, σ_{y0} 和 σ_{z0} 按表 1 选取,系数项值按表 2 选取,地面有效粗糙度按表 3 选取。

表1 扩散参数

大气稳定度	σ_{y_0}/m	σ_{z_0}/m
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.02x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1}$

3.3.2 瞬时源

对于瞬时源,若无特别指定,取平均时间为 10 s ,扩散系数采用烟流模式的扩散系数并通过公式进行修正, $\sigma_y=0.441\sigma_{y(10\text{ min})},\sigma_x=\sigma_{y_0}$ 。大气扩散稳定度的分

表2 修正系数

修正系数	大气稳定度					
	A	B	C	D	E	F
a_0	0.42	0.115	0.15	0.38	0.3	0.57
b_0	1.10	1.5	1.49	2.53	2.4	2.93
c_0	0.036 4	0.045	0.018 2	0.13	0.11	0.094 4
d_0	0.436 4	0.853	0.87	0.55	0.86	0.753
e_0	0.05	0.012 8	0.010 46	0.042	0.016 82	0.022 8
f_0	0.273	0.156	0.089	0.35	0.27	0.29
g_0	0.024	0.013 6	0.007 1	0.03	0.022	0.023

表3 地面有效粗糙度

地面类型	草原、平坦开阔地	农作物地区	村落、分散的树林	分散的高矮建筑物(城市)	密集的高矮建筑物(大城市)
Z_0/m	≤ 0.1	$0.1\sim 0.3$	$0.3\sim 1$	$1\sim 4$	4

类方法采用经过修正的帕斯奎尔—特纳尔 (P-T)方法。

4 毒害半径计算模型

液化介质在容器破裂时会发生蒸汽爆炸。当液化介质为有毒物质,例如液氯、液氨、LPG、LNG 等,爆炸后如果不燃烧,会造成大面积的毒害区域^[11-12]。假设这些有毒空气以半球形向地面扩散,则可求出该有毒气体扩散半径为:

$$R=\sqrt[3]{\frac{v_g/c'}{\frac{1}{2}\times\frac{4}{3}\pi}}=\sqrt[3]{\frac{v_g/c'}{2.0944}}$$

式中 R ——有毒气体的半径, m ;
 v_g ——有毒介质的蒸汽体积, m^3 ;
 c' ——有毒介质在空气中的危害度值。

5 应用举例

以几何容积为 50.5 m^3 (有效容积为 46.7 m^3) 的 LNG 罐车为模拟对象,分别在不同风速和不同大气稳定度的情况下,对罐车泄漏后 LNG 扩散的危险区域进行模拟。假设液体泄漏速率为 $4.1\text{ kg}/\text{s}$,环境温度选取 $20\text{ }^\circ\text{C}$,不同情况下发生连续性泄漏,见表 4。LNG 的爆炸极限选取 $5\%\sim 15\%$,取 LNG 的平均分子量为 $17.3\text{ g}/\text{mol}$,换算成质量浓度约为 $0.030\sim 0.094\text{ kg}/\text{m}^3$ 。根据不同情况下发生连续性泄漏绘制了危险区域,见图 1~7。

图 1~7 中横向为泄漏点沿风向方向扩散的距离,纵向为泄漏点垂直风向方向扩散的距离。

表4 不同天气情况下的假设事故

事故 编号	地面风速 / m·s ⁻¹	白天太阳 辐射	夜晚云团 覆盖	大气稳定度
1	1	强		A(开阔乡间)
2	2.5	中		B(开阔乡间)
3	3	弱		C(城市)
4	5	弱		C(城市)
5	5.5		多云	D(城市)
6	2.5		多云	E(开阔乡间)
7	2.5		晴	F(开阔乡间)

综上所述,通过模拟分析可知,泄漏的液化天然气受风速和大气稳定度的影响最大。当大气稳定度相同,风速与蒸汽云的爆炸范围成反比:风速增大,LNG蒸汽的爆炸范围减小。其原因如下:当风速增大时,能够加速液化天然气蒸汽扩散的速度。风速的作用主要表现在两方面:其一,风速的增大加剧了气云的平流

传输能力,加速重质气云向下风向传输,在同一大气稳定度,风速愈大,传输作用愈显著,传输的范围越广,下游的液化天然气蒸汽浓度愈低;其二,风速的增

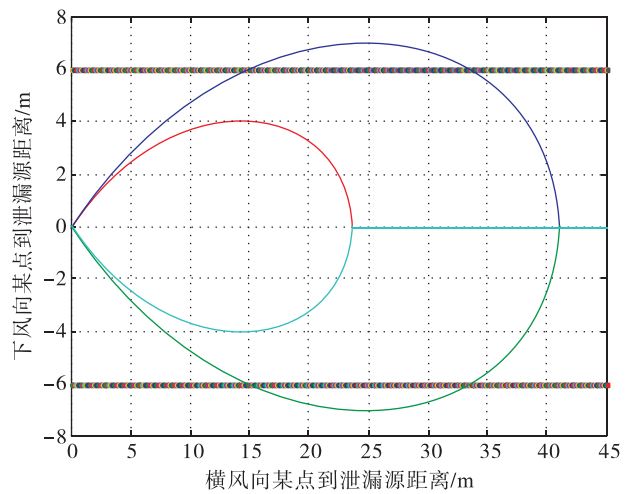


图 1 事故 1 的爆炸危险区域

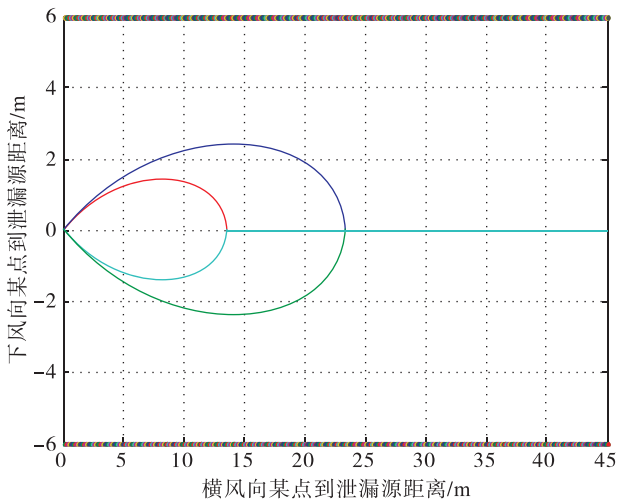


图 2 事故 2 的爆炸危险区域

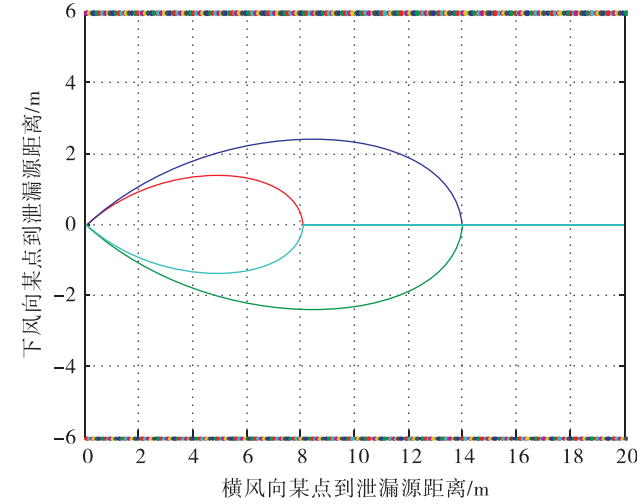


图 3 事故 3 的爆炸危险区域

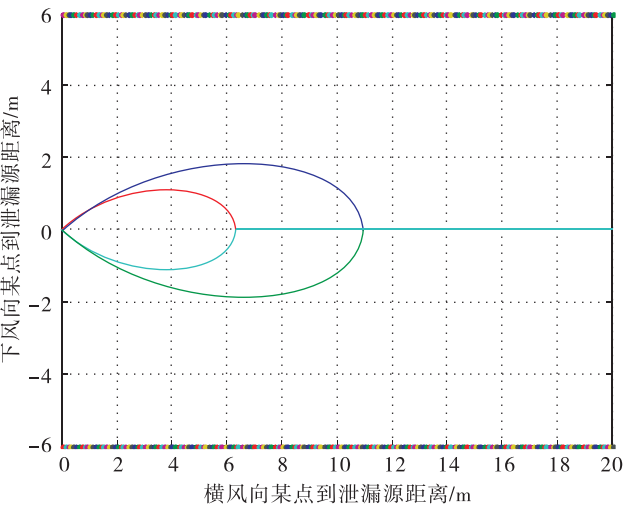


图 4 事故 4 的爆炸危险区域

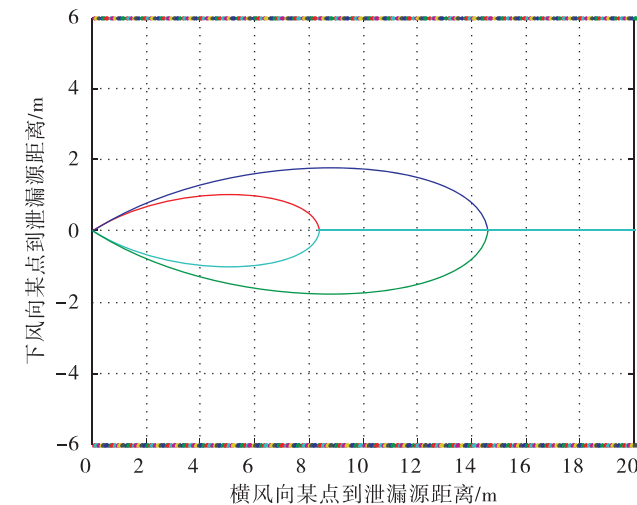


图 5 事故 5 的爆炸危险区域

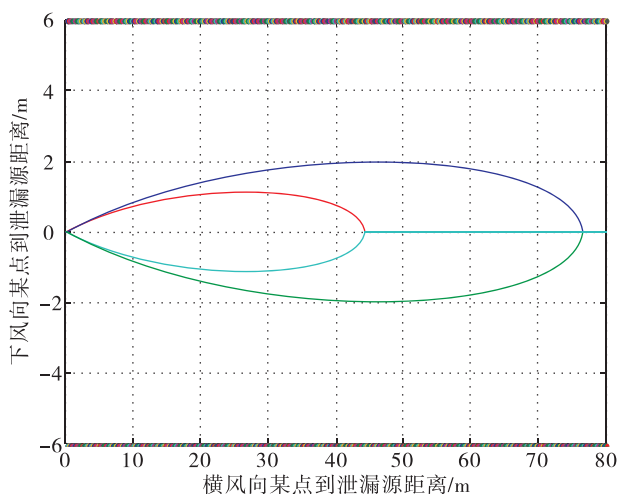


图 6 事故 6 的爆炸危险区域

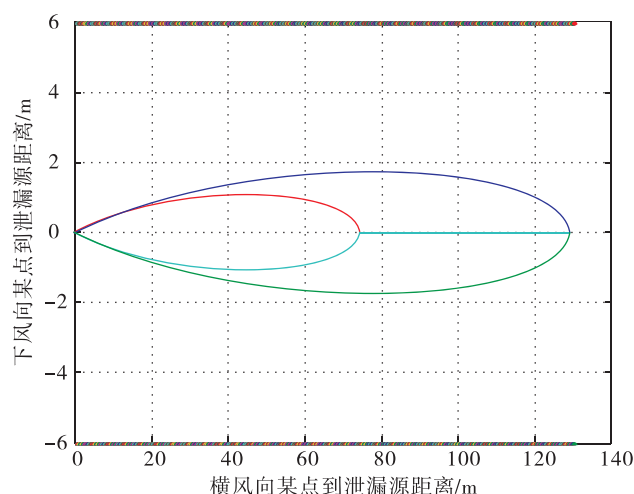


图 7 事故 7 的爆炸危险区域

大,引起脉动也随之增大,使气云扩散范围增大,同样的泄漏速率,其蒸汽的浓度就会下降。当风速相同,大气稳定度不同时,大气稳定度对扩散的影响表现为,大气稳定度越稳定,泄漏引起的液化天然气蒸汽爆炸扩散范围越大。通过使用 VB 与 MATLAB 编程软件进行混合编程,能够形象地表示出大气稳定度和风速对液化天然气泄漏的影响。

参考文献:

- [1] 徐烈,李兆慈,张洁,等.我国液化天然气(LNG)的陆地储存与运输[J].天然气工业,2002,22(3):89-91.
- [2] 梁光川,郑云萍,李又绿,等.液化天然气(LNG)长距离管道输送技术[J].天然气与石油,2003,21(2):8-10.
- [3] 饶国宁.常见工业危险源泄漏及其后果评价研究[D].南京:南京理工大学,2004.

- [4] 沈艳涛,于建国.有毒有害气体泄漏的 CFD 数值模拟(1)[J].化工学报,2007,58(3):745-749.
- [5] 张礼敬,丁立,陶刚.输氯管线泄漏事故后果模拟[J].化工学报,2008,59(5):1333-1337.
- [6] 李民权译.工业污染事故评价技术手册[M].北京:中国环境科学出版社,1992,34-35.
- [7] 汪元辉.安全系统工程[M].天津:天津大学出版社,1999,240-241.
- [8] 高露.液化天然气泄漏扩散模拟及应用研究[D].南充:西南石油大学,2008.
- [9] 李大全.成品油管道泄漏扩散分析及危害后果评价[D].南充:西南石油大学,2005.
- [10] 宇德明.易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评价[M].北京:中国铁道出版社,2000:53-54.
- [11] 吴宗之,高进东,魏利军.危险评价方法及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2001:194-195.
- [12] 高露,梁光川,彭波,等.液化天然气的泄露与防护[J].天然气与石油,2008,26(1):28-30.

金秋致密气田开发 EPC 项目动向

中石油与壳牌石油公司的合作开发项目——金秋致密气田试采项目于 2010 年 9 月启动,并于 2011 年 3 月正式进入 EPC 施工图设计,目前项目进展迅速,并计划于 2011 年 8 月建成首气,这标志着我国首个致密气对外合作开发项目正式进入实施阶段。

四川盆地非常规气开发目前正有序推进,发展前景非常广阔。目前,中石油与壳牌石油公司通过合作开发 TPO 试采井模式(试采规模预计 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),对金秋区块的气源和开发可行性进行评估,并为该区块大规模产业化开发提供依据。

金秋致密气具有井口高压、组分含凝析油、单井分散的特点,试采过程工艺相对复杂,试采项目的成功将为后续气田规模开发形成可靠的技术储备。中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司作为项目实施的 EPC 方,沿袭长北气田与壳牌石油公司通力合作的模式,整合强有力的技术团队,采用目前油气田开发先进的集输技术,构建站场橇装化、模块化等标准化设计流程,旨在把我国首个致密气田对外合作开发项目建成示范型项目。

(杨静余洋供稿)