

# 瓦斯泄压过程中的焦耳-汤姆逊效应

霍留鹏, 岳高伟, 王宾宾

(河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**针对气体节流膨胀热力过程在工程系统运行中的安全问题,对瓦斯泄压过程温度-压力的焦耳-汤姆逊效应进行了试验和理论研究,并理论预测了煤与瓦斯突出过程中泄压口气体升温规律。研究表明:由于瓦斯泄压节流效应,泄压气体温度迅速升高,充气罐内瓦斯压力越接近泄压罐内瓦斯压力,泄压罐内气体温度升高越慢。在改进 Berthelot 状态方程中甲烷的引力项温度指数  $n$  取值 0.625 为佳。采用焦耳-汤姆逊效应理论计算得到的瓦斯泄压过程泄压罐内温度变化规律与实测结果基本一致,进而理论预测煤与瓦斯突出且瓦斯压力为 0.5、0.74、1.0 MPa 时,泄压口气体温度分别升高 22.99、33.87、45.35 K。

**关键词:**瓦斯压力;泄压;焦耳-汤姆逊效应;煤与瓦斯突出

中图分类号:TD713;P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2017)12-0127-07

## Joule-Thomson effect of gas pressure releasing process

HUO Liupeng, YUE Gaowei, WANG Binbin

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** According to the safety problems occurred in the operation of the engineering system during the swelling thermodynamic process of the gas throttle, an experiment and theoretical study was conducted on the Joule-Thomson effect of the temperature-pressure during the gas pressure released process. A theoretical prediction was conducted on the gas temperature rising law at the pressure released outlet during the coal and gas outburst process. The study results showed that, due to the throttle effect of the gas pressure released, the temperature of the pressure released gas would be rapidly increased. When the gas pressure in the gas filling tank was more closely to the gas pressure in the pressure released tank, the gas temperature in the pressure released tank would be slowly increased. In the improved Berthelot state equation, the gravity temperature index  $n$  of the methane should be selected as 0.625. With the theoretical calculation of the Joule-Thomson effect, the internal temperature variation law of the pressure released tank obtained during the gas pressure released process was basically the same to the measured results. Thus when the theoretical predicted coal and gas pressure as well as the gas pressure was 0.5, 0.74 and 1.0 MPa individually, the gas temperature at the pressure released outlet would be increased to 22.99, 33.87 and 45.35 K individually.

**Key words:** gas pressure; pressure released; Joule-Thomson effect; coal and gas outburst

## 0 引 言

实际气体流动过程中,由于节流效应,气体发生绝热不可逆膨胀导致温度变化的现象称为焦耳-汤姆逊效应<sup>[1-2]</sup>。气体节流膨胀是关系工程实际的重要热力学过程<sup>[3]</sup>,众多学者针对不同工程实际的焦耳-汤姆逊效应开展了一系列研究,并得到了一些

有益的结果。文献[4-6]考虑焦耳-汤姆逊效应的影响,计算分析了天然气抽采管线及井口降温规律。文献[7-8]根据传热学和流体力学理论,考虑焦耳-汤姆逊效应,建立了天然气管道泄漏扩散物理模型和数学模型,求解后得到天然气管道泄漏扩散参数。文献[9-10]考虑焦耳-汤姆逊效应,建立了封存 CO<sub>2</sub> 的井筒传热模型,给出了 CO<sub>2</sub> 热物性参数的计

收稿日期:2017-07-15;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.12.022

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41772163);河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(15IRTSTHN029)

作者简介:霍留鹏(1993—),男,河南扶沟人,硕士研究生。Tel:18236883467, E-mail:huo1172843979@163.com

引用格式:霍留鹏,岳高伟,王宾宾. 瓦斯泄压过程中的焦耳-汤姆逊效应[J]. 煤炭科学技术,2017,45(12):127-133.

HUO Liupeng, YUE Gaowei, WANG Binbin. Joule-Thomson effect of gas pressure releasing process[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12):127-133.

算方法,对建立的井筒传热模型进行了敏感性分析。文献[11-12]考虑了平均含气率与焦耳-汤姆逊效应对温降的影响,建立集输管线的油气两相流温降数学模型,对油气两相流进行计算分析。文献[13-14]采用自行设计和搭建的高压瓦斯泄放自燃试验平台,研究了初始压力、下游释放管道直径对高压瓦斯泄漏到空气中时发生自燃的影响。

笔者从瓦斯泄压过程温度-压力的试验测试出发,基于焦耳-汤姆逊效应的基本理论,数值计算了不同情况下瓦斯泄压焦耳-汤姆逊升温效应,并理论预测了煤与瓦斯突出过程中泄压口气体的升温规律。

## 1 瓦斯泄压过程温度-压力测试

### 1.1 试验测试系统

试验测试系统如图1所示,在充气罐向泄压罐充气过程中(泄压罐处于恒温状态),与充气罐中瓦斯压力相比,进入泄压罐的瓦斯压力急剧减小,泄压罐内气体温度将发生变化,即气体泄压引起焦耳-汤姆逊效应。

度测试。④数据实时采集单元:传感器将测试数据传递到数据采集系统,和计算机连接,实现试验数据的实时采集。

### 1.2 测试过程及方法

试验分2种情况进行:①泄压罐与外界关闭(阀门16闭合);②泄压罐与外界连通(阀门16打开)。

试验过程如下:①检查试验系统的气密性、检测数据采集系统是否正常运行;②启动温度控制系统,使之在某一温度稳定一段时间;③采用真空泵对泄压罐和气体收集袋真空脱气,而后关闭阀门17;④从高压甲烷气瓶向充气罐内充入一定压力的甲烷;⑤打开充气罐和泄压罐之间的阀门(瓦斯泄压),同时运行数据采集系统;⑥重复上述步骤②—⑤进行其他情况下的测试。

### 1.3 瓦斯泄压温度-压力测试

泄压罐外壁虽然有保温材料,但也不能达到绝热的目的,因此,泄压罐罐体温度与环境温度一致。

在不同恒温环境下(308、303、298 K,泄压罐与外界关闭),瓦斯泄压过程中充气罐内瓦斯压力、泄压罐瓦斯压力及泄压罐内气体温度测试结果如图2所示。从图2可以看出,充气罐内瓦斯压力迅速降低,而泄压罐内瓦斯压力快速增大,由于瓦斯泄压节流效应,泄压罐内气体温度迅速升高,但随着充气罐和泄压罐内瓦斯压力差值迅速减小,泄压罐内温升变缓,以至于一段时间后泄压罐内气体温度开始缓慢降低,这是因为泄压罐罐体不仅吸收一部分能量,而且瓦斯泄压导致的膨胀能也小于泄压罐罐体向外传热所损失的能量。此后充气罐和泄压罐内瓦斯压力一致,泄压罐内气体温度将一直降低。

由图2可以看出,泄压罐内温度变化和充气罐初始充气压力关系不大,而与瓦斯泄压速率有关,如图2a所示,初始时段充气罐内瓦斯压力均有急剧降低的现象,由此也导致了泄压罐内气体温度急剧升高。

考虑到瓦斯是危险性气体,因此在进行泄压罐与外界打开的焦耳-汤姆逊效应试验中,充气罐瓦斯压力设定较低,分别进行了0.82、0.59、0.47 MPa三种情况下的泄压测试,泄压过程中充气罐瓦斯压力、泄压罐瓦斯压力和泄压罐内气体温度的测试结果如图3所示。从图3可以看出,充气罐内瓦斯压力逐渐降低,由于泄压罐与气体收集袋联通,泄压罐

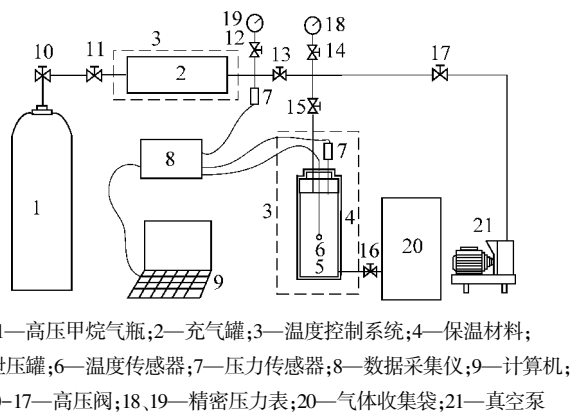


图1 测试系统

Fig. 1 Test system

试验测试系统主要包括真空脱气单元、温度控制单元、充气单元和数据采集单元4个部分。①真空脱气单元:该单元由电阻真空计(量程 $1 \sim 1 \times 10^5$  Pa)、真空泵(极限真空度 $6.8 \times 10^{-2}$  Pa)、真空管、真空规管和玻璃三通阀组成,主要完成恒温环境煤样罐的真空脱气工作。②控温单元:由高低温交变湿热试验箱和煤样罐及附属管路组成,温度范围: $-50 \sim 100$  °C;温度偏差: $\leq \pm 1$  °C。③充气单元:由精密压力传感器(量程 $0 \sim 16$  MPa,0.1级精度)、温度传感器、甲烷气源(浓度99.99%)、充气罐、煤样罐和阀门组成,完成不同环境温度下充气过程的温

内气体压力略有升高,这段时间内泄压罐内气体温度逐渐升高,充气罐内瓦斯压力越接近泄压罐内瓦斯压力,泄压罐内气体升温速率越慢。之后由于一

部分瓦斯膨胀能被泄压罐吸收和热传导至外界,还有一部分被气体带入气体收集袋中,以至于泄压罐内温升较慢且温度降低。

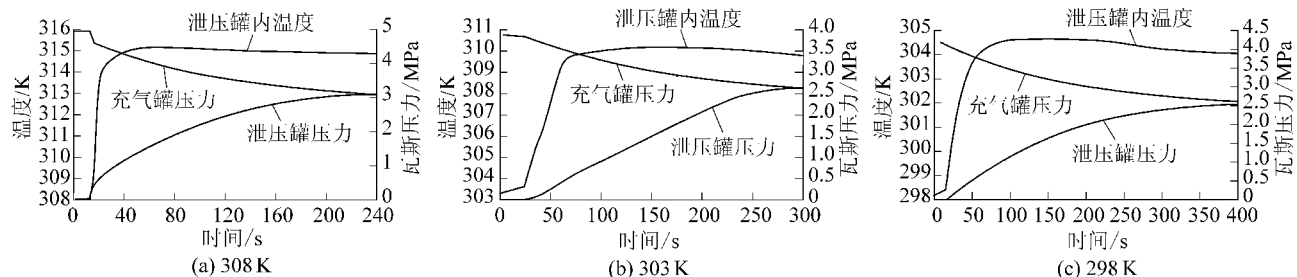


图2 泄压罐关闭时温度-压力测试结果

Fig. 2 Temperature-pressure test results with pressure tank closed

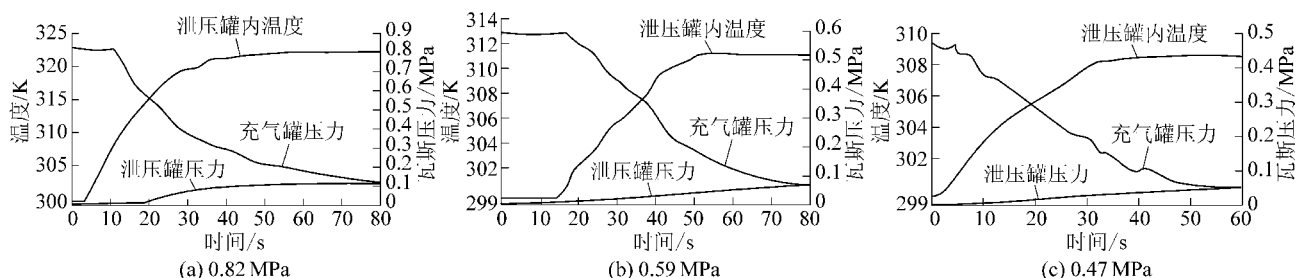


图3 泄压罐打开时温度-压力测试结果

Fig. 3 Temperature-pressure test results with pressure tank open

## 2 焦耳-汤姆逊效应基本理论

### 2.1 焦耳-汤姆逊系数

焦耳-汤姆逊系数  $\mu_{J-T}$  是描述焦耳-汤姆逊效应的最主要参数,由热力学函数关系式可表示为<sup>[15]</sup>:

$$\mu_{J-T} = (\partial T / \partial p)_H = [T(\partial V / \partial T)_p - V] / C_p \quad (1)$$

其中: $T$ 为温度,K; $p$ 为压力,MPa; $H$ 为焓; $V$ 为气体摩尔体积, $m^3/mol$ ; $C_p$ 为实际气体的摩尔定压比热容, $J/(mol \cdot K)$ 。

对于实际气体,引入压缩因子 $Z$ ,且 $Z = pV/RT$ ,则 $\mu_{J-T}$ 可表示为

$$\mu_{J-T} = (\partial Z / \partial T)_p RT^2 / (C_p p) \quad (2)$$

其中: $R$ 为普适气体常数,取 $8.314 J/(mol \cdot K)$ 。

在此,采用改进的 Berthelot 状态方程<sup>[16]</sup>:

$$p = RT / (V - b) - a / (T^m V^2) \quad (3)$$

其中: $a$ 、 $b$ 分别为改进 Berthelot 气体常数, $a = 27R^2 T_c^{2+n} / (64p_c)$ , $b = RT_c / (8p_c)$ , $T_c$ 、 $p_c$ 分别为气体临界压强(MPa)和临界温度(K); $n$ 为改进 Berthelot 状态方程中引力项温度指数, $n$ 取值范围为 $0 \sim 1$ <sup>[17]</sup>。

运用流体热力学对改进 Berthelot 状态方程进行变换,改进 Berthelot 状态方程用压缩因子 $Z$ 表示为

$$Z = V / (V - b) - a / (RT^{1+n} V) \quad (4)$$

将方程(4)按 Virial 方程(Leiden 型)形式以 $T$ 、 $V$ 和 $T_p$ 为变量分别展开:

$$Z(T, V) = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \lim_{V \rightarrow \infty} [\partial^i Z / \partial (1/V)^i]_T / (i! \cdot V^{i+1}) \quad (5)$$

$$Z(T, p) = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \lim_{p \rightarrow 0} [\partial^i Z / \partial p^i]_T / (i! \cdot p^i) \quad (6)$$

联立式(4)一式(6)可以得到改进 Berthelot 状态方程的 $Z$ 表达式为

$$Z \approx 1 + (b - \frac{a}{RT^{1+n}}) \frac{p}{RT} + [\frac{2ab}{RT^{1+n}} - \frac{a^2}{(RT^{1+n})^2}] (\frac{p}{RT})^2 + [-\frac{3ab^2}{RT^{1+n}} + \frac{6a^2b}{(RT^{1+n})^2} - \frac{2a^3}{(RT^{1+n})^3}] (\frac{p}{RT})^3 \quad (7)$$

将式(7)代入式(2),忽略高阶项,可得较低压力的 Berthelot 方法计算的焦耳-汤姆逊系数 $\mu_{J-T}$ :

$$\mu_{J-T} = \frac{1}{C_p} \left[ -b + \frac{(2+n)a}{RT^{1+n}} - \frac{2(3+n)abp}{R^2T^{2+n}} + \frac{2(2+n)a^2p}{R^3T^{3+2n}} + \frac{3(4+n)ab^2p^2}{R^3T^{3+n}} - \frac{6(5+2n)a^2bp^2}{R^4T^{4+2n}} + \frac{6(2+n)a^3p^2}{R^5T^{5+3n}} \right] \quad (8)$$

### 2.2 焦耳-汤姆逊效应引起的温差

在短时间内,气体等含节流膨胀过程中,仅考虑焦耳-汤姆逊效应引起的温度变化,即温差  $\Delta T_H$  可表示为<sup>[18]</sup>

$$\Delta T_H = T_h - T_q = \int_{p_q}^{p_h} \mu_{J-T} dp \quad (9)$$

其中: $T_q$ 、 $T_h$  分别为瓦斯泄压前后的温度; $p_q$  为环境压力,MPa; $p_h$  为外部压力,MPa。

由于  $\mu_{J-T}$  系数与压力可近似为直线关系,在此采用辛普森数值积分法,式(9)的温差可变为

$$\Delta T_H = \frac{p_h - p_q}{6} [\mu_{J-T}(p_q) + 4\mu_{J-T}(\frac{p_q + p_h}{2}) + \mu_{J-T}(p_h)] \quad (10)$$

## 3 焦耳-汤姆逊效应参数计算分析

### 3.1 转换温度函数关系

对于理想气体  $\mu_{J-T} = 0$ , 不存在焦耳-汤姆逊效应,而对于实际气体,当  $\mu_{J-T} > 0$  时,节流后温度降低(冷效应);当  $\mu_{J-T} < 0$  时,节流后温度升高(热效应)。在等压状态下,利用改进 Berthelot 状态方程(3)求导,可得:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{V(V-b)(RT^mV+na)}{T[RT^mV^2-a(V-b)]} \quad (11)$$

当  $\mu_{J-T} = 0$  时,整理式(11)可得:

$$V = (n+1)ab / [(n+1)a - bRT^m] \quad (12)$$

将式(12)代入式(3),可得转换温度  $T$  和压强  $p$  的关系式为

$$p = \frac{a}{b^2T^m} \left(1 - \sqrt{\frac{bRT^{1+n}}{(2+n)a}}\right) \left[ (3+n) \sqrt{\frac{bRT^{1+n}}{(2+n)a}} - 1 \right] \quad (13)$$

### 3.2 转换曲线计算分析及 $n$ 值

对于甲烷,气体临界温度  $T_c = 191.05$  K、气体临界压强  $p_c = 4.6407$  MPa,代入  $a = 27R^2T_c^{2+n}/(64p_c)$ ,  $b = RT_c/(8p_c)$ ,同时对  $n$  采用二分法取值,并代入式(13),可得到甲烷的  $p/p_c - T/T_c$  转换曲线,如图4所示。

从图4可以看出,不同的引力项温度指数  $n$  的

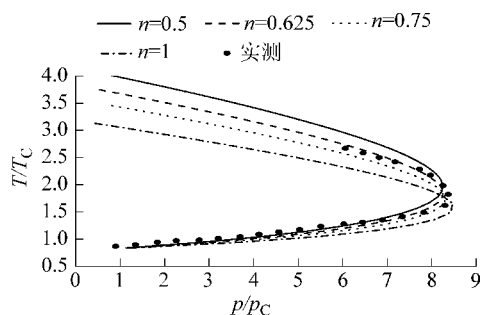


图4 甲烷  $p/p_c - T/T_c$  转换曲线

Fig. 4  $p/p_c - T/T_c$  conversion chart of methane

取值,均对应一条转换曲线,当  $n$  取值为 0.625 时,计算得到的转化曲线与甲烷的试验转换数据吻合较好<sup>[19]</sup>,其他情况下与试验值相差较大,因此,对于甲烷,改进 Berthelot 状态方程中引力项温度指数  $n$  取值 0.625 为佳。

### 3.3 甲烷摩尔定压比热容

根据甲烷的不同温度、不同压力下的定压比热容数据,绘制定压比热容  $C_p$  与压力  $p$  的曲线图,如图5所示,同时,对  $C_p$  随压力  $p$  的变化规律采用线性拟合,见式(14),其拟合参数见表1。表1中的拟合参数  $B_0$  和  $B_1$  随温度的变化规律如图6所示,它们也满足线性规律,见式(15),相关系数达到 0.99 以上。

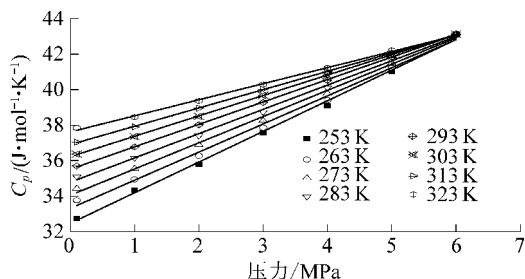


图5 定压比热容与压力关系

Fig. 5 Relationship between specific heat capacity and pressure

表1 不同温度定压比热容与压力拟合参数

Table 1 Fitting parameters of specific heat capacity and pressure

温度/K	$B_0$	$B_1$	相关系数 $R^2$
253	32.465 26	1.726 631	0.998 56
263	33.313 02	1.583 640	0.997 58
273	34.051 81	1.476 650	0.998 27
283	34.784 25	1.367 880	0.998 87
293	35.516 80	1.262 860	0.999 91
303	36.225 24	1.148 400	0.999 97
313	36.905 50	1.031 160	0.999 95
323	37.618 61	0.905 390	0.999 21

$$C_p = B_0 + B_1p \quad (14)$$

$$\begin{cases} B_0 = 14.0968 + 0.07296T & (R^2 = 0.9996) \\ B_1 = 4.60455 - 0.01143T & (R^2 = 0.9986) \end{cases} \quad (15)$$

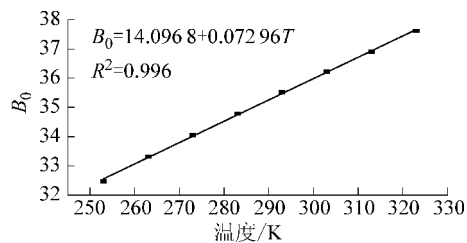
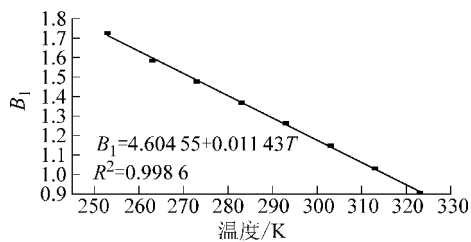
(a)  $B_0$ 与温度 $T$ (b)  $B_1$ 与温度 $T$ 

图6 参数与温度关系

Fig. 6 Relationship between fitting parameters and temperature

将式(15)代入式(14),可得到定压比热容  $C_p$  与压力、温度的关系式。

$$C_p = 14.0968 + 0.07296T + (4.60455 - 0.01143T)p \quad (16)$$

#### 4 焦耳-汤姆逊效应变温计算与分析

将甲烷参数  $T_c = 191.05 \text{ K}$ 、 $p_c = 4.6407 \text{ MPa}$  代入  $a = 27R^2 T_c^{2+n} / (64p_c)$ 、 $b = RT_c / (8p_c)$ , 求得改进 Berthelot 气体常数  $a$ 、 $b$  值, 同时将求得的引力项温度指数  $n = 0.625$  代入式(8), 联立式(8)、式(10)和式(16), 并根据试验测得不同时刻充气罐压力(外部压力  $p_h$ )和泄压罐压力(环境压力  $p_q$ ), 采用 Fortran 语言编程计算上述试验泄压罐内气体温度的变化规律, 如图7和图8所示。从图7和图8可以看出, 在瓦斯泄压初始阶段, 泄压罐内温度的数值计算结果与实测结果十分吻合, 但随着泄压过程瓦斯压力降低, 数值计算得到的泄压罐内温度与实测结果差别越来越大。

这主要是因为数值计算时考虑瓦斯处于绝热环境中, 而试验中不仅泄压罐罐体吸收热量, 还与外界热传导部分热量, 而且管路等均吸收部分热量, 进而导致实测温度低于数值计算结果。在泄压初始阶段计算和实测结果差别不明显是因为初始阶段充气罐与泄压罐内瓦斯压力差值大, 泄压快, 瓦斯泄压释放能量大, 能量损失不明显。但总的来说, 采用理论计算得到的瓦斯泄压过程中泄压罐内温度变化规律与实测结果基本一致, 这充分表明该计算方法切实可行。

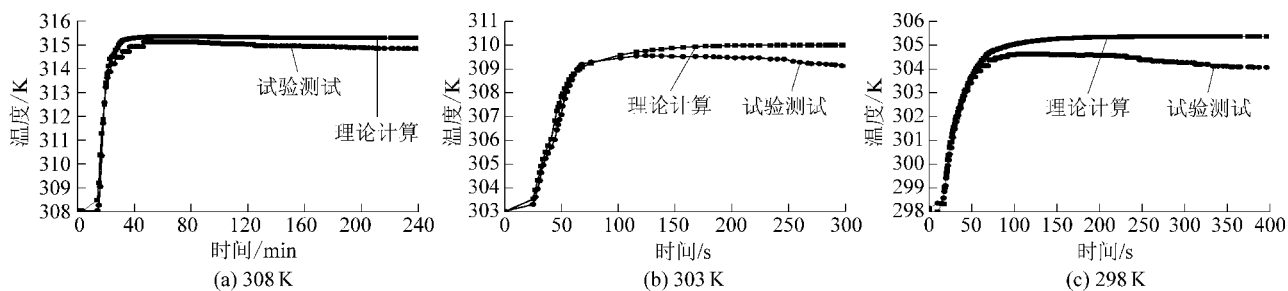


图7 泄压罐关闭时泄压罐内温度测试与模拟结果对比

Fig. 7 Comparison with temperature test and simulation results with pressure tank closed

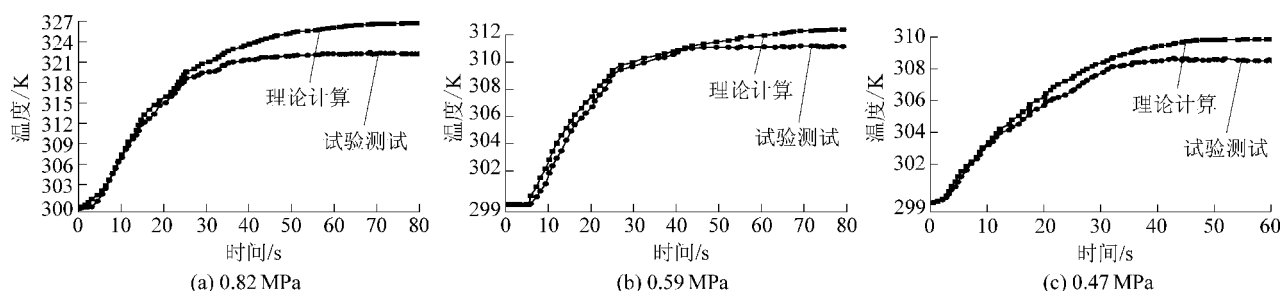


图8 泄压罐打开时泄压罐内温度测试与模拟结果对比

Fig. 8 Comparison with temperature test and simulation results with pressure tank open

## 5 瓦斯突出过程泄压瓦斯温度预测

### 5.1 瓦斯突出过程压力假设

在煤与瓦斯突出试验研究中,孔彪<sup>[20]</sup>测试煤与瓦斯突出时瓦斯压力变化规律如图9所示,从图9可以看出,在煤与瓦斯突出前,试验腔体含瓦斯煤中瓦斯压力一直处于稳定状态,当突出发生时,瓦斯压力瞬间降至接近于0(相对压力),突出结束后瓦斯压力趋于稳定。从图9可知,试验中煤与瓦斯突出过程几乎是瞬间完成的(时间不超过0.5 s),这是由于试验模型所限制(尺寸小、瓦斯量小),而在实际煤与瓦斯突出过程的时间远大于此,可达到40 s<sup>[21-22]</sup>,由此,在实际煤与瓦斯突出过程中,煤体泄压口以内的瓦斯压力持续高压 $p_0$ ,巷道内气体压力为 $p_{a0}$ (相对压力),在此情况下,若假定突出持续时间为 $t_0$ ,瓦斯压力变化如图10所示。

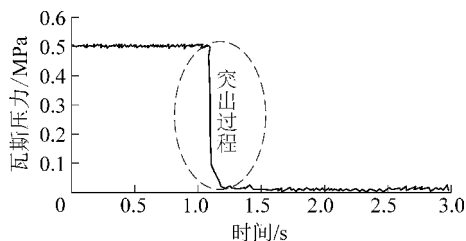


图9 试验中煤与瓦斯突出时瓦斯压力变化

Fig. 9 Gas pressure changes when coal and gas outburst in test

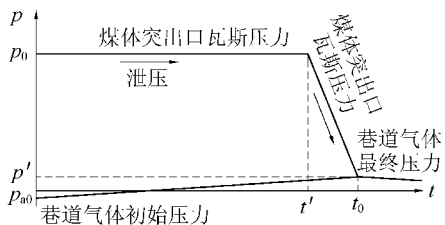


图10 实际煤与瓦斯突出过程瓦斯压力变化

Fig. 10 Gas pressure change in actual process of coal and gas outburst

### 5.2 泄压口气体温度计算与分析

分别假设突出瓦斯压力 $p_0 = 0.5、0.74、1.0$  MPa,瓦斯泄压持续时间 $t' = 25$  s, $t_0 = 30$  s, $p_{a0} = -0.001325$  MPa,巷道气体最终压力 $p' = 0.01$  MPa(均为相对压力),巷道气体温度 $25.6$  °C(298.75 K),将以上参数代入式(8)、式(10)和式(16)联立的方程组,采用Fortran语言编程计算上述煤体泄压口气体温度的变化规律,如图11所示。

从图11可以看出,在煤与瓦斯突出过程中,由于节流效应,泄压口瓦斯(进入巷道)温度先是迅速

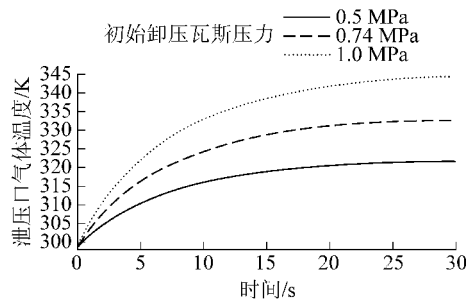


图11 泄压口气体温度变化规律

Fig. 11 Gas temperature change laws of pressure relief

升高,然后缓慢升温;而且,初始泄压瓦斯压力越大,升温速度越快,温度也升的越高,如在上述参数下,初始泄压瓦斯压力分别为0.5、0.74、1.0 MPa,30 s内泄压完时,泄压口气体温度分别升高了22.99、33.87、45.35 K,由于巷道内气体流动,突出区巷道内的气体温度也将急剧升高。除瓦斯泄压升温之外,在突出现场瓦斯解吸吸热(煤体温度降低),瓦斯温度也有一定升高。综合泄压升温 and 瓦斯吸热升温,瓦斯突出过程气体温度升高。

## 6 结 论

1) 由于瓦斯泄压节流效应,泄压气体温度迅速升高,泄压罐内温度变化和充气罐初始充气压力关系不大,而和瓦斯泄压速率有关。

2) 充气罐内瓦斯压力越接近泄压罐内瓦斯压力,泄压罐内气体升温越慢,然后泄压罐内气体温度开始逐渐降低。

3) 对甲烷来说,改进 Berthelot 状态方程中引力项温度指数 $n$ 取值0.625为佳。

4) 甲烷定压比热容随压力增大线性增加。

5) 采用焦耳-汤姆逊效应理论计算得到的瓦斯泄压过程中泄压罐内温度变化规律与实测结果基本一致,这充分表明该计算方法是切实可行的。

6) 不同突出瓦斯压力(0.5、0.74、1.0 MPa)下,30 s内泄压完时,泄压口气体温度分别升高22.99、33.87、45.35 K。

### 参考文献 (References):

- [1] MARTIN Schoen. The Joule-Thomson effect in confined fluids[J]. Physica A, 1999, 270: 353-379.
- [2] LVAN M. The Joule-Thomson effect in natural gas flow-rate measurements[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16: 387-395.
- [3] 胡新根,林娟娟. 气体节流膨胀过程的热力学分析[J]. 大学化

- 学,2015,30(4):74-77.
- HU Xingen, LIN Juanjuan. Thermodynamic analysis on throttling expansion of gases[J]. University Chemistry, 2015, 30(4): 74-77.
- [4] TAROM N, HOSSAIN M M. A practical method for the evaluation of the Joule Thomson effects to predict flowing temperature profile in gas producing wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 1080-1090.
- [5] 高德洁, 王鑫, 王春生, 等. 天然气输送管线温度计算[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(7): 39-43.
- GAO Dejie, WANG Xin, WANG Chunsheng, *et al.* Temperature drop calculation for natural gas transmission pipeline[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(7): 39-43.
- [6] 牛文杰, 吴建军, 刘新福, 等. 煤层气排采井口温降计算与保温装置设计[J]. 机械设计, 2011, 28(9): 71-75.
- NIU Wenjie, WU Jianjun, LIU Xinfu, *et al.* Calculation on temperature drop at CBM drainage well-head and insulation device design [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(9): 71-75.
- [7] 艾刚, 刘应华. 高压容器泄漏中发生的焦耳-汤姆逊效应研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4): 97-102.
- AI Gang, LIU Yinghua. Study on the Joule-Thomson effect during leakage in high pressure vessels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(4): 97-102.
- [8] 王玉石. 双层天然气管道泄漏扩散特性仿真研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- [9] 胡丞. 地质封存中注CO<sub>2</sub>井筒传热模拟分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [10] 于博, 刘永忠, 杨勇, 等. 封存CO<sub>2</sub>在泄漏通道中迁移及相变过程的模拟分析[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(3): 516-522.
- YU Bo, LIU Yongzhong, YANG Yong, *et al.* Simulation of migration and phase transition of sealed CO<sub>2</sub> in a leaky pathway[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2015, 29(3): 516-522.
- [11] 尹铁男, 姚海元, 邓道明, 等. 考虑焦耳效应等因素的两相管流热力学模型[J]. 石油化工高等学校学报, 2011, 24(5): 73-76.
- YIN Tienan, YAO Haiyuan, DENG Daomin, *et al.* Energy equation derivation of the multiphase flow pipeline[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2011, 24(5): 73-76.
- [12] 王卫强, 吴明, 王勇, 等. 油气两相流温降计算方法的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2007, 27(2): 42-44.
- WANG Weiqiang, WU Ming, WANG Yong, *et al.* Evaluation method of temperature drop of oil-gas two-phase flow[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2007, 27(2): 42-44.
- [13] 余明高, 任鹏, 游浩, 等. 基于不同直径的高压管道瓦斯泄放自燃试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2): 194-199.
- YU Minggao, REN Peng, YOU Hao, *et al.* Experimental study of the spontaneous ignition of pressurized gas released through different diameter pipelines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 194-199.
- [14] 赵万里. 高压瓦斯泄放自燃试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [15] 李西平, 司云森. 物理化学[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2006.
- [16] 张永梅. 实际气体分子间吸引相互作用对转换温度的影响[J]. 物理通报, 2015, 22(1): 20-22.
- Zhang Yongmei. The effect about attractive interaction among the actual gas molecules to inversion temperature[J]. Physics Bulletin, 2015, 22(1): 20-22.
- [17] RICHARD T J, RICHARD B S, MAJID J. Thermodynamic properties of nitrogen from the freezing line to 2 000 K at pressures to 1 000 MPa[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1986, 15(2): 735-909.
- [18] 邓成香, 宋鹏云, 马爱琳. 干气密封的实际气体焦耳-汤姆逊效应分析[J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3833-3842.
- DENG Chengxiang, SONG Pengyun, MA Ailin. Analysis of Joule-Thomson effect of real gas system sealed by dry gas[J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3833-3842.
- [19] BEHZAD H, MOHAMMAD R H, MOHAMMAD R B, *et al.* Joule-Thomson inversion curve prediction by using equation of state[J]. Chinese Chemical Letters, 2007, 18: 1154-1158.
- [20] 孔彪, 王恩元, 李忠辉, 等. 煤与瓦斯突出瓦斯压力变化规律试验研究[J]. 煤矿安全, 2015, 46(2): 8-11.
- KONG Biao, WANG Enyuan, LI Zhonghui, *et al.* Experimental study on gas pressure change law of coal and gas outburst[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(2): 8-11.
- [21] VALLIAPPAN S, ZHANG W L. Role of gas energy during coal outbursts[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 44(7): 875-895.
- [22] 景国勋, 张强. 煤与瓦斯突出过程中瓦斯作用的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 169-171.
- JING Guoxun, ZHANG Qiang. Study on the role of gas in the coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 169-171.