

PR 方程推算氮气/灭火剂蒸气等熵指数

陈梦东¹, 余建祖^{1,2}, 施 尚¹, 谢永奇^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院

人机工效与环境控制重点学科实验室, 北京 100191)

摘 要: 氮气(N_2)/灭火剂蒸气组成的混合气体的容积等熵指数和温度等熵指数随充填压力和温度的变化关系是影响机载灭火系统灭火剂释过程的重要因素。基于 PR(Peng-Robinson)方程和范德瓦耳混合规则,编制了 N_2 /灭火剂混合气体的容积等熵指数和温度等熵指数的计算程序,计算了三组混合气体 N_2 /HFC227ea、 N_2 /CF₃I 和 N_2 /CF₃Br 充填压力分别为 4.2 MPa 和 2.5 MPa,初始温度为 293 K 时等熵指数随温度的变化曲线。结果表明:它们的容积等熵指数和温度等熵指数随着温度的升高而逐渐下降,呈近似线性关系。在相同温度下,充填压力为 4.2 MPa 时的三组混合物的容积等熵指数和温度等熵指数均高于充填压力 2.5 MPa 时的结果。在相同的充填压力和温度下, N_2 /CF₃I 的等熵指数最大,其次为 N_2 /HFC227ea 和 N_2 /CF₃Br 的最小。

关 键 词: 灭火系统; PR 方程; 等熵指数; 灭火剂; 气液平衡

中图分类号: V231.1; TK123

文献标志码: A

Estimating isentropic exponent for nitrogen and fire extinguishing agent vapor using PR equation

CHEN Mengdong¹, YU Jianzu^{1,2}, SHI Shang¹, XIE Yongqi^{1,2}

(1. School of Aeronautics Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Fundamental Science on Ergonomics and Environment Control Laboratory,

School of Aeronautics Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The variation of volumetric isentropic exponent and temperature isentropic exponent of the gas mixture of nitrogen (N_2) and fire extinguishing agent vapor with pressurized pressure and temperature are a key influential factor to the fire extinguishing agent discharge progress for the aircraft fire extinguishing system. Based on the PR (Peng-Robinson) equation associated with the classical van der Waals mixing rule, a program was developed to estimate volumetric isentropic exponent and temperature isentropic exponent for the mixture of N_2 and fire extinguishing agent vapor. The curves of volumetric isentropic exponent and temperature isentropic exponent varying with temperature were calculated with the pressurized pressure of 4.2 MPa and 2.5 MPa and initial temperature of 293 K for the binary system of N_2 /HFC227ea, N_2 /CF₃I and N_2 /CF₃Br. The results showed that volumetric isentropic exponent and temperature isentropic exponent decreased as temperature increased and the relation was nearly linear.

收稿日期: 2016-03-29

作者简介: 陈梦东(1985—),男,博士生,主要从事直升机灭火系统设计研究。

引用格式: 陈梦东,余建祖,施尚,等. PR 方程推算氮气/灭火剂蒸气等熵指数[J]. 航空动力学报,2017,32(10):2378-2383. CHEN Mengdong, YU Jianzu, SHI Shang, et al. Estimating isentropic exponent for nitrogen and fire extinguishing agent vapor using PR equation[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2378-2383.

The volumetric isentropic exponent and temperature isentropic exponent of all the three binary systems had a higher value with pressurized pressure of 4.2 MPa than with 2.5 MPa at the same temperature. When pressurized to an equal pressure at same temperature, isentropic exponent of N_2/CF_3I had a largest value followed by the results of $N_2/HFC227ea$ and N_2/CF_3Br .

Key words: fire extinguishing system; PR equation; isentropic exponent; fire extinguishing agent; vapour-liquid equilibrium

在民用及军用航空领域,哈龙 1301(CF_3Br) 由于高灭火效率、低毒、释放后无残留等特点,作为发动机/辅助动力装置(APU)、货舱和载人舱的灭火剂已经广泛使用多年。然而,因为对臭氧层的严重破坏,蒙特利尔协议全面禁止了哈龙型灭火剂的生产,美国开展了“新一代灭火技术计划”^[1-3] 寻找哈龙的替代品,七氟丙烷($HFC-227ea$)和三氟碘甲烷(CF_3I)成为 FAA(美国联邦航空管理局)推荐的发动机舱灭火剂^[4]。

工程上一般将 N_2 作为增压介质充填到灭火瓶,与灭火剂蒸气一起提供释放过程的驱动力,瓶内 N_2 充填量直接影响灭火剂的释放速率。Yang 等^[5]分析了 N_2 /灭火剂蒸气驱动灭火剂的释放过程,然而并未考虑灭火剂蒸气对 N_2 /灭火剂混合气体等熵指数的影响。刘晖^[6]采用 SRK(Soave-Redlich-Kwong)状态方程,计算了一定温度和压力范围的氮氢混合气体温度等熵指数和容积等熵指数,并未涉及相平衡性质。周训飞等^[7]选用 PR(Peng-Robinson)方程对三种替代型纯制冷剂的等熵指数进行了推算,并未涉及物质的混合规则。灭火剂释放前, N_2 和灭火剂在瓶内达到气液相平衡, N_2 和灭火剂蒸气组成混合气体的等熵指数由充填压力和温度决定。文献[8-10]对于动力舱火灾模拟及灭火瓶 N_2 充填量作了一定研究。

PR 方程的形式简单、通用性强,计算气相性质和气液相平衡的精度较高,近年来,PR 方程及其改进方式^[11]在工程上获得了广泛应用。本文选择 PR 方程,结合经典的范德瓦耳混合规则,对 $N_2/HFC227ea$ 、 N_2/CF_3I 和 N_2/CF_3Br 三组气体混合物的等熵指数进行推算,以获得 N_2 /灭火剂蒸气的容积等熵指数和温度等熵指数随充填压力和温度的变化关系,用于分析新型机载灭火系统灭火剂释放过程。

1 等熵指数计算

1.1 等熵指数计算式

在可逆绝热过程中,压力、温度及比热容的变

化满足下式^[6]:

$$pV_m^{\kappa_V} = \text{const} \tag{1}$$

$$Tp^{-\frac{\kappa_T-1}{\kappa_T}} = \text{const} \tag{2}$$

式中 p 为充填压力(Pa); T 为初始温度(K); V_m 为摩尔体积(m^3/mol); κ_V 和 κ_T 分别为容积等熵指数和温度等熵指数。

根据热力学基本关系式推导可得^[12]

$$\kappa_V = \frac{Z}{Z_p - RZ_T^2/c_p} \tag{3}$$

$$\kappa_T = \frac{1}{1 - RZ_T/c_p} \tag{4}$$

式中 R 为气体常数($J/(mol \cdot K)$); c_p 为实际气体的比定压热容($kJ/(kmol \cdot K)$); Z 为流体压缩因子; Z_p 和 Z_T 分别为压力和温度的导数压缩因子,其定义式如下:

$$Z_p = Z - p\left(\frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T \tag{5}$$

$$Z_T = Z + T\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p \tag{6}$$

1.2 状态方程和混合规则

为了计算 κ_V 和 κ_T ,本文选用的状态方程为 PR 方程,形式如下:

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)} \tag{7}$$

式中 a 和 b 为状态方程系数, a 和 b 可由临界参数和偏心因子计算得到

$$a = \frac{0.45724R^2T_c^2\alpha(T)}{p_c} \tag{8}$$

$$b = \frac{0.07780RT_c}{p_c} \tag{9}$$

式中 p_c 和 T_c 分别为临界压力和临界温度; $\alpha(T)$ 函数的定义为

$$\alpha(T) = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2 \tag{10}$$

式中 $T_r = T/T_c$ 为对比温度; m 的表达式为

$$m = 0.3746 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \tag{11}$$

式中 ω 为偏心因子。

本文中 N_2 和灭火剂的临界参数、偏心因子取自文献[13]。

本文采用经典的范德瓦耳(vdW)混合规则,

计算 N₂/灭火剂蒸气二元混合物的热物理性质，具体如下：

$$a_m = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 y_i y_j a_{ij} \tag{12}$$

$$a_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{a_{ii} a_{jj}} \tag{13}$$

$$b_m = \sum_{i=1}^2 y_i b_i \tag{14}$$

式中 y_i 为组分 i 的摩尔分数； a_{ii} 和 b_i 为组分 i 在 PR 方程中的系数 a 和 b ； k_{ij} 为二元交互系数，通过对文献[14-15]中 N₂/HFC227ea、N₂/CF₃I 和 N₂/CF₃Br 的气液平衡数据进行优化拟合得到，结果如表 1 所示。

实际应用中 PR 方程常常表示为压缩因子 Z 的三次型方程，如下所示：

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \tag{15}$$

$$Z_p = Z - p \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T = Z - \frac{2A_m B_m - 2B_m^2 - 3B_m^3 - Z^2 B_m - Z(A - 6B_m^2 - 2B_m)}{3Z^2 - 2(1 - B_m)Z + (A - 3B_m^2 - B_m^3)} \tag{16}$$

$$Z_T = Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_p = Z + \frac{B_m Z^2 + \left[-6B^2 - 2B + p/(R^2 T^2) \left(\frac{\partial A_m}{\partial T} \right)_p \right] Z - Bp/(R^2 T^2) \left(\frac{\partial A_m}{\partial T} \right)_p - \frac{A_m B_m + 2B_m^2 + 3B_m^3}{3Z^2 - 2(1 - B_m)Z + (A - 3B_m^2 - B_m^3)}}{3Z^2 - 2(1 - B_m)Z + (A - 3B_m^2 - B_m^3)} \tag{17}$$

式中 $A_m = a_m p / (R^2 T^2)$ ； $B_m = b_m p / (RT)$ ； $E_1 = k_1 \cdot \sqrt{T_{1r}/\alpha_1}$ ； $E_2 = k_2 \sqrt{T_{2r}/\alpha_2}$ 。 $\left. \frac{\partial A_m}{\partial T} \right|_p = -\frac{p}{R^2 T^3} \cdot [a_1 E_1 y_1^2 + y_1 y_2 (1 - k_{12}) \sqrt{a_1 a_2} (E_1 + E_2) + a_2 E_2 y_2^2 + 2a_m]$

N₂ 和灭火剂蒸气混合物的比定压热容 c_{pm} 可用下式计算：

$$c_{pm} = \sum_i c_{pi} y_i \tag{18}$$

式中 y_i 为各组分摩尔分数； c_{pi} 为各组分在系统温度及其分压 p_i 下的比定压热容。

N₂ 比定压热容的计算来自文献[16]，灭火剂蒸气比定压热容的计算来自文献[17-18]。

2 算例验证及分析

为验证本文计算方法的准确性，选择三种制冷剂 R12、R21 和 R22，计算工况：温度为 293 K，压力为 101.325 kPa。利用上述等熵指数计算方法（设 $y_1 = 0$ ），将计算的容积等熵指数值与文献值进行对比，结果如表 2 所示。由该表可知，本文计算方法与文献值的最大偏差在 2.5% 以内，满足工程计算的要求。

此外，利用本文方法计算了 N₂/氢气(H₂)混

表 1 N₂/灭火剂二元交互系数
Table 1 Binary interaction coefficient for N₂ and fire extinguishing agents

N ₂ /灭火剂	T/K	k_{12}	$ \Delta p /\%$	$ \Delta y /\%$
N ₂ + HFC227ea	293.2	-0.011 02	1.68	1.47
N ₂ + CF ₃ I	293.2	0.024 85	1.28	0.80
N ₂ + CF ₃ Br	293.2	0.045 00	0.89	1.03

注： $\Delta p = (p_{cal} - p_{exp})/p_{exp} \times 100\%$ ， $\Delta y = (y_{cal} - y_{exp})/y_{exp} \times 100\%$ ，式中下标 exp 表示实验值，cal 表示计算值。

式中 $A = ap/(R^2 T^2)$ ， $B = bp/(RT)$ ， $Z = pV_m/(RT)$ 。

根据隐函数的求导法则，对式(15)分别计算压缩因子对温度和压力的偏导数，结果如下：

合气体(N₂ 摩尔分数为 0.25，H₂ 摩尔分数为 0.75)在压力为 0.098 MPa，温度分别为 298、373、473 K 时的温度等熵指数，计算结果与文献值的对比如表 3 所示。由表 3 可知，对氮氢混合气 κ_T 的计算，平均偏差小于 0.1%，与文献值吻合良好。

表 2 制冷剂的等熵指数计算值与文献值比较
Table 2 Comparison of isentropic exponent of refrigerating fluid between calculated values and literature values

制冷剂	等熵指数		相对偏差/%
	文献[7]	计算值	
R12	1.138	1.1147	2.05
R21	1.12	1.1361	1.44
R22	1.194	1.1647	2.44

表 3 N₂/H₂ 的等熵指数计算值与文献值比较
Table 3 Comparison of isentropic exponent of N₂/H₂ between calculated values and literature values

压力/ MPa	温度/K	等熵指数		相对偏差%
		文献[6]	计算值	
	298	1.405	1.4042	-0.057
0.098	373	1.399	1.3991	0.007
	473	1.395	1.3959	0.065

3 结果与分析

为了计算 N_2 /灭火剂蒸气混合气的等熵指数,首先需要确定气相空间内 N_2 与灭火剂蒸气的摩尔比例关系。对于灭火系统设计人员,一般已知条件包括:灭火瓶的有效容积 V_{bot} 、灭火剂的充填质量 m_b 、充填压力 p 和初始温度 T 。由气液相平衡理论可知,当充填压力 p 和初始温度 T 确定时,液相和气相中 N_2 与灭火剂的摩尔比例是唯一的。有关 N_2 和灭火剂蒸气比例关系的确定可参考文献[9-10]。

工程实际中 N_2 的充填压力分为 2.5 MPa 和 4.2 MPa 两种。本节对三组混合物,初始温度均为 293 K,充填压力分别为 2.5 MPa 和 4.2 MPa 的工况,分别计算了容积等熵指数和温度等熵指数随温度的变化,结果如图 1~图 3 所示。

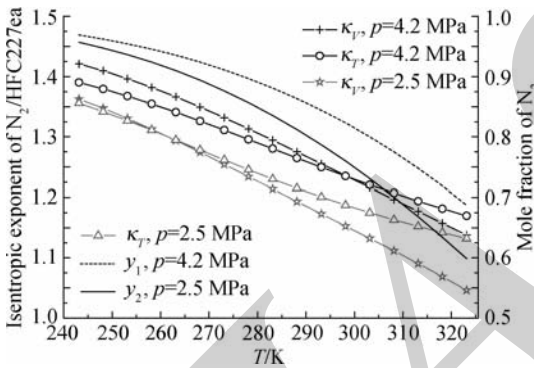


图 1 N_2 /HFC227ea 的等熵指数和 N_2 摩尔分数随温度的变化关系

Fig. 1 Relation of isentropic exponent of N_2 /HFC227ea and mole fraction of N_2 with temperature

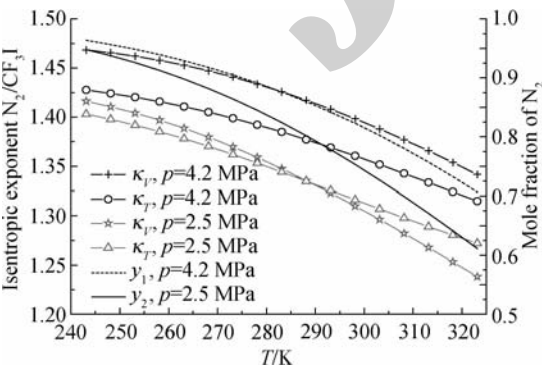


图 2 N_2 /CF₃I 的等熵指数和 N_2 摩尔分数随温度的变化关系

Fig. 2 Relation of isentropic exponent of N_2 /CF₃I and mole fraction of N_2 with temperature

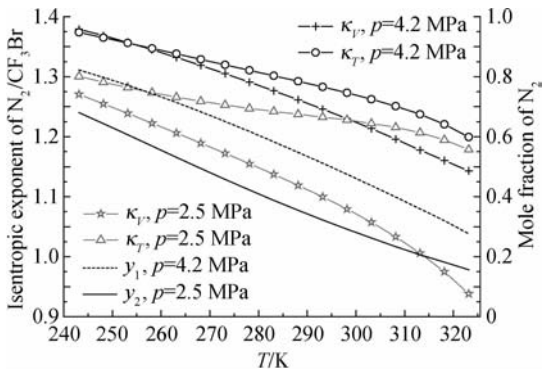


图 3 N_2 /CF₃Br 的等熵指数和 N_2 摩尔分数随温度的变化关系

Fig. 3 Relation of isentropic exponent of N_2 /CF₃Br and mole fraction of N_2 with temperature

由图 1 可知,两种充填压力下 N_2 /HFC227ea 的容积等熵指数和温度等熵指数均随着温度的升高而逐渐下降,近似呈线性关系。充填压力为 4.2 MPa 时,容积等熵指数由 243 K 的 1.42 降为 323 K 时的 1.14,温度等熵指数由 1.39 降为 1.17;充填压力为 2.5 MPa 时,容积等熵指数由 1.36 降为 1.05,温度等熵指数由 1.35 降为 1.13。当充填压力较高时,整个温度区间内容积等熵指数与温度等熵指数间的差别较小;当充填压力较低时,温度高于 283 K 后,两者的差值逐渐增大,并且温度等熵指数始终略高于容积等熵指数。整个温度范围内气相中 N_2 所占摩尔分数均高于 0.60,混合气中 N_2 占主要成分。

由图 2 可知, N_2 /CF₃I 的等熵指数也随着温度的升高逐渐降低,呈近似线性关系,但降低的幅度明显小于 N_2 /HFC227ea。充填压力为 4.2 MPa 时容积等熵指数的变化范围是 1.34~1.47,温度等熵指数的变化范围是 1.31~1.43;充填压力为 2.5 MPa 时,容积等熵指数的变化范围是 1.24~1.42,温度等熵指数的变化范围是 1.27~1.40。与 N_2 /HFC227ea 不同,充填压力较高时, N_2 /CF₃I 的容积等熵指数始终高于温度等熵指数,两者的差值随着温度的变化近似恒定。而充填压力较低时,两者的差别不大。高压时,气相空间 N_2 摩尔分数始终高于 0.70,低压时该数值始终高于 0.60,混合气中以 N_2 成分为主。

由图 3 可知, N_2 /CF₃Br 等熵指数的变化情况与上述两者均有不同。充填压力为 4.2 MPa 时,随着温度的升高,温度等熵指数与容积等熵指数的差值逐渐增大。整个温度区间内容积等熵指数与温度等熵指数的范围分别是 1.14~1.38 和

1.20~1.37。充填压力为 2.5 MPa 时, N_2/CF_3Br 的温度等熵指数随着温度升高降低的速率, 明显小于容积等熵指数的变化速率。容积等熵指数由 243 K 时的 1.27 降为 323 K 时的 0.94, 而温度等熵指数仅由 1.30 降为 1.18。与图 1 和图 2 不同的是, 气相空间中 N_2 并不一直占主要成分, 当温度高于 293 K (充填压力为 4.2 MPa) 和温度高于 268 K (充填压力为 2.5 MPa) 时, N_2 的摩尔分数小于 0.50, 并随着温度的升高进一步降低。

综合上述分析可知, 三组二元混合物的等熵指数受充填压力和温度影响。由此可知文献[5]利用等熵指数计算灭火剂释放时间时, 并不区分灭火剂种类和所处的压力、温度区间是不合适的, 这可能是文中计算的释放时间与实验值误差较大的原因之一。

相同充填压力和初始温度, $N_2/HFC227ea$, N_2/CF_3I 和 N_2/CF_3Br 三组混合气体的容积等熵指数和温度等熵指数随温度变化的对比结果如图 4 和图 5 所示。

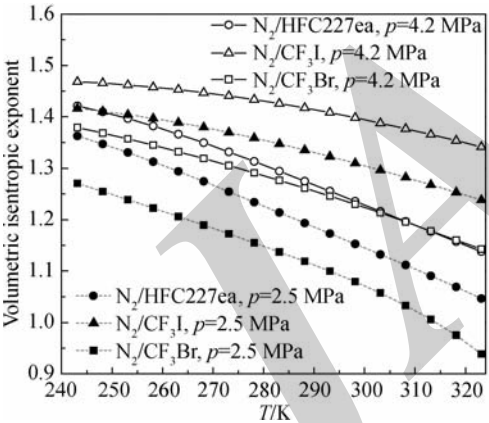


图 4 相同初始温度和充填压力下容积等熵指数的比较
Fig. 4 Comparison of volumetric isentropic exponent at the same initial temperature and pressurized pressure

由图 4 可知, 无论充填压力是 4.2 MPa 还是 2.5 MPa, 相同温度下 N_2/CF_3I 的容积等熵指数最大, $N_2/HFC227ea$ 的其次, N_2/CF_3Br 的最小, 并且 N_2/CF_3I 的结果明显高于其他两组混合物。

由图 5 可知, 对于温度等熵指数, 仍然是 N_2/CF_3I 的结果最大, 而对于 $N_2/HFC227ea$ 和 N_2/CF_3Br , 随着温度的升高, 温度等熵指数出现了交叉。相同的温度变化范围, 温度等熵指数降低的数值小于相同条件下容积等熵指数的变化。

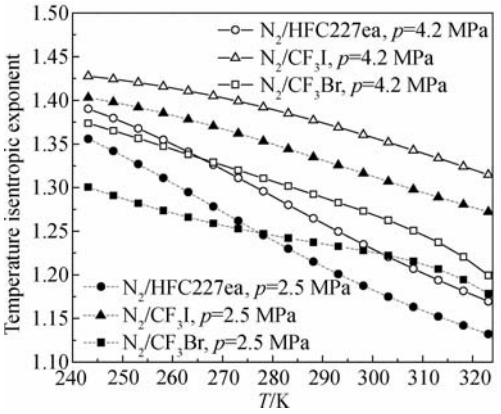


图 5 相同初始温度和充填压力下温度等熵指数的比较
Fig. 5 Comparison of temperature isentropic exponent at the same initial temperature and pressurized pressure

4 结 论

本文基于 PR 方程和范德瓦耳混合规则, 计算了 $N_2/HFC227ea$, N_2/CF_3I 和 N_2/CF_3Br 三组混合气体的容积等熵指数和温度等熵指数。结果表明, 等熵指数随着温度的升高呈近似线性下降关系。相同温度范围, 充填压力较高, 容积等熵指数和温度等熵指数的变化范围小于充填压力较低的情况。相同的充填压力和温度下, N_2/CF_3I 的等熵指数最大, 其次为 $N_2/HFC227ea$ 、 N_2/CF_3Br 最小。本文计算的 N_2 /灭火剂混合气体等熵指数, 可以用于分析新型机载灭火系统灭火剂释放过程, 指导替代型灭火剂的机载灭火系统的工程设计。

参考文献:

[1] GANN R G. Next-generation fire suppression technology program[J]. Fire Technology, 1998, 34(4): 363-371.
[2] GANN R G. FY2002 annual report: next generation fire suppression technology program (NGP)[R]. Washington: National Institute of Standards and Technology, 2002.
[3] GANN R G. Advanced technology for fire suppression in aircraft; the final report[R]. Washington: National Institute of Standards and Technology, 2007.
[4] BORGHETTI L, CHAER S, FERGUSON D, et al. Options for aircraft engine fire protection[R]. Chicago, US: Boeing Commercial Airplane Group, 2000.
[5] YANG J C, CLEARY T G, VÁZQUEZ I, et al. Optimization of system discharge[R]. Washington: US Department of Commerce, NIST-SP-890, 1995.
[6] 刘晖. 实际气体温度绝热指数和容积绝热指数的计算[J]. 石油化工高等学校学报, 2000, 13(4): 42-45.

LIU Hui. Calculation of the isentropic temperature change exponent and isentropic volume change exponent of real gases[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2000, 13 (4):42-45. (in Chinese)

[7] 周训飞,赵小明,郭智恺,等. 利用 PR 方程推算替代制冷剂的绝热指数[J]. 工程热物理学报, 2012, 33 (4): 548-552.

ZHOU Xunfei, ZHAO Xiaoming, GUO Zhikai, et al. Calculation of adiabatic exponent using P-R equation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33 (4): 548-552. (in Chinese)

[8] 牛雪民,谢永奇,余建祖. 无通风直升机动力舱火灾温度场数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8):1761-1767.

NIU Xuemin, XIE Yongqi, YU Jianzu. Simulation study on helicopter nacelle ventilation cooling system[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1761-1767. (in Chinese)

[9] 陈梦东,谢永奇,郭祥祥,等. 基于 PR 方程和 WS 混合规则预测灭火瓶氮气充填量[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(10):2014-2020.

CHEN Mengdong, XIE Yongqi, GUO Xiangxiang, et al. Calculating the filling mass of nitrogen in the fire agent bottle based on P-R equation of state with wong-sandler mixing rule[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42 (10): 2014-2020. (in Chinese)

[10] 陈梦东,余建祖,谢永奇. 基于 VTPR 方程计算 N_2/CF_3I 充填特性[J]. 航空学报, 2016, 37(12):3706-3712.

CHEN Mengdong, YU Jianzu, XIE Yongqi. Calculating the filling properties for N_2/CF_3I based on volume translation Peng-Robinson equation of state[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37 (12): 3706-3712. (in Chinese)

[11] LIN Hong, DUAN Yuanyuan. Empirical correction to the Peng-Robinson equation of state for the saturated region [J]. Fluid Phase Equilibria, 2005, 233(2):194-203.

[12] 苏长荪,谭连城,刘桂玉. 高等工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,1987.

[13] LEMMON E W, MCLINDEN M O, HUBER M L. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP) [M]. 8th ed. Gaithersburg, US: National Institute of Standards and Technology, 2007.

[14] LIM J S, KIM J. Vapor liquid equilibria of the binary systems nitrogen + bromotrifluoromethane, + bromochlorodifluoromethane, + 1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane, and + trifluoroiodomethane from 293.2 to 313.2 K and 30 to 100 bar [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1997, 42(1):112-115.

[15] YANG J C, CLEARY T G, VÁZQUEZ I, et al. Measured and predicted thermodynamic properties of selected halon alternative/nitrogen mixtures[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(2):96-105.

[16] SPAN R, LEMMON E W, JACOBSEN R T, et al. A reference equation of state for the thermodynamic properties of nitrogen for temperatures from 63.151 to 1000 K and pressures to 2200 MPa [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2000, 29(6):1361-1433.

[17] 杨亚晶,何茂刚,张颖. 混合制冷剂比定压热容的理论推算[J]. 化学工程, 2007, 35(10):42-45.

YANG Yajing, HE Maogang, ZHANG Ying. Estimation of isobaric specific heat for mixing refrigerant [J]. Chemical Engineering, 2007, 35(10):42-45. (in Chinese)

[18] 段远源,徐建锋. 适用于整个区域的 HFC-227ea 状态方程[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1):22-24.

DUAN Yuanyuan, XU Jianfeng. A new equation of state for HFC-227ea over entire region [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(1):22-24. (in Chinese)

(编辑:陈 越)