

# LNG 缠绕管式换热器试验研究中的热物性计算方法

陈永东<sup>1,2</sup> 吴晓红<sup>1,2</sup> 周兵<sup>1,2</sup>

1. 合肥通用机械研究院 2. 国家压力容器与管道安全工程技术研究中心

陈永东等. LNG 缠绕管式换热器试验研究中的热物性计算方法. 天然气工业, 2011, 31(6): 92-97.

**摘要** 在基本负荷型的 LNG 工厂中, 多股流缠绕管式换热器是应用最广泛的主低温换热器, 多组分介质在管程和壳程的传热与流动特性是主低温换热器试验研究的关键, 而混合介质的热物性(密度、动力黏度、导热系数、比热容)对试验研究的影响较大。为此, 在考虑了压力对气态混合物热物性计算影响的情况下, 对气态和液态混合介质的 4 种基本热物性的计算方法进行了提炼、集成, 并将计算结果与 HYSYS 的计算结果进行了比较, 结果表明: 相关的热物性计算方法是可行的, 计算误差均控制在工程允许范围内。该计算方法为国内开发大型冷塔提供了技术支撑, 有助于早日实现 LNG 缠绕管式换热器冷塔的国产化。

**关键词** LNG 主低温换热器 缠绕管式换热器 传热 流动特性 混合介质 热物性 计算方法

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.06.020

在基本负荷型的 LNG 工厂中, 热交换是重要的工艺过程, 在冷却、冷凝和液化流程中, 主低温换热器是最重要的换热设备。尽管在某些液化工艺流程中采用了板式换热器, 但缠绕管式换热器仍是应用最广泛的主低温换热器<sup>[1]</sup>。目前这种换热器的制造商还比较少, 关于其传热与流动模型方面的文献也较少。为了掌握这种换热器传热系数和压降的可靠设计计算方法, 需要对换热器的流体动力学过程进行试验和模拟。由于主低温换热器是多股流缠绕管式换热器, 其中的混合制冷剂组分在壳程蒸发, 包括天然气在内的几股不同的介质各自在相应的管程内冷却或冷凝, 从而实现天然气液化的目的, 管程和壳程的流动过程可能涉及单相气态冷却、单相液态冷却、两相冷凝和两相蒸发等, 因此, 需要设计缠绕管式换热器的低温试验装置模拟这些过程, 对其表现出来的传热与流动特性进行研究<sup>[2]</sup>。本文参考文献[3-4]已经对 LNG 缠绕管式换热器的壳程气态流动和液态降膜式流动进行了试验研究, 并指出测试数据的不确定度和试验介质热物性计算的不确定度影响了推衍参数的不确定度(这些推衍

参数包括流速、蒸汽分率、当地摩擦压降和当地传热系数等), 同时也介绍了其采用的热物性计算方法的来源, 并指出了相关物性计算的不确定度。而我国目前的热物性计算大多依靠国外的计算软件, 且没有对其计算结果进行任何评估, 没有相应物性计算软件的单位从事相关研究与设计就相当困难, 传热与流动试验的主要结果是靠测试数据和介质的热物性推衍得到的, 因此有必要对试验介质(尤其是混合物)的热物性计算方法进行总结, 为 LNG 低温换热器的试验研究奠定基础。

## 1 气态混合物的物性计算方法

经过处理的天然气进入液化工段后, 需要经过预冷、冷凝和过冷等工艺过程变成 LNG。天然气是一个以甲烷为主要组分的混合物, 因此将甲烷和乙烷按照一定比例混合, 在缠绕管式换热器内对其进行传热与流体流动的研究。

### 1.1 气态混合物的密度计算

混合气体的密度( $\rho$ )可以按照实际气体的状态方

**基金项目** 国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目(编号:2009AA044802)。

**作者简介** 陈永东, 1968 年生, 教授级高级工程师, 硕士; 现任合肥市合肥通用机械研究院压力容器与储运装备工程部部长, 压力容器学会换热器委员会常务副主任委员, 全国锅炉压力容器标准化技术委员会热交换器分委会委员; 长期从事石油、化工、天然气等领域换热设备的传热与结构研究工作。地址: (230088)安徽省合肥市高新区天湖路 29 号合肥通用机械研究院。电话: (0551) 5335412, 13805692930。E-mail: cyd\_hf@yahoo.cn

程求得：

$$\rho = \frac{P}{ZRT} \quad (1)$$

式(1)中的压缩因子( $Z$ )是相对温度( $T_r$ )和相对压力( $p_r$ )的函数,可根据 Nelson-Obert 通用压缩因子图查得。Nelson-Obert 通用压缩因子图规定了  $p_r < 1.0$  为低压范围; $p_r$  从 1.0 到 10.0 为中压范围; $p_r$  从 10.0 到 40.0 为高压范围<sup>[5]</sup>。在求取物性时采用了混合物的假临界性质来处理,即

$$T_{cm} = \sum_{i=1}^n x_i T_{ci} \quad (2)$$

$$p_{cm} = \sum_{i=1}^n x_i p_{ci} \quad (3)$$

$$\omega_h = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i \quad (4)$$

对于某一温度、压力下的混合气体求出其相对于假临界性质的相对温度和相对压力,即

$$T_r = \frac{T}{T_{cm}} \quad (5)$$

$$p_r = \frac{P}{p_{cm}} \quad (6)$$

式(1)中的压缩因子( $Z$ )也可以根据 Pitzer-Curl 的研究结果按照下式求得：

$$Z = Z^{(0)}(T_r, p_r) + \omega_h Z^{(1)}(T_r, p_r) \quad (7)$$

式(7)中的  $Z^{(0)}$  为偏心因子近似为零时的压缩因子, $Z^{(1)}$  为压缩因子的校正系数,可以从本文参考文献[6]中查取或插值计算。计算混合气体的压缩因子值,最多需要 6 次插值。

式(1)中的气体常数( $R$ )采用混合气体的当量气体常数( $R_{eq}$ )计算式计算,即

$$R_{eq} = 8.314 / \sum_{i=1}^n m_i x_i \quad (8)$$

混合气体的密度  $\rho$  也可以按照下式计算：

$$\rho = \frac{\rho_p T_0}{p^0 TZ} \quad (9)$$

式(9)的  $\rho$  为混合气体在标准状态下的密度,按照下式计算：

$$\rho = \sum_{i=1}^n x_i M_i / 22.414 \quad (10)$$

### 1.2 气态混合物的比热容计算

气态纯物质在常压下的比热容  $c_p$  按照下式计算：

$$c_p = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (11)$$

式(11)中  $c_p$  的单位是 J/(mol · K),本文参考文献[6]给出了不同物质对应的系数  $A \sim E$ 。表 1 为甲烷和乙烷在常压下的比热容计算系数表。

表 1 甲烷和乙烷在常压下的比热容计算系数表

组分	A	B	C	D	E
甲烷	34.942	$-4.00 \times 10^{-2}$	$1.92 \times 10^{-4}$	$-1.53 \times 10^{-7}$	$3.93 \times 10^{-11}$
乙烷	28.146	$4.34 \times 10^{-2}$	$1.89 \times 10^{-4}$	$-1.91 \times 10^{-7}$	$5.33 \times 10^{-11}$

混合气体常压下的比热容  $c_{pm}$  按照下式计算：

$$c_{pm} = \sum_{i=1}^n w_i c_{pi} \quad (12)$$

式(12)中的  $w_i$  是气态混合物中各介质成分的质量组分,按照下式计算：

$$w_i = \frac{x_i M_i}{\sum_{i=1}^n x_i M_i} \quad (13)$$

实际气体的压力会对比热容产生一定的影响,本文参考文献[5-8]给出了气体比热容的等温压力修正图,其理论基础都是认为压力作用下比热容的修正值是相对温度( $T_r$ )和相对压力( $p_r$ )的函数。由于这些图的来源不同,比热容修正值的单位也不相同,使用起来容易出错。

Lee-Kesler 给出了实际气体比热容修正值  $\Delta c_p$  的计算式<sup>[6]</sup>：

$$\Delta c_p = R \left[ \left( \frac{\Delta c_p}{R} \right)^{(0)} + \omega_h \left( \frac{\Delta c_p}{R} \right)^{(1)} \right] \quad (14)$$

式(14)中  $(\Delta c_p/R)^{(0)}$  为偏心因子近似为零时的比热容相对修正值, $(\Delta c_p/R)^{(1)}$  为比热容相对修正值的校正系数, $R$  等于 8.31 J/(mol · K),而  $\Delta c_p$  的单位也是 J/(mol · K)。

### 1.3 气态混合物的动力黏度计算

气态纯物质在常压下的动力黏度( $\mu$ )按照下式计算：

$$\mu = A + BT + CT^2 \quad (15)$$

式(15)中  $\mu$  的单位是 micropoise,等于  $10^{-7}$  Pa · s。本文参考文献[9]给出了不同物质对应的系数  $A \sim C$ ,甲烷和乙烷在常压下的动力黏度计算系数如表 2 所示。

表 2 甲烷和乙烷在常压下的动力黏度计算系数表

组分	A	B	C
甲烷	3.844	$4.01 \times 10^{-1}$	$-1.43 \times 10^{-4}$
乙烷	0.514	$3.34 \times 10^{-1}$	$-7.11 \times 10^{-5}$

混合气体常压下的动力黏度( $\mu_{ho}$ )按照下式计算：

$$\mu_{ho} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i^* x_i m_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^n x_i M_i^{1/2}} \quad (16)$$

混合气体在一定压力下的黏度修正值按照下列公式计算<sup>[6]</sup>：

$$\mu_m - \mu_m^0 = \frac{10.8 \times 10^{-8}}{\zeta_m} [\exp(1.439 \rho_m) - \exp(-1.111 \rho_m^{1.838})] \quad (17)$$

$$\zeta_m = T_{cm}^{1/6} / (M_m^{1/2} p_{cm}^{2/3}) \quad (18)$$

$$\rho_m = \frac{\rho_m}{\rho_{cm}} \quad (19)$$

$$\rho_{cm} = p_{cm} / (Z_{cm} R T_{cm}) \quad (20)$$

$$M_m = \sum_{i=1}^n x_i M_i \quad (21)$$

$$Z_{cm} = \sum_{i=1}^n x_i Z_{ci} \quad (22)$$

式(17)中  $\mu_m^0$  按照式(16)的计算值代入。在使用上述公式时,各参数的量纲应采用统一的单位制,尤其要注意  $\rho$ 、 $p$ 、 $R$  的协调一致。

本文参考文献[5]已经将压力对气体的黏度影响绘制成图,基于相对温度和相对压力两个参数查取,在查得一个比例系数后乘以常压下的黏度就是所需的结果。

### 1.4 气态混合物导热系数的计算

气态纯物质在常压下的导热系数( $\lambda$ )按照下式计算：

$$\lambda = A + BT + CT^2 \quad (23)$$

式(23)中  $\lambda$  的单位是  $W/(m \cdot K)$ 。本文参考文献[9]给出了不同物质对应的系数  $A \sim C$ 。甲烷和乙烷在常压下的导热系数计算系数表如表 3 所示。

表 3 甲烷和乙烷在常压下的导热系数计算系数表

组分	A	B	C
甲烷	-0.009 35	$1.40 \times 10^{-4}$	$3.32 \times 10^{-8}$
乙烷	-0.019 36	$1.25 \times 10^{-4}$	$3.83 \times 10^{-8}$

混合气体常压下的导热系数( $\lambda_m$ )按照下式计算：

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i M_i^{1/3}}{\sum_{i=1}^n x_i M_i^{1/3}} \quad (24)$$

混合气体的压力对介质的导热系数会产生较大的影响,本文参考文献[10]推荐了不同的计算方法。Stiel-Thodos 方法采用下列公式计算  $\lambda$  与  $\lambda^0$  的差值。

$$\lambda_m - \lambda_m^0 = \frac{5.852 \times 10^{-5}}{\Gamma Z_{cm}^5} [\exp(0.535 \rho_m) - 1] \quad (\rho_m < 0.5) \quad (25)$$

$$\lambda_m - \lambda_m^0 = \frac{5.476 \times 10^{-5}}{\Gamma Z_{cm}^5} [\exp(0.67 \rho_m) - 1.069] \quad (0.5 < \rho_m < 2.0) \quad (26)$$

$$\lambda_m - \lambda_m^0 = \frac{1.244 \times 10^{-5}}{\Gamma Z_{cm}^5} [\exp(1.155 \rho_m) + 2.016] \quad (2.0 < \rho_m < 2.8) \quad (27)$$

$$\Gamma = T_{cm}^{1/6} M_m^{1/2} / p_{cm}^{1/2} \quad (28)$$

上式  $\lambda_m^0$  按照式(24)的计算值代入。在使用上述公式时,各参数的量纲应采用统一的单位制。

Huber 提出了适当的混合规则,并采用丙烷为参考流体。计算高压下的混合气体导热系数时,首先按照下列公式计算若干中间参量。

$$f_i = \frac{T_{ci}}{T_c^R} [1 + (\omega - \omega^R)(0.052 03 - 0.749 8 \ln T_{ri})] \quad (29)$$

$$h_i = \frac{\rho^R Z_c^R}{\rho_i Z_{ci}^R} [1 - (\omega - \omega^R)(0.143 6 - 0.282 2 \ln T_{ri})] \quad (30)$$

$$h_m = \sum_i \sum_j x_i x_j h_{ij} \quad (31)$$

$$f_m h_m = \sum_i \sum_j x_i x_j f_{ij} h_{ij} \quad (32)$$

$$h_{ij} = \frac{(h_i^{1/3} + h_j^{1/3})^3}{8} \quad (33)$$

$$f_{ij} = (f_i f_j)^{1/2} \quad (34)$$

$$T_s = T / f_m \quad (35)$$

$$\rho = \rho_m h_m \quad (36)$$

再按照下列公式求出相对于丙烷临界性质的相对参数：

$$T_r^R = T_s / T_c^R \quad (37)$$

$$\rho^R = \rho / \rho_c^R \quad (38)$$

后按照下式计算出丙烷在温度( $T_s$ )和密度( $\rho$ )时的实际导热系数( $\lambda^R$ )和温度( $T_s$ )时的常压导热系数( $\lambda^{RS}$ )的差值,该差值的单位为  $10^{-3} W/(m \cdot K)$ 。

$$\lambda^R - \lambda^{RS} = C_1 \rho^R + C_2 (\rho^R)^3 + (C_3 + C_4 / T_r^R) (\rho^R)^4 + (C_5 + C_6 / T_r^R) (\rho^R)^5 \quad (39)$$

式中  $C_1$  为 15.258 398 594 4;  $C_2$  为 5.299 173 191 27;  $C_3$  为 -3.053 304 147 48;  $C_4$  为 0.450 477 583 739;  $C_5$  为 1.031 440 506 79;  $C_6$  为 -0.185 480 417 707。

最后按照下列公式计算混合气体在给定温度和压力下的导热系数：

$$\lambda_m = \lambda_m^0 + F_{\lambda m} X_{\lambda m} (\lambda^R - \lambda^{RS}) \quad (40)$$

$$F_{\lambda m} = 44.094^{1/2} (h_m)^{-2} \sum_i \sum_j x_i x_j (f_{ij} / M_{ij})^{1/2} (h_{ij})^{4/3} \quad (41)$$

$$M_{ij} = \left( \frac{1}{2M_i} + \frac{1}{2M_j} \right)^{-1} \quad (42)$$

$$X_{\lambda m} = \left[ 1 + \frac{2.186 6 (\omega_m - \omega^R)}{1 - 0.505 (\omega_m - \omega^R)} \right]^{1/2} \quad (43)$$

本文参考文献[5]已经将压力对气体的导热系数影响绘制成图,基于相对温度和相对压力两个参数查取,在查得一个比例系数后乘以常压下的导热系数就是所需的结果。

## 2 液态混合物的物性计算方法

### 2.1 液态混合物的密度计算

液态纯物质的密度按照下式计算:

$$\rho = 1\,000AB^{-1-T/T_c}n \quad (44)$$

本文参考文献[9]给出了不同物质对应的参数 A、B、T<sub>c</sub>、n。液态甲烷和乙烷在常压下的密度计算参数如表 4 所示。

表 4 液态甲烷和乙烷在常压下的密度计算参数表

组分	A	B	T <sub>c</sub>	n
甲烷	0.159 98	0.288 1	190.58	0.277 0
乙烷	0.200 87	0.273 3	305.42	0.283 3

液态混合物的密度按照下式计算:

$$\rho_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (w_i/\rho)} \quad (45)$$

Gunn-Yamada 提出按照下列公式计算液体的密度,并认为是计算饱和液体密度最精确的方法之一<sup>[6]</sup>,但并没有指出是否适应于混合物。

$$\frac{V}{V_{sc}} = V_r^{(0)}(1 - \omega\Gamma) \quad (46)$$

$$V_r^{(0)} = 0.335\,93 - 0.339\,53T_r + 1.519\,41T_r^2 - 2.025\,12T_r^3 + 1.114\,22T_r^4 \quad (0.2 \leq T_r \leq 0.8) \quad (47)$$

$$V_r^{(0)} = 1.0 + 1.3(1 - T_r)^{1/2} \ln(1 - T_r) - 0.508\,79 \times (1 - T_r) - 0.915\,34(1 - T_r)^2 \quad (0.8 < T_r < 1.0) \quad (48)$$

$$\Gamma = 0.296\,07 - 0.090\,45T_r - 0.048\,42T_r^2 \quad (0.2 \leq T_r < 1.0) \quad (49)$$

$$V_{sc} = \frac{RT_c}{p_c} (0.292\,0 - 0.096\,7\omega) \quad (50)$$

### 2.2 液态混合物的比热容计算

液态纯物质在常压下的比热容按照下式计算:

$$c_p = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (51)$$

式(51)中 c<sub>p</sub> 的单位是 J/(mol·K),本文参考文献[9]给出了不同物质对应的系数 A~D。液态甲烷和乙烷在常压下的比热容计算系数如表 5 所示。

表 5 液态甲烷和乙烷在常压下的比热容计算系数表

组分	A	B	C	D
甲烷	-0.018	1.198 2	-9.87×10 <sup>-3</sup>	3.17×10 <sup>-5</sup>
乙烷	38.332	0.410 0	-2.30×10 <sup>-3</sup>	5.93×10 <sup>-6</sup>

液态混合物的比热容按照下式计算:

$$c_{pm} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (w_i/c_{pi})} \quad (52)$$

本文参考文献[6]推荐了 Rowlinson-Bondi 法和 Sternlng-Brown 法计算液体的比热容,其基准都是同样温度下理想气体的比热容。

Sternlng-Brown 法提出了按照下式计算:

$$\frac{c_p - c_p^{(0)}}{R} = (0.5 + 2.2\omega)[3.67 + 11.64(1 - T_r)^4 + 0.634(1 - T_r)^{-1}] \quad (53)$$

式(53)中 c<sub>p</sub><sup>(0)</sup> 为同温度下理想气体比热容,其单位为 J/(mol·K)。

### 2.3 液态混合物的动力黏度计算

液态纯物质在常压下的动力黏度按照下式计算:

$$\ln \mu = A + B/T + CT + DT^2 \quad (54)$$

式(54)中 μ 的单位是 centipoise,等于 10<sup>-3</sup> Pa·s。本文参考文献[9]给出了不同物质对应的系数 A~D。液态甲烷和乙烷在常压下的动力黏度计算系数如表 6 所示。

表 6 液态甲烷和乙烷在常压下的动力黏度计算系数表

组分	A	B	C	D
甲烷	-7.380 1	319	4.79×10 <sup>-2</sup>	-1.41×10 <sup>-4</sup>
乙烷	-4.269 4	290	1.71×10 <sup>-2</sup>	-3.61×10 <sup>-5</sup>

液态混合物的动力黏度按照下式计算:

$$\mu_m^n = \left( \sum_{i=1}^n x_i \mu_i^{1/3} \right)^3 \quad (55)$$

本文参考文献[10]也提出了液体混合物动力黏度的另一混合规则,首先按照下列公式计算混合物若干参数:

$$\epsilon_m = \frac{V_{cm}^{2/3}}{(T_{cm} M_m)^{1/2}} \quad (56)$$

$$V_{cm} = \sum_i \sum_j x_i x_j V_{cij} \quad (57)$$

$$T_{cm} = \frac{\sum_i \sum_j x_i x_j T_{cij} V_{cij}}{V_{cm}} \quad (58)$$

$$V_{cij} = \frac{(V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3})^3}{8} \quad (59)$$

$$T_{cij} V_{cij} = \psi_{ij} (T_{ci} T_{cj} V_{ci} V_{cj})^{1/2} \quad (60)$$

然后按照下式计算混合液体的动力黏度:

$$\ln(\mu_m \epsilon_m) = \ln(\mu \epsilon)^{R_1} + [\ln(\mu \epsilon)^{R_2} - \ln(\mu \epsilon)^{R_1}] \times \frac{\omega_m - \omega^{R_1}}{\omega^{R_2} - \omega^{R_1}} \quad (61)$$

对于组分 1 和组分 2 的二元组合,式(61)可以简化为:

$$\ln(\mu_m \epsilon_m) = x_1 \ln(\eta \epsilon) + x_2 \ln(\eta \epsilon) \quad (62)$$

在应用公式(61)、(62)时,无论是参考流体  $R_1$ 、 $R_2$ ,还是组分 1 和组分 2,其对应的动力黏度值都不是在温度  $T$  下的计算值,而是在一个参考温度  $T \cdot T_{ci} / T_{cm}$  下的计算值。

### 2.4 液态混合物的导热系数计算

液态纯物质在常压下的导热系数按照下式计算:

$$\ln \lambda = A + B(1 - T/C)^{2/7} \quad (63)$$

本文参考文献[9]给出了不同物质对应的系数  $A \sim C$ 。液态甲烷和乙烷在常压下的导热系数计算系数如表 7 所示。

表 7 液态甲烷和乙烷在常压下的导热系数计算系数表

组分	A	B	C
甲烷	-1.097 6	0.538 7	190.58
乙烷	-1.347 4	0.700 3	305.42

液态混合物的导热系数按照下式计算:

$$\lambda_m = \left( \sum_i w_i \lambda_i^{-2} \right)^{-1/2} \quad (64)$$

本文参考文献[5-6,10]介绍了一些压力对液体的密度、比热容、动力黏度和导热系数影响的研究结果,但普遍认为压力在 4.0 MPa 以下时对液体的上述物性参数影响甚微。

### 3 计算结果的对比

运用前述的计算方法对甲烷和乙烷混合物的 4 种热物性进行了计算,并和 HYSYS 的计算结果进行了比较。在计算气态混合物的比热容修正值和导热系数修正值时,选择了公式(14)、(25);在计算液态混合物的动力黏度和导热系数时选择了公式(55)、(64)。表 8 为气态混合物的计算结果对比表(用本文计算方法的计算结果与 HYSYS 计算结果对比),表 9 为液态混合物的计算结果对比。

### 4 结论

1)使用实际介质进行缠绕管式换热器低温传热与流动的研究具有重要意义,将为我国大型 LNG 装置主低温换热器的国产化提供技术支撑。

2)对气态和液态混合物 4 种基本热物性的计算方法进行了提炼,并考虑了压力对气态混合物物性计算的影响。

表 8 气态混合物的热物性计算结果对比表

物性	计算结果										
$p/10^5 \text{ Pa}$	14.80	14.98	15.16	15.34	15.52	15.70	15.88	16.06	16.24	16.42	16.60
$T/^\circ\text{C}$	-15.71	-15.54	-15.36	-15.18	-15.00	-14.82	-14.64	-14.46	-14.28	-14.10	-13.92
$\rho_{\text{HYSYS}}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	18.45	18.69	18.93	19.16	19.41	19.63	19.88	20.12	20.35	20.60	20.82
$\rho_{\text{本文}}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	18.67	18.67	19.09	19.76	19.97	20.19	20.41	20.39	20.84	21.06	21.28
$\delta$	0.11%	-0.11%	0.85%	3.13%	2.89%	2.85%	2.67%	1.34%	2.41%	2.23%	2.21%
$\alpha_{\text{HYSYS}}/\text{kJ} \cdot (\text{kgK})^{-1}$	1.943	1.945	1.948	1.950	1.953	1.955	1.958	1.961	1.963	1.966	1.968
$\alpha_{\text{本文}}/\text{kJ} \cdot (\text{kgK})^{-1}$	2.089	2.094	2.099	2.104	2.109	2.114	2.119	2.124	2.129	2.134	2.139
$\delta$	7.51%	7.66%	7.75%	7.90%	7.99%	8.13%	8.22%	8.31%	8.46%	8.55%	8.69%
$\mu_{\text{HYSYS}}/10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
$\mu_{\text{本文}}/10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
$\delta$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{\text{HYSYS}}/\text{W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.025	0.025	0.025
$\lambda_{\text{本文}}/\text{W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
$\delta$	-4.17%	-4.17%	-4.17%	-4.17%	-4.17%	-4.17%	-4.17%	-4.17%	-8.00%	-8.00%	-8.00%

注:下角标“HYSYS”表示 HYSYS 的计算结果;下角标“本文”表示本文计算方法的计算结果; $\delta$ 为相对误差。

表 9 液态混合物的热物性计算结果对比表

物 性	计 算 结 果									
$p/10^5 \text{ Pa}$	2.05	2.27	2.49	2.71	2.93	3.15	3.37	3.59	3.81	4.03
$T/^\circ\text{C}$	-134.0	-130.8	-127.6	-124.4	-121.2	-118.0	-114.8	-111.6	-108.4	-105.2
$\rho_{\text{HYSYS}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	515.02	512.92	510.22	506.48	502.57	498.38	493.78	488.61	482.66	475.70
$\rho_{\text{本文}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	516.10	512.06	507.98	503.89	499.76	495.60	491.40	487.14	482.83	478.76
$\delta$	0.21%	-0.17%	-0.44%	-0.51%	-0.56%	-0.56%	-0.48%	-0.30%	0.04%	0.58%
$\alpha_{\text{HYSYS}}/\text{kJ}\cdot(\text{kgK})^{-1}$	2.796	2.810	2.809	2.793	2.790	2.798	2.817	2.845	2.884	2.930
$\alpha_{\text{本文}}/\text{kJ}\cdot(\text{kgK})^{-1}$	2.562	2.648	2.645	2.644	2.790	2.649	2.654	2.662	2.674	2.689
$\delta$	-5.15%	-5.77%	-5.84%	-5.33%	-5.20%	-5.33%	-5.79%	-6.43%	-7.82%	-8.23%
$\mu_{\text{HYSYS}}/10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	0.197	0.187	0.179	0.174	0.169	0.164	0.159	0.154	0.149	0.145
$\mu_{\text{本文}}/10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	0.223	0.211	0.200	0.189	0.180	0.171	0.163	0.155	0.148	0.142
$\delta$	13.20%	12.83%	11.73%	8.62%	6.51%	4.27%	2.52%	0.65%	-0.67%	-2.07%
$\lambda_{\text{HYSYS}}/\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.179	0.178	0.176	0.171	0.167	0.163	0.159	0.155	0.151	0.148
$\lambda_{\text{本文}}/\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.180	0.178	0.176	0.174	0.172	0.170	0.167	0.165	1.163	0.160
$\delta$	0.56%	0	0	1.75%	2.99%	4.29%	5.03%	6.45%	7.95%	8.11%

注:下角标“HYSYS”表示 HYSYS 的计算结果;下角标“本文”表示本文计算方法的计算结果; $\delta$ 为相对误差。

3)和 HYSYS 的计算结果进行了对比,结果表明本文计算方法可行,误差均控制在可接受范围以内。上述计算方法不仅适用于 LNG 试验用介质,也适用于实际 LNG 多组分介质的热物性计算。

4)由于目前还缺少混合物热物性的试验值数据,计算方法的不确定度还有待进一步研究。

符 号 说 明

$p$  为压力; $x$  为摩尔分数; $w$  为质量分数; $\omega$  为偏心因子; $M$  为相对分子量;下标“ $i$ 和 $j$ ”表示组分;下标“ $m$ ”表示“假”物性;下标“ $c$ ”表示临界值;下标“ $r$ ”表示相对值;下标“ $s$ ”表示指定值。

参 考 文 献

[1] 陈永东,陈学东.LNG 成套装置换热器关键技术分析[J].天然气工业,2010,30(1):96-100.  
 [2] 毕明树,窦兴华.LNG 沉浸式气化器的数值模拟[J].天然气工业,2009,29(1):109-110.  
 [3] NEERAAS B O, FREDHEIM A O, AUNAN B.Experimental shell-side heat transfer and pressure drop in gas flow for spiral-wound LNG heat exchanger[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2004,47(2):353-361.

[4] NEERAAS B O, FREDHEIM A O, AUNAN B.Experimental data and model for heat transfer, in liquid falling film flow on shell-side, for spiral-wound LNG heat exchanger[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2004,47(14/16):3565-3572.  
 [5] Technical Committee of the TEMA .Standards of the tubular exchanger manufacturers association (the 8th edition) [S].New York:TEMA,1999.  
 [6] 《化学工程手册》编辑委员会.化学工程手册:第一篇 化工基础数据[M].北京:化学工业出版社,1980.  
 [7] SINNOTT R K.化工设计[M].宋旭峰,译.4版.北京:中国石化出版社,2008.  
 [8] SCHLUNDER E U.换热器设计手册,第五卷 物理性质[M].马庆芳,马重芳,项立成,等,译.北京:机械工业出版社,1988.  
 [9] YAWS C L.Chemical properties handbook[M].北京:世界图书出版公司北京公司,1999.  
 [10] 波林 B E,普劳斯尼茨 J M,奥康奈尔 J P.气液物性估算手册:原著第 5 版[M].赵红玲,王凤坤,陈圣坤,等,译.北京:化学工业出版社,2006.

(收稿日期 2011-02-21 编辑 何 明)