

CO₂ 超临界管内冷却换热和压降关联式的比较^{*}

西安交通大学 陶于兵[☆] 吴志根 周俊杰 何雅铃 陶文铨

摘要 总结了用于计算 CO₂ 超临界状态下换热和压降的关联式,与相关文献中的实验数据进行了比较,结果表明 Pettersen 修正的换热关联式和 Yin 修正的换热关联式偏差较小,Churchill 的压降关联式偏差最小。

关键词 CO₂ 超临界冷却 换热 压降 关联式 实验数据 偏差

Comparisons of heat transfer and pressure drop correlations for in-tube cooling of CO₂ in supercritical region

By Tao Yubing[★], Wu Zhigen, Zhou Junjie, He Yaling and Tao Wenquan

Abstract Presents common heat transfer and pressure drop correlations, and compares them with experimental data from literatures. The results indicate that Pettersen's and Yin's modifications of heat transfer correlations and Churchill's pressure drop correlation have less deviation than the other correlations.

Keywords CO₂ supercritical cooling, heat transfer, pressure drop, correlation, experimental data, deviation

★ Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China

①

0 引言

在制冷空调系统中大量使用的 CFC 类工质不仅破坏臭氧层而且还会引起很严重的温室效应,为了保护环境,实现 CFC 类工质替代已成为全世界共同关注的问题。在替代工质中,CO₂ 以其良好的热物性(容积制冷量高、流体密度高、黏度低、系统压缩比小等)和对环境的友好性(ODP=0, GWP=1),越来越引起人们的重视,并在空调热泵制冷系统中得到了广泛的应用。

目前,随着对 CO₂ 作为制冷工质研究的逐渐深入,各国学者对 CO₂ 在超临界状态下的流动和换热特性进行了大量的研究,得出一些新的经验公式或对已有的关联式作了一定的修改。这些经验公式都有一定的实验不确定度、适用条件和各自的局限性。本文对 CO₂ 超临界冷却计算中常用的一

些换热和阻力关联式与一些实验数据进行了分析比较,为 CO₂ 超临界流动和换热的热力设计和数值模拟提供选择关联式的依据。

1 现有 CO₂ 超临界冷却换热和压降关联式总结

表 1 列出了文献中常采用的 CO₂ 超临界流体换热关联式,表 2 列出了 CO₂ 超临界流体压降关联式。

各关联式具体的适用条件见相应文献。

2 现有换热、压降关联式与实验数据的比较

将上述关联式与相关的实验数据^[15-16],以管径、压力、质量流速及热流密度四个参量为指标,在 20 个不同工况下对计算值与实验值进行了对比,

①[☆] 陶于兵,男,1979 年 11 月生,在读博士研究生
710049 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室
(029) 82663851 (0) 13709261365
E-mail: taoyubing@stu.xjtu.edu.cn
收稿日期:2005-01-05
修回日期:2006-02-07

表 1 CO₂ 超临界流体换热关联式

	换热关联式
Dittus-Boelter 公式(~1940) ^[1]	$Nu_{\text{f}}=0.023Re_{\text{f}}^{0.8}Pr_{\text{f}}^n$
Petukhov-Popov 公式(1968) ^[2]	$Nu=\frac{\left(\frac{f}{8}\right)RePr}{12.7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)+10.7}$
式中 f 为阻力因数。	
Gnielinski 公式(1976) ^[3]	$Nu_{\text{m}}=\frac{\frac{f}{8}(Re-1\,000)Pr}{1+12.7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)}\left[1+\left(\frac{d}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right]$
式中 d 为直径,m; l 为长度,m; f 采用下式计算	
$f=(1.82\lg Re-1.64)^{-2}$	
Pitla 公式(1999) ^[4]	$Nu_{\text{mean}}=\frac{Nu_{\text{wall}}+Nu_{\text{bulk}}}{2}$
式中 Nu_{wall} 和 Nu_{bulk} 分别为以壁面温度和流体温度为特征温度的努塞尔数,由 Gnielinski 公式计算得到; Nu_{mean} 为平均努塞尔数。	
Pettersen 的修正公式(2000) ^[5]	$Nu=Nu_{\text{m}}\left(\frac{Pr}{Pr_{\text{w}}}\right)^{0.11}$
式中 Pr_{w} 为以壁面温度为特征温度的普朗特数; Nu_{m} 由 Gnielinski 公式计算所得,计算过程中阻力因数采用 Haaland 公式:	
$f=\left\{-1.8\lg\left[\frac{6.9}{Re}+\left(\frac{\varepsilon}{3.7}\right)^{1.11}\right]\right\}^{-2}$	
其中 ε 为当量糙粒高度,m。	
Yin 的修正公式(2000) ^[6]	$Nu_{\text{m}}=\frac{\frac{f}{8}(Re-1\,000)Pr}{1+12.7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)}\left[1+\left(\frac{d}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right]$
式中 阻力因数 f 采用 Churchill 公式 ^[7] 计算(见表 2)。	

表 2 CO₂ 超临界流体压降关联式

	压降关联式
Filonenko 公式 ^[3,8]	$f=(1.82\lg Re-1.64)^{-2}$
Blasius 公式 ^[9-10]	$f=\frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}}$
Colebrook and White 公式(1938) ^[9,11]	$\frac{1}{\sqrt{f}}=-2\lg\left(\frac{2.51}{Re\sqrt{f}}+\frac{\varepsilon}{3.71}\right)$
Kuraeva-Protopopov 公式(1974) ^[12]	$f=f_0\left(\frac{\mu_{\text{w}}}{\mu_{\text{b}}}\right)^{0.22}$
式中 f_0 由 Filonenko 公式计算得到; μ_{w} 和 μ_{b} 分别为对应壁面温度和流体温度的黏度,Pa·s。	
Churchill 公式(1977) ^[7]	$f=8\left\{\left(\frac{8}{Re}\right)^{12}+\left[\left(2.457\ln\frac{1}{\left(\frac{7}{Re}\right)^{0.9}+0.27\varepsilon}\right)^{16}+\left(\frac{37\,530}{Re}\right)^{16}\right]^{-\frac{3}{2}}\right\}^{\frac{1}{12}}$
Petrov-Popov 公式(1985) ^[13]	$\xi_{\text{w}}=\xi_{0,\text{w}}\frac{\rho_{\text{w}}}{\rho_{\text{f}}}\left(\frac{\mu_{\text{w}}}{\mu_{\text{f}}}\right)^S$ $\xi_{0,\text{w}}=(1.82\lg Re_{\text{w}}-1.64)^{-2}$ $S=0.023\left(\frac{ q_{\text{w}} }{\rho u}\right)^{0.42}$
式中 ξ_{w} 为阻力因数; ρ_{w} 和 ρ_{f} 分别为对应壁面温度和流体温度的密度,kg/m ³ ; Re_{w} 为以壁面温度为特征温度的雷诺数; q_{w} 为以壁面温度为特征温度的质量流速,kg/(m ² ·s); ρ 为对应平均温度的密度,kg/m ³ ; u 为对应平均温度的速度,m/s。	
Wang and Toubert 公式(1991) ^[14]	$f=\begin{cases}\frac{64}{Re} & Re<2\,300 \\ \frac{0.316}{Re^{0.25}} & 2\,300<Re<8\,000 \\ 0.0054+\frac{0.3964}{Re^{0.3}} & Re>8\,000\end{cases}$
Haaland 公式(2000) ^[5]	$f=\left\{-1.8\lg\left[\frac{6.9}{Re}+\left(\frac{\varepsilon}{3.7}\right)^{1.11}\right]\right\}^{-2}$

图 1 给出了表面传热系数的代表性结果,图 2 给出了压降的代表性结果。图题中的数据分别代表管

径、实验管段长度、流体压力、热流密度和质量流速。

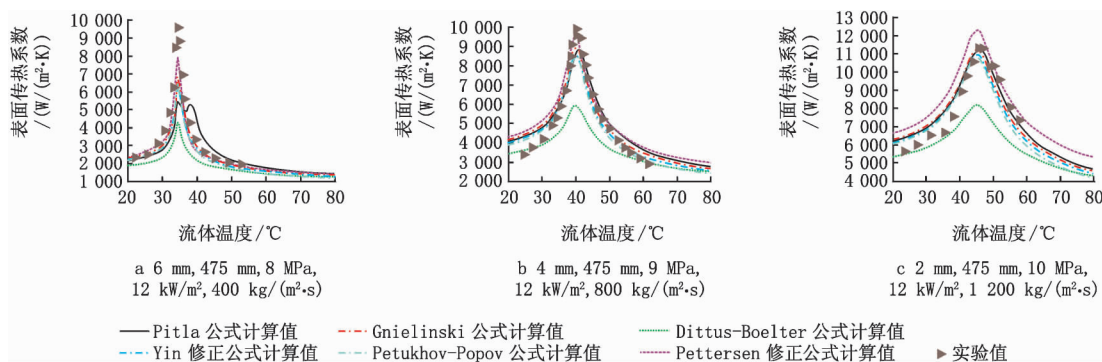


图 1 表面传热系数计算值和实验值的比较

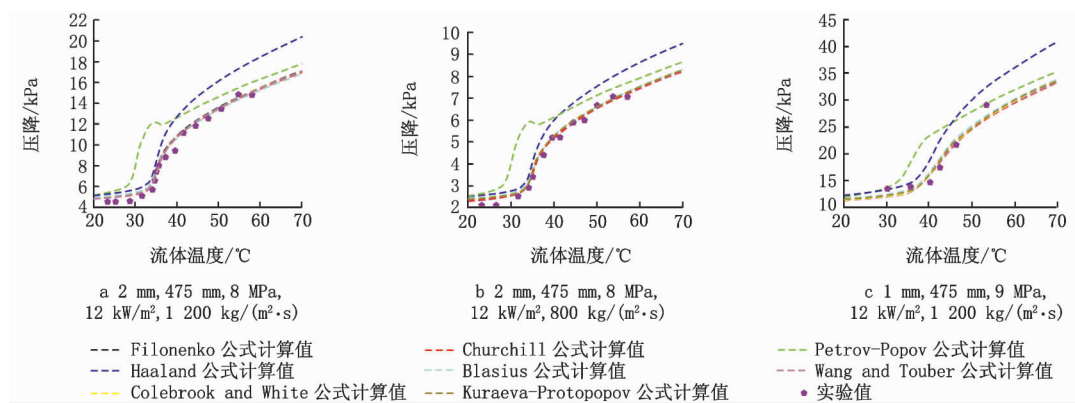


图 2 压降的计算值和实验值的比较

3 比较结果的偏差分析

从图 1,2 可以看到,在不同的工况下,用各关联式进行预测所得的结果和实验结果之间尽管都存在一定的偏差,但是在趋势上是相同的。表 3,4 给出了各关联式的偏差,其中采用了以下平均偏差指标。

代数平均偏差 σ_{ave} :

$$\sigma_{ave} = \frac{1}{n} \sum_n \frac{\alpha_c - \alpha_m}{\alpha_m} \quad (1)$$

绝对值平均偏差 σ_{abs} :

$$\sigma_{abs} = \frac{1}{n} \sum_n \left| \frac{\alpha_c - \alpha_m}{\alpha_m} \right| \quad (2)$$

式(1),(2)中 α_c 为计算值, α_m 为实验值。

由表 3 可见,当质量流速为 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, Pettersen 的修正公式偏差较小,而当质量流速为 $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, Yin 的修正公式偏差较小;而表 4 的数据表明,现有关联式对压降预测的精度

表 3 不同工况下换热关联式的偏差分析 %

工况	偏差类别	Pitla	Gnielinski	Dittus-Boelter	Yin	Petukhov-Popov	Pettersen
图 1a	σ_{ave}	-10.2	-14.7	-36.6	-19.1	-20.3	-12.2
	σ_{abs}	23.5	15.1	36.6	19.1	20.3	13.2
图 1b	σ_{ave}	4.9	3.6	-21.5	-0.9	-3.3	10.1
	σ_{abs}	9.5	11.7	22.2	8.1	8.4	11.2
图 1c	σ_{ave}	3.6	3.6	-18.8	0.4	-1.1	12.8
	σ_{abs}	6.4	8.8	18.8	8.2	8.7	12.8

表 4 不同工况下压降关联式的偏差分析

%

工况	偏差类别	Flionenko	Churchill	Petrov-Popov	Haaland	Blasius	Wang and Toubert	Colebrook and White	Kuraeva-Protopopov
图 2a	σ_{ave}	5.2	4.6	41.8	20.4	4.8	4.9	5.2	6.6
	σ_{abs}	5.5	4.9	41.8	20.4	5.3	5.2	5.4	6.9
图 2b	σ_{ave}	6.2	5.5	38.7	17.8	6.8	5.7	6.0	7.9
	σ_{abs}	6.6	6.1	38.7	17.8	7.3	6.2	6.4	8.2
图 2c	σ_{ave}	0.3	-0.6	27.0	15.7	1.6	-0.6	-0.2	1.4
	σ_{abs}	7.6	7.6	27.2	16.4	7.6	7.8	7.7	7.9

比对换热情况预测的精度要好,除了 Petrov-Popov 及 Haaland 公式外,偏差均在 10% 以下,相对而言 Churchill 公式偏差最小。

4 结论

本文总结了文献中用于计算 CO_2 超临界流动和换热的关联式,通过与可得到的实验数据的比较,发现当 CO_2 处于超临界状态时,流体质量流速大于 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, Yin 修正的换热关联式与实验数据之间吻合度较好;而当流体质量流速等于 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, Pettersen 换热关联式与实验数据之间有着最好的吻合度;对于流体流动过程中的压降计算,除了 Petrov-Popov 公式及 Haaland 公式外偏差大致相当,基本上在 5%~8% 的范围内。

参考文献

- [1] Winterton R H S. Technical notes where did the Dittus and Boelter equation come from [J]. Int J H M T, 1998, 41: 809-811
- [2] Petukhov B. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties [J]. Advances in Heat transfer, 1968(6): 508-564
- [3] Gnielinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow[J]. Int Chem Eng, 1976, 16: 359-368
- [4] Pitla S S. Heat transfer from in-tube cooling of supercritical carbon dioxide [D]. West Lafayette: Purdue University, 1999
- [5] Pettersen J, Rieberer R, Munkejord S T. Heat transfer and pressure drop for flow of supercritical and subcritical CO_2 in microchannel tubes [C] // SINTEF Energy Research Technical Report TR, 2000
- [6] Yin J M, Bullard C W, Hrnjak P S. R-744 gas cooler model development and validation[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24: 692-701
- [7] Churchill S W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes[J]. Chemical Engineering, 1977,

7: 91-92

- [8] Krasnoshchekov E A, Kuraeva I V, Protopopov V S. Local heat transfer of carbon dioxide at supercritical pressure under cooling conditions [J]. Teplofizika Vysokikh Temperature, 1969, 7(5): 922-930
- [9] 张远君. 流体力学大全[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1991: 202
- [10] Blasius H. Das Ahnlichkeitsgesets bei Reibungsvorganen in Flussigkeiten[J]. Forsch Arb Ing-Wes, 1913(134)
- [11] Colebrook C F. Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws[J]. J Inst Civil Eng, 1939, 11: 133-139
- [12] Kuraeva I V, Protopopov V S. Mean friction coefficients for turbulent flow of a liquid at a supercritical pressure in horizontal circular tubes[J]. Teplofizika Vysokikh Temperature, 1974, 12 (1): 218-200
- [13] Petrov N E, Popov V N. Heat transfer and resistance of carbon dioxide being cooled in the supercritical region [J]. Thermal Engineering (In Russian), 1985, 32 (3): 16-19
- [14] Wang H, Toubert S. Distributed and non-steady-state modeling of an air cooler [J]. International Journal of Refrigeration, 1991, 14: 98-111
- [15] Dang Chaobin, Hihara E. Cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide 1st report: numerical calculation and experimental results [G] // Paper Collection of the Refrigeration and Air-condition Association of Japan, 2003, 22 (3): 1-11
- [16] Dang Chaobin, Hihara E. Cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide 2nd report: a new correlation for heat transfer coefficient and effect of lubricant oil [G] // Paper Collection of the Refrigeration and Air-condition Association of Japan, 2003, 22 (3): 12-20

· 征订 ·

《第 13 届全国暖通空调技术信息网大会文集》

第 13 届全国暖通空调技术信息网技术交流会于 2005 年 11 月 1~3 日在厦门召开,大会文集集中反映各地方、各行业的广大设计、科研、教学和工程第一线的暖通空调专业工作者在各自工作岗位上所作出的新开拓和新成果。文集选登 100 多篇文章,分为综合、空调制冷、供暖供热、通风除尘 洁净技术、计算机网络技术、节能及其他共 7

大部分。

文集作为《暖通空调》杂志 2005 年的增刊,正式出版,476 页,定价 60 元(邮费 10 元)。订购者请与《暖通空调》编辑部联系,电话:(010)68362755,金庆平;或 88383814。地址:100044 北京市西直门外车公庄大街 19 号。

(本 刊)