



钢外护管真空复合预制直埋管道真空层热力分析^{*}

哈尔滨工业大学 那 威[☆] 邹平华

摘要 应用稀薄气体分子热运动理论,研究了真空层复合传热机理,提出了真空层当量导热系数计算方法,分析了不同真空层压力和热媒温度对真空层传热量的影响以及导热、对流和辐射传热量在真空层总传热量中所占比例和变化规律,提出优化真空保温管道保温性能的方法。试验结果与计算结果的最大偏差率为 7.9%。真空层压力应控制在 2 kPa 以下,以获得满意的保温效果。真空层压力高于 101.3 kPa 时,真空层内传热以对流传热为主;当真空层压力降低到 1 kPa 时,真空层内传热以辐射传热为主。真空层的对流传热不应被忽略。

关键词 真空保温管道 真空层 环形空间 复合传热 当量导热系数 压力

Thermal analysis of vacuum layer in steel jacketed vacuum insulated directly buried steam pipelines

By Na Wei[★] and Zou Pinghua

Abstract Based on the theory of aerothermodynamics for rarefied gas, discusses the principle of compound heat transfer in the vacuum layer. Presents a method for calculating the equivalent thermal conductivities for this layer. Analyses the effect of thermal characters on heat transfer in vacuum layer, such as vacuum pressure and temperature of steam, and discusses the percentages of conduction, convection and radiation in vacuum layer and their variability. Presents how to optimize the thermal performance of the pipelines. Results prove to be satisfactory for the maximum of deviation rate between calculated data and experimental data is 7.9%. The pressure in vacuum layer should be controlled under 2 kPa to achieve desirable insulating effects. The dominating way of heat transfer in vacuum layer is the convection when the vacuum pressure is above 101.3 kPa, and it is the radiation when the vacuum pressure is under 1 kPa. The convection in vacuum layer should not be neglected.

Keywords vacuum insulated pipeline, vacuum layer, annular space, compound heat transfer, equivalent thermal conductivity, pressure

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

0 引言

真空保温技术于 20 世纪 50 年代开始应用于空间技术、超导设备用低温液体的储藏和运输等领域,国内外在真空下稀薄空气传热计算领域已取得一定研究成果^[1-6]。德国等欧洲国家于 20 世纪 80

年代开始将真空技术应用于高温蒸汽管道保温工程^[1-2]。我国于 1995 年开始应用具有空气层的钢外护管直埋管道;2001 年开始引入钢外护管真空

☆ 那威,男,1979 年 1 月生,在读博士研究生
150090 哈尔滨工业大学二校区 223 信箱
(010) 86283342 (0) 13091434219
E-mail: nawei79@126.com

收稿日期:2005-09-12
修回日期:2005-11-08

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50378029),国家“十五”重点科技攻关计划资助项目(编号:2002BA107B02)

保温管道产品。

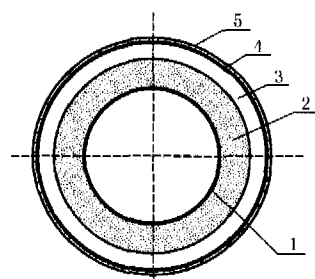
钢外护管直埋管道中设置空气层,将其抽真空后形成真空层(下文简称真空层)。真空层的作用主要是利用真空下较好的绝热性能减少直埋管道的热损失、提高直埋管道的防腐性能和监视管道运行过程中的泄漏情况。钢外护管真空复合预制直埋管道(下文简称真空保温管道)是真空保温技术应用的新领域,不同于在空间技术、超导设备用低温液体的储藏和运输等领域中所应用的中高真空(真空绝对压力小于 1 Pa),其真空度较低(真空层绝对压力高于 50 Pa,通常真空保温管道产品真空层的绝对压力控制在 1 000 Pa 左右),真空层残留较多空气,真空层环形空间的热力计算涉及到低真空条件下真空层残留稀薄空气的导热、对流和辐射传热问题,国内外尚没有关于真空保温管道热力分析和计算的研究论文发表。因此,研究真空保温管道的真空层传热机理并确定合理的真空层环形空间热力计算方法,以及分析不同真空压力条件下真空层环形空间内导热、对流和辐射传热量在总传热量中所占比例和变化规律,对于分析真空管道的换热过程和计算热损失,以及工程上提高直埋管道保温性能及优化设计都有重要的实际意义。

本文详细分析了国内外的相关资料,引入真空层当量导热系数的概念,得出了真空层在不同真空压力条件下稀薄空气的导热、对流和辐射三种传热方式复合传热的当量导热系数计算公式,用试验结果进行了验证,并分析了真空层内稀薄空气的导热、对流和辐射三种传热量在总传热量中所占比例和变化规律。本文提出的方法也适用于计算其他环形空间内空气的导热、对流和辐射三种传热方式并存的复合传热问题。

1 真空保温管道物理模型与热工性能试验^[7-9]

真空保温管道的结构如图 1 所示,保温材料常采用离心玻璃棉。

采用稳态圆管法,测试了不同热媒温度、不同真空层压力条件下真空保温管道的传热量和多层复合结构各层界面温度(或表面温度)。长度为 3 m 的



1 工作钢管 2 保温材料 3 真空层 4 钢外护管 5 防腐层

图 1 真空保温管道多层复合结构图

真空保温管道测试管段布置在高 1 m 的架子上(架子与测试管段接触部分保温良好),并置于自动控制恒温((25±1)℃)的测试室内。为了实现稳态的测试环境,利用导热油作为测试管段内的热媒,导热油沸点在 350℃以上,适合模拟真空保温管道内的高温热媒。导热油通过电加热器被加热并通过自动温度控制装置稳定在一定的温度((200±0.2)℃,(250±0.2)℃或(300±0.2)℃)。在测试管段上选取 2 个测试截面,分别为垂直于管段轴线的中心截面和距离此截面 500 mm 的平行截面。在每个测试截面上,分别在复合结构每个界面(钢外护管外表面、保温材料层外表面和工作钢管外表面)上布置 3 个温度测点;在钢外护管外表面布置 3 个热流测点。测点布置在管道的顶端、底部及与垂直方向夹角 2π/3 处,共 18 个温度测点,6 个热流测点。每一工况稳定 2~3 天后进行测量,温度测点和热流测点测试 10 次后取平均值。真空层的压力通过真空泵和压力控制装置控制。测试管段上布置精度高于 0.5℃的 PT100 热电阻测量温度测点的温度,布置热流计测量热流测点的热流密度。

2 真空层复合传热计算

如图 1 所示,真空层是在保温材料外表面和钢外护管内表面两层不同直径的同心管之间形成的环形空间。真空层当量导热系数反映真空层中残余稀薄空气的导热、对流和辐射三种传热方式的综合传热特性,计算公式如下:

$$\lambda_{dl} = \lambda + \epsilon_k \lambda + \alpha_f \quad (1)$$

式中 λ_{dl} 为真空层当量导热系数, W/(m·K); λ 为真空层导热系数, W/(m·K); ϵ_k 为真空层对流传热的附加因数; α_f 为折算辐射传热系数, W/(m·K)。

则真空保温管道的真空层传热量的计算公式如下:

$$Q_z = 2\pi\lambda_{dl} \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (2)$$

式中 Q_z 为真空层总传热量, W/m; T_1 为保温材料层外表面温度, K; T_2 为钢外护管内表面温度, K; d_1 为工作钢管中心与保温材料层外表面的距离的 2 倍, m; d_2 为钢外护管内表面直径, m。

2.1 真空层的导热系数 λ

在空间技术、超导设备用低温液体的储藏和运

输等领域中有较成熟的导热传热计算方法^[3-6,10-11]。在真空保温层中,气体的导热与分子平均自由程 $\bar{\lambda}$ 及高温壁面和低温壁面的间距尺寸 d 有关^[10-11]。

真空保温管道的真空层属于中低真空状态,真空层中残余气体的分子平均自由程 $\bar{\lambda} \ll d$,沿高、低温两壁面的径向方向尚存在温度梯度,不存在温度剧增现象。在中低真空度下真空层中残余气体的导热系数 λ 的计算公式如下^[10]:

$$\lambda = \frac{1}{4}(9\gamma - 5)\eta c_v \quad (3)$$

式中 γ 为绝热指数,空气的绝热指数为 1.403^[11]; η 为气体的黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, $\eta = 0.499\rho\bar{v}\bar{\lambda}/(1 + C/T)$, 其中 ρ 为气体密度, kg/m^3 , $\rho = 0.1203Mp/T$, M 为气体摩尔质量, kg/mol , 空气的摩尔质量为 0.02896 kg/mol ^[11], p 为真空绝对压力, Pa , T 为气体热力学温度, K , \bar{v} 为气体热运动的平均速度, m/s ; C 为肖节伦德常数, K , 对于空气 $C = 113 \text{K}$ ^[11]; c_v 为气体的比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $c_v = 717.756 \times (1 + 3.45 \times 10^{-5}T + 6.30 \times 10^{-8}T^2)$ 。

将所有气体分子的速度相加后除以分子总数,可得分子的算术平均速度 \bar{v} ,计算公式如下:

$$\bar{v} = 4.601 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (4)$$

一个气体分子与其他气体分子连续两次碰撞所走过的路程为自由程。空气分子的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 是相当多自由程的平均值,计算公式如下:

$$\bar{\lambda} = 3.107 \times 10^{-24} \frac{T}{p\sigma'^2} \quad (5)$$

式中 σ' 为气体分子直径, m , 空气分子直径为 $3.72 \times 10^{-10} \text{m}$ ^[11]。

2.2 真空层对流传热的附加因数 ϵ_k

真空层对流传热计算较复杂,国内外尚没有成熟的理论求解方法,只有靠实验获得的经验关联式计算^[10-11,13-14]。在空间技术、超导设备用低温液体的储藏和运输等领域中,真空层的绝对压力控制在 1 Pa 以下,忽略高、低温壁面间的对流传热,仅考虑辐射和导热传热。真空保温管道的真空层绝对压力通常控制在 0.05~20 kPa 范围内,属于中低真空,真空层残留空气较多,在高、低温壁面间对流传热仍然较剧烈,笔者认为不应忽略对流传热量。俄罗斯学者提出了可用普朗特数 Pr 和格拉晓夫数 Gr 为自变量构造函数以修正导热项来计算对

流传热量的方法^[12]。构造的修正因数函数 $\epsilon_k = f(Pr, Gr)$, 如下:

$$\epsilon_k = 0.062[PrGrL^3]^{\frac{1}{3}} = 0.062 \left(\frac{g\beta}{\nu a} \right)^{\frac{1}{3}} \Delta T^{\frac{1}{3}} lL \quad (6)$$

式中 L 为用于计算的空间定形尺寸, $L = (\pi r + \delta)/(d_1 + \delta)$, 其中 $r = d_1/2$, δ 为真空层厚度, m , $\delta = (d_2 - d_1)/2$; g 为自由落体加速度, m/s^2 ; β 为体积膨胀系数, $1/\text{K}$; ν 为运动黏度, m^2/s ; a 为热扩散率, m^2/s ; ΔT 为高低温壁面温差, K , $\Delta T = T_1 - T_2$; l 为特征长度, m 。特征温度取真空层的平均温度 $T_{pj} = (T_1 + T_2)/2$ 。

2.3 折算辐射传热系数 α_r

真空层环形空间内高温壁面和低温壁面的辐射传热可采用经典的无限长同心圆筒面的辐射传热公式计算^[13-14],可以认为保温材料外表面壁面和钢外护管内壁面是漫反射表面,其发射率根据文献^[13-14]确定,为了便于计算,本文将辐射传热系数折算为导热系数的形式,如下式:

$$\alpha_r = \frac{Q_r \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi(T_1 - T_2)} \quad (7)$$

$$\text{式中 } Q_r = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{l \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]} \quad (8)$$

式中 Q_r 为单位长度管道真空层环形空间辐射传热量, W/m ; A_1 为保温材料层外表面面积, m^2 , 即环形空间内表面面积; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; l 为管道长度, m ; ϵ_1 为保温材料层外表面发射率, $\epsilon_1 = 0.9$ ^[13-14]; ϵ_2 为钢外护管内表面发射率, $\epsilon_2 = 0.09$ ^[13-14]; A_2 为钢外护管内表面面积, m^2 , 即环形空间外表面面积。

3 算例与试验结果分析

真空保温管道的工作钢管和钢外护管尺寸分别为 DN100 和 DN300,保温材料采用离心玻璃棉,厚度为 70 mm。表 1 给出了当热媒温度分别为 200, 250 和 300 °C,真空层绝对压力分别为 1, 2, 5, 10 和 101.3 kPa 时,单位长度管道真空层传热量的计算值与试验值的对比及导热、对流和辐射传热量在真空层总传热量中所占比例。

从表 1 可以看出,当热媒温度分别为 200, 250

表 1 不同热媒温度和真空压力条件下真空层传热量的计算值和试验值的对比及
导热、对流和辐射传热量在真空层总传热量中所占比例

热媒温度/℃	真空绝对 压力/kPa	真空层传热量				导热、对流和辐射传热量在真空层总传热量中所占比例					
		试验值/ (W/m)	计算值/ (W/m)	偏差/ (W/m)	偏差率/%	导热传热 量/(W/m)	对流传热 量/(W/m)	辐射传热 量/(W/m)	导热传热量 所占比例/%	对流传热量 所占比例/%	辐射传热量 所占比例/%
200	1	51.6	50.7	0.9	1.7	14.2	9.9	26.6	28.0	19.5	52.5
	2	57.7	55.7	2.0	3.5	14.0	15.5	26.2	25.1	27.8	47.1
	5	67.9	62.7	5.2	7.7	12.9	25.7	24.1	20.6	41.0	38.4
	10	71.2	66.6	4.6	6.5	11.3	34.6	20.7	16.9	52.0	31.1
	101.3	70.7	73.1	-2.4	-3.4	5.0	59.4	8.7	6.9	81.2	11.9
250	1	75.8	72.3	3.5	4.6	19.4	13.9	39.0	26.9	19.2	53.9
	2	80.9	78.8	2.1	2.6	19.1	21.5	38.2	24.2	27.3	48.5
	5	96.2	88.6	7.6	7.9	17.6	36.1	34.9	19.9	40.7	39.4
	10	96.5	93.4	3.1	3.2	15.3	48.2	29.9	16.4	51.6	32.0
	101.3	97.5	99.0	-1.5	-1.5	6.5	80.7	11.8	6.6	81.5	11.9
300	1	102.6	99.6	3.0	2.9	25.5	18.2	55.9	25.6	18.3	56.1
	2	108.7	110.0	-1.3	-1.2	25.5	28.7	55.8	23.2	26.1	50.7
	5	133.0	125.3	7.7	5.8	24.0	48.5	52.8	19.2	38.7	42.1
	10	136.1	134.8	1.3	1.0	21.3	67.5	46.0	15.8	50.1	34.1
	101.3	152.1	152.9	-0.8	-0.5	9.8	124.0	19.1	6.4	81.1	12.5

和 300 ℃, 真空层的真空绝对压力分别为 1, 2, 5, 10 和 101.3 kPa 时, 采用本文方法的计算结果与试验值的偏差较小, 最大为 7.7 W/m, 最大偏差率为 7.9%; 最小偏差为 -0.8 W/m, 最小偏差率为 -0.5%; 平均偏差率为 2.7%。计算值与试验值拟合程度较好, 证明采用本文方法计算真空保温管道真空层的传热是可行的。

从表 1 还可以看出, 单位长度真空保温管道的真空层传热量随真空压力的提高而增大。当真空压力从 101.3 kPa 降低到 5 kPa 时, 真空层的传热量降幅较小, 对应热媒温度 200, 250 和 300 ℃, 降幅分别为 4.0%, 1.3%, 12.6%; 真空层压力在 5 kPa 以下时, 换热量的降幅开始增大, 当真空压力从 5 kPa 降到 2 kPa, 对应热媒温度 200, 250 和 300 ℃, 降幅分别为 15.0%, 15.9%, 18.3%; 当真空压力从 2 kPa 降到 1 kPa, 传热量降幅分别为 9.0%, 5.3%, 4.6%。因此, 真空层压力控制在 2 kPa 以下, 真空保温管道的保温效果会有明显提高。

以热媒温度为 250 ℃ 的情况为例, 从表 1 可以看出, 当真空层压力为 101.3 kPa 时, 真空层内对流传热量远高于导热传热量和辐射传热量, 真空层内传热以对流传热为主。随着真空层压力的降低, 对流传热量所占比例大幅下降, 导热传热量所占比例有所提高, 辐射传热量所占比例有较大提高。当

真空层压力为 2 kPa 时, 导热传热量和对流传热量基本持平, 辐射传热量所占比例较高。当真空层压力为 1 kPa 时, 辐射传热量所占比例已超过 50%, 真空层内传热以辐射传热为主, 对流传热量所占比例仍达到 19.2%, 对流传热不应被忽略。当热媒温度为 200 ℃ 和 300 ℃ 时, 真空层内导热、对流和辐射传热量在总传热量中所占比例也有类似的规律。

因此, 工程上进一步优化真空保温管道保温性能的途径是一方面将真空层压力控制在 2 kPa 以下, 整体降低真空层的传热量; 另一方面通过增加反射屏或反射层等方法来降低真空层内高、低温壁面的发射率以降低真空层内辐射传热量, 从而有效降低真空保温管道真空层的传热量(当真空层压力为 2 kPa 或更低时, 真空层传热以辐射传热为主)。

4 结论

4.1 采用本文方法的计算结果与试验值的拟合程度较好, 最大偏差率为 7.9%, 最小偏差率为 -0.5%, 证明本文方法是可行的。

4.2 单位长度真空保温管道的真空层传热量随真空层压力的降低而降低。当真空绝对压力从 101.3 kPa 降到 5 kPa 时, 真空层传热量的平均降幅为 6.0%; 从 5 kPa 降到 2 kPa 时, 传热量平均降幅为 16.4%; 从 5 kPa 降到 1 kPa 时, 传热量平均

降幅为 22.7%。真空层压力应控制在 2 kPa 以下,以获得满意的真空保温管道保温性能。

4.3 随着真空层压力的降低,导热传热量在真空层总传热量中所占比例有所提高,对流传热量所占比例大幅下降,辐射传热量所占比例有较大提高。真空层压力为 101.3 kPa 时,真空层内传热以对流传热为主;当真空层压力降到 1 kPa 时,真空层内传热以辐射传热为主。中低真空度下真空保温管道真空层空气环形空间的传热计算中,对流传热不应被忽略。

4.4 工程上可通过增加反射屏等方法降低真空层内高、低温壁面的发射率,以降低真空保温管道真空层内辐射传热量,从而进一步优化真空保温管道保温性能。

4.5 本文提出的真空保温管道真空层热力计算方法也适用于其他中低真空度下空气层环形空间的导热、对流和辐射三种传热方式并存的复合传热问题。

参考文献

- [1] Anon. Vacuum-jacketed tubing: past, present, and future[J]. Journal of Petroleum Technology, 1999, 51(5):65-66
- [2] Bonn J. Vacuum insulated pipe seeks increased use with LNG[J]. Pipe and Gas Journal, 2004, 231(11):78-80
- [3] Nemanic V. Vacuum insulation panel[J]. Vacuum, 1995, 46: 839-842
- [4] Collins R E, Simko T M. Current status of the science and technology of vacuum glazing[J]. Solar Energy, 1998, 62(3):189-213
- [5] Smith D M, Maskar A, Boes U. Aerogel-based thermal insulation [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998(225):254-259
- [6] Gerhold J. Properties of cryogenic insulants [J]. Cryogenics, 1998, 38:1063-1081
- [7] 国家技术监督局. GB 10296—88 绝热层稳态热传递特性的测定 圆管法[S]. 北京:中国标准出版社, 1989
- [8] 国家技术监督局. GB/T 17357—1998 设备及管道绝热层表面热损失现场测定 热流计法 [S]. 北京:中国标准出版社, 1998
- [9] 中华人民共和国建设部. CJ/T 140—2001 供热管道保温结构散热损失测试与保温效果评定方法 [S]. 北京:中国标准出版社, 2001
- [10] 徐成海. 真空低温技术与设备[M]. 北京:冶金工业出版社, 1995;2, 14-20
- [11] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1995;2, 26-54
- [12] Сазонова и др Р М. Бесканальные теплопроводы Расчет и проектирование Справочник [М]. Киев: Будівельник, 1985;8-10
- [13] 卞伯绘. 辐射换热的分析和计算[M]. 北京:清华大学出版社, 1988;92-156, 362-364, 318-337
- [14] Siegel R, Howell J R. Thermal Radiation Heat Transfer [M]. 2nd ed. Hightstown: Hemisphere and McGraw Hill, 1981;162-163, 211, 606, 610-612

· 会讯 ·

北京市土木建筑学会第 1 届暖通空调专业委员会学术年会召开

为了进一步推进北京市暖通空调设计行业的技术交流,由北京市土木建筑学会暖通空调专业委员会主办、空研工业株式会社协办的北京市土木建筑学会第 1 届暖通空调专业委员会学术年会于 2006 年 1 月 6 日在京召开。

应邀参加此次年会的有在京的设计单位、开发商、生产厂家的代表 300 多人。

中国建筑学会暖通空调专业委员会副主任委员那景成,中国制冷学会空调热泵专业委员会副主任委员、北京市土建学会理事长吴德绳,中国建筑学会暖通空调专业委员会副主任委员、中国工程院院士江亿教授,北京市土木建筑学会暖通空调专业委员会主任委员曹越总工,以及有关教学、科研、设计与管理的专家学者出席了年会。

本届年会共有参会代表的 43 篇论文收入论文集。9 位代表进行了年会的主题演讲,清华大学江亿院士作了《从大型公共建筑节能诊断谈改进暖通空调系统设计》、北京市建筑设计研究院曹越总工作了《提高供暖系统自动化水平

降低采暖燃料消耗》的报告;中国建筑科学研究院空调所邹瑜研究员作了《国家标准〈地源热泵系统工程技术规范〉GB 50366—2005 编制要点》的报告;北京市建筑设计研究院孙敏生总工作了《北京地区采暖冷风渗透耗热量确定方法的分析》的报告;中国建筑设计研究院潘云钢总工作了《拉萨火车站采暖系统对太阳能的利用》的报告、北京建筑工程学院范贇作了《空调系统分区和分区界限影响因素分析》的报告;清华大学夏春海作了《Commissioning 在变风量改造工程中的应用》的报告、清华大学刘焯作了《北京市〈公共建筑节能评审标准〉应用》的报告;北京建筑工程学院王随林教授作了《新型低温热水辐射供暖地板构造热过程研究》的报告。代表的发言紧紧围绕节能、新规范新标准和创新技术展开,精彩并富有前瞻性,得到与会代表的热烈欢迎。

其间,空研工业株式会社、约克国际(北亚)有限公司等参会企业进行了现场的技术交流。

(本刊特约通讯员 张杰)