

热网管道金属围护表面 比辐射率的测量研究

张才根 王鸿禧 吴应生 应月芬

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文分析了热网管道围护表面比辐射率的大小对传热状态及热损失的影响,并作了实验观测。根据红外测温的特点,提出了用“等效温度法”测量金属围护表面比辐射率的方法。

一、引 言

比辐射率是工程传热、特别是辐射传热问题中最基本的参数之一。例如,在用“表面温度法”测量热网管道表面的热损失时,一般应测出该表面的比辐射率;采用部分能量法的红外测温仪或热像仪测量热网管道表面真实温度 T 时,也要进行比辐射率的修正。

围护表面的比辐射率与热网管道的保温技术有密切联系。在自然对流传热过程中,即使在常温下,辐射换热也占有不可忽略的比重。例如在一般热网管道表面的热损失中,辐射换热的比重可达 50% 左右^[1]。在燕山石化总公司热网管道保温技术改造工作中,我们对直径为 529 mm 的蒸气管道表面的热损失进行了测试,结果表明,对油毛毡玻璃布涂漆的围护结构,当环境空气温度 $T_0 = 20.5^\circ\text{C}$, 管道表面温度 $T = 30.5^\circ\text{C}$ 时,辐射换热所占的比重为 66% (测试条件: 风速小于 0.5 m/s, 无日照)。对铝合金围护结构,在表面有薄氧化层及灰尘的情况下,辐射换热的比重占 35% 左右^[2]。输热管道围护结构比辐射率的大小不仅能改变对流换热与辐射换热的比例,而且对热网管道表面的传热状态及热损有影响。

关于物体比辐射率的分析及测量方法,不少论著中都有介绍^[3~7],本文仅叙述我们对金属围护所采用的测试方法及测量结果。

二、围护结构比辐射率对表面传热状态的影响

文献[8]指出,单位长度水平圆管通过管道保温层散失的热流 Q 为

$$Q_1 = \frac{2\pi\lambda(T_0 - T)}{\ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1}}, \quad (1)$$

式中 λ 为隔热材料的导热系数, T_0 为管道内壁温度, T 为保温层表面温度, γ_1 和 γ_2 各为蒸汽管道及保温层半径, 见图 1。

通过水平圆管保温层单位长度表面散逸的热流包括对流热损及辐射热损, 根据“表面温度法”, 其热流 Q 的计算式为

$$Q_2 = 2\pi\gamma_2 [\alpha(T - T_a) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_a^4)], \quad (2)$$

且

$$Q_1 = Q_2 = Q, \quad (3)$$

上式中 $\sigma = 4.9 \times 10^{-8} \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$, α 为对流换热系数。

当热网管道围护表面比辐射率变化时, 其表面温度 T 及热流 Q 发生的变化可以从热流 Q 对 ε 的求导中看出。由式(1)得

$$\frac{dQ_1}{d\varepsilon} = -\frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1}} \frac{dT}{d\varepsilon}, \quad (4)$$

图 1 通过水平圆管的一维径向导热图

由式(2)得

$$\frac{dQ_2}{d\varepsilon} = 2\pi\gamma_2 \left[(\alpha + 4\varepsilon\sigma T^3) \frac{dT}{d\varepsilon} + \sigma(T^4 - T_a^4) \right], \quad (5)$$

由于式(3), 有 $\frac{dQ_1}{d\varepsilon} = \frac{dQ_2}{d\varepsilon} = \frac{dQ}{d\varepsilon}$, 再利用式(4)、(5), 得

$$\frac{dT}{d\varepsilon} = -\frac{\gamma_2\sigma(T^4 - T_a^4)}{\frac{\lambda}{\ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1}} + \gamma_2(\alpha + 4\varepsilon\sigma T^3)}, \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{d\varepsilon} = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1}} \cdot \frac{\gamma_2\sigma(T^4 - T_a^4)}{\frac{\lambda}{\ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1}} + \gamma_2(\alpha + 4\varepsilon\sigma T^3)}. \quad (7)$$

显然, $\frac{dT}{d\varepsilon} < 0$, $\frac{dQ}{d\varepsilon} > 0$ 。这表明当围护结构表面比辐射率 ε 降低时, 保温层表面温度将升高, 但热损失将减少。

下面以 $\phi 529 \text{ mm}$ 蒸汽管道保温层围护结构为例进行计算, 从数值结果可以看到: 当围护由油毛毡玻璃布涂漆($\varepsilon = 0.85$)改为 0.7 mm 厚的铝合金板($\varepsilon = 0.28$)后, 表面引起温升, 热损随之减小。

设 $\gamma_1 = \frac{0.529}{2} \text{ m}$, $\gamma_2 = \frac{0.78}{2} \text{ m}$, $T_0 = 300^\circ\text{C}$, $T_a = 20.5^\circ\text{C}$, $\lambda = 0.06 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha = 4.76 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 当 $\varepsilon = 0.85$ 时, 对式(1)和式(2)进行迭代运算, 求得

$$T = 31.94^\circ\text{C}, \quad Q = 260.15 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h}).$$

当 $\varepsilon = 0.28$ 时, 用同样的方法可以求得

$$T = 37.06^\circ\text{C}, \quad Q = 255.18 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h}).$$

这表明, 对上述设定参数的保温管道, 当围护结构的比辐射率由 0.85 降为 0.28 后, 温度升高 5.12°C , 热损减少 2% 左右。

我们采用岩棉隔热材料作保温层, 在 $\phi 529 \text{ mm}$ 管道上进行了中间试验, 用 HD-400 型红外测温仪观察到了温升现象, 数据如表 1 所示。

表 1

日 期	测 量 对 象	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	测 试 条 件
1983.5.20	油毛毡玻璃布涂漆围护	20.5	32.5	管道外侧面 90° 处, 风速小于 0.5 m/s
1983.5.21	铝合金围护	21	37	管道外侧面 90° 处, 轴向 5 点平均值, 风速为 0.5 m/s

三、等效温度法测比辐射率

物体比辐射率的大小除了与物质的结构、物理化学性质、温度等有关外, 在很大程度上还取决于物体的表面状态, 即表面的粗糙度、氧化程度、污染和损伤情况等。一般说来, 室温下表面状态对非金属材料的比辐射率的影响不明显, 而表面状态对金属材料比辐射率的影响却非常大^[3, 4]。热网管道保温层采用金属围护(例如铝合金、镀锌铁皮), 由于表面氧化层厚薄不匀, 所沾灰尘数量不同, 表面损伤不一, 因而比辐射率变化较大。我们采用下面的“等效温度法”来测量比辐射率。在现场条件下, 由于金属围护结构表面温度比环境温度高得多, 这样做是可行的。

根据文献[2]中式(5、6、7), 将积分光谱区 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 取为 $0 \sim \infty$, 得

$$\varepsilon T^4 + (1 - \varepsilon) T_b^4 = T_e^4, \quad (8)$$

即

$$\varepsilon (T^4 - T_b^4) = T_e^4 - T_b^4, \quad (9)$$

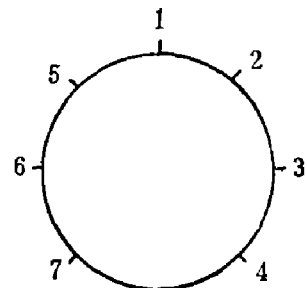
因而

$$\varepsilon = \frac{T_e^4 - T_b^4}{T^4 - T_b^4}. \quad (10)$$

上式中 T 为被测点表面真实温度(K), T_b 为被测点表面所受的环境辐射等效黑体温度(K), T_e 为包括被测点自身发射的辐射及其反射的环境辐射在内的等效黑体温度(K)。当 $T_b = T_a$ (T_a 为环境空气温度)时, 则

$$\varepsilon = \frac{T_e^4 - T_a^4}{T^4 - T_a^4}. \quad (11)$$

我们对安装一个月、表面有薄氧化层并落有一层灰尘的铝合金围护, 用 HD-400 型红外测温仪按上述“等效温度法”进行 ε 测试。真实温度 T 是仪器对准贴在金属围护上的一小块胶纸(此胶纸是热流计测量热流时用的一种两面沾胶的薄纸, 在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 光谱区内, 测得胶纸的 $\varepsilon = 0.94$)、进行 ε 和 T_b 修正后测得的, T_e 是仪器对准胶纸旁的金属围护、在 $\varepsilon = 1$ 时测得的, T_a 是用水银温度计测量的, 然后按式(11)求 ε 。对一横截面的 ε 测试结果见表 2, 测点位置分布如图 2 所示。

图 2 ε 测点位置

在铝合金围护表面去掉灰尘后又测量两点, 得 $\bar{\varepsilon} = 0.16$, 这说明了灰尘污染对 ε 的影响。

由于难以严格描述表面条件, 所以文献资料中提供的金属辐射性质的数据可能相差很大^[3]。上述方法提供了一种现场测试热网管道金属围护比辐射率的方法, 此法简单、方便、

表 2

测 点	$T(^{\circ}\text{C})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$T_a(^{\circ}\text{C})$	ε
1	42.5	27.0	21	0.258
2	39.5	25.7	21	0.237
3	38.2	25.2	21	0.228
4	33.8	24.8	21	0.284
5	40.3	25.4	21	0.211
6	38.2	25.4	21	0.240
7	34.7	24.8	21	0.264
平 均				0.246

实用。

致谢——徐玲同志参加了部分工作,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 范洽新,工程传热原理,化学工业出版社,1982.
- [2] 张才根等,热网管道保温技术论文选,能源出版社,1984,190.
- [3] 王补宣,工程传热传质学(上册),科学出版社,1982.
- [4] 奚同庚,无机材料热物性学,上海科学技术出版社,1981.
- [5] 葛新石等,太阳能利用中的光谱选择性涂层,科学出版社,1980.
- [6] 张幼文、张才根,物理学报, **29** (1980), 829.
- [7] 张才根,物理学报, **31** (1982), 1191.
- [8] 杰姆斯·苏赛克(俞佐平等编译),传热学,人民教育出版社,1980

MEASUREMENT AND STUDY OF EMISSIVITY OF METAL SURFACE SURROUNDING THE STEAM PIPE

ZHANG CAIGEN, WANG HONGXI, WU YINSHEN, YING YUEFEN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The effect of the emissivity of the surface surrounding the steam pipe on the heat-transfer and heat-loss is analysed, and the experimental observation is made. An "Equivalent Temperature" measuring method is presented in this paper for the measurement of the surface emissivity of the metal surroundings.