

环境辐射对热网管道辐射换热的影响

张才根 王鸿禧 应月芬

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文应用环境辐射等效黑体温度的概念,研究了环境辐射对热网管道辐射换热的影响。所得实验结果与理论解释相吻合。

一、引 言

在空气环境里,热网管道与周围空气发生对流换热,也与周围环境物体发生辐射换热。即使在常温下,辐射换热也是不可忽略的。在燕山石油化学总公司热网管道保温技术改造工作中,我们用 HD-400 型红外测温仪对正在进行工程试验的向阳化工厂 1619 m ϕ 529 mm 蒸气管道的热损进行测试。对于改造前的油毛毡玻璃布涂漆复合围护,一月(环境空气温度 $T_a=2.2^\circ\text{C}$)和八月($T_a=21.6^\circ\text{C}$)测得的辐射换热所占的比例分别为 53.1% 和 58.4%;对于改造后的铝合金围护,十月($T_a=15^\circ\text{C}$)测得的辐射换热的比例为 32.7%^[1]。

文献[2]指出,物体表面由于与围周其它物体和介质相互辐射、吸收而失去的“净辐射热流密度”为

$$q_r = E - A_r G_r \quad (1)$$

式中 E 为物体的辐射通量密度, A_r 为物体的吸收率, G_r 为周围环境中其它物体发射的辐射落到物体上的总的辐照度。

在室内,人们在计算物体与周围环境物体发生辐射换热时所失去的“净辐射热流密度” q_r 时,通常都采用环境空气温度 $T_a(^{\circ}\text{C})$ 这一参数,即式(1)可写为:

$$q_r = \varepsilon \sigma [(T + 273)^4 - (T_a + 273)^4], \quad (2)$$

式中 T 为物体温度($^{\circ}\text{C}$); ε 为物体的比辐射率, $\varepsilon = A_r$; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。

由于向阳化工厂 1619 m ϕ 529 mm 蒸气管道地处山区,小气候影响复杂,而且周围地物目标的几何形状、比辐射率、表面温度、与被测管道的距离等各不相同,并有其它蒸气管道、物料管道纵横交错,环境辐射十分复杂,这样就很难简单地用式(2)来描述热网管道的辐射换热。

二、实 验

对形状规则、表面温度均匀的朗伯体(黑体或灰体),通常都采用“角系数”或辐射网络法

本文 1985 年 2 月 1 日收到。

来描述环境辐射对辐射换热的影响^[2,3], 或者用辐射计对周围物体扫描取平均温度来描述环境辐射。在文献 [4]、[5] 中, 我们把落到物体上的总的环境辐照度用温度为 T_b 的等效黑体辐射通量密度来表示, 并给出了 T_b 的测量方法。于是, 式 (1) 可改写为

$$q_r = \epsilon\sigma [(T + 273)^4 - (T_b + 273)^4], \quad (3)$$

式中 T_b 称为环境辐射等效黑体温度($^{\circ}\text{C}$) (简称环境辐射温度)。

为考察环境辐射对热网管道辐射换热的影响, 按照文献 [5] 的方法, 我们采用一块正反面比辐射率分别为 $\epsilon_1=0.94$ 、 $\epsilon_2=0.47$ 的辐射参考板, 在工程试验前后选择了几个横截面, 进行 T_b 沿蒸气管道径向分布的实验测量。

把辐射参考板放在被测目标处, 用 HD-400 型红外测温仪 (测温范围 $-20\sim+400^{\circ}\text{C}$, 视场角 2.35° , 响应时间 $1/4\text{s}$, 噪声等效温差 $\text{NETD}\leq 0.1^{\circ}\text{C}$, $4\frac{1}{2}$ 位平板式荧光数码管显示温度读数, 末位 0.1°C) 分别测出正面 (比辐射率为 ϵ_1) 和反面 (比辐射率为 ϵ_2) 的等效黑体温度 T_{e1} ($^{\circ}\text{C}$) 和 T_{e2} ($^{\circ}\text{C}$), 再根据测温仪的 $V-T$ 分度曲线求得对应于 T_{e1} 、 T_{e2} 的电压 $V(T_{e1})$ 、 $V(T_{e2})$ 。根据文献 [5] 中的式 (15), 有

$$V(T_b) = \frac{V(T_{e2}) - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} V(T_{e1})}{1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}, \quad (4)$$

由式 (4) 可求得 $V(T_b)$, 进而由 $V-T$ 分度曲线求得 T_b ($^{\circ}\text{C}$)。当 T_b 、 T_{e1} 、 T_{e2} 相差不大时, T_b 可表示为

$$T_b \approx \frac{T_{e2} - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} T_{e1}}{1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}. \quad (5)$$

试验中, 各测点位置分布见图 1。部分测试结果见表 1。

第一次测试: 1983 年 8 月 29 日, 晨 6:30, 对某段改造前管道进行测试。从测试结果求得管道横截面 T_b 的平均值为 $\bar{T}_b=26.1^{\circ}\text{C}$ 。第二次测试: 1983 年 8 月 30 日, 晨 5:20, 对某段改造前管道进行测试。求得 $\bar{T}_b=14.1^{\circ}\text{C}$ 。第三次测试: 1983 年 10 月 12 日, 晚 7:20, 对某段改造后管道进行测试。求得 $\bar{T}_b=9.3^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 T_b ($^{\circ}\text{C}$) 的测试结果
Table 1 Test results of T_b ($^{\circ}\text{C}$)

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
第一次	22.6	23.1	22.2	24.8	25.1	27.9	36.4	26.7
	测试条件: $T_a=21.6^{\circ}\text{C}$							
第二次	-7.0	1.4	9.0	20.5	24.1	26.8	29.3	9.9
	测试条件: $T_a=20^{\circ}\text{C}$							
第三次	-10.0	-5.0	13.9	15.2	17.4	18.4	21.1	1.1
	测试条件: $T_a=9.4^{\circ}\text{C}$							

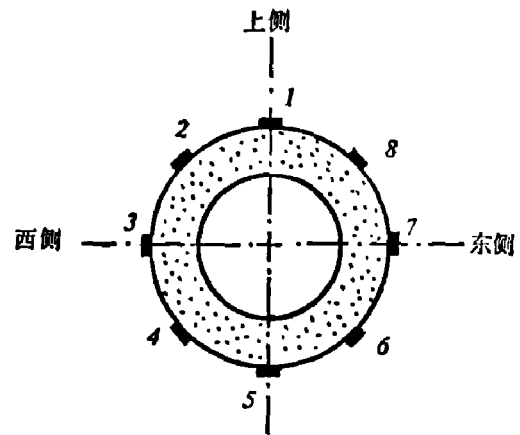


图 1 测量 T_b 的测点位置分布
Fig. 1 The distribution of the tested points for T_b

上述结果表明：(1) 环境辐射等效黑体温度 T_b 沿管道横截面的分布往往是不均匀的。当管道上方为天空背景时， T_b 较低(如第二、第三次测试中的位置 1)。由于该管道东侧有另一条保温较差的 $\phi 529$ mm 蒸气管道，因此在位置 7 测得的 T_b 值最高。(2) 由于周围环境物体不同，测得的 T_b 沿管道横截面的平均值 \bar{T}_b ，或比环境空气温度 T_a 高(第一次测试)、或比它低(第二次测试)或相近(第三次测试)。可见，在研究物体的辐射换热时，不能简单地用 T_a 代替 T_b 。

根据红外测温方法的特点，在计算辐射换热时，为避开 ε 引起的麻烦，可用测量等效黑体温度 T_b 的方法来求 $q_r^{[1]}$ ，则式 (3) 可改写为：

$$q_r = \sigma [(T_s + 273)^4 - (T_b + 273)^4] \quad (6)$$

当 $T_b = T_a$ 时，

$$q_r = \sigma [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (7)$$

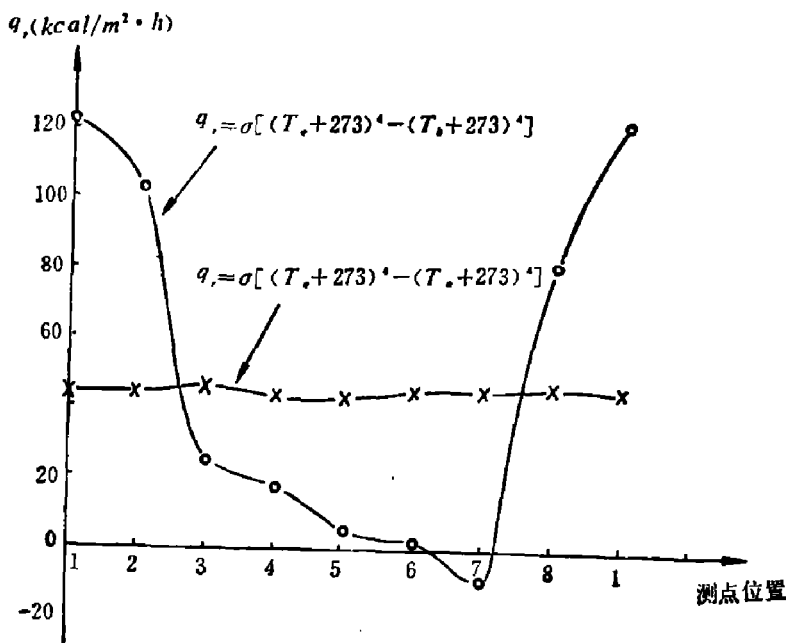


图 2 q_r 沿管道横截面分布

Fig. 2 The distribution of q_r in a cross section of the pipe.

这是由于东侧有另一条保温较差的 $\phi 529$ mm 蒸气管道，因而此处管道表面不仅没有通过辐射换热失去能量，反而得到了能量。这些结果比按式 (7) 求得的结果更符合实际情况。

下面我们根据 1983 年 10 月 12 日、晚 7:20 时、 $T_a = 9.4^\circ\text{C}$ 以及对某段热网管道测得的 T_a 、 T_b 沿管道横截面分布值(其中 T_b 见表 1 第三次测试)，分别用式 (6)、(7) 计算 q_r 沿管道横截面的分布，结果见表 2 及图 2。

表 2 及图 2 说明，按式 (6) 求得的 q_r 沿管道横截面的分布极不均匀，上侧的 q_r 最大，约为其截面平均值的三倍。这是由于管道上方是天空冷背景，致使管道上侧表面失去的净辐射热流密度要大得多。相反，在管道东侧， q_r 为负值，这

表 2 q_r 计算值

Table 2 Calculated values of q_r

位 置	1	2	3	4	5	6	7	8
T_a ($^\circ\text{C}$)	19.0	18.9	19.2	18.7	18.7	19.0	19.1	19.3
q_r [式(6)] (kcal/m ² ·h)	122.0	103.0	25.2	16.7	5.5	2.9	-9.8	81.1
q_r [式(7)] (kcal/m ² ·h)	44.6	44.1	45.6	43.1	43.1	44.6	45.0	46.0

三、结 论

初步实验结果表明,在研究环境辐射对辐射换热的影响时,应用等效黑体温度的概念,把落到物体上的总环境辐照度用温度为 T_0 的等效黑体辐射通量密度来表示,实验结果与理论解释就相当吻合了。

致谢——本文在写作过程中,曾得到清华大学任泽霈先生、中国科学院上海硅酸盐研究所奚同庚先生及燕山石化总公司动力处程宗颐同志的鼓励和帮助,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 张才根、王鸿禧、吴应生,红外测温仪对输热管道表面热损的测试方法及结果,应用科学学报,待发表。
- [2] 王补宣,工程传热传质学(上册),科学出版社,1982。
- [3] J. R. 威尔蒂,任泽霈、罗禄庵等译,工程传热学,人民教育出版社,1983。
- [4] 张才根、张幼文,物理学报,30(1981),953。
- [5] 张才根,物理学报,31(1982),1191。

EFFECT OF THE ENVIRONMENTAL RADIATION ON THE RADIATION HEAT TRANSFER OF THE STEAM PIPE

ZHANG CAIGEN, WANG HONGXI, YING YUEFEN
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The effect of the environmental radiation on the radiation heat transfer of steam pipe is studied using the concept of the equivalent blackbody temperature of the environmental radiation. Experimental results agree well with the theoretical analysis.