

# 蒸汽管道的经济保温工程计算

张夏平 叶璧如

(化工与生化工程系)

## 摘 要

本文在文〔4〕所提及概念和推导出佣\*经济保温工程计算简便修正公式的基础上,进行蒸汽输热管道的经济保温工程计算,并与含经济保温工程计算比较,结果表明佣经济保温工程计算更为科学、合理。

**关键词** 佣经济、保温工程、蒸汽管道

## 一、前 言

保温工程是一门综合性的学科,它对于使用设备与管道维持工艺条件及减少热损失起着重要的作用,其计算方法已由经验性的表面温度法或限制热损失法,转为采用从经济角度来确定最佳保温层厚度的含经济法<sup>〔1〕</sup>。但是,这只是以热力学第一定律为理论基础来评价减少热损失的经济价值。确定热价时,没有考虑不同品位的热能在质量上的区别,只按焦耳论价,确定的保温层厚度,通常还是不能达到最合理、最经济的目的。

由于保温对象不同,被保温的流体介质温度,可在很大范围内变动,热能的质量不同,其价值必然不同。因此,在保温工程计算中为正确衡量热能的质量,必须引入佣的概念。将佣分析的观点应用于保温工程设计,在国内外已引起普遍重视<sup>〔2,3〕</sup>,国内也正处于研究开发阶段。本文应用文〔4〕提出的佣经济保温工程计算的修正公式,结合某工业热电站的热平衡测定数据,进行各种条件下蒸汽输热管道的佣经济保温层厚度及经济效益等有关数据的计算,以进一步论证佣经济保温工程计算方法的正确性。

## 二、佣经济保温工程计算方程

采用文〔4〕提出的佣经济保温工程计算方程

$$D \ln \frac{D}{D_0} = 2 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{B \theta H \lambda (T - T_0)}{A N}} - \frac{2 \lambda}{\alpha}, \quad (1)$$

最佳保温层厚度  $\delta = (D - D_0) / 2$  求出后,可由下式求取最小总年费用  $S$

本文1988年3月26日收到。

\*本文所有“佣”、“含”字均分别为“烟”、“焓”代用字。

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_o^2) ANL + \frac{10^{-6} B \theta H L (T - T_o)}{\frac{1}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{D}{D_o} + \frac{2\lambda}{\alpha D} \right)}, \quad (2)$$

式中大多数是熟知的符号, 其中散热代价换算因子  $\theta$  与热价  $B$  的乘积

$$B\theta = C \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right), \quad (3)$$

散热代价换算因子  $\theta$  与代价  $C$  为未知数, 一般可先求出  $C$ , 然后确定  $\theta$ , 求算代价的普遍式

$$CE_{out} = \sum C_{in} E_{in} + C_R \Delta E_R + C_d', \quad (4)$$

由于反应焓  $\Delta E_R = 0$ , 所以

$$CE_{out} = \sum C_{in} E_{in} + C_d', \quad (5)$$

式中  $C_d'$  表示设备投资费用总和。

当  $\theta$  求出后只须将  $B\theta$  替换含经济保温计算公式及其计算机程序中的  $B$ , 即可进行经济保温工程的有关计算, 毋需编制新的计算机程序。因此, 可以在设计部门中方便地推广应用。

式(1)、(2)中  $\lambda$  表示实际使用的保温材料的导热系数是温度、密度的函数; 保温层外表面温度与保温层厚度成正比, 与散热量成反比; 而散热量取决于保温材料的热阻, 该热阻又与导热系数及保温层厚度有关。但是保温层厚度正是需求的未知数, 可见求保温层厚度问题, 可以归结为求解最优保温层外径的问题。这是一个以经济性为主要约束条件的优化设计目标函数的有约束最优化问题, 但是可以将它化作无约束最优化问题来求解。本文采用常见的最速下降法和牛顿法<sup>[5]</sup>, 对上述非线性方程组进行求解, 可以得到所需要的最优解。

文中程序采用结合最速下降法的拟牛顿优化解法, 其基本原理是: 首先根据用户选择的条件定出初值, 用最速下降法以得到一个较好的初值, 再用拟牛顿法解出其最优点。这样做有以下几个优点: (1) 可以利用最速下降法具有前几个迭代点收敛效果较好的特点, 从而防止因初值不好而引起拟牛顿法之解的振荡和发散; (2) 采用拟牛顿法可以很快收敛, 又可以防止最速下降法在接近最优解时收敛慢的“锯齿现象”; (3) 采用拟牛顿法可以避免每次求雅可比矩阵, 从而减少运算量, 加快程序的运行速度。

根据以上思路编制程序, 并在 Apple- II 微机上运算。它可以根据用户所给的工艺条件数据, 自动求出最佳保温层厚度及有关经济效益等数据的最优解。该程序采用人机对话的方式, 操作简便并易于推广。同时, 采用通常较可靠的求算导热系数、表面温度, 散热量与热阻的公式, 或据各种工艺条件, 选择更精确的计算公式替代。

### 三、数据及处理

目前我国有些企业如棉、毛纺织厂、印染厂、糖厂、纸厂、塑料厂、化工厂等, 都需要大量不同品位的工艺用蒸汽。为提高能源利用率, 一般是建立工业热电站系统, 采用热-电联供、即在发电的同时通过保温的蒸汽输热管道, 输出不同品位的工艺用蒸汽。现根据某工业热电站四台工业锅炉的热平衡测定数据, 进行计算处理, 结果如表1所示(环境温度 为 20℃)。

表1 工业锅炉的热平衡测定数据及平衡算表

项 目	1 #	2 #	3 #	4 #
蒸汽压力, 10 <sup>5</sup> Pa	5.07	14.19	25.33	39.52
蒸汽温度, °C	150	350	400	450
给水温度, °C	45	45	45	45
燃料用量(标煤), kg·h <sup>-1</sup>	2200	2374	2450	2520
燃料佣, 10 <sup>6</sup> kJ·h <sup>-1</sup>	66.11	71.18	73.27	75.36
燃烧佣损, 10 <sup>6</sup> kJ·h <sup>-1</sup>		23.28	23.95	24.62
蒸汽佣, 10 <sup>6</sup> kJ·h <sup>-1</sup>	14.53	20.72	23.24	25.12
传热佣损, 10 <sup>6</sup> kJ·h <sup>-1</sup>		21.86	20.64	19.80
排气佣损, 10 <sup>6</sup> kJ·h <sup>-1</sup>		1.31	1.36	1.39
散热佣损, 10 <sup>6</sup> kJ·h <sup>-1</sup>		4.00	4.09	4.42
热效率, %	80.6	85.0	85.0	85.0
佣效率, %	21.9	29.1	31.7	33.3

来自工业热电站的水蒸汽, 由不同管径的管道输送. 如采用岩棉为保温材料, 其价格为420元/m<sup>3</sup>, 保护层价格为34元/m<sup>2</sup>, 对不同温度的蒸汽输热管道(直径为0.5m)进行佣经济及含经济保温工程计算, 其结果分别列于表2、3.

表2 不同温度的蒸汽输热管道佣经济保温计算结果

输热管道温度T, °C	90	150	180	200	450	500	550
热 价B, 元(10 <sup>6</sup> kJ) <sup>-1</sup>	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83
佣 价C, 元(10 <sup>6</sup> kJ) <sup>-1</sup>	15.12	18.32	16.50	15.64	11.71	11.26	10.16
保温层厚度δ, mm	16	50	61	68	149	163	171
保温层外表面温度T <sub>f</sub> , °C	29.1	26.6	27.1	27.4	31.0	31.8	33.0
保温层散热量Q, 10 <sup>6</sup> kJ(y) <sup>-1</sup>	765	596	656	697	1278	1416	1602
保温层散佣量E, 10 <sup>6</sup> kJ(y) <sup>-1</sup>	147	183	232	265	760	879	1031
保温工程费用S <sub>1</sub> , 万元(y) <sup>-1</sup>	0.18	0.26	0.29	0.31	0.56	0.61	0.63
年散热佣损费用S <sub>2</sub> , 万元(y) <sup>-1</sup>	0.22	0.34	0.38	0.41	0.89	0.99	1.05
年总费用S, 万元(y) <sup>-1</sup>	0.40	0.60	0.67	0.72	1.45	1.60	1.68
经济效益y, 万元(y) <sup>-1</sup>	1.08	6.69	9.48	11.59	59.26	72.51	81.76
保温工程费用与年散热量之比v <sub>1</sub> , 元(10 <sup>6</sup> kJ) <sup>-1</sup>	2.34	4.45	4.50	4.52	4.40	4.30	3.97
保温工程费用与年散佣量之比v <sub>2</sub> , 元(10 <sup>6</sup> kJ) <sup>-1</sup>	12.12	14.50	12.74	11.87	7.41	6.93	6.16

保温材料价格参数一定时, 蒸汽温度分别为150°C, 200°C, 450°C, 550°C的输热管道的保温层厚度、经济效益等参数随佣(热)价变化的计算结果列于表4.

当佣(热)价及保温材料价格一定时, 保温层厚度将随着输热管道直径而改变. 计算结果见表5.

如采用目前当地常用的水泥膨胀珍珠岩(250元/m<sup>3</sup>)或水玻璃膨胀珍珠岩(360元/m<sup>3</sup>),

表 3 不同温度的蒸汽输热管道经济保温计算结果

输热管道温度, °C	90	150	180	200	450	500	550
热 价, 元 ( 10 <sup>6</sup> kJ ) <sup>-1</sup>	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83
保温层厚度, mm	30	51	61	67	136	149	161
保温层外表面温度, °C	25.3	26.5	27.1	27.5	32.0	32.9	33.8
保温层散热量, 10 <sup>6</sup> kJ ( y ) <sup>-1</sup>	445	584	656	704	1374	1522	1674
保温工程费用, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	0.21	0.27	0.29	0.31	0.52	0.56	0.60
年热损费用, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	0.26	0.34	0.38	0.41	0.80	0.89	0.98
年总费用, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	0.47	0.61	0.67	0.72	1.32	1.45	1.58
经济效益, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	2.67	6.94	9.48	11.33	49.41	60.22	72.66
保温工程费用与年散热量之比, 元(10 <sup>6</sup> kJ) <sup>-1</sup>	4.78	4.60	4.50	4.43	3.78	3.69	3.60

对蒸汽温度为450℃的输热管道，进行经济保温工程计算，其结果列于表 6。

表 6 几种保温材料的经济保温计算结果

[ 热价=5.83元 ( 10<sup>6</sup>kJ )<sup>-1</sup>, 佣价=11.71元 ( 10<sup>6</sup>kJ )<sup>-1</sup>, 保护层价=34元 ( m )<sup>-2</sup> ]

保温材料价, 元 ( m ) <sup>-3</sup>	360	250	420
保温层厚度, mm	174	197	149
保温层外表面温度, °C	31.4	30.5	31.0
保温工程费用, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	0.59	0.54	0.56
年散热佣损费用, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	0.98	0.93	0.89
年总费用, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	1.57	1.47	1.45
经济效益, 万元 ( y ) <sup>-1</sup>	59.06	59.20	59.26

由于年散热佣损费用随保温层厚度的增加而减少，而保温工程费用则相应增加。这两项费用之和为年总费用。在最佳保温层厚度处，必相应有一最低年总费用。当佣（热）价参数不变时，给定一系列的保温层厚度，分别按岩棉、水泥膨胀珍珠岩、水玻璃膨胀珍珠岩计算，得到相应的保温工程费用、年散热佣损费用及年总费用的数值（图 1）。其中，岩棉的最低年总费用为最小，从而得到最优的保温材料及其保温层厚度数值。

为校核以上计算得到的保温层厚度下的散热损失是否符合国家要求，根据国家计委节能局、国家经委能源局提出的“供热系统节能暂行规定”（讨论稿），对于保温管道及设备生产允许最大散热损失，与本文根据“佣经济法”求取散热损失计算的结果比较于表 7。

佣经济保温工程计算系根据图 2 程序框图。



表 5 蒸汽输热管道直径改变对烟经济保温层厚度的影响\*

管道直径, mm	10	20	40	70	100	200	300	400	500	700	900	1200
保温层厚度, mm	38	54	69	85	96	118	132	141	149	158	165	172
保温后表面温度, °C	30.8	30.4	30.2	30.2	30.2	30.4	30.6	30.8	31.0	31.2	31.5	31.8
保温工程费, 万元(元) <sup>-1</sup>	0.03	0.05	0.07	0.11	0.14	0.24	0.34	0.44	0.56	0.74	0.94	1.24
年散热损耗费用, 万元(元) <sup>-1</sup>	0.16	0.20	0.26	0.32	0.37	0.51	0.64	0.75	0.89	1.09	1.30	1.62
年总费用, 万元(元) <sup>-1</sup>	0.19	0.25	0.33	0.43	0.51	0.75	0.98	1.19	1.45	1.83	2.24	2.86
经济效益, 万元(元) <sup>-1</sup>	1.17	2.78	5.22	9.07	12.74	24.16	35.47	46.52	59.26	79.02	100.33	132.21

\*以蒸汽温度450°C的输热管道100mm计算.

表 7 最大散热损失比较表

项 目	单 位	数				值			
管道与设备外表面温度	°C	90	150	180	200	450	500	550	
允许最大散热损失	$\text{kJ}(\text{m})^{-2}(\text{h})^{-1}$	310	419	469	502	879	942	1005	
本文散热损失计算值	$\text{kJ}(\text{m})^{-2}(\text{h})^{-1}$	229	178	196	208	381	423	479	

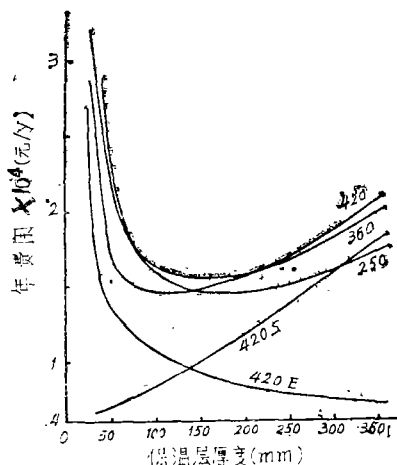


图1 年费用随保温层厚度变化曲线

420—岩棉; 360—水玻璃膨胀珍珠岩;  
250—水泥膨胀珍珠岩;  
420S—保温工程费用; 420E—  
散热损失费用

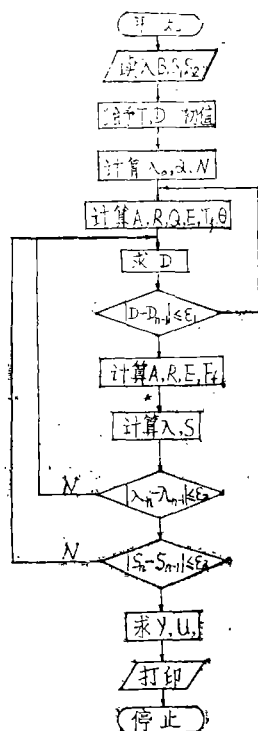


图2 佣经济保温工程计算程序框图

#### 四、佣经济保温工程计算方法的优点

几种保温计算方法中, 含经济保温工程算法 (简称“含经济法”) 优于经验性的计算方法<sup>[1]</sup>, 但不如“佣经济法”合理。表 2—3 说明, 在一定的佣价及保温材料价格参数的条件下, 保温层厚度、经济效益及有关参数随着蒸汽输热管道的温度不同而变化, 根据“佣经济法”及“含经济法”两种计算结果的比较表明: (1) 佣经济保温层厚度随着输热管内蒸汽温度的增高而增加。当输热管内介质温度较低时, 佣经济保温层厚度小于含经济保温层厚度。但随着管内介质温度提高其能级增加, 佣经济保温层厚度将接近、等于以至超过含经济保温层厚度。现以蒸汽温度为 90℃ 的保温管道为例, “佣经济法”计算的保温层厚度比“含经济法”少 14mm, 相应的保温工程费用节省约六分之一, 说明按“佣经济法”计算的 实际经济效益较好。(2) 当输热管内蒸汽温度低于 180℃ 时, 能级较低, 应允许较高的保温层外表面温度及相应较大的散热量。随着输热管内蒸汽温度的提高, 其能级增高。“佣经济法”得出的表面温度和散热量, 将逐渐接近“含经济法”, 并在后来低于“含经济法”。(3) “佣经济法”计算的单位年散热量的保温工程投资费用, 随输热管内蒸汽的能级增高而增加, 但是, 按“含经济法”计算的相应结果反而降低, 前者的结论显然比后者合理。

两种方法计算保温层外表面温度及散热损失的结果, 皆在允许范围之内。

总之,由于“佣经济法”考虑到散热损失的能级不同,其质量不同。当输热管内蒸汽温度较低时,热能的能级较低、质量较差,散热佣价值较低,保温层厚度应比不考虑热能质量的“含经济法”小;当输热管内介质温度增高,热能质量提高时,应采用比“含经济法”较大的保温层厚度是合理的。虽然消耗保温工程费用增加,但因表面温度相应较低,散热损失较小,其经济效益反而提高,这一结论正体现出“佣经济法”的科学性及合理性。

## 五、蒸汽输热管道的佣经济保温工程计算结果

保温工程计算的合理性,取决于经济效益,而经济效益取决于能源和保温材料的相对价格及其保温性能,从表4、6可见,当保温材料价格一定时,无论采用岩棉、水泥膨胀珍珠岩或水玻璃膨胀珍珠岩,都有较好的经济效益,并随着输热管内蒸汽温度及佣(热)价的增高而增加。如以每100m的蒸汽输热管道(直径0.5m)计算,保温的净经济效益,每年均可达万元以上。

当佣(热)价及保温材料价格一定时,保温层厚度可随输热管道直径的改变而改变,但保温层厚度的变化,约只是管道直径变化的三分之一。而若管内介质温度变化,则引起保温层厚度较大的变化(表5)。“含经济法”的计算结果,与“佣经济法”基本一致。因此,保温层厚度主要决定于输热管内蒸汽温度的高低。

从图1所示年总费用随着保温层厚度变化的关系曲线可见:当佣价参数一定时,最低总年费用主要决定于保温材料的价格参数与其保温性能,主要是导热系数的大小;优选保温材料的顺序应是:岩棉、水泥膨胀珍珠岩、水玻璃膨胀珍珠岩。虽然岩棉和水泥膨胀珍珠岩的年总费用差不多,但由于采用岩棉的保温层厚度较小,且岩棉的容重( $100\text{kg}/\text{m}^3$ )远小于水泥膨胀珍珠岩的容重( $200\text{—}400\text{kg}/\text{m}^3$ ),故采用岩棉也有利于降低管道的设计总重量。

按计算机程序计算结果所编制的表格,可供用户查取在一定热价和保温材料价格条件下,不同直径的管道,以及对应于输热管内蒸汽温度不同,所需要的保温层厚度。但是,佣价与各种保温材料价格及有关工艺、环境参数,常因时因地而变化,且目前计算机已相当普及,各种图表存在固有的近似性。因此,欲求取最佳保温层厚度,以应用计算机程序直接计算为宜,不但更为准确、方便,而且可同时得到最佳保温层厚度、经济效益及一系列有关数据,为优选保温材料及保温工程计算提供更加合理的科学根据。

## 六、结 论

据文〔4〕推导出的佣经济保温工程计算公式,进行蒸汽输热管道的佣经济保温工程计算,得出比含经济保温工程计算更加合理的计算结果,值得推广采用。同时,采用文〔4〕提出的散热佣价换算因子的概念,只需将热价与散热佣价换算因子的乘积,代换“含经济法”计算机程序中的热价,便可进行相应的佣经济保温工程的有关计算,毋需重新编制计算机程序,极易在设计部门中推广应用,具有一定的实用价值。



## 参 考 文 献

- 〔1〕唐趾祥, 化工设计与开发, 1, (1982).  
〔2〕Wepfer, W. J. et al., *Trans.A.S.M.E.J.Eug.Industry*, 101, 4 (1979), 427.  
〔3〕陈安民, 石油炼制, 10, (1986).  
〔4〕张夏平, 华侨大学学报(自然科学版), 9, 2 (1988).  
〔5〕席少霖, 赵凤治, 最优化计算方法, 上海科学技术出版社, (1983).

Insulation Engineering Calculation on Exergy  
Economic of Steam Pipe

Zhang Xijaping Ye Piliu

## Abstract

Based on the concept of heat dissipation exergy cost exchange factor posed by the author in paper<sup>[1]</sup> as well as on the derived and revised formula for calculating exergy economic insulation engineering, this paper carries out the insulation engineering calculation exergy economic of steam pipe.

The results reveal that the insulation engineering calculation on exergy economic is an even more rational method as compared with the engineering calculation of enthalpy economic insulation.

**Key Words** exergy economic, insulation engineering, Steam pipe