

设备与管道保温的最优化设计方法

中国科学院力学研究所 方铎荣 陆显洁 吕筠锋*

〔提要〕 本文论述了隔热技术应用研究的重要内容之一，设备与管道保温的最优化设计方法。首先，提出了优选隔热材料的简化方法；其次，提出了变导热系数隔热材料用于输热管道与储热箱的最优化隔热设计方法，并在蒸汽管道保温应用中，取得了重大的节能和经济效益；第三，论述了输热管道多层隔热保温的最优化设计方法，由传热模型计算的热损失值与复合隔热层交界面温度与实验值吻合得较好。

1、前言

隔热技术是早期传热学所涉及的主要问题之一，有一本早期的传热学教科书名就是“传热元件与隔热”。这往往使人们认为隔热问题是一个经典课题，大部分研究问题已经解决了。其实不然，二十世纪六十年代前后，由于宇航、核能、低温和其他现代化技术的发展，扩大了装置运行的温度范围，在极端温度范围内，已经出现了许多难以克服的工程问题，其中之一就是有效隔热在极端温度下的应用。因此，近二十年对隔热在高温与低温的应用，已经形成了一个研究浪潮，如美国加利福尼亚州大学贝克利分校田长霖教授等对低温隔热作出了较大的贡献。

最近，由于世界范围存在能源问题，对于中温与室温的隔热也引起人们极大的注意，隔热应用于建筑、工业管道与设备、液化天然气储存和输送等方面，就能获得重大的节能效果。同时，工程设计中，以节能与经济性成为问题的焦点，以此为出发点确定最优隔热材料，最优隔热层厚度与合理的隔热结构。这就是设备与管道保温的最优化设计方法所要解决的问题，在此问题上国内外已发表了许多文献，结合我国管道隔热保温

的实际问题，我们作了进一步研究探讨，现分述如下：

2、优选隔热材料的简化方法

确定最优隔热保温材料，是保温最优化设计方法的重要环节。它包括对材料的综合技术性能和经济性进行优选和评价。在明确使用目的和条件的情况下，常常希望有一项经济效益指标来反映使用效果。首先要满足技术可行性要求，如耐热温度、热稳定性、抗腐蚀性等。在同时满足使用技术性能条件的隔热材料中，一般说来，它可以通过两条途径来降低管道与设备的热损失，一是降低隔热材料的导热系数；一是增加隔热层厚度，其目的都是要建立隔热系统的热阻，而这两条途径，不仅与隔热材料的技术性能有关，而且与材料的售价、运输、安装价格有关，

文献给出了以计算机程序来优选最优隔热保温材料的方法，但在工程应用中，希望给出更简明直观的方法。为此，以平壁热力设备为应用对象，假定几种隔热材料，要达到同等的隔热效果，则何种隔热保温材料的费用最小，即为最优保温材料。这一简化方法的数学表达式，经过推导，可以得到：

* (本工作是在吴承廉研究员直接指导下进行的)

$$C_1/P_1K_1 = C_2/P_2K_2 = \dots C_n/P_nK_n \quad (1)$$

式中 C_1, C_2, \dots, C_n , 单位面积上隔热保温材料1、2、...、n的费用(元/米²);

P_1, P_2, \dots, P_n , 隔热保温材料的单价(元/米²);

K_1, K_2, \dots, K_n , 隔热保温材料的导热系数(瓦/米·时·℃)。

由此看到, $P \cdot K$ 是标志隔热保温材料产生单位热阻费用的经济效益指标, 单位为(元·瓦/米²·℃)。PK值最小, 则该隔热保温材料经济效益最好。PK参数的物理意义可以理解为, 隔热保温措施就是花钱买热阻来达到减少管道与设备的热损失, 那么, 隔热保温材料就是商品, 这一商品产生单位热阻

的费用最小, 这就是最优隔热保温材料。值得指出的是, 上述分析方法在管道保温中是得不到方程式(1)的简化表达式。所以, 它只适用于平壁与大管径的热力设备, 故称之为优选隔热材料的简化方法。文献用计算机优选最优隔热保温材料与本文所述的简化方法比较, 如表1所示。从表1看到, 对于直径529毫米的管径, 最优隔热保温材料是岩棉玻璃布缝毡, 次之是微孔硅酸钙, 次序是完全一致的, 其他材料的优选顺序略有变化。计算机程序优选方法考虑到管道隔热系统的各部分热阻与能源价格等更多因素, 所得的结果更科学, 而简化方法则简明、直观、快速。

表1 隔热材料优选结果比较表

序号	材料名称	K (瓦/米·℃)	P (元/米 ²)	PK (元瓦/米·℃)	计算机方法 优选顺序	简化方法 优选顺序
1	微孔硅酸钙	0.049	215	10.56	2	2
2	岩棉玻璃布缝毡	0.036	220	7.92	1	1
3	酚醛树脂矿棉管	0.052	280	14.56	3	4
4	硅酸盐珍珠岩瓦	0.048	500	24.00	7	8
5	水玻璃珍珠岩瓦	0.070	210	14.70	5	5
6	水泥珍珠岩瓦	0.082	150	12.30	4	3
7	水玻璃蛭石制品	0.093	220	20.46	8	7
8	水泥蛭石砖瓦	0.120	125	15.00	6	6

3、变导热系数隔热材料用于输热管道与储热箱保温的最优化设计方法

目前已发表关于输热管道保温的最优化设计方法或称经济厚度计算的许多文献, 都是以隔热材料的导热系数为常数来处理的(文献略)。实际上, 几乎所有隔热材料的导热系数都是温度、密度的函数, 有的还是各向异性的, 常导热系数的最优化隔热设

计方法对于优选材料仍是有效的, 在最优隔热层厚度的确定中, 如对导热系数变化作一些修正, 也能达到工程上的设计精度。但是, 对于现有热网工程的节能改造, 要从理论上对节能的潜力及投资回收期等进行可行性研究时, 上述数学模型所作的计算, 带来的误差比较大, 不能较精确地预计现有热网管道与实现技术改造后的热损失, 从而使得判断是否要进行技术改造和预计节能的经济效益带来困难。为此, 文献根据输热管道的实际情况, 考虑到一维假定的合理性, 在给

定材料密度情况下,对于隔热材料导热系数随温度线性变化情况,对传热模型及计算方法作了一些合理处理,从而使得最优化设计计算简化。使热损失计算值与实验值比较吻合。这给热网保温技术改造的可行性研究与最优隔热层厚度的确定,提供了一个较好的方法。

文献已经证明,对于隔热材料导热系数随温度直线变化的情况,它的热损失的计算,可以隔热层内、外表面温度的算术平均值所对应的导热系数值来代替常导热系数传热模型的热损失计算。由于隔热层外壁温度是在迭代计算中确定的,因此,变导热系数值也相应的确定。这就是说,对于隔热材料导热系数随温度线性变化的最优化保温设计中的热损失计算,只要在常导热系数传热模型中,多加一个方程式,就能得到可靠的计算结果。

若导热系数随温度接近线性变化情况,如抛物线,则在计算中,可以把抛物线拟合成分段线性方程来处理。

变导热系数传热模型所计算的热损失值,已在管道隔热技术模拟试验台上进行了校验,实验值与理论计算值的最大相对偏差为5%。如图1,2所示。

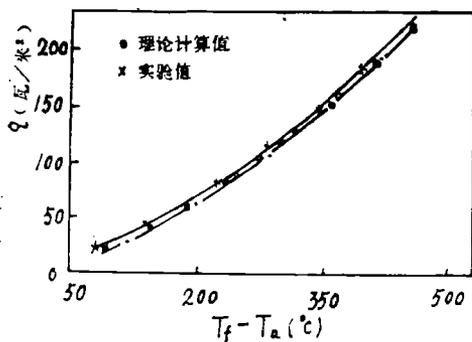


图1 硅酸钙保温材料($\delta=96$ 毫米)热损理论计算值和实验值的比较

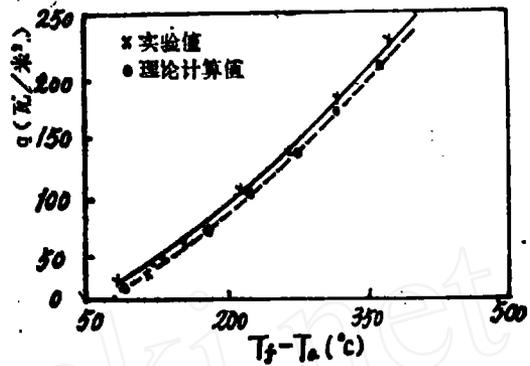


图2 岩棉保温层($\delta=76$ 毫米)热流理论计算值和实验值的比较

变导热系数隔热材料用于输热管道保温的最优化设计方法,已用于燕山石化公司热网管道隔热保温技术改造的任务中,经过理论分析、模拟试验、中间试验、工艺试验、工程试验,完成了16.9米直径为529毫米、介质温度为280°C的输热管道的保温技术改造,相对节能率(即热损失比改造前减少百分比)达到50%以上,仅热损失一项每年可节约燃油526吨,以平价油计,年收益7.5万元;以议价油计为27.2万元,投资回收期为2.6年(平价)与0.69年(议价)。在1984年、1985年推广了此项成果。共有40000米管道采用了这一技术,每年可节约燃油9000余吨,节资270~450万元。

4、输热管道多层隔温的最优化设计方法

在隔热工程中,由于各种隔热材料各有它一定的适用范围,一般说来,隔热材料的价格是随着导热系数的减小以及最高使用温度的增高而增加的。为了更有效地提高隔热的经济性,尽可能就地取材或者减少接缝热损失等,有时要采用两层或多层不同隔热材料的复合隔热。有关文献已对数学模型与计算方法作了论述,传热模型假定为:一

维无内热源的稳定传热、隔热材料的导热系数为常物性或随温度线性变化、隔热层之间、隔热材料与金属管壁紧密接触，即接触热阻为零。热损失与隔热层之间界面温度的计算先以材料常物性来考虑，然后考虑到材料导热系数随温度线性变化情况，给予修正。经济模型与单层隔热基本相同，只是增加复合隔热层的不同材料费用一项，它的热损失计算不仅在求外层壁温 T_p 值时需要迭代计算，同时复合隔热层的界面温度也要迭代计算，达到一定的精度后，才能比较准确地确定材料的导热系数值，从而求出通过复合隔热层的热损失及各隔热层的厚度与界面温度，当同时满足界面温度要求与隔热年费用最低时，就得到复合隔热层的最佳厚度。

对双层复合隔热保温方法进行了模拟实验，其热损失与第一隔热层内表面与环境温差的关系如图 3 所示。图 3 说明理论计算值与实验值吻合得较好，最大相对偏差为 $\pm 3\%$ 。复合隔热的夹层温度是复合层保温优化设计的关键参数。图 4 表示复合层夹层温度 T_w 、外表温度 T_p 与环境温度 T_a 之差的理论计算值与实验值的比较。从图 4 可见夹层温度 T_w 的理论计算值与实验值吻合得较好，但隔热层外表温度 T_p 与环境温度 T_a 之差理论计算值比实验值偏低 8%。由此可见，复合层隔热优化设计中的传热模型是比较合理的。

在研究解决高温管道隔热保温问题时，采用了硅酸铝纤维毡与岩棉缝毡的复合隔热保温的方法，并在燕山石化公司前连化工厂乙烯裂解炉内出口进入急冷室的一段高温管道上作了现场试验，相对节能率达到 74%，隔热效率达到 98.7%，投资回收期，按平价油计为 1.04 年，按议价油计为 0.25 年。

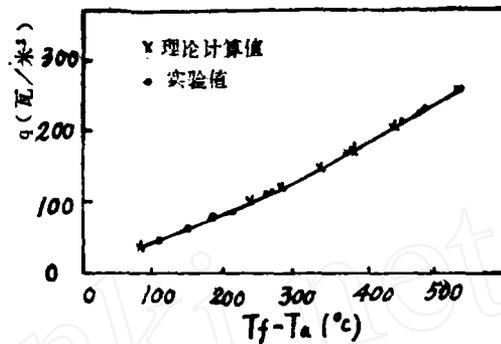


图 3 外表面热流与第一隔热层内表面温度 T_f 和环境温度 T_a 之差的关系曲线

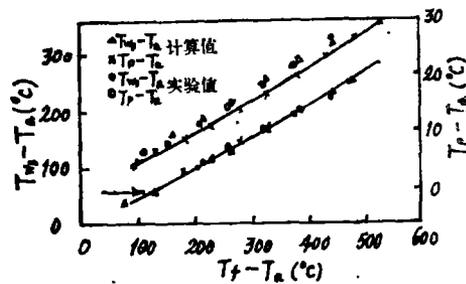


图 4 复合保温层夹层温度 T_w 、外表温度 T_p 与环境温度 T_a 之差的理论计算值与实验测量值曲线对比图

5、结论

本文给出的设备与管道保温的最优化设计方法，其传热模型经过实验验证，计算机程序比较有效，这一方法应用到工业保温实践中，取得了较大的经济效益。