

开孔金属薄板温度场和导热热阻的测定与近似计算

杨自奋 洪 波 焦文治

(上海交通大学)

〔摘要〕 开孔金属薄板的二维稳态导热问题采用分析解和计算机数值解都相当复杂,不便实用。本文采用导电纸热电比拟法对六种典型开孔金属薄板求解其温度场和导热热阻,简捷且相当精确;导出的近似计算公式合理简单且精度较高,对工程计算有一定的实用价值。

关键词 金属薄板 稳态导热 热电比拟 近似计算

分类号 TK124

0 前言

在工程上常要求解金属薄板的导热问题。如在金属反射式隔热保温块中,为成型和支撑可用金属薄板作端侧板。由于这种保温块两面温差很大,为减少导热,常在保证一定的结构强度和刚度的条件下,在金属端侧板上开各种形状的孔,以增加导热热阻,并减轻容重。求解此类导热问题要求得其温度场和导热热阻,进而算出导热热流量。

开孔金属薄板厚度相对其长度和宽度来说很小,故在无内热源的情况下,如果在其长度两端保持一定的温差不变,则可认为这是一个二维稳态导热问题。但因其表面开有各种形状的许多孔,几何形状相当复杂,故其分析解是十分繁复的级数,不便实用计算;若采用数值解法,虽可用计算机,但也相当复杂和费时。我们采用导电纸的热电比拟法却相当简捷和精确地求得了温度场和导热热阻,并由此导出了热阻的近似计算公式。这在工程上有一定的实用价值。

1 导热热流量

图 1 所示,未开孔的实心金属薄板宽度为 b_s , 长度为 l_s , 厚度为 W 。如在 l_s 两端保持温度 t_A 和 t_B 不随时间而变,并在 b_s 方向上均匀一致,温差为 $\Delta t = t_A - t_B$,若 $t_A > t_B$,则沿着 l_s 方向有导热热流量 Q_s ,可认为是一维稳态导热,导热横截面积 $A_s = Wb_s$,据傅立叶定律,则有:

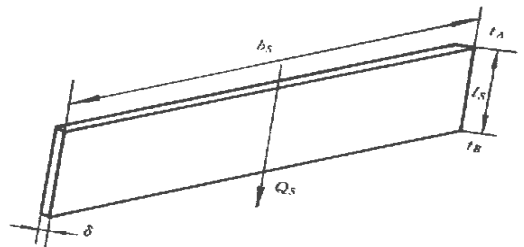


图 1 未开孔实心金属薄板

$$Q_s = \lambda W_s \frac{t_A - t_B}{l_s} = \frac{\Delta t}{R_s} \quad (1)$$

式中 R_s 为实心板导热热阻: $R_s = \frac{l_s}{\lambda W_s} = \frac{r l_s}{b_s}$, $r = \frac{1}{\lambda W}$ 为热阻系数, 若导热系数 λ 为常数, 则无论实心板还是开孔板, 因 W 都相同, 故 r 也不变。

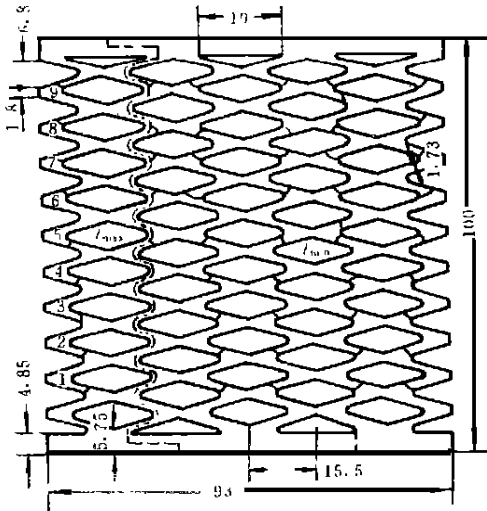


图 2 19×6.8 菱形孔

我们设计了六种典型的开孔型式: (1) $\varnothing 40$ 大圆孔; (2) 60×40 椭圆孔; (3) $\varnothing 12$ 小圆孔; (4) 15×90 纵向矩形孔; (5) 40×10 横向矩形孔; (6) 19×6.8 菱形孔。如图 2 所示的是其中的一种: 19×6.8 菱形孔。

开孔板对于实心板的导热热阻增大倍率:

$$C_R = \frac{R}{R_s} = \frac{r \frac{l}{b}}{\frac{r l_s}{b_s}} = \frac{b_s l}{b l_s} = C_b C_l \quad (2)$$

式中 $C_b = \frac{b_s}{b}$, 为开孔板对实心板导热通道宽度缩小倍率; $C_l = l // l_s$, 为开孔板对实心板导热路径加长倍率。可以认为开孔板导热热阻的增大是由于导热通道宽度减小和导热路径长度加长的结果。开孔板导热热流量:

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta t}{C_R R_s} = \frac{Q_s}{C_R} \quad (3)$$

2 热电比拟法原理和测试结果

2.1 基本原理

热电比拟法是建立在热电现象彼此相似的理论基础上的。根据相似理论, 如果导热和导电两种不同的物理现象能用同一型式的微分方程式描述, 并实现了几何条件、物理条件和边界条件的相似, 那么就可以用电模型上的导电现象来模拟热原件上的导热现象。无内热源的固体的二维稳态导热现象与直流电路中的导体的二维稳态导电现象都可以用 Laplace 微分方程式描述。

2.2 测试系统和方法

我们用导电纸作为电模型材料, 经测量其单位面积上电阻尚属均匀。按几何尺寸 1:1 比例制作了六个不同孔型的开孔板电模型。以第一类边界条件布置为例, 电模型上的高低电位面与热原件上的高低温度面相对应。温度场测定与等温线绘制试验线路布置如图 3 所示。1 为直流电源; 2 为电模型; 3 为电阻箱, 它们的电阻值分别为 R_1 和 R_2 ; 4 为检流计。

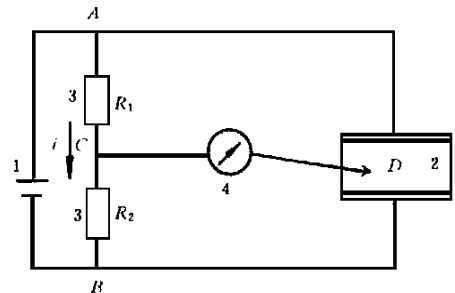


图 3 温度场测定与等温线绘制试验线路图

试验采用平衡电桥测量线路, 在满足了电模型与热原件相似的条件下, 取 $R_1 = R_2 = \Delta t$, 则得:

$$t_D = t_B + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Delta t = t_B + R_2 \quad (4)$$

2.3 测试结果

假设取工况 $t_A = 350^\circ\text{C}$, $t_B = 65^\circ\text{C}$, $\Delta t = 285^\circ\text{C}$; 设置不同的 R_1 , R_2 , 就可以求得不同的 t_D 值, 这样就可以画出各种开孔板温度场的等温线, 如图 2 所示。表 1 列出了绘制温度场等温线的有关数据。

表 1 绘制等温线时电阻箱示值与温度换算值

等温线序号	$R_1(K)$	$R_2(K)$	R_1+	$R_2(K)$	$t_B(^{\circ}C)$	$t_D(^{\circ}C)$
0						
1	256.5	28.5				93.5
2	228.0	57.0				122.0
3	199.5	85.5				150.5
4	171.0	114.0				179.0
5	142.5	142.5	285	65		207.5
6	114.0	171.0				236.0
7	85.5	199.5				264.5
8	57.0	228.0				293.0
9	28.5	256.5				321.5

2.4 热阻和电阻增大倍率的测定

为测定开孔电模型对实心电模型的电阻增大倍率,我们用电桥法分别测量了六个不同孔型的开孔电模型和实心电模型的电阻值。根据热电比拟的原理,热原件的热阻与电模型的电阻是对应的。因此,测得的电模型电阻增大倍率就是热原件的热阻增大倍率:

$$\frac{R_e}{R_{es}} = K = \frac{R}{R_s} = C_R \quad (5)$$

上式中 R_e 为开孔电模型电阻, R_{es} 为实心电模型电阻; K 为开孔电模型对实心电模型电阻增大倍率,即相应的热阻增大倍率 C_R 的实测值。

3 导热热阻近似计算公式与计算结果

公式 (2),即 $C_R = C_b C_l$,就是开孔金属薄板对实

表 2 近似计算值与热电比拟实测值比较

开孔型号	实心板 单元通道 宽度 $b_s(mm)$	开孔板 通道计算 宽度 $b(mm)$	宽 度 缩 小 倍 率 C_b	开孔板 导热路径 计算长度 $l(mm)$	实心板 导热路径 长度 $l_s(mm)$	长 度 加 长 倍 率 C_l	热 阻 增 大 倍 率 C_R	热 电 比 拟 实 测 值 K	相 对 误 差 $\Delta = \frac{C_R - K}{K}$
∅40大圆孔	50	18.6	2.69	119	100	1.19	3.20	3.33	- 3.9%
60×40椭圆孔	70	22.9	3.06	133	100	1.33	4.07	3.90	+ 4.4%
∅12小圆孔	12	2.42	4.96	133	100	1.33	6.60	6.88	- 4.1%
15×90纵向矩形孔	20	5.00	4.00	110	100	1.10	4.40	4.60	- 4.3%
40×10横向矩形孔	45	5.50	8.18	163	100	1.63	13.3	13.5	- 1.5%
19×6.8菱形孔	15.5	1.73	8.96	129	100	1.29	11.6	11.9	- 2.5%

4 结论

(1)用导电纸热电比拟法求解各种孔型开孔金

心板热阻增大倍率的近似计算公式,其中 $C_b = b_s/b$, $C_l = l/l_s$

一般来说,由于导热通道宽度减小使板厚不变时导热截面积减小而导致热阻增大,可以认为其中通道最小宽度起了主要作用。对于通道宽度变化较小的孔型可以选用通道最小宽度作为计算宽度 b 但是对于通道宽度变化很大的孔型,选用最小宽度作为计算宽度显然是不适宜的,为此我们选用了用面积折合的当量宽度作为计算宽度 b

从温度场等温线图可知,开孔板由于热流线加长而导致热阻增大,热流线长度就是导热路径长度。每种孔型都有最长的导热路径长度 l_{max}^* 和最短长度 l_{min}^* (为了便于近似计算,我们采用了几何尺寸的最长值 l_{max} 和最短值 l_{min} ,并不是最长和最短的热流线长度,这样会带来一定的计算误差),还有它们的平均长度 $\bar{l} = 1/2(l_{max} + l_{min})$ 。一般来说,应该用平均长度作为计算长度,即 $l = \bar{l}$ 但是还注意到热流总是力图沿着最短热流线流过去,尤其是当通道宽度缩小倍率很大时,这种趋势必将更加明显。因此,再用平均长度作为计算长度将是不适宜的,此时宜用最短长度 l_{min} 。所以,对于横向矩形孔和菱形孔,我们均改用 l_{min} 作为计算长度 l

根据公式 (2)算出 C_R ,并把它们与热电比拟实测值 K 进行比较,算出相应的误差 $\Delta\%$,有关的计算结果如表 2 所示。

属薄板稳态导热的温度场和热流量,简便易行,精度较高。

(2)用于求得各种孔型开孔金属板的导热热流量的近似计算公式 (1) (2)和 (3)使用简单方便,可供工程实用计算。计算结果与热电比拟法实测比较,

各种孔型的相对误差均在 5% 以下。

参 考 文 献

- 1 翁中杰等. 薄片式热电比拟试验研究. 上海交通大学学报, 1964(3)
- 2 杨世铭. 传热学. 第二版, 高等教育出版社, 1987年
- 3 Rohsenow W M and Hartnett J P(eds.). Handbook of heat transfer. McGraw - Hill Book Company, New York, 1973
- 4 Kayan C F. An electrical geometrical analogue for complex heat flow. Trans. ASME, 1945, 67, 173

作者简介 杨自奋,男,副教授,1939年生。1961年7月毕业于上海交通大学热力机车专业。长期从事工程热物理领域的研究,先后在国内核心期刊发表论文十余篇。(通讯处:200030 上海交通大学能源工程系)

新研制的宽程煤粉燃烧器的示范试验结果

据“火力原子力发电”1996年9月号报道,日本四国电力公司进行了宽程煤粉燃烧器的示范试验,以便改进西条电站2号机组(输出功率250MW)烧煤粉锅炉低负荷运行的性能。

结果表明,内部燃烧装置是充分坚固耐用的,并且在基本负荷(250MW)和装置最小负荷(50MW)之间的运行是稳定的。

这些结果使得宽程煤粉燃烧器的实际运行是确有把握的。

1000MW烧煤超临界滑压运行锅炉的特点和试运行结果

据“火力原子力发电”1996年8月号报道,日本相马共同火力发电公司新地火力发电站2号机组的1000MW烧煤超临界滑压运行锅炉已于1995年9月7日起投入商业运行。

文章报道了该锅炉的设计特点和试运行结果。

- (1)借助于先进的燃烧技术使NO_x排放量为150ppm,飞灰中未燃烧的碳为3%。
- (2)借助于改进燃烧达到了高达91.6%的锅炉效率。
- (3)使用带肋管的炉膛垂直水冷壁的可靠性。
- (4)利用区域模件建造法缩短了建造周期。

(思娟 供稿)

欢迎订阅《热能动力工程》

sation heat exchange, heat exchange model, correlation

穿孔金属薄板温度场和导热热阻的测定与计算 = **The Determination and Approximate Calculation of Perforated Metal Sheet Temperature Field and Heat Conduction Thermal Resistance** [刊, 中] / Yang Zifen, Hong Bo, et al (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12 (5). - 381- 384

Instead of the rather complicated analytical method and computer-aided numerical method for solving two-dimensional steady-state heat conduction problem of perforated metal sheets this paper proposes an electroconductive paper-based thermoelectrical analogy method. The said method has been used to solve the temperature field and heat conduction thermal resistance of six kinds of typical perforated metal sheets in a simple and speedy manner and also with a relatively high accuracy. The derived approximate calculation formula features rationality, simplicity and a relatively high precision, which contribute to its practical value for making engineering evaluations. **Key words** metal sheet, steady-state heat conduction, thermoelectrical analogy, approximate calculation

火电厂热力系统热平衡的拓扑算法 = **Topology-based Calculation of the Thermodynamic System Heat Balance of a Thermal Power Plant** [刊, 中] / Yue Hong (Zhongqing University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 385- 387

The thermodynamic system heat balance calculation method based on a topological analysis is considered as the most successful computer-based method for calculating thermal power plant heat balance. For the first time this paper makes an in-depth study of this subject, including an overview of the said method, related issues in software design and an analysis of the prospects of its application. It provides a totally new view point in thermodynamic system heat balance calculation. **Key words** thermodynamic system, topological analysis, heat balance

叶栅风洞试验微机监控系统 = **A Computer-based Monitoring System for Turbine Cascade Wind Tunnel Tests** [刊, 中] / Liu Wendong, Sun Zhaoqiang, et al (Harbin NO. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 393- 394

Key words turbine cascade wind tunnel test, microcomputer, monitoring system

Edited and Published by Harbin 703
Research Institute and Editorial Staff
of this Journal

Printer Printing House of Harbin Institute of Technology

Address P. O. Box 77, Harbin, China

Tel (0451) 5650888-2092

Fax (0451) 5662885

Post Code 150036

Periodical Registration ISSN1001-2060
CN23-1176/TK

Distributed by China International

Book Trading Corporation

P. O. Box 399, Beijing, China