

螺纹烟管的刚度分析及其 对拱形管板强度的影响

董 芑 刘曼青 张 勇 李之光

(哈尔滨工业大学)

〔提要〕本文推导并实验验证了螺纹烟管刚度与其几何参数的无次关系式,应用有限元法分析了烟管刚度变化对拱形管板强度的影响,得到了螺纹烟管几何参数在工程应用范围内变化时,其刚度的相应变化对拱形管板应力分布及应力幅值并无明显影响的结论。

主题词 螺纹烟管 拱形管板 强度计算

一、前 言

螺纹烟管是一种管壁上具有外凹内凸螺旋槽的异形管,其典型截面形状见图1。

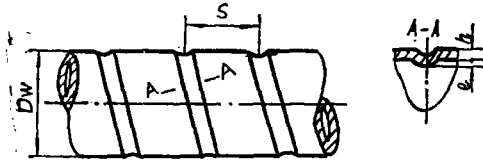


图1 螺纹烟管结构

由于螺纹烟管管壁上的螺旋槽能显著地提高管内外的换热系数,起到双边强化换热的作用,而且有拱形管板的卧式快装锅炉在使用螺纹烟管后,锅筒直径可大大减小,节约了大量的材料与工时。因此,在动力、化工等工业领域的换热设备上得到愈来愈多的应用⁽¹⁾⁽²⁾。

但随着螺纹烟管在工业锅炉上的广泛应用,一个新的问题出现了:即使用刚度较之光管不同的螺纹烟管会给管板强度造成什么影响,而螺纹烟管的刚度又如何确定。这个问题是在工业锅炉上应用螺纹烟管所必须解决的关键问题之一。

二、螺纹烟管的刚度分析

从图1可知,螺纹烟管的主要几何参数是壁厚 h ,直径 D_w ,螺距 S ,槽深 e 以及螺旋槽的截面形状。

为了简化分析,作如下假设:

(1) 由于螺旋槽的升角不大,故可不考虑其影响,将螺纹烟管简化成环形槽管。

文稿收到日期1988-06-15

(2) 根据环形槽管的轴对称性、长度方向上的周期性以及 $h \ll D_w$ ，可将环形槽管与光管的刚度之比简化成直、曲组合杆(图2)与等长直杆刚度之比进行计算。

(3) 由于螺旋槽形状各异，考虑到一般性，故将螺旋槽的截面形状简化为半圆(图2)。

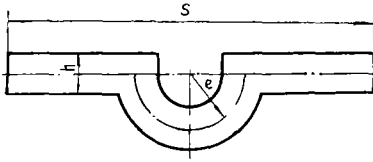


图2 螺纹烟管刚度计算模型

根据以上三点假设可以看出，简化后的计算模型是由直杆段和半圆曲杆段组成的组合杆。所以，可分别求其轴向变形，进而求出组合杆的刚度与等长直杆的刚度之比。

1. 直杆段的轴向变形

由[3]可知，计算模型直杆段的总变形为：

$$\Delta S_1 = \frac{P(S - 2e)}{EF} \tag{1}$$

式中：

- ΔS_1 ——计算模型直杆段的总变形，m；
- P ——计算模型所受的轴向力，N；
- E ——材料的弹性模量，MPa；
- F ——计算模型的截面积， m^2 。

2. 曲杆段的轴向变形

根据假设条件及半圆曲杆的对称性，为求出P作用下曲杆的总变形，可将半圆曲杆简化为图3的形式计算。

由图3可见，经受力模型的简化，垂直力P和弯矩 M_0 同时作用于 A_0 截面，而作用于任意截面A的垂直力N和弯矩M(略去剪力)为：

$$N = P \cos \varphi \tag{2}$$

$$M = M_0 - Pe(1 - \cos \varphi) \tag{3}$$

式中：

- φ ——任意截面A与 A_0 之间的夹角。

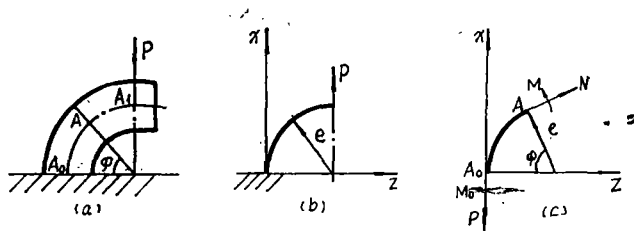


图3 半圆曲杆段力学模型

由于截面 A_0 和 A_1 之间的夹角变形后仍为直角，故令 A_0 和 A_1 之间的角度改变 $\Delta \varphi = 0$ 由曲杆变形理论[4]得， $\frac{1}{2}$ 半圆曲杆在轴向力P的作用下的轴向变形u为：

$$u_2 = \frac{2pe}{FEK} \left[\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+k)} \right] \quad (4)$$

半圆曲杆的轴向总变形为:

$$\Delta S_2 = 2u = \frac{4pe}{FEK} \left[\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+k)} \right] \quad (5)$$

式中:

K ——曲梁的截面模量, 对于矩形

$$K = \frac{1}{3} \left(\frac{h}{2e} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{h}{2e} \right)^4 + \frac{1}{7} \left(\frac{h}{2e} \right)^6 + \dots$$

3. 组合杆的轴向总变形

组合杆的轴向总变形应为其直杆段和曲杆段的变形之和。即

$$\Delta S_{\text{组}} = \Delta S_1 + \Delta S_2$$

$$= \frac{P(S-2e)}{FE} + \frac{4pe}{FEK} \left[\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+K)} \right]$$

$$= \frac{P}{FE} \left[S - 2e - \frac{4e}{K} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+K)} \right) \right] \quad (6)$$

4. 等长直杆的轴向变形

由[3]可知, 等长直杆的轴向变形为

$$\Delta S_{\text{直}} = \frac{PS}{FE} \quad (7)$$

5. 螺纹烟管与光管的刚度之比

根据刚度定义可知:

$$C_{\text{螺}} = \zeta C_{\text{组}} = \zeta \frac{P}{\Delta S_{\text{组}}} = \frac{FE}{S - 2e + \frac{4e}{K} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+k)} \right)} \quad (8)$$

$$C_{\text{光}} = C_{\text{直}} = \frac{P}{\Delta S_{\text{直}}} = \frac{FE}{S} \quad (9)$$

式中:

$C_{\text{组}}$ ——组合杆刚度, N/m;

$C_{\text{直}}$ ——等长直杆刚度, N/m。

由以上分析可知:

$$C_{\text{螺}} = \zeta C_{\text{组}} \quad (10)$$

$$C_{\text{光}} = C_{\text{直}} \quad (11)$$

则

$$\eta = \zeta \frac{C_{螺}}{C_{光}} = \frac{\zeta S}{\delta - 2e + \frac{4e}{K} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+k)} \right)} \quad (12)$$

式中:

η ——螺纹烟管与光烟管刚度之比;

ζ ——考虑到螺纹轧制的减薄量以及螺纹段与光管段连接处变形与理论模型边界条件的误差修整系数。由试验测得 $\zeta = 0.55$,

$C_{螺}$ ——螺纹烟管刚度, N/m;

$C_{光}$ ——光烟管刚度, N/m。

将公式写成无因次形式, 即

$$\eta = \frac{\zeta}{1 - 2\beta + \frac{4\beta}{K} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+k)} \right)} \quad (13)$$

其中:

$$K = \frac{1}{12} \alpha^2 + \frac{1}{80} \alpha^4 + \frac{1}{224} \alpha^6 + \dots$$

$$\alpha = \frac{h}{e}$$

$$\beta = \frac{e}{s}$$

为方便工程计算, 由公式(13)制作的线算图见图4。公式(13)与实验测得的结果吻合程度较高, 见表1。

表1 螺纹烟管刚度计算值与实测值对比表

管 号	1	2	3	4	5
管壁厚h (mm)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
螺纹槽深e (mm)	1.72	2.35	2.30	2.25	3.2
螺纹截距s (mm)	14.0	20.0	21.5	28.0	28.0
计算值 η	0.6136	0.5435	0.5494	0.5254	0.4647
实测值 η_1	0.6245	0.5921	0.3544	0.5334	0.4430
相对误差 δ	1.7%	8.2%	2.8%	1.5%	4.9%

注: 表中相对误差由下式计算

$$\delta = \left| \frac{\text{实测值} - \text{计算值}}{\text{实测值}} \right| \times 100\%$$

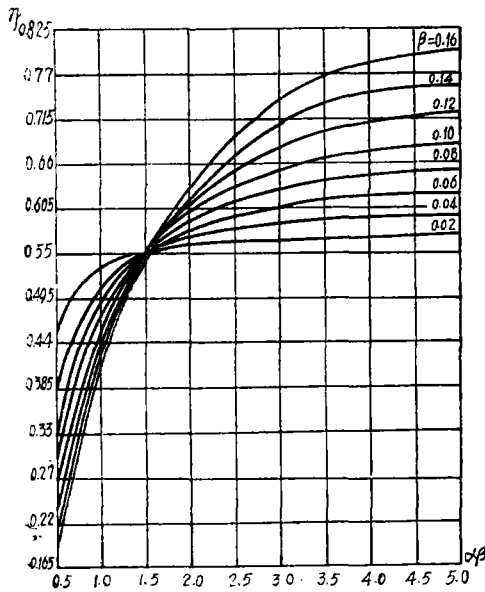


图4 螺纹烟管与光管刚度比值的线算

整个计算模型共有节点540个,板壳元481个,三维梁元30个,其网格划分见图6。

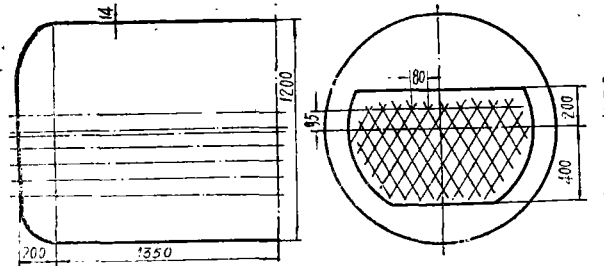


图5 DZN1-7型锅炉锅筒计算模型

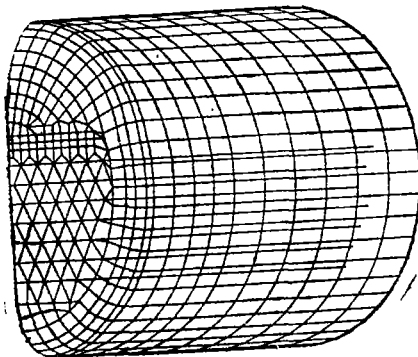


图6 计算网格

三、螺纹烟管刚度变化对拱形管板强度的影响

1. 计算模型的建立

本文以 DZN1—7型锅炉为基本 计算模型。由于管板、筒壳和烟管管束联在一起,构成高次静不定系统,考虑到管束和筒壳的变形不协调性及其对管板强度的作用,为保证计算精度,故采用整体锅筒作为计算模型(图5),分别计算了当使用各种刚度的螺纹烟管时,拱形管板的应力分布及其幅值。

本文采用有限单元法进行计算(6)(6),使用SAP5程序(7),并选用板壳元计算管板和筒壳,三维梁元计算烟管管束。

2. 计算结果分析

为了分析螺纹烟管刚度变化对拱形管板强度的影响,在管板上选择了具有代表性的八个点(图7),根据有限元计算结果分别给出这八个点的外壁当量应力。内壁当量应力及薄膜当量应力随烟管刚度变化的变化规律(图8、9、10)。其当量应力则按第三强度理论计算(8)。

从图中可以看出,当螺纹烟管刚度在光管刚度0.2~1.4倍变化时,拱形管板各

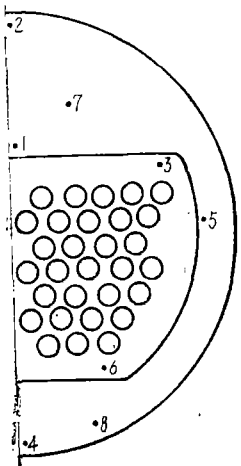


图7 典型计算点位置

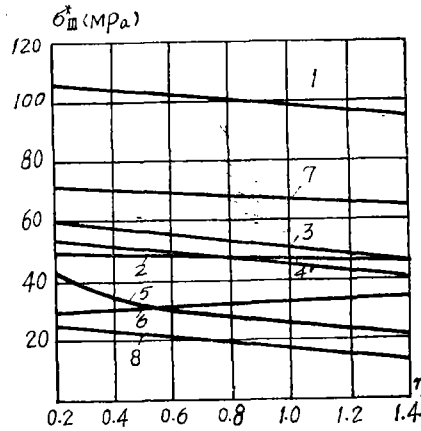


图8 外壁当量应力变化

点的各类当量应力值总的变化规律是随烟管刚度的增加而下降,但其变化的相对量很小。

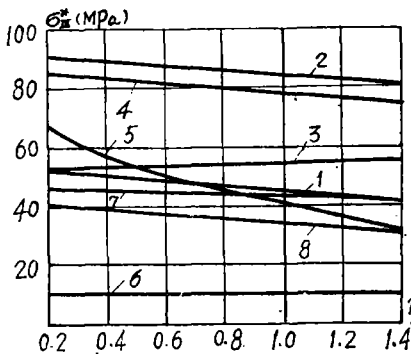


图9 内壁当量应力变化

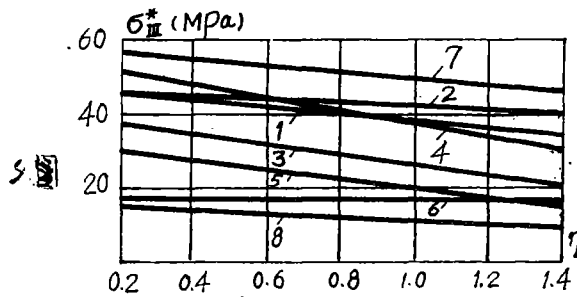


图10 薄膜当量应力变化

四、结 论

1.在工业锅炉使用的螺纹烟管参数范围内,即槽深1.2~2.0mm,截距15~30mm,壁厚3~3.5mm,螺纹烟管的刚度为光管刚度的0.55~0.65倍。

2.当螺纹烟管在光管刚度的0.2~1.4倍范围内变化时,拱形管板的最大当量应力值仅变化10%,其它各点的各类当量应力值也变化不大。所以,在工业锅炉上使用螺纹烟管代替光管在强度上是可行的。

参 考 文 献

- (1) Carnavo, T.C: Heat Exchangers, design and Theory Source book; Chapter 17, 1974.
- (2) 郝平: 锅炉螺纹烟管的传热及流阻研究及其初步优化工作, 哈尔滨工业大学研究生论文, 1986, 5.
- (3) 刘鸿文: 材料力学, 1979, 2.
- (4) 渥美光, 铃木幸三, 三田贤次: 材料力学, 1981, 10.
- (5) O.C. Zienkiewicz: The Finite Element Method in Engineering, McGraw-Hill 1971
- (6) 徐次达, 华伯浩: 固体力学, 有限单元理论方法及程序 1983, 2
- (7) 杭州汽轮机厂计算中心: SAP5程序说明书, 1985, 7.
- (8) 李之光、蒋智翔: 锅炉受压元件标准分析, 1980.

Analysis on the Stiffness of a Screwtube and its Effect on the Strength of an Arched Type Tubeplate

Dong Peng Liu Manqing Zhang Yong Li Zhiguang
(Harbin Institute of Technology)

Abstract

A colleration of dimensionless groups grout the stiffness and geometric parameters of screwtube is in vestigated and proved by experiments. The effects of variation of stiffness of screwtube on strength of arched type tubeplate is studied by finite element method. It is concluded that when the geometric paramefers of a screwtube vary with in the scope of their industrail applications, the variation of stiffness have no obvious effects on the distribution and amplitude of stresses of an arched type tubeplate.

Key words: Screwtube, arched type tubeplate, Stength computalion