

螺纹管综合性能的研究探讨

董 凡 吴江全 (哈尔滨工业大学)

刘振德 (哈尔滨龙江锅炉厂)

〔提要〕 本文对螺纹管的综合技术性能进行了分析探讨,评述了各种计算关联式和研究结论,为螺纹管在工程上的应用奠定了基础。

主题词 螺纹管 强化传热

一、前 言

1966年,美国的Lawson等发表了第一篇关于螺纹管的报告〔1〕。此后,各工业国家分别对螺纹管的性能开展研究,进行工程应用并取得良好效果。由于螺纹管的传热效率高,可以减少换热设备的受热面积,缩小其体积,降低原材料消耗;螺纹管加工简单,设备投资费用低,因此螺纹管获得了广泛的应用。

近年来,我国也对螺纹管的性能开展了大量的应用研究。特别是工业锅炉行业,在烟管锅炉上采用螺纹管代替光管,改善了结构,降低了成本,提高了技术经济效益。由于各研究报告(参见文献)推得的各个计算关联式不尽相同,并且,大都只是对螺纹管某些性能的研究结果,这使得应用者对螺纹管的综合性能缺乏总体概念,给工程应用造成一定的困难。为此,本文力图对螺纹管的研究及其工程应用情况作一较为全面的总结,综合各种计算关联式与研究结论,为螺纹管更广泛的应用奠定基础。

二、螺纹管内对流换热

螺纹管内流体流动及其强化换热机理非常复杂。目前,为大家所接受的观点是:螺纹管内的流体同时进行着两种流动。其一,由于螺纹管内近壁流体的流动受着螺纹凸肋的限制作用而产生附加的旋转流动,减薄了传热边界层,使传热过程得到强化;其二,由于螺纹凸肋的存在导致在凸肋后侧产生逆向压力梯度,造成速度边界层以及传热边界层的分离,从而使流体的逆向混合加强,强化了传热效果。传热强化的程度与螺槽深 e 、螺距 s 、螺槽头数 n 、以及流体的 Re 数与 Pr 有关。

文献〔2〕以水为工质对螺纹管的传热及流阻性能进行了实验研究,并给出了其在湍流区的对流换热计算关联式:

$$\text{当 } S > 0.4d, e \leq 0.6d^{0.8} Re^{-0.16}$$

$$Re = 2 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3 \text{ 时}$$

收稿日期:1989-08-10

$$Nu = 165 \left(\frac{e}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{s}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Re - 2000}{10^4} \right)^{(0.8 - 3.5 \frac{e}{d})} Pr^{0.4}$$

当 $S > 0.4d$, $e \leq 0.6d^{0.8} Re^{-0.16}$

$Re = 8 \times 10^3 \sim 8 \times 10^4$ 时

$$Nu = 165 \left(\frac{e}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{s}{d} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{Re}{10^4} \right)^{(0.8 - 3.5 \frac{e}{d})} Pr^{0.4}$$

文献[2]推荐的波纹管最佳参数比为: 当 $Re = 8 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ 时, $\frac{s}{d} = 0.4$; $\frac{e}{d} = 0.04$; 当 $Re > 3 \times 10^4$ 时, $\frac{s}{d} = 0.4$, $\frac{e}{d} \leq 0.04$.

文献[3]实验研究后推出的波纹管管内对流换热计算关联式为:

当 $\frac{e}{s} = 0.04 \sim 0.07$, $d = 17 \sim 33\text{mm}$, $n = 3$

$Re = 1.6 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ 时

$$Nu_{\text{螺}} = Nu_{\text{光}} \left[1 + 592 \frac{e}{s^*} - 7053 \left(\frac{e}{s^*} \right)^2 \right] Re^{-0.94} \left(\frac{e}{s^*} \right)^{0.41}$$

文献[4]则采用 $d = 45\text{mm}$ 的无缝铜管轧制的 $S = 15.7 \sim 100\text{mm}$, $e = 0.75 \sim 4.75\text{mm}$ 的27种单头波纹管进行实验研究, 得出的对流换热计算关联式为:

当 $Re = 2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$ 时

$$Nu = 1.138 \left(\frac{e}{d} \right)^{0.478} \left(\frac{s}{d} \right)^{-3.83} Re^{0.606} Pr^{0.4}$$

文献[4]推荐的波纹管最佳参数比为: $\frac{s}{d} = 0.5 \sim 0.7$, $\frac{e}{d} < 0.17$.

文献[5]则以空气为工质, 对15根用 $d = 42\text{mm}$ 的无缝钢管轧制的波纹管进行实验研究, 得出的对流换热计算关联式为:

当 $\frac{e}{d} = 0.0196 \sim 0.0682$, $\frac{s}{d} = 0.324 \sim 0.92$

$Re = 6 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ 时

$$S_i = \sqrt{\frac{f}{8}} / \left[2.5 I_n \left(\frac{d}{2e} \right) - 3.75 + 10.77 \left(\frac{e}{d} \right)^{0.33} \left(\frac{s}{e} \right)^{0.096} \left(\frac{e}{d} Re \sqrt{\frac{f}{8}} \right)^{0.273} Pr^{0.5} \right]$$

$$Nu = S_i Re Pr$$

$$\alpha = \lambda Nu / d$$

文献[5]推荐的波纹管最佳参数比为: 当 $Re = 6 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ 时, $\frac{e}{d} = 0.035 \sim 0.05$,

$\frac{s}{d} = 0.4 \sim 0.5$.

三、螺纹管内流动阻力

由于螺纹管内凸肋的作用,管内流体的湍流度增加,造成流体的沿程阻力增大。

文献[2]给出了螺纹管内流动阻力计算关联式:

$$\text{当 } \frac{e}{d} = 0.0323 \sim 0.1393, \quad \frac{s}{d} = 0.4037 \sim 1.152$$

$$d = 10.85 \sim 56.5 \text{ mm}$$

$$Re = 2 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4 \text{ 时}$$

$$f = 0.273e s^{-0.5} \quad (e > 2.5 \text{ mm})$$

$$f = 1.3 \left(\frac{e}{d} \right) \left(\frac{s}{d} \right)^{-0.7} \quad (e \leq 2.5 \text{ mm})$$

$$\text{当 } \frac{e}{d} = 0.0323 \sim 0.1393, \quad \frac{s}{d} = 0.4037 \sim 1.152$$

$$d = 10.85 \sim 56.5 \text{ mm}$$

$$Re = 5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 \text{ 时}$$

$$f = 0.273e S^{-0.5} \left(\frac{Re}{5} \times 10^4 \right)^{-0.2} \quad (e > 2.5 \text{ mm})$$

$$f = 1.3 \left(\frac{e}{d} \right) \left(\frac{s}{d} \right)^{-0.7} \left(\frac{Re}{5} \times 10^4 \right)^{-0.2} \quad (e \leq 2.5 \text{ mm})$$

文献[3]给出的螺纹管内流动阻力计算关联式为:

$$\text{当 } \frac{e}{d} = 0.01 \sim 0.12, \quad \frac{s}{e} = 9 \sim 120,$$

$$d = 14 \sim 33 \text{ mm}, \quad n = 1 \sim 3,$$

$$Re = 10^4 \sim 3.3 \times 10^5 \text{ 时}$$

$$f_{\text{螺}} = f_{\text{光}} \left[1 + 13 \frac{e}{s} + 94 \left(\frac{e}{s} \right)^2 \right]$$

文献[4]给出的螺纹管内流动阻力计算关联式为:

$$\text{当 } \frac{e}{d} \leq 0.05, \quad \frac{s}{d} = 0.35 \sim 2.22,$$

$$Re = 2.5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ 时}$$

$$f = 2.31 Re^{-0.075} \left(\frac{s}{d} \right)^{-0.7} \left(\frac{e}{d} \right)^{1.55}$$

$$\text{当 } \frac{e}{d} \leq 0.05, \quad \frac{s}{d} = 0.35 \sim 2.22,$$

$$Re = 5 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4 \text{ 时}$$

$$f = 22 Re^{-0.08} \left(\frac{s}{d} \right)^{-0.2} \left(\frac{e}{d} \right)^{1.68}$$

文献[5]给出的螺纹管内流动阻力的计算关联式为:

$$\text{当 } \frac{e}{d} = 0.0196 \sim 0.0682, \quad \frac{s}{d} = 0.324 \sim 0.92,$$

$$Re = 6 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$$

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.5 \ln \left(\frac{d}{2e} \right) - 3.75 + 0.868 \left(\frac{e}{d} \right)^{-0.33} \left(\frac{s}{d} \right)^{0.366}$$

$$\left[1 + 0.0296 (\ln Re - 9.48)^2 \right] \exp \left(-0.005 \frac{s}{e} \right)$$

以上所有公式的预报偏差都在10%以内。

四、单头螺纹管与多头螺纹管传热与流阻性能比较

对于单头螺纹管与多头螺纹管的传热与流阻性能,国外曾做过一些比较实验[6-7],其结果见表1。

表1 单头螺纹管与三头螺纹管传热流阻性能实验对比表

螺纹头数	节距 (mm)	螺纹高度 (mm)	螺纹管与光管的换热系数比	螺纹管与光管的流阻系数比
3	2.4	0.8	1.67~1.68	3.24~3.26
1	2.4	0.8	1.53~1.65	2.01~2.09
3	2.4	0.4	1.42~1.44	1.65~1.68
1	2.4	0.4	1.43~1.46	1.58~1.66

由表可见,当单头螺纹管与三头螺纹管的对流换热系数相近时,后者的流阻系数远高于前者。这是由于在相同的 Re 数时,单头螺纹管的升角较小,其主要作用是使边界层流体旋转,减薄边界层,强化换热过程。而多头螺纹管的升角较大,能使边界层流体与主流流体一起产生强烈旋转,而主流流体的旋转对强化换热的作用不大,却增加了很大的流动阻力。因此,目前工程上一般都采用单头螺纹管作为强化换热元件。

五、螺纹管的刚度性能

目前,螺纹管已开始应用于卧式水火管快装锅炉上。但是,由于螺纹管的刚度较之光管有很大不同,并且,随着结构参数而变化。而这种特性对于烟管对锅筒管板的拉撑作用以及管板强度的影响如何则是将螺纹管应用于卧式水火管快装锅炉必须解决的问题。文献[8]通过实验和理论推导,给出了螺纹管刚度计算关联式:

$$\eta = \xi \frac{1}{1 - 2 \left(\frac{e}{s} \right) + \frac{4}{K} \left(\frac{e}{s} \right) \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi(1+K)} \right)}$$

其中:

$$K = \frac{1}{12} \left(\frac{h}{e} \right)^2 + \frac{1}{80} \left(\frac{h}{e} \right)^4 + \frac{1}{224} \left(\frac{h}{e} \right)^6 + \dots$$

此公式的预报偏差在10%以内。

文献[8]指出,在工业锅炉使用的螺旋管结构参数范围内,即螺槽深1.2~2.2mm,螺槽截距15~30mm,管壁厚3~3.5mm,螺旋管的刚度为光管刚度的0.55~0.65倍。当螺旋管刚度在光管刚度的0.2~1.4倍范围内变化时,卧式水火管快装锅炉拱形管板上各点的当量应力值变化范围不大于10%。

六、螺旋管的磨损性能

螺旋管的磨损、积灰性能是设计含尘气流换热设备必备的技术指标。文献[9]的实验研究表明:螺旋管类似于其它受磨件,单位时间内的磨损量在磨损初期阶段逐渐降低,以后逐渐趋于稳定状态。磨损量沿螺旋管圆周方向分布均匀,磨损最严重的区域为螺旋凸肋迎风面中上部,且磨损量随着螺槽深和螺距的增加而加剧。

文献[9]通过对实验测得的数据进行回归整理,得出单头螺旋管磨损量计算关联式:

$$\text{当 } \frac{e}{d} = 0.0196 \sim 0.0617, \quad \frac{s}{d} = 0.323 \sim 0.920,$$

$$W = 5.89 \sim 19.93$$

$$d_p = 0.082 \text{mm} \quad \text{时}$$

$$\Delta G = 4.975 \times 10^{-7} \left(\frac{e}{d} \right)^{0.440} \left(\frac{s}{d} \right)^{1.167} W^{3.15} \mu \tau$$

从上述公式可以看出:螺旋管内的磨损量 ΔG 约与气相速度 W 的3次方成正比,且随着螺槽深 e 、螺距 s 、灰粒粒径 d_p 、灰粒浓度 μ ,磨损时间 τ 的增加而增大。

螺旋管的磨损对管内对流换热系数有一定影响。磨损后,螺旋凸肋的形状变化且高度降低,从而导致对流换热系数有所下降。

螺旋管的磨损对其强度影响不大。

七、螺旋管的积灰性能

文献[9]的实验研究表明:螺旋管内的积灰是由两个同时进行的过程所组成:细灰吸附于螺旋管内壁;粗灰则破坏吸附在螺旋管内壁的细灰层。

在积灰的初始阶段,积灰量逐渐增加,达到一定时间后,积灰过程逐渐趋于稳定。螺旋管内积灰沿圆周方向和管长方向分布都较为均匀。积灰只发生在螺旋凸肋背风处,且灰粒粒径小于 $50\mu\text{m}$,多数小于 $40\mu\text{m}$ 。气相速度 $W = 6 \sim 20 \text{m/s}$ 时, W 对积灰量无影响。

螺旋管结构参数对积灰有较大影响。螺距 s 增加,积灰量减少。对于小螺距螺旋管,槽深 e 增加,积灰量增加;对于大螺距螺旋管,槽深 e 增加,积灰量反而减少。

原始颗粒粒径分布对积灰影响很大。 R_{90} 增加,积灰量减少;反之,积灰量增加。由于在实际工作中螺旋管内的积灰量很少,因此,可忽略其对传热性能的影响。

八、结 束 语

随着对螺纹管性能研究的深入,特别是对强度、刚度、磨损和积灰性能的研究结果,奠定了其在燃煤工业锅炉上的应用基础。据测算,在卧式水火管快装锅炉上使用螺纹管代替光管作为传热元件可以节约大量钢材,改善原炉型的固有缺点,具有很高的技术经济效益。总之,螺纹管在工业锅炉上具有较为广阔的应用前景。

符 号 说 明

- e —螺槽深, mm;
 s —螺距, mm;
 n —螺槽头数;
 d —螺纹管流通直径, mm;
 Re —流体的雷诺数;
 Nu —流体的努谢尔特数;
 Pr —流体的普朗克数;
 a —对流换热系数;
 f —沿程阻力系数
 S^* —当量螺距, $S^* = \sqrt{S^2 + d^2}$;
 h —螺纹管厚度, mm;
 η —螺纹管与光管刚度之比;
 ξ —误差修正系数, 由实验测得 $\xi = 0.55$;
 ΔG —磨损量, g/m²;
 W —气相速度, m/s;
 l —灰粒浓度, g/m³;
 τ —磨损时间, h

参 考 文 献

- [1] Lawson C G, Keal R J, Modonald R E. Transcation of the ANS, 1966, 9(2):565
- [2] 吉富英明, 大场一马, 有马芳雄. スパイロへ管の传热と压力损失. 火力发电厂发电, 1976, 27(2):171
- [3] Бродов Ю М. Теплоэнергетика, 1982(12):36~40
- [4] 程俊国. 高效传热表面. 重庆大学科技, 1982(1):1~22
- [5] 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
- [6] Newson J H, Hodgson T K. 4th Int Symp on Fresh Water from Sea. 1973, 1
- [7] Afgan N H, Schuender E U. Heat Exchangers Design and Theory Sourcebook. 1977
- [8] 董芑, 刘曼青, 张勇, 李之光. 螺纹烟管的刚度分析及其对拱形管板强度的影响, 热能动力工程, 1988, 6
- [9] 吴江全, 董芑, 郝平. 螺纹管性能的综合研究. 全国动力机械与工程热物理青年工作者论文报告会论文集, 1988, 8

(渠源沥 编辑)

An Investigation on Synthetic Properties of Spirally Corrugated Tubes

Dong Peng, Wu Jiangquan

(Harbin Institute of Technology)

Liu Zhende

(Harbin Longjiang Boiler Works)

Abstract

Presented in this paper are an analytical investigation on the synthetic technical properties of spirally corrugated tubes, and a review of various calculation correlation formulas and investigation conclusions, laying a foundation for the application of spirally corrugated tubes in engineering

Key Words: *spirally corrugated tube, strengthened heat transfer*

“程氏循环”热电联供装置推广 应用交流会在哈尔滨召开

哈尔滨市科学技术协会与中国船舶工业总公司第七〇三研究所联合举办《程氏循环热电联供装置推广应用交流会》于1989年12月14日在哈尔滨市召开。参加会议的单位有省科学顾问委员会、市科协、哈尔滨电站成套设备研究所、哈船院、第七研究院外事处，以及大庆油田的六个单位的代表。黑龙江电视台、哈尔滨日报及黑龙江科技报记者采访了本会。

会上，日本专家野口康博和曾根泰辛宣读了“川崎重工程氏循环热电联供系统的开发”的学术论文，哈尔滨七〇三研究所总工程师闻雪友介绍了“双工质平行一复合循环热电联供装置应用和发展前景”的论文。日中双方学者进行了热烈的讨论和咨询。

日本KHI推出了M1A—01CC和M1A—13CC程氏循环机组。七〇三所也于1989年6月推出国内第一台程氏循环热机的试验装

置。中日双方进行了该热机的技术合作，现已推出工程化示范装置，为实际应用打下了坚实的基础。

与会者还实地参观了程氏循环热机的运行情况。控制室内仪表盘上、监视屏幕上清晰地显示了燃气轮机喷注蒸汽前后的功率、燃料、蒸汽等参数的变化情况。参观者感兴趣地记录下各种参数的变化数据，表示了对这一技术的极大兴趣与关注。充分的事实表明，程氏循环热机作为热电联供装置具有下列明显优点：

1. 大幅度地提高效率；
2. 大幅度地提高输出功率；
3. 在动力输出和热输出之间可方便地匹配调整，在满足热电平衡方面具有高度的灵活性，非常适用于热电联供；
4. 使排放物中NO_x含量减小，有利环境保护；
5. 可用现有的燃气轮机进行改造，这使它在财力方面具有明显优点。

(本刊编辑部)