

顶棚过热器受热面管流量偏差问题的数值模拟研究

范卫东¹, 韩小岗², 郝卫东², 章明川¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 250002)

摘 要: 对一台锅炉中其分配集箱带弯头入口的顶棚管过热器受热面管流量分配做了较详细的数值模拟研究。研究发现, 进口弯头对分配集箱中的流量分配有较大的影响, 弯头上不同区域的管产生不同的流量偏差, 布置在弯头外侧的管流量偏大, 弯头内侧的管流量偏小, 并且弯头出口附近直管集箱上的管中流量也会受弯头的影响。该区域受热面管中流量偏小的管产生爆裂后, 其附近流量偏大的管中流量会减小, 出现连锁爆裂。最后, 根据计算分析, 得到产生流量偏差的原因和特点, 提出消除流量偏差和解决爆管的措施, 并给予了计算论证。

关 键 词: 锅炉; 过热器; 爆管; 数值模拟

中图分类号: TK223.3 文献标识码: A

1 前 言

电站锅炉过热器、再热器的超温爆管现象是锅炉运行中最常见的事故之一, 严重影响到锅炉的安全经济运行。爆管的原因是多方面的, 往往是由热偏差引起的, 而导致热偏差的主要原因是过热器所处烟道的烟温和烟速分布不均引起的烟气侧传热偏差和过热器系统结构不合理引起的并联管中流量偏差^[1], 其中过热器、再热器采用了不合理结构, 如弯头、三通等引起的并联管组上的流量偏差导致爆管占了较大比重^[2]。本文针对某电厂锅炉的顶棚管过热器进口集箱带弯头入口而引起其上并联的受热面管流量偏差导致的爆管做了详细的数值模拟研究。

2 模拟对象及模拟方法

某电厂 1 号~3 号锅炉为某锅炉厂 400 t/h 再热锅炉, 自 1972 年投产至今运行已近 30 年。从 1997 年锅炉改造后, 顶棚过热器受热面管束频繁爆管, 三台锅炉顶棚过热器已爆管数次, 爆管位置都位于顶棚过热器靠近两侧墙的六根管束的炉膛出口部分,

大致位置见图 1 所示。这不但严重威胁锅炉的安全运行, 也影响了经济指标的完成。爆管的原因主要应从两方面分析: 炉内燃烧工况如何和是否顶棚过热器各受热面管间存在流量偏差。文献[3]介绍, 此锅炉的确存在炉膛高度相对较矮、炉膛容积热负荷偏高等问题, 这使位于炉膛出口部分顶棚过热器受热管束处的烟温可能偏高。对于顶棚过热器各受热面管间是否存在流量偏差引起流量偏小的管(即前述六根管束)爆裂尚未有可靠定论。为此, 证实是否有偏差管存在; 若有, 是造成偏差的原因, 并提出消除偏差管的措施。在此背景下对该顶棚过热器受热面管束流量偏差问题进行了试验和数值模拟研究, 介绍数值模拟得到的一些结果。

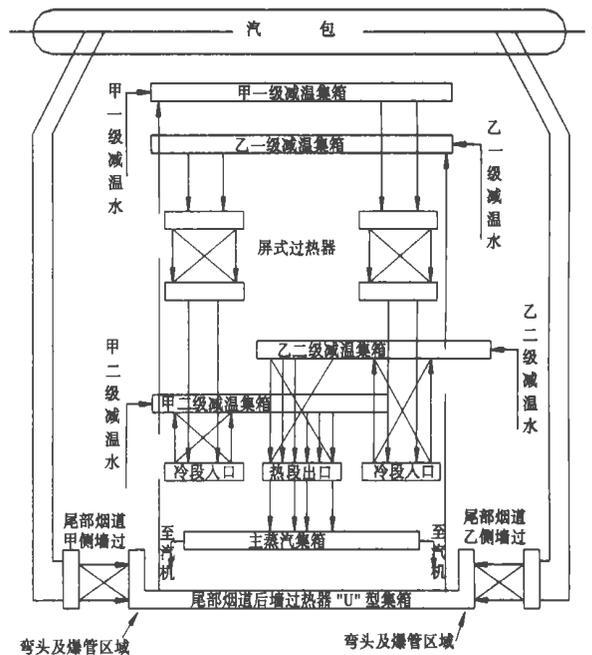


图 1 主蒸汽流程图

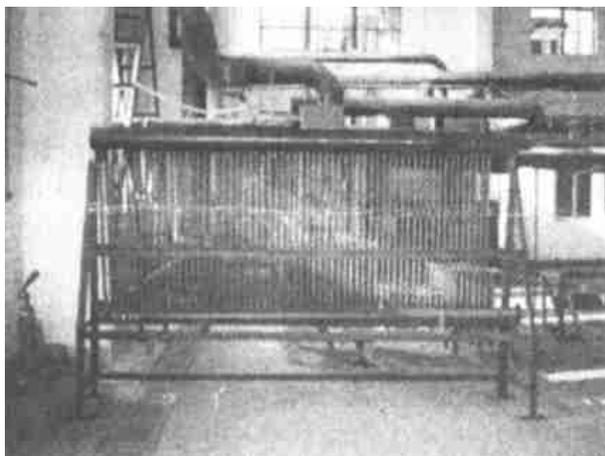


图 2 试验台 现场照片

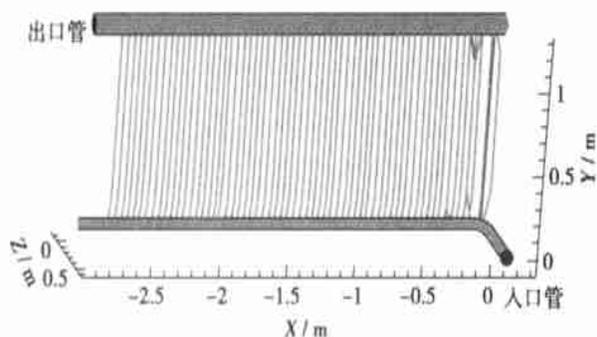


图 3 计算模型造型

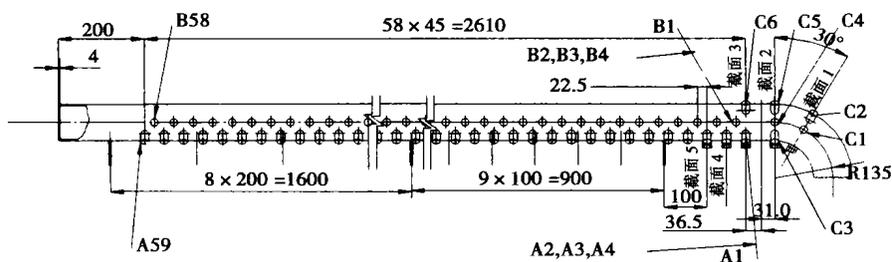


图 4 管排编号示意图

利用 CFD 商用软件以试验台为数值模拟对象, 完全遵循试验台的几何条件、边界条件, 即以试验台设计图纸严格造型, 不做任何简化, 因此计算的结果十分可信。而试验台是以后墙包墙管下集箱(分配集箱)一半为模化对象(由于对称), 其上的受热面管共有 123 根, 见图 2 所示。根据模化计算结果, 模型按原型 1:2 缩小后, 模型中受热面管长度为 12.5 m, 管内径 15 mm, 下集箱(分配集箱)内径 80 mm, 上集

箱(汇流集箱)内径 139 mm, 在上集箱中还内置一个内径 80 mm、外径 89 mm 的套管, 此管模拟原型中的喷水减温器, 整个受热面管束与上、下集箱形成的是 U 型联接系统。受热面管中平均流速为 10 m/s, 下集箱进口总风量 43.79 m³/s。由于模型中受热面管较长, 实际制作模型很难做到, 因此管长需缩短, 但总阻力系统数必须被保证, 这样才能模拟集箱中真实的压力分布, 从而得到真实的流量分布情况。为此设计了节流孔板来模拟长度缩短时减小的阻力系数(当然, 在试验模型中还兼做受热面管中流量测量装置)。数值计算采用 $\kappa-\epsilon$ 双方程湍流模型, 迭代过程采用 SIMPLEC 方法求解。计算造型见图 3 所示, 为了减少总的网格数, 对造型采用组合网格生成法, 即在每根受热面管上采用较规整六面体结构化网格, 为保证受热面管与集箱间微小(相对于几何尺寸)的几何衔接, 在分配、汇流集箱上采用四面体非结构化网格, 总网格数在 60 万个以上。

3 计算结果及分析

为便于研究, 对 123 根管进行了编号, 弯头上易爆的 6 根管单独编为 C 组, 直管编为 B 组, 带弯头管编为 A 组, 具体编号见图 4。

3.1 集箱轴线方向压力分布

图 5 为两集箱的沿轴线方向压力分布情况。图中压力进行了无量纲处理, 即得到的欧拉数是集箱压力与汇流集箱出口的流速值计算的动压头之比。坐标原点位置见图 3 中下集箱上的坐标系, 为方便与试验对照, 制图时调转了 x 坐标方向, 即图中左面是弯头。沿上下两集箱轴线方向压力分布是较有规律的, 与试验结果很吻合^[4], 这种规律符合 U 型联接系统沿集箱长度工质压力变化的理论分析^[5]。两集箱的压力分布沿程形成的压差是较均匀的, 说明大多数管排的流量分布也均匀, 不会出现较大流量偏差。但同样在靠近弯头端(坐标为正值方向)压差稍小一些, 这里的管中流量会偏小一点。与试验稍有区别的是在横轴左端分配集箱压力突然升高, 这是因为其位置逐渐接近弯头外侧内壁面, 气流产生了滞止所至, 而此位置汇流集箱压力下降是因为此处

为减温器入口气流有涡流造成的。

3.2 受热面管流量偏差系数分布

从数值模拟(弯头端为坐标小值方向)来看, 图 6~图 8 所反映出的数据规律基本与试验结果一致, 但在靠近弯头部位流量偏差系数(管中流速比平均管流速)计算值比试验值要大一些。A 和 B 两排管靠近弯头端的管子流量偏小, 偏差系数小于了 1, 但仍大于 0.85, 甚至大多数管大于 0.9, 而只有 A1, A2 的流量偏差量超过了 10%。对于现场易爆的管, 即 C 排管的流量偏差曲线变化很大, C1、C2、C4、C5 的流量偏差系数都接近 1, 甚至大于 1, 而 C3 和 C6 的系数偏小, 特别是 C3 的流量最小, 偏差量超过了 25%, 而试验值超过了 55%, 过热器在实际运行中由于流量的波动流量偏差系数可能更小, 这必然导致该管未受良好冷却而爆裂。

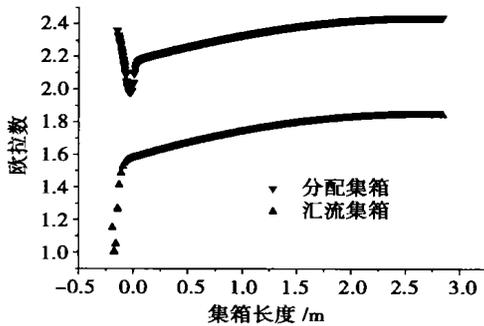


图 5 无因次压差分布曲线

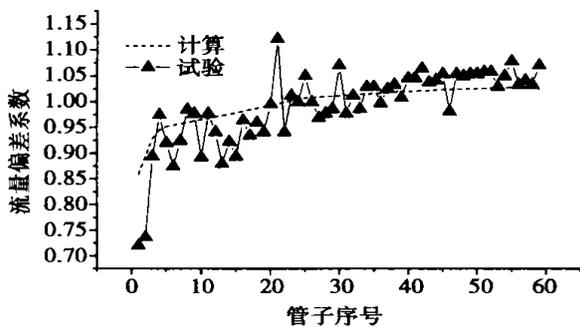


图 6 A 排管流量偏差系数

3.3 静压分布及产生流量偏差管原因分析

图 9 为分配集箱弯头处受热面管入口管接头所在平面的静压分布情况, 图中数值单位为帕。C 排管中各管入口轮廓基本能看清楚, 借此可判断各管入口处静压高低情况分析该管流量的大小。气流流经弯头时由于惯性会大量涌入弯间的外侧, 与外侧壁面碰撞滞止, 动压转换为静压, 压力升高, 在弯

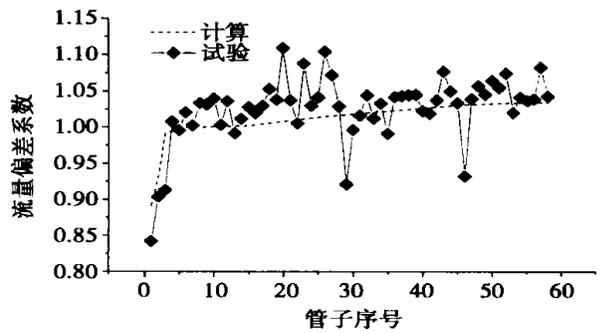


图 7 B 排管流量偏差系数

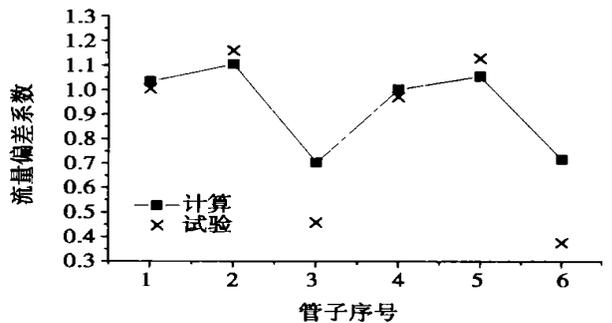


图 8 C 排管流量偏差系数

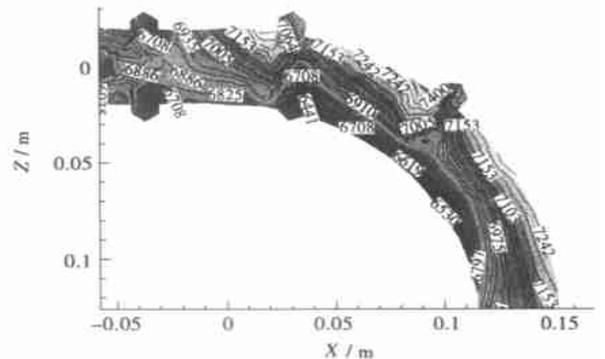


图 9 弯头处受热面管入口所在截面静压分布

头外侧形成高压区, 即图中数值所示。而在弯头内侧是气流的低速区, 必然在此形成低压区, 如图所示, 这与试验结果完全符合^[4]。气流流经弯头后, 又会向内侧收缩, 即在弯头出口外侧的直管段形成压力较低的区域(C6 所在位置, 试验很难测量此水平剖面, 即未得到结果), 但这种向内收缩幅度很小, 故在弯头出口内侧的直管段区域仍受弯头内侧影响而压力较低(A1 所在位置)。这一压力分布特点必然造成处于压力较高的弯管外侧区域的 C2、C5 流量偏大, 处于压力较低的弯管内侧区域的 C3 和弯头的出口外侧的直管段区域的 C6(以及 A1)流量偏小,

而处于弯管中部压力居中区域的 C1、C4 流量适中。

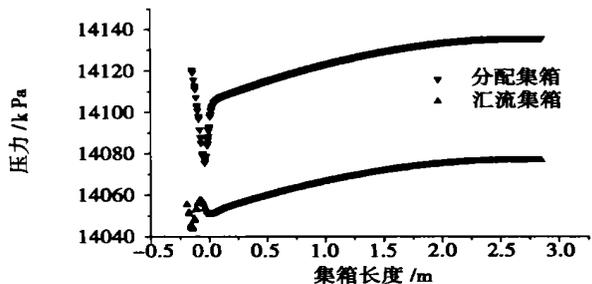


图 10 计算压差分布曲线

综上所述可知, C 排管中流量较小的是 C3 和 C6, 而现场出现爆管的是靠弯头的数根管, 即 C1、C2 等都可能爆管, 这似乎存在矛盾, 其实不然, 若流量偏小的产生爆管后, 偏大的管是否还偏大就不一定, 即可能出现连锁反应也会爆管。现来分析这一推测, 若偏小的 C3 产生爆管, 则 C3 爆管处必然会“泄压”, 即爆管处接近于烟道中烟气压力(稍低于当地大气压), 而其相邻的管在引入汇流集箱处远大于当地大气压的背压(在这台炉中应大于 14MPa)。为平衡各管中的压差, C3 中的流量会大大增加, 并使其入口处压力降低, 这样其邻近管的流量就会大大减小, 形成偏差管, 逐渐过热爆管。此管爆后, 与 C3 爆后一样会引发连锁反应, 以此类推。为证实此推测, 现数值模拟 C3 爆裂后各管的流量分配情况(由于风机压头无法保证在上集箱出口处形成高背压, 故无法通过试验证明此推测), 爆管位置选在节流孔板之后, 这与实际爆管位置及其对其前后的阻力系数分配是符合的。图 10 为两集箱的沿轴线方向压力分布情况, 与图 5 有较大区别的是在弯头位置, 分配集箱压力较大程度地减小了, 这与上述推测分析完全一致, 而汇流集箱在同侧压力却有一定程度增加, 可能是这里有气流泄漏能减小此位置的涡流区而导致此位置的压回升。两集箱的压力分布特点必然使弯头处的管中流量减小, 而远离弯头区域的管中流量减小程度较小一些。图 11 和图 12 是此时的各排管中流量分配情况(C3 流量偏差系数远大于 1, 故未示出), A 和 B 排管的流量偏差系数较图 6 和图 7 减少了近 0.1, 而 C 排管的流量偏差系数较图 8 减少了近 0.2~0.5, 减少幅度很大, 其中 C1 出现了更大

偏差。这样就完全证实了上述的推测, 即在弯头处出现一根管爆管可能引起此位置连锁的爆管。

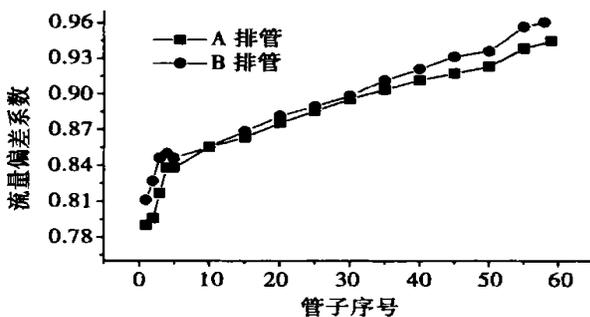


图 11 A、B 排管流量偏差系数

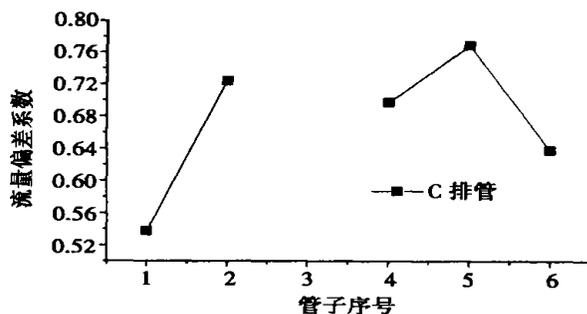


图 12 C 排管流量偏差系数

4 消除流量偏差管改进结构及验证

根据前述产生流量偏差管的原因, 结构上可采用一定的改进来消除偏差管, 在这里提出两种措施: 弯头处易爆的管可远离弯头低压区引出; 在弯管处单设一中间集箱, 从侧集箱单独引入蒸汽, 弯头处的偏差管从中间集箱引出。下面分别来验证这两种措施是否可行。

4.1 原流量偏差管远离弯头低压区引出法

在原工况中 C 排管的 C3、C6 流量偏差最大, 因

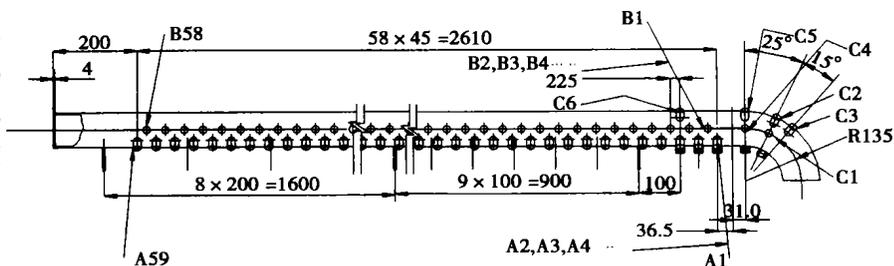


图 13 管排编号示意图

此可把它的引出位置移离低压区。在这里, 把 C3 移到弯管外侧的高压区, 而 C6 移到远离弯管出口的区域, 如图 13 所示。当然实炉上还可把 A 和 B 排管中前几根偏差管(虽然偏差较小)移离弯头出口区, 然后进行‘跳管’, 跳回原来所在的炉墙位置。图 14 和图 15 是该工况计算得到的各管的流量偏差系数, 很显然, 除 A 和 B 两排管的流量偏差系数较原工况变化不大外, C 排管中原流量偏差较大的管得到了很大改善, 特别是 C3 管的流量现在已大于平均管的流量。这是因为这些管入口已处于高压区, 如图 16 所示。

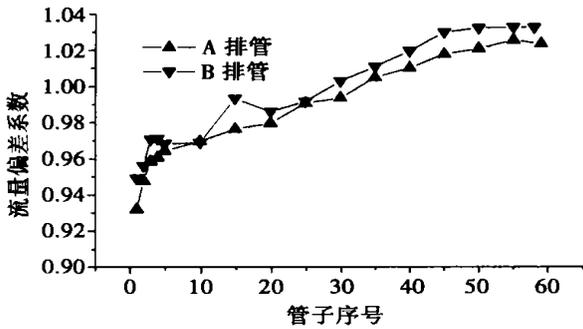


图 14 A、B 排管流量偏差系数

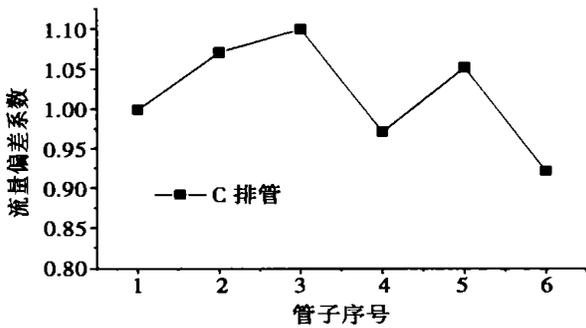


图 15 C 排管流量偏差系数

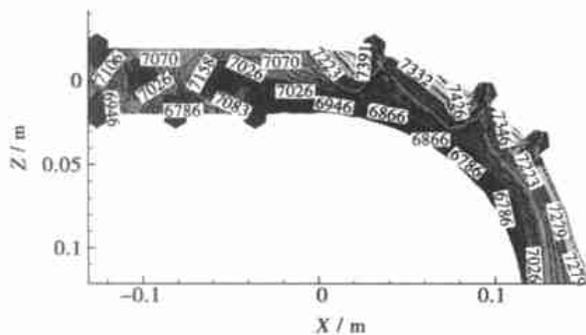


图 16 弯头处受热面管入口所在截面静压分布

4.2 弯管处设中间集箱法

在弯管处单设中间集箱, 从侧后墙包墙管下集箱单独为其引入蒸汽, 这样弯头处的偏差管可不从弯头引出, 而从中间集箱上引出。图 17 是设中间集箱时的造型情况, 这里为方便起见把中间集箱放在了弯头之上, 现场应把它放在其后面, 但计算效果是等效的。另外, 中间集箱的气流是从弯头处引入的, 而不是从侧集箱, 若此情况可以, 则现场从侧集箱引入就更没问题。在此工况中, 把 C 排管的所有管和 A、B 排管中流量偏小的 A1~A5、B1~B5 共 16 根管放在了中间集箱引出。图 18 是沿三个集箱轴线方向弯头内侧母线上的静压分布情况, 分配和汇流集箱的压力分布与原工况相比变化不大, 中间集箱的压力为图中短线, 它高于分配集箱弯头处压力(该处压力较低), 在弯头区域的偏差管的流量驱动压差从分配和汇流集箱的压差变为了中间集箱和汇流集箱的压差, 因此, 驱动压差变大了, 这样流量偏差量必然会减小。图 19 和图 20 表示了此工况各根管的流量分配情况, 显然, 不管哪排管的流量都分配较均匀。最大流量偏差管的流量偏差量都未超过 0.1, 并且从中间集箱引出管的流量已较接近平均管流量。

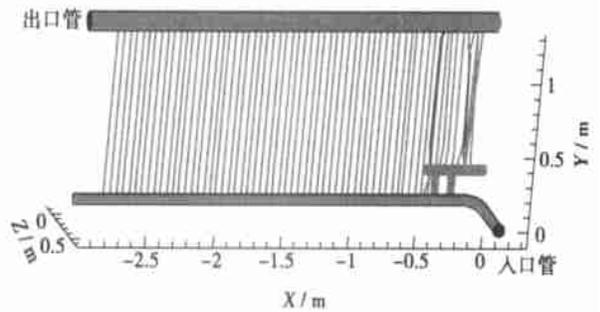


图 17 设中间集箱时计算域的造型

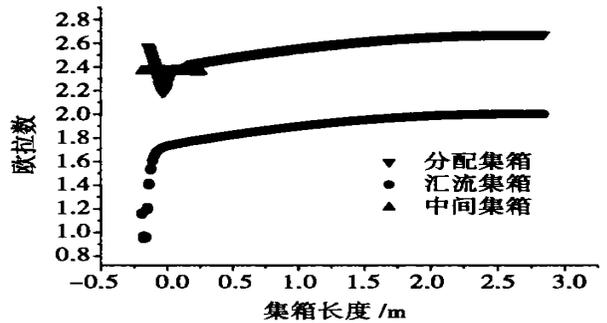


图 18 计算压差分布曲线

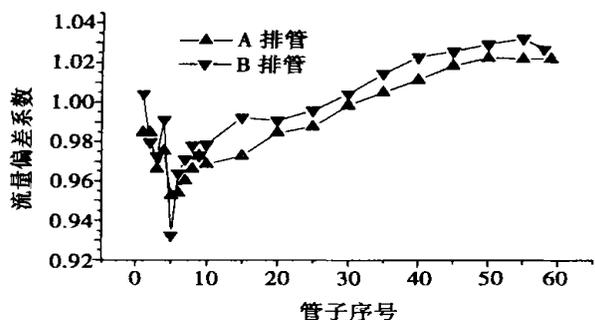


图 19 A、B 排管流量偏差系数

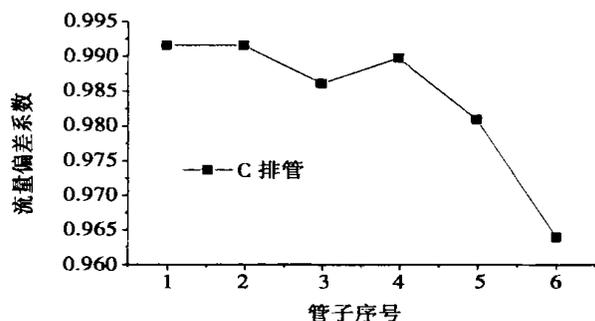


图 20 C 排管流量偏差系数

5 结 论

借助数值模拟来研究并联管中复杂的流量偏差问题是可行的。本文针对一台具体的过热器中带弯头入口的并联管组流量偏差问题,通过数值计算分析得出一些认识,弯头的存在的确引起其上的管子

发生一定的流量偏差,这可能是该过热器发生爆管的重要原因。布置在弯头外侧的管偏大、弯头内侧的管偏小,这是由弯头处气流的流动行为决定的,可通过静压分布来分析。在弯头出口的直管集箱上,由于低压区的影响并没结束,则这一区域的受热面管中流量仍偏小。若偏小的产生爆管后,其附近流量偏大的管中流量会大大减少,出现连锁反应也会爆裂。为彻底解决爆管问题可采用以下措施:在设计并联管组结构时,分配集箱应尽量不采用弯头入口;若不得已采用了弯头,弯头处易爆的管可考虑稍远离弯头低压区引出;另外,在弯管处也可单设一中间集箱,单独为其引入蒸汽(因其总流量小,引入管可较小,不会给该集箱带来强度问题),单独给弯头处的这几根管供汽。当然,针对该炉考虑到改造成本的因素,也可采用一些‘消极’的措施,如堵掉流量偏小的管或更换较好材质的管子等。

参考文献:

- [1] 袁益超. 对流过热器与再热器的汽温偏差对烟温偏差的敏感性研究[J]. 动力工程, 1999 19(2): 29- 32
- [2] 唐必光. “三通效应”对高温过热器流量分配的影响及改进措施[J]. 电站系统工程, 1999 15(5): 26- 28.
- [3] 袁益超. 大容量电站锅炉汽温问题及过热器与再热器超温爆管原因的分析[J]. 动力工程, 1994 14(6): 21- 28.
- [4] 范卫东. 防止顶棚管过热器频繁爆管的研究报告[R]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- [5] 黄承懋. 锅炉水动力学及锅内传热[M]. 北京: 机械工业出版社 1982.

(何静芳 编辑)

汽轮机热膨胀规范化的综合方法

据《ЭлектрИческие станции》2002 年 5 月号报道,解决汽轮机热膨胀研究和规范化问题的方法应该是综合成套的,并且本身应该包括分析摩擦力变化和键接内出现卡死的原因并分析管道的工作情况。

应用旋转式横向键不仅允许排除横向键接内的卡死和塑性变形,而且可以在整个运行期间使连接管道对汽轮机热膨胀系统工作的影响保持不变。

在大多数情况下,不用切断管道只需要进行最少量的工作就可以完成从回热到余热供暖抽汽连接管道一侧作用到汽轮机上的力和力矩的优化。

(吉桂明 供稿)

顶棚过热器受热面管流量偏差问题的数值模拟研究= **Numerical Simulation Study of Flow Distribution Deviation in Heating-surface Tubes of a Roof Superheater** [刊, 汉] / FAN Wei-dong, HAN Xiao-gang, HAO Wei-dong (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), HONG Mei (Shanghai Boiler Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 343 ~ 348

A detailed numerical simulation study was conducted of the flow distribution in the heating-surface tubes of a boiler roof superheater featuring a distribution header with a bent inlet. The inlet elbow has a relatively great impact on the flow distribution in the distribution header with different flow deviations occurring in tubes at different zones of the elbow. The flow rate in the tubes located at the outer side of the elbow is excessively great while that at the inner side of the elbow is excessively small. Moreover, the flow rate in the tubes of a straight-tube header adjacent to the elbow outlet will also be affected by the elbow. After a tube explosion caused by the excessively small flow rate in heating-surface tubes located in the above zone the flow rate in the nearby tubes with excessively great flow rates will be drastically reduced, thus triggering chain explosions of tubes. Finally, on the basis of calculations and analyses the causes and specific features of the flow deviations were identified and verified, and relevant measures adopted for eliminating flow deviations and solving the problem of tube explosions. **Key words:** boiler, superheater, tube explosion, numerical simulation

自激振荡脉冲射流强化换热实验研究= **Experimental Investigation of Intensified Heat Exchange Based on Self-excited Oscillating Pulse Jets** [刊, 汉] / GAO Hong, ZENG Dan-ling (Power Engineering Institute under the Zhongqing University, Zhongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 349 ~ 351

A preliminary exploratory study was conducted of the mechanism of self-excited oscillating pulse jets-based intensified heat exchange. Furthermore, a contrast test was performed of the heat exchange conditions with or without a resonant cavity. Through tests it is found that the self-excited oscillating pulse jets produced by a Helmholtz resonant cavity have intensified the dilution mixing of fluids in a tube, thus destroying boundary layers and resulting in an intensified heat exchange. During the tests it has also been discovered that the increase in pressure difference at the two ends of the resonant cavity will generate more intensified pulse flows, significantly enhancing the turbulence degree of fluids and, as a result, intensifying the in-tube flow heat exchange. **Key words:** self-excited oscillation, pulsation, jet flow, intensified heat transfer

微细通道内可燃气体预混燃烧实验与微型发动机燃烧方案= **Pre-mixed Combustion Tests of Combustible Gases in Tubules and the Combustion Scheme of a Micro Turbo-engine** [刊, 汉] / HU Guo-xin, WANG Ming-lei (Department of Aerospace & Aeronautical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 352 ~ 355

In the light of the current development state of micro turbo-engines discussed are the intractable problems related to the maintenance of stable combustion in tubules. An experimental research has been conducted with respect to the flame stability of premixed combustion of fuel gas and air in the tubules. The ignition concentration limit of hydrogen and acetylene combustion was identified through tests. The test results show that it is feasible to conduct premixed burning of combustible gas and air in the tubules, but there is a significant reduction in the range of combustible product concentrations. The use of supercharged combustion can lead to an increase in the range of combustible concentrations and may enhance combustion stability. In comparison with large channels the tubules will not easily be subject to a back-fire, but is liable to suffer from flame extinction. However, a mixed gas flow with a relatively high fuel gas concentration will not be blown out easily and also enjoys fairly good combustion stability. **Key words:** micro turbo-engine, combustion stability, micro-fine channel, fuel-air ratio