

某电厂汽包锅炉过热器顶棚管联箱结构优化研究

吕玉贤¹, 庞力平¹, 李文学²

- (1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206;
2. 国电电力发展股份有限公司安全生产部, 北京市 朝阳区 100101)

Geometrical Optimization for Outlet Tubes at Header of Top Roof Superheater in a Utility Boiler of a Power Plant

LÜ Yuxian¹, PANG Liping¹, LI Wenxue²

- (1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Production Safety Department, GD Power Development Co., LTD, Chaoyang District, Beijing 100101, China)

ABSTRACT: Numerical simulation was performed on the internal flow of header using the method of computational fluid dynamics with geometry model builded the same as practical field for the frequent rupture of roof superheater in a power station. The results indicate that due to the abnormal static pressure distribution in the area of Tee-junction of header, the static pressure of the branch pipes around inlet tube is so low, and the mass flow rate decreases relatively, then the heat transference of tubes deteriorates, finally the tubes rupture. This paper proposes an improved geometric construction. By changing the leading direction of specific branch pipes, the uniformity of mass flow distribution in branch pipes promotes significant. It will offer a great reference for further design and optimization of distribution header in power station boilers.

KEY WORDS: roof superheater; rupture; numerical simulation; Tee-junction header; flow distribution; structure optimization

摘要: 针对某电厂锅炉顶棚过热器频繁爆管现象, 建立了与现场实际相同的几何模型, 采用计算流体力学方法对联箱内部流动情况进行数值研究。研究发现联箱三通附近由于静压分布异常, 导致引入管周边的分支管静压较低, 流量分配相对减少, 发生传热恶化, 进而发生爆管。该文提出优化的几何结构, 通过对特定分支管引出方向进行调整, 显著提升了并联分支管流量分配的均匀性, 为电站锅炉分配联箱设计和结构优化提供一定的参考。

关键词: 顶棚过热器; 爆管; 数值模拟; 三通集箱; 流量分配; 结构优化

0 引言

随着电站锅炉容量增加, 过热蒸汽的蒸发量随之增大, 因此, 大型电站锅炉过热蒸汽系统普遍采

用径向引入大直径分配集箱和多方向引出并联分支管来适应过热蒸汽流量的增加。

早期集箱多采用轴向引入的分配集箱方式调整受热面内部过热蒸汽流量。国内外学者进行了深入研究, 获得了大量有益的结论并在工程中广泛应用^[1-3]。Bajura 于 1971 年进行了开创性工作, 提出了 Bajura 第一模型^[4], 之后陆续有学者提出了半理论半经验公式的修正模型和其他模型^[5-9]。在过去的几年里, 对 U 型管组和 Z 型管组的流量分配和压降也进行了不少理论研究和数值模拟^[10-12]。

近年来, 采用径向引入过热器和再热器分配集箱入口三通处存在涡流区, 发生了不少超温爆管事故。陆方等人针对分配集箱中涡流的问题进行了模化实验、理论分析和实验验证, 探索了压强与流量的关系^[13]。罗永浩等对分配集箱入口三通附近涡流区中的集箱静压分布和支管入口阻力系数进行了深入的实验研究, 计算所得的流量分配与实验数据吻合较好^[2]。王峻晔等提出了幂速度分布理论, 使联箱内部流量分配的理论计算结果更接近实际, 更能准确地描述分配集箱内流动的行为、静压分布和流量分配情况^[14]。刘福国等针对目前分配集箱的模型不能直接应用于汽包配水管设计的问题, 从质量守恒原理出发, 建立了分配管分支流动的物理模型, 获得分析解并给出了均匀分流和变节距多孔分配管的设计方法^[15]。庞力平等针对径向引入分配联箱, 提出了并联分支管的两相流流量分配的计算方法^[16]。钟崑等研究了热负荷分布不均性对并联管组流量分配不均性的影响, 通过理论推导, 得知单相蒸汽状态下各并联管区段的分配流量随热负荷的

增加而减小^[17]。随着 CFD 软件的发展,数值模拟的方法也应用在三通区域的静压分布与流量分配的研究上^[18-19]。

针对三通效应引起流量偏差进而导致爆管事故的现象,国内学者也提出不少优化方案。王孟浩提出改变分支管位置的方案,将涡流区的支管平移到更靠近引入管正对的位置处,以增加该支管的流量^[20]。唐必光等提出从分配集箱的左右侧手孔处引出管子,接入至流量较少的两分支管的方案^[21]。刘进提出两种改进后的球型三通和弧形三通结构,以弱化三通附近回流区对流量分配的影响^[19]。董红年提出通过减少分支管根数以增大间距和改进入口节流孔的方案^[22]。周云龙等将流量偏少的分支管屏的入口形状改为圆形,改造后的支管的流量明显增大,但会使后面支管的流量比改造前小^[18]。由于三通联箱几何结构复杂性,还没有一个通用简单的方法解决由三通效应引起联箱内部分支管流量偏差导致的爆管事故。

本文针对某电厂顶棚管过热器频繁爆管问题,建立了几何结构模型,通过计算流体力学先对无支管的三通结构进行了数值模拟计算与分析,并在此基础上研究和分析了顶棚管联箱的压强与流量分配,提出了通过改变分支管布置方式改善流量分配的几何结构优化方案,为电站锅炉过热器和再热器分配集箱系统的几何结构设计提供参考。

1 研究对象和方法

1.1 研究模型及网格划分

本项目针对某电厂 7 号和 8 号 600MW 单元机组,主要研究该汽包锅炉过热蒸汽系统中分配联箱的流动问题。饱和蒸汽从汽包顶部蒸汽引出管进入顶棚分配集箱,在顶棚分配集箱,蒸汽分两路引出:一路蒸汽由 6 根蒸汽旁路管引出,通过该分配集箱直接引入至后竖井中隔墙上集箱;另一路蒸汽进入顶棚过热器。如图 1 为该分配联箱在过热蒸汽系统流程中的相对位置和具体结构。

由于管数较多且管子呈一定周期性对称布置,选取具有代表性的一段,如图 1 的圈中所示为该分配联箱几何结构。两根汽包饱和蒸汽引出管径向引入该分配联箱,饱和蒸汽又通过 18 个分支管进入顶棚过热器管,通过中间引出大直径旁通管引入中隔壁入口联箱。将顶棚入口集箱分支管进行编号,如图 1 所示,从左至右依次为:1#, 2#, 3#, ..., 17#, 18#。根据现场运行统计数据得知,7 号和 8

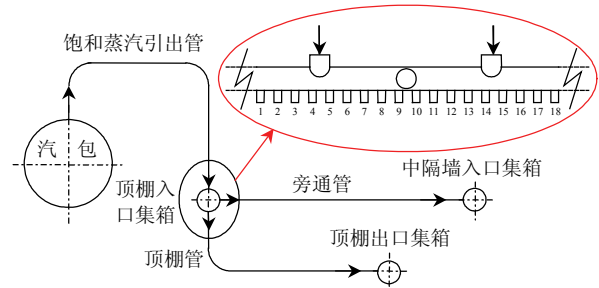


图 1 某电站锅炉过热蒸汽系统流程图及顶棚入口集箱局部几何结构示意图

Fig. 1 Flow chart of superheated steam header and local structural geometry of top roof inlet branch tubes in a drum-type boiler

号锅炉顶棚过热器管子开裂位置呈现相同的规律。爆管部位都主要集中在 6#、7#、8#和对称的 11#、12#、13#分支管。此外对顶棚过热器管子样品进行测试、试验和分析,发现样品试样均符合相关规定,材料质量正常。为了了解该分配联箱内部蒸汽流动情况,采用计算流体力学方法数值模拟分别研究无支管模型和该分配联箱的蒸汽流动情况。无支管模型为内径 D 为 155 mm 的等径三通,集箱长度为 $10D$ 。分配联箱入口引入管与旁通管的内径为 132 mm,分配联箱内径为 155 mm,分支管的内径为 50.5 mm,间距为 115 mm。为保证模型具有较高的网格质量,网格形式采用六面体网格。为使计算更加精确,在流动变化较大的管子交接处进行了局部网格加密。

1.2 数学模型及边界条件

本文模拟所涉及的流动为三维稳态定常流动,使用目前工程上广泛采用的标准 $k-\varepsilon$ 方程湍流模型,其中湍流模型中的 k 、 ε 值直接从湍动能和湍动能耗散方程中求解,湍动能方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (2)$$

式中: $C_{\varepsilon 1}=1.44$; $C_{\varepsilon 2}=1.92$; $\sigma_k=1.0$; $\sigma_\varepsilon=1.3$, 为常数。

模型壁面采用无速度滑移和无质量渗透的壁面边界条件,即假定相对于固体壁面的气流切向分速度和法相分速度均为零;模型入口采用速度进口边界条件;模型出口采用压力出口边界条件,考虑到集箱内静压变化主要在联箱的三通附近,而各出口管出口压强近似相等,故设定各个出口平均相对

静压为 0。计算采用高阶求解模式，设置均方根残差值为 10^{-6} 以获取较为准确的结果。

1.3 模拟正确性验证

文献[2]对分流三通联箱内的静压分布进行了实验与一维计算研究，为了验证本文应用数学模型模拟的准确性和可靠性，本文对文献[2]中图 4 的实验段结构在相同条件下进行模拟，得到了流比计算结果。图 2 给出了数值模拟结果与文献[2]的实验和一维计算结果进行了比较，计算机数值模拟结果与文献[2]实验和一维计算结果非常相符，说明采用本数学模型分析本文问题是合理的。

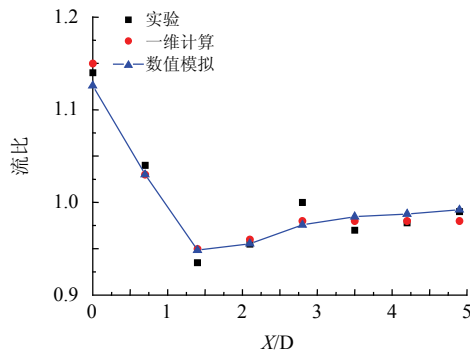


图 2 带支管三通数值模拟与实验和一维计算结果的比较

Fig. 2 Comparison of simulation, experiment and 1-D calculation for Tee-junction with branch pipes

1.4 网格数量对计算结果的影响

数值模拟过程中，同样的模型原则上是网格数越多越精确。但考虑到计算机的配置及计算时间，网格数也不能过多。为了获得网格无关解^[23]，采用不同的网格数量对上述模型进行数值模拟。由于研究主要目的是测量质量流量的分配，故而此处以标准流比偏差系数 A_{STD} 来比较不同网格数对结果的影响：

$$A_{STD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\beta_i - 1)^2} \quad (3)$$

式中： N 为等径并联分支管的数目； β_i 为流比，即各等径并联分支管质量流量与全部等径并联分支管平均质量流量之比。

如表 1 所示，62 万和 78 万网格数下 A_{STD} 的相

表 1 网格无关性验证

Tab. 1 Meshes used in the mesh independence study

网格数	A_{STD}
16 万	0.312 965
39 万	0.320 465
62 万	0.323 530
78 万	0.324 137

对误差在 0.2% 以内，继续增加网格数对计算结果的影响已经很小。综合考虑计算的精度与经济性，采用网格数为 62 万的网格系统对上述模型进行三维数值模拟分析。

2 模拟结果与分析

2.1 流动参数及研究思路

根据实际情况，本文的进口 Re 数为 1.065×10^7 ，此时流动已进入第二自模化区，流动与 Re 数的关系可以忽略。工质为水蒸气，温度 $t=362^\circ\text{C}$ ，流速 $u=13.11 \text{ m/s}$ 。压力为 19.047 MPa，密度为 148.577 kg/m^3 ，动力黏度为 $2.608 \times 10^{-7} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

集箱系统中各管子内的工质流动的动力为该管子所连接的进出口集箱中的压力差，因此集箱内的压力分布对集箱系统流量分配有决定性的影响^[13]。根据这一研究思路，先研究无支管三通的压强分布，然后再研究带支管三通联箱的压强分布，最后根据得出的结论进行改进。

2.2 无支管三通模型

由于组成集箱的基本结构为三通，故而先研究无支管的压强分布。为了比较数据，对压差使用欧拉数 Eu 表示，长度用无量纲长度 L/D 表示，其中 L 为与集箱中心的距离：

$$Eu = \frac{p_i - p_{ref}}{0.5 \rho u_0^2} \quad (4)$$

式中： p_i 为被测点的静压，Pa； p_{ref} 为引入管的基准静压，Pa； ρ 为密度， kg/m^3 ； u_0 为引入管进口流速， m/s 。

图 3 为分流三通模型及各母线的欧拉数 Eu 。由图 3(b) 可知，在 $L/D=-1.25D \sim 1.25D$ 的区域内，压力沿集箱圆周方向上是不相等的，且各母线欧拉数由大变小排列分别为：正母线、侧母线和背母线。此区域正母线和侧母线的 Eu 较其他区域明显大很多，这是因为由于引入管正对的正母线和背母线处壁面具有强烈的速度滞止作用，尤其是在正母线处。而且随着与中心点距离的增加， Eu 数也逐渐降低。对于背母线，由于进口管处速度较高，动压也较大，在总压一定的情况下，静压相对较小，这也是此处 Eu 较正母线与背母线小的原因。但是在引入管与集箱连接处的背母线区域 ($L/D \approx -0.5$ 和 $L/D \approx 0.5$)，由于惯性原因，流过此处的流体很少，且形成两个对称的负压区， Eu 也很低。这也可以通过伯努利方程解释，当蒸汽从引入管进入集箱时，靠近中心的转弯率较小，流动阻力系数较小，但是

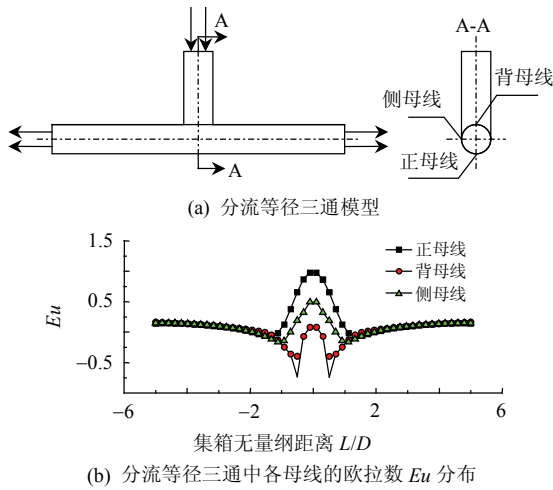


图3 分流三通模型及各母线的欧拉数 Eu 分布
 Fig.3 Eu distribution of each generatrix and model of bypass flow Tee-junction

在集箱引入管与集箱连接处的背母线区域处，流体的转弯率较大，流动阻力系数较大，流动损失也较大，故而在总压一定的情况下，容易形成负压区。又因为两区域流速不同引起的剪切力的存在，使得气流分层，进而在 $-0.5D \sim -1.25D$ 和 $0.5D \sim 1.25D$ 范围内各形成一个较低静压的回流区。

在 $L/D < 1.25D$ 和 $L/D < -1.25D$ 的区域，气流已经基本不受三通回流的影响，故而 3 条母线的 Eu 基本保持一致，且变化趋势逐渐平缓。

图4为汇流三通模型及各母线的欧拉数 Eu 。由图4(b)可知，相比于分流三通，正母线和侧母线整体较为平缓，而背母线却波动很大。在 $L/D > 1.5D$

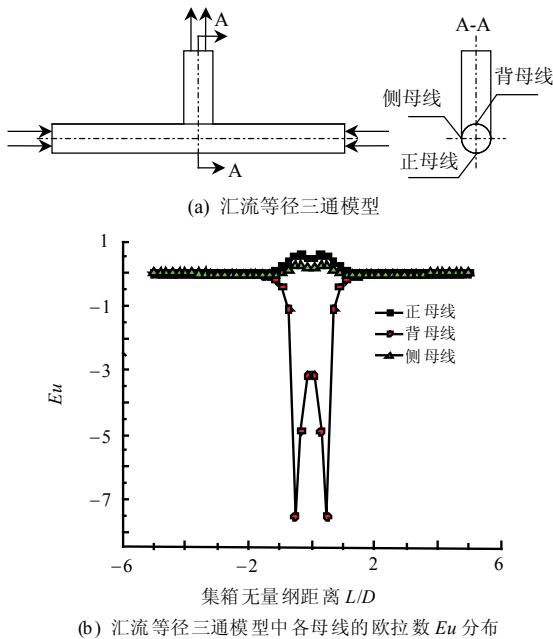


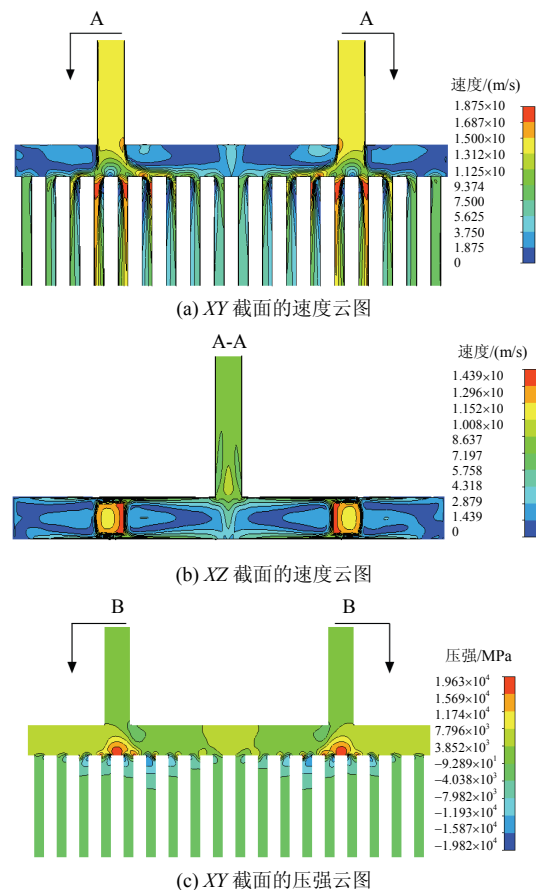
图4 汇流三通模型及各母线的欧拉数 Eu 分布
 Fig.4 Eu distribution of each generatrix and model of conflux Tee-junction

和 $L/D < -1.5D$ 的区域，由于流体基本无阻力流动，故而各母线压强保持与进口基准压强相近， Eu 也基本为 0。随着两进口流体的靠近，撞击会产生速度滞止效应，故而在 $L/D = -1.5D \sim 1.5D$ 区域，正母线和侧母线的 Eu 会有一定程度的增大，而背母线处由于分支管的抽吸作用， Eu 会变为负值。其中在集箱与出口管相交处的背母线区域 ($L/D \approx -0.5$ 和 $L/D \approx 0.5$)，出现一极低的 Eu 。这是因为一方面此处转弯率较大，流动阻力系数较大；但是另一方面由于流通面积的突然减小，流动速度反而会增大，动压也较高。故而由伯努利方程可知，在总压一定的情况下，静压会变得相当低。但是整体来说，由于正母线和侧母线 Eu 数变化趋势平缓，管口附近区域没有明显回流区，只在出口管转弯处，会产生一个贯通的回流区。

由以上可知，分流三通比汇流三通的三通效应要强。故而对于分流三通与汇流三通并存的情况，需要抓住主要矛盾，着力解决由于分流三通造成的回流问题。

2.3 带支管的三通联箱模型

基于分析的几何结构，本文模拟了联箱内部流体速度和压力分布，图5为带支管联箱模型 XY 与 XZ 截面的速度云图和压强云图。由于结构的对称



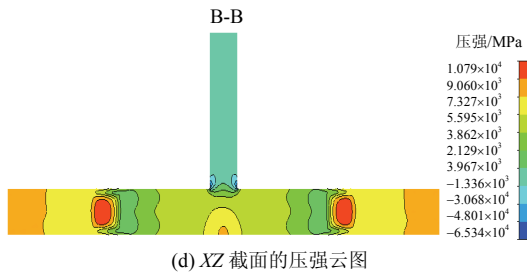


图 5 带支管联箱模型 XY 与 XZ 截面的速度云图和压强云图

Fig. 5 Velocity and pressure distribution along XY and XZ cross section of with branch Tee-junction model

性，只对一侧分析即可，以下选择左侧进行分析。由图 5(a)和(b)的速度云图可知，引入管对应的 4#和 5#分支管速度很大，而 6#和 7#分支管速度很小。旁通管与集箱组成汇流三通结构，在旁通管内流速较整体的集箱来说速度较高。由图 5(c)和(d)的压强云图可知，引入管正对的正母线壁面处压强较高，而各细小分支管转弯处压强较低。其中引入管与集箱相交的背母线区域，尤其是靠近旁通管侧的压强较低，形成一较大的回流区。旁通管整体较集箱压强较大，且在旁通管与集箱相交的转弯处形成一个贯通的回流区。这也印证了分流三通较汇流三通的三通效应强这一结论。

为了定量研究带支管的联箱模型，根据模拟计算出模型结构各母线 Eu 数如图 6 所示。整体而言，其分布基本遵循了分流三通和汇流三通的特点。只是就正母线处而言，由于有分支管流出，且支管直径与集箱直径之比($d/D=0.326$)相对而言较大，故而 Eu 波动较大，且基本在各分支管处由于有分支管的抽吸作用， Eu 突降至 0 以下；但是在引入管正对的 4#和 5#分支管附近的 Eu 较高。侧母线和背母线的 Eu 整体比较符合，只是在引入管和旁通管附近区域会有差别。在引入管管口附近，作为分流三通结构，背母线处速度较大，故而静压相对

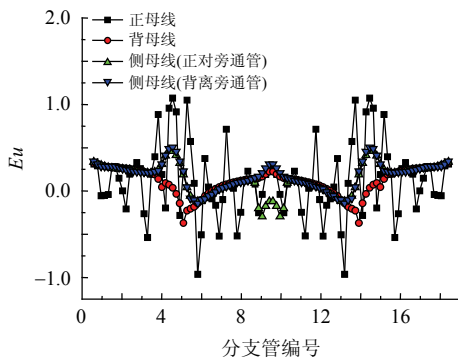


图 6 带支管联箱模型各母线的 Eu 分布
Fig. 6 Eu distribution of each generatrix for with branch Tee-junction model

较低， Eu 较小；而在旁通管管口附近，作为汇流三通，正对旁通管侧母线处有旁通管的抽吸作用，静压较低， Eu 也较低，而背母线和背离旁通管处的侧母线远离各细小分支管和旁通管，不受其影响，两母线的 Eu 在此处保持一致。

图 7 为带支管的联箱模型分支管的流比分布，由图可知，正对入口区域的 4#和 5#分支管流比较大，除此之外的其他区域分支管流比较小。其中对于 9#和 10#分支管，虽然较大口径的旁通管带走不少流量，但是由于其本身属于汇流三通，其三通效应较弱，且对联箱各区域的流体分布基本不造成影响，故而 9#和 10#分支管流比并不是最小的。而 7#和 8#分支管由于处在进口管和旁通管之间的回流区范围内，故而其流比最小。

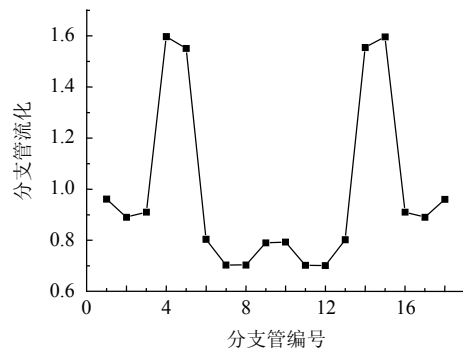


图 7 各分支管的流比分布

Fig. 7 Flow ratio distribution of each branch tube

以上模拟所得流比分布趋势与文献[2,18,24]所得的结果相同，这也说明了本文模拟的正确性。另外结合现场数据，爆管位置基本处在以上模拟所得流比偏小的分支管处。由此，可以判定由于分流三通的三通效应，在引入管附近区域产生涡流区，而处在涡流区范围的几根分支管蒸汽流量偏小，进而使该分支管在相同的热负荷下得不到足够的冷却，管子壁温也较其他管子高，最终发生超温爆管。

3 几何结构优化研究

针对此类三通效应引起流量偏差进而导致爆管事故的问题，文章介绍了国内学者提出的不少优化方案，结合本文研究的工程实际问题，受到结构、造价和工程可行性等很多条件限制及制约。要解决此工程实际问题会有很多不同的方案，例如可以针对联箱结构及引入和引出方式进行大的改变，但考虑到优化方案的工程可行性和投资的经济性，本文旨在已有的结构基础上，提出一种局部的改进方案。根据文献[25]，可知在集箱直径一定的情况下，分支管直径越小，流量分配越均匀。设计联箱时 d/D

大多在 0.1~0.2 之间，而此处 $d/D=0.326$ ，故而流量分配均匀性变差，但改变分支管直径的方案工作量太大，不易实现。另外，原几何结构中由于有较大口径旁通管的存在，使得并联分支管流量不均性变差。

根据等径分流三通 Eu 分布可知，在 $2D$ 范围内正母线的 Eu 变化很大，而且大概在 $1.5D$ 时降为最低，这也导致了处于此涡流区范围内的几根分支管流量偏小，而侧母线在 $1.5D$ 范围内的 Eu 数比正母线小，如果有一排分支管从侧母线引出， $1.5D$ 范围内的侧母线引出管的流量肯定会比正母线处引出的小一些。根据这一思路，本文提出将在 $1.5D$ 范围内的正母线上的分支管折向侧母线的原则。这里，只需要将 4#、5#和 14#、15#分支管折向侧母线位置。考虑到整体结构平衡性及管子的强度要求，选取与旁通管正对的侧母线。这样引入管正对的几根分支管流量会有一定程度减少，与之前相比多余的工质便会分摊一部分到在原来涡流区范围内的分支管，具体情况参见图 8(a)和(b)所示。

图 8 为几何结构优化前后的几何模型、流比及 STD 比较。以左侧为例，4#、5#分支管的变化非常明显，流比由原来的 1.5 以上减小为 1.2 以下，其余分支管流比均有上升，其中改造前流量最小的 7#

和 8#分支管的流比均上升了近 0.1。说明通过改变 4#和 5#分支管的入口位置可以明显减小两根分支管的流量，从而间接地增加了其余流量较少的分支管流量。此外，分支管的 A_{STD} 也由优化前的 0.3235 减小至 0.1278，整个管组的流量均匀性得到了极大地提升。

4 结论

1) 径向引入引出的分流三通较汇流三通存在更强的三通效应，回流区的范围及影响更大。对于带支管的分流三通联箱，引入管正对的分支管流量较大，而其附近处于回流区范围的几根分支管流量较少，所在管屏易发生爆管事故。布置分支管时应尽量避开这一回流区域。

2) 改变引入管正对分支管的位置，将其移向侧母线位置，可以明显提升原来处于涡流区范围内流量偏少的几个分支管的流量。结构优化后，整个管组流量均匀性提高， A_{STD} 仅为原来的 39.5%，解决了爆管问题，为以后分配联箱的设计和结构优化提供了一定的参考。

参考文献

[1] 陈之航, 赵在三, 汪环, 等. 锅炉中单相流体并联管组的流量分布及热偏差的分析和计算[J]. 锅炉技术, 1980, (Z1): 1.
Chen Zhihang, Zhao Zaisan, Wanghuan, et al. Research and calculation of flow mass distribution and thermal deviation for single phase fluid parallel tubes in a boiler[J]. Boiler Technology, 1980(Z1): 1(in Chinese).

[2] 罗永浩, 杨世铭, 王孟浩. T 型进口三通对分配集箱流量分配的影响[J]. 动力工程, 1998, 18(3): 30-34,79, 88-89.
Luo Yonghao, Yang Shiming, Wang Menghao. The impact of inlet Tee junction for flow mass distribution of dividing header[J]. Power Engineer, 1998, 18(3): 30-34,79, 88-89(in Chinese).

[3] 缪正清, 徐通模. 集箱与并联管屏系统单相流体的流动特性[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(9): 1206-1210.
Miu Zhengqing, Xu Tongmo. Single phase fluid flow characteristics in the headers and parallel tube platen systems[J]. Journal of Power Engineering, 2000, 34(9): 1206-1210(in Chinese).

[4] Bajura R. A model for flow distribution in manifolds [J]. Journal of Engineering for Power, 1971, 93(1): 7.

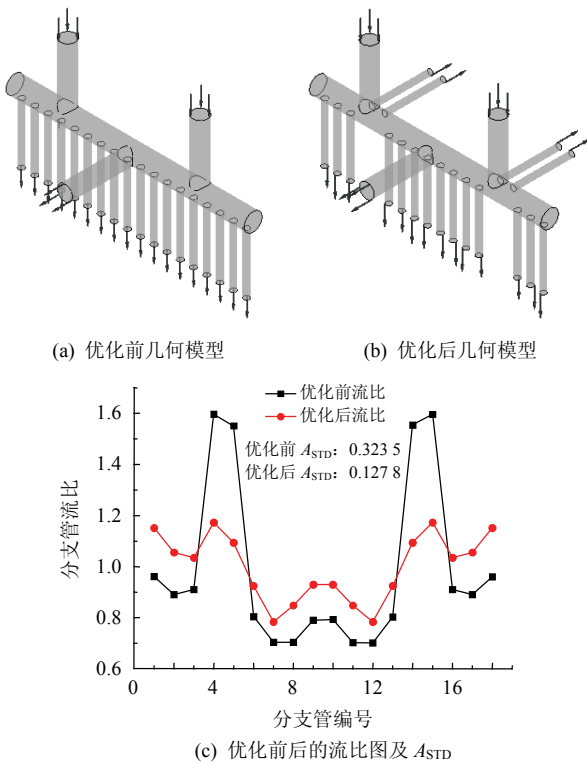


图 8 优化几何结构前后几何模型、流比及 A_{STD} 比较
Fig. 8 Comparison of geometric model, flow ratio and A_{STD} of before and after geometrical optimization

- [5] Bajura R, Jones Jr E. Flow distribution manifolds [J]. ASME Transactions Journal of Fluids Engineering, 1976(98): 654-665.
- [6] Majumdar A. Mathematical modelling of flows in dividing and combining flow manifold[J]. Applied Mathematical Modelling, 1980, 4(6): 424-432.
- [7] Pigford R L, Ashraf M, Miron Y D. Flow distribution in piping manifolds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1983, 22(4): 463-471.
- [8] Wang X, Wu L. Analysis and performance of flat-plate solar collector arrays[J]. Solar Energy, 1990, 45(2): 71-78.
- [9] Fu H, Watkins A, Yianneskis M. The effects of flow split ratio and flow rate in manifolds[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1994, 18(9): 871-886.
- [10] Wang J. Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: U-type arrangement [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(21): 6339-6350.
- [11] Wang J. Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: Z-type arrangement [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(11): 5498-5509.
- [12] López R, Lecuona A, Ventas R, et al. A numerical procedure for flow distribution and pressure drops for U and Z type configurations plate heat exchangers with variable coefficients[C]//International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics, New York, 2012.
- [13] 陆方, 王孟浩, 李道林, 等. 大容量电站锅炉过热器、再热器带三通集箱流量分布的试验研究[J]. 动力工程, 1996, 16(3): 13-19,61.
- Lu Fang, Wang Menghao, Li Daolin, et al. Flow distribution studies of superheaters and reheaters of large utility boiler with Tee-junction header[J]. Power Engineering, 1996, 16(3): 13-19,61(in Chinese).
- [14] 王峻晔, 章明川, 吴东棣. 锅炉分配集箱速度分布对流量分配的影响[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 10-13,39.
- Wang Junye, Zhang Mingchuan, Wu Dongdi. Effect of velocity distribution on the flow uniformity in the boiler's dividing header[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 10-13,39(in Chinese).
- [15] 刘福国, 魏恩宗, 杨祥良, 等. 均匀分流、变节距多孔分配管的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 151-155.
- Liu Fuguo, Wei Enzong, Yang Xiangliang, et al. A model for designing variable pitches to balance flow along multi-orifices distributing pipe[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 151-155(in Chinese).
- [16] 庞力平, 孙保民, 王波, 等. 径向引入方式下联箱并联分支管中两相流流量分配计算[J]. 化工学报, 2009, 60(12): 3006-3011.
- Pang Liping, Sun Baomin, Wang Bo, et al. Calculation method for two-phase flow distribution of parallel channels in manifold with radical inlet[J]. CIESC Journal, 2009, 60(12): 3006-3011(in Chinese).
- [17] 钟崑, 谢金芳, 王志新, 等. 锅炉集箱系统并联管组流量不均匀性与热负荷间的关系[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(32): 23-30.
- Zhong Wei, Xie Jinfang, Wang Zhixin, et al. Relationship between the heat load and the uneven distribution flow of the manifold in header system of boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(32): 23-30(in Chinese).
- [18] 周云龙, 刘袖. 三通集箱过热器压力分布与流量分配的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2013, 33(1): 6-10.
- Zhou Yunlong, Liu Xiu. Numerical simulation on pressure and flow distribution in superheater with T-junction header[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(1): 6-10(in Chinese).
- [19] 刘进. 电站锅炉三通集箱系统流量分配的数值模拟[D]. 上海: 上海发电设备成套设计研究院, 2008.
- Liu Jin. Numerical simulation research on flow distribution of utility boiler Tee-junction header system [D]. Shanghai: Shanghai Power Equipment Research Institute, 2008(in Chinese).
- [20] 王孟浩. 大容量电站锅炉过热器再热器温度偏差原因及防止对策[J]. 锅炉技术, 1992, 13(3): 1-11.
- Wang Menghao. Reason and method of temperature deviation for superheater and reheater in large utility boiler[J]. Boiler Technology, 1992, 13(3): 1-11(in Chinese).
- [21] 唐必光, 熊立红, 张新生. “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.
- Tang Biguang, Xiong Bihong, Zhang Xinsheng. Impact and improvement measure of Tee-junction effect for flow mass distribution in high temperature superheater

- [J]. Power System Engineering, 1999, 15(5): 26-28(in Chinese).
- [22] 董红年. 高温过热器 T92 钢爆管原因分析[J]. 华电技术, 2011, 33(3): 24-28,80.
Dong Hongnian. Reasons analysis on of T92 steel pipe bursting of high temperature superheater[J]. Huadian Technology, 2011, 33(3): 24-28,80(in Chinese).
- [23] 孙纪宁. ANSYS CFX 对流传热数值模拟基础应用教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 189.
Sun Jining. ANSYS CFX basic application tutorial of numerical simulation for convective heat transference [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012: 189(in Chinese).
- [24] 卫飞飞, 缪正清, 黄荣国, 等. 带三通锅炉集箱的数值模拟和实验研究[J]. 锅炉技术, 2010, 41(6): 19-23.
Wei Feifei, Miu Zhengqing, Huang Rongguo, et al. Numerical simulation and experimental research of flow problems of headers with T-type Three-way pipe and parallel tube platen system of utility boiler[J]. Boiler Technology, 2010, 41(6): 19-23(in Chinese).
- [25] 梁倩. 集箱静压分布与流量分配的仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Liang Qian. The simulation and research on static pressure distribution and flow deviation of the header[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007(in Chinese).



吕玉贤

收稿日期: 2013-08-15。

作者简介:

吕玉贤(1988), 男, 工学硕士, 主要从事电站锅炉性能优化及管内两相流流动的研究, yuxian0927@163.com;

庞力平(1968), 男, 博士, 教授, 主要从事两相流动及传热、电站设备寿命管理和电站设备可靠性的研究, 本文通讯作者, liping_pang@163.com。

(责任编辑 车德竞)