

链条锅炉复合燃烧及其优化的数值模拟研究

严浩文¹, 陈宝明², 赛庆毅¹, 张忠孝¹, 荣燕燕¹, 徐传航¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200090; 2. 华之邦科技股份有限公司, 上海 200090)

摘要:以某化工厂一台 35 t/h 链条锅炉为物理模型, 借助 Fluent 软件对链条锅炉采用复合燃烧技术改造前后炉内燃烧特性以及优化送粉速度进行数值模拟计算。计算结果表明: 链条锅炉采用复合燃烧改造后, 炉内温度分布更加均匀, 炉内高温区达到 1500 ~ 2000 K, 整体烟气平均温度升高了 100 ~ 200 K; 随着送粉速度的提高, 炉内高温区呈现从左到右的偏斜趋势, 且后拱上方的回流区逐渐变小, 当送粉速度为 20 m/s 时, 炉内温度场和速度场最为合理。

关键词:链条锅炉; 复合燃烧; 温度场; 速度场; 数值模拟

中图分类号: TK229.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-3950(2016)02-0069-06

DOI: 10.16189/j.cnki.nyg.2016.02.012

Research of numerical simulation and optimization of compound chain boiler combustion

YAN Hao-wen¹, CHEN Bao-ming², SAI Qing-yi¹, et al

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Wisebond Technology PLC, Shanghai 200090, China)

Abstract: Taking a 35t/h chain furnace in an chemical plant as physical model, the combustion characteristic and the powder feeding velocity of both traditional chain-grate and compound combustion chain-grate were studied using Fluent. The results showed that after using compound combustion, the temperature distribution was more even; the temperature in the high temperature zone was about 1500 ~ 2000 K, the fume temperature was 100 ~ 200 K higher; With the improvement of powder feeding velocity, the high temperature presented the trend deviation from left to right and at the top of the arch, the reflow area became smaller. When the powder feeding velocity was 20 m/s, the temperature and velocity field were most reasonable.

Key words: chain-grate; compound combustion; temperature field; velocity field; numerical simulation

0 引言

燃煤工业锅炉是仅次于电站锅炉的第二大煤炭消耗设备^[1],也是主要的煤烟型污染源^[2]。其中,链条锅炉因其运行稳定、操作简单等优点在我国得到了广泛的应用^[3],其数量占工业锅炉的 65%^[4]。目前,大多数工业锅炉炉膛容积热负荷取值偏小,炉膛水冷度大,实际运行中锅炉炉膛温度偏低,而且链条锅炉属于单面引燃,因此,容易引起链条锅炉着火性能较差,热效率偏低以及出力不足等问题^[5]。复合燃烧技术是针对层燃炉燃烧效率不高的现状,强化炉内燃烧过程、提高锅

炉燃烧效率以及煤种适应性而设计的^[6]。加煤粉复合燃烧链条锅炉就是将层燃燃烧方式和煤粉的悬浮燃烧方式有机结合,共同应用在同一台锅炉上,实现链条锅炉的高效燃烧。姜少军^[7]、刘亮^[8]等研究表明,对工业锅炉进行复合燃烧技术改造是改善锅炉的燃烧性能、提高锅炉热效率、增强锅炉煤种适应性的一种行之有效的方法。李元章^[9]将层燃和室燃两种燃烧方式结合应用在 8 台 DZL4-1.25-A II 型卧式快装锅炉上,改造结果表明,锅炉热效率平均提高了 17%。常少卿等^[10]针对一台型号为 SZD10-13 的抛煤机链条炉进行复合燃烧技术改造,改造后,锅炉热效率提

收稿日期: 2015-11-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAA07B00)

作者简介: 严浩文(1989-),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为煤的高效与清洁燃烧。

能源工程 2016 年 第 2 期 - 69 -

高了12%。许忠春等^[11]研究表明,对链条锅炉进行复合燃烧技术改造,其经济效益非常显著。这些研究结果都是从工程应用上表明了链条锅炉采用复合燃烧技术改造的可行性和经济性,但没能针对链条锅炉复合燃烧技术进行深入的理论分析。

本文借助 Fluent 软件对链条锅炉采用复合燃烧技术改造前后的炉内燃烧特性以及送粉速度的优化进行计算,通过对比改造前后炉内燃烧特性,分析了链条锅炉采用复合燃烧技术改造的优越性,以及通过比较不同送粉速度下炉内的燃烧特性,确定了最佳的送粉速度。为复合燃烧技术的工业应用和推广提供可靠的理论依据。

1 研究对象及研究方法

1.1 研究对象

本文的研究对象是某化工厂一台蒸发量为35 t/h 的链条锅炉,其炉排长度为8.5 m(x 方向),炉排宽度为4.52 m(y 方向),炉高为13 m(z 方向)。复合燃烧改造是在原链条锅炉两侧墙中间部位各增加一只煤粉燃烧器喷口,煤粉喷口位置在炉膛侧面沿炉排运动方向2.5 m,炉排上方0.6 m处;煤粉喷口直径为180 mm;煤粉喷口将煤粉在炉膛侧面沿着垂直于炉排运行方向喷入炉膛内部。锅炉燃煤煤种为Ⅱ类烟煤,煤质的工业分析和元素分析如表1所示。

表1 煤质的工业分析和元素分析

工业分析/%					元素分析/%				$Q_{\text{net,ar}}$ /MJ· kg ⁻¹
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	S_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	
14.08	21.04	22.28	42.60	49.8	2.86	0.8	0.94	5.6	19.699

1.2 研究方法

1.2.1 网格划分

本文研究区域为链条炉排上煤层表面到炉膛出口处,因为炉膛关于 $y=2.26$ m处截面对称,为了加快计算进度,减少模型网格数,选取一半炉膛作为计算区域。数值模拟采用 Ansys 前处理软件 ICEM 来建立模型并对其划分网格。针对链条锅炉较为复杂的结构特点,采用了复杂结构适应性强的非结构化四面体网格^[12],同时,在下侧炉膛入口、煤粉喷口以及炉膛出口处流场变化比较大的区域,采用了局部网格加密。复合燃烧改造前后链条锅炉网格模型示意图见图1。

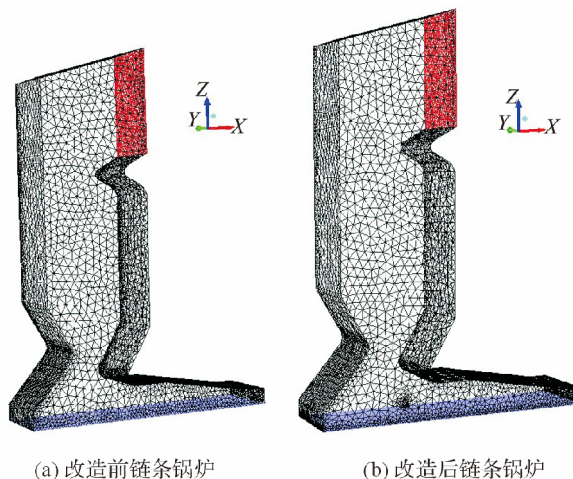


图1 链条锅炉网格模型示意

1.2.2 计算方法

本文中借助 Fluent 软件对复合燃烧改造前后链条锅炉炉内燃烧以及优化进行数值模拟研究。将链条炉排沿炉排运动方向平均分成8等分,采用组分输运模型将这8等分对应位置床层上燃烧产生的烟气中 O_2 、 CO 、 CH_4 、 CO_2 等各种气体组分的平均浓度、温度以及速度作为炉膛下侧的速度入口边界,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型,辐射传热模型采用 $P-1$ 模型^[13],煤粉喷口喷入煤粉的燃烧采用离散型模型。锅炉四周布置有水冷壁,采用无滑移定温边界条件,炉膛出口采用压力出口边界条件。

2 模拟结果与分析

2.1 复合燃烧改造前后的炉内燃烧特性

模拟链条锅炉改造前后炉内燃烧特性时,改造前后燃料消耗总量保持不变,改造后,其炉内悬浮燃烧煤粉量占总燃料消耗量的20%,采用热烟气输送煤粉,送粉速度为20 m/s。

2.1.1 温度场特性分析

图2为链条锅炉采用复合燃烧技术改造前后炉膛内 $y=2.26$ m(炉膛中心对称面)处截面的温度分布。从图2(a)和图2(b)中可以看出,沿着炉排的运动方向,靠近炉排上方的烟气温度均是先升高后降低。这是因为煤粉落到炉排上,随着炉排向前运动,依次经历着煤粉的干燥、挥发分的析出、挥发分的燃烧、焦炭的燃烧以及燃尽的过程。在靠近锅炉前拱下方,煤粉处于干燥和挥发分析出阶段,炉排上方的烟气温度较低;在锅炉的中间部位,煤粉主要处于挥发分的燃烧和焦炭燃

烧阶段,释放出大量的热量,炉排上方的烟气温度快速上升;而在接近排渣口处,煤粉处于燃尽阶

段,而炉排下部空气依然在不断的送入炉内,使得炉排上方的烟气温度降低。

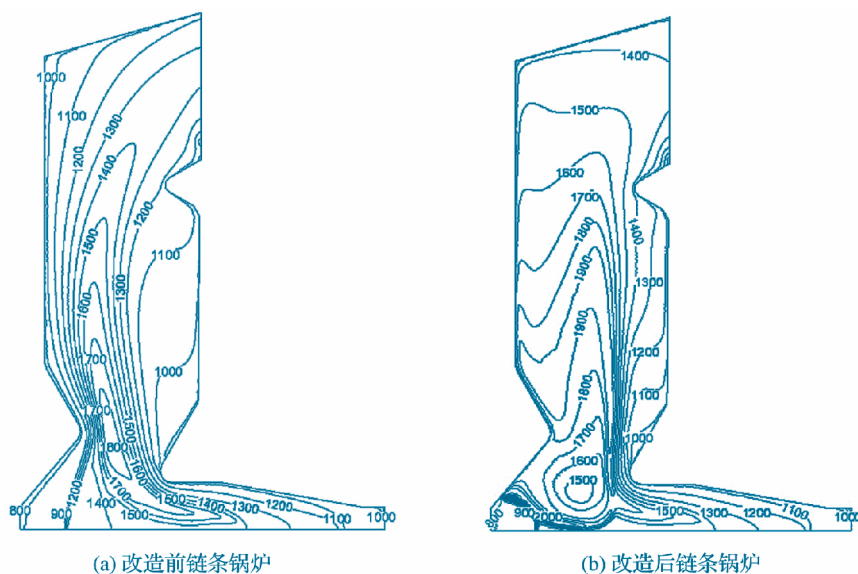


图2 链条锅炉炉膛内 $y = 2.26$ m 处截面的温度分布

从图2中还可以看出,复合燃烧改造前后,炉内高温区都集中在炉膛的中下部区域。改造前,链条锅炉炉内高温区温度为 $1500 \sim 1800$ K,与杨茹等^[14]的研究结果相一致。改造后,链条锅炉炉内高温区温度为 $1500 \sim 2000$ K。煤粉从两侧墙喷口喷入炉膛后,在煤粉干燥和挥发分析出的过程中,煤粉气流需要从周围的烟气中吸收热量,从而在煤粉喷口对应的炉膛中心位置处形成一个相对低温区,温度约为 1500 K。在低温区的下侧,由于靠近炉排,煤粉能充分吸收来自炉排上层燃烧释放的热量,并与炉排下方送入的空气混合,剧烈燃烧起来,温度高达 2000 K。从图2(b)中可以看出, 2000 K 的高温区域位于前拱的下方,并靠近炉排前端,为新加入煤层的干燥、挥发分的析出以及煤层的引燃提供了十分有利的条件。对比图2(a)和图2(b)可以发现,链条锅炉复合燃烧改造后,炉膛内火焰充满度更好,前后拱上方温度分布更加均匀。

图3为链条锅炉采用复合燃烧技术改造前后,炉内沿炉膛高度方向上的各个截面的平均温度分布曲线。从图3中可以看出,链条锅炉采用复合燃烧技术改造前后,炉内整体温度趋势均是先上升后下降。对于改造前的链条锅炉,在 B_0 点之前,虽然有煤层的燃烧,但同时有大量冷空气送入炉内,煤层上方烟气的平均温度呈缓慢上升趋势; B_0D_0 段对应锅炉的喉口部位,一方面,由于喉口

处炉膛截面积最小,大量的高温烟气快速集中在这一区域,另一方面煤层上吹起的细小煤粉颗粒和挥发出来的可燃性气体的燃烧,使得这一区域的平均温度较快上升,其中, B_0C_0 段对应前后拱快速收缩段,炉膛截面积快速减小,故 B_0C_0 段相对 C_0D_0 段温度上升更快; D_0 点之后,随着烟气上升,由于水冷壁吸热作用,炉内平均温度逐渐降低,而在 G_0 点处,炉内平均温度有小幅上升,这是由于 G_0 点对应炉内折焰角处,炉膛截面积在此处减小,使得烟气有集中趋势,故温度得到小幅上升。对于采用复合燃烧改造后的链条锅炉, A_1 点对应煤粉喷口的位置,当炉墙两侧温度相对较低的煤粉气流喷入炉膛后,煤粉气流会从周围高温烟气中吸收大量的热量,因此 A_1 点处温度稍有下降; B_1F_1 段炉内平均温度快速上升,一方面,由于喉口的收缩,使得炉内烟气快速集中,另一方面,主要是因为喷入煤粉的燃烧,释放出大量的热量,使得高温区上移,其中, E_1 点位于后拱上方,该区域存在强烈的回流区,回流区卷吸大量的低温烟气,使得该截面的平均温度下降; F_1 点之后,由于煤粉的逐渐燃尽以及水冷壁的吸热作用,使得炉内温度呈现整体下降的趋势。从整体上看,复合燃烧改造后链条锅炉炉内平均温度比改造前高 $100 \sim 200$ K,这与张永祥^[15]、杨明新等^[16]的研究结果相符合。

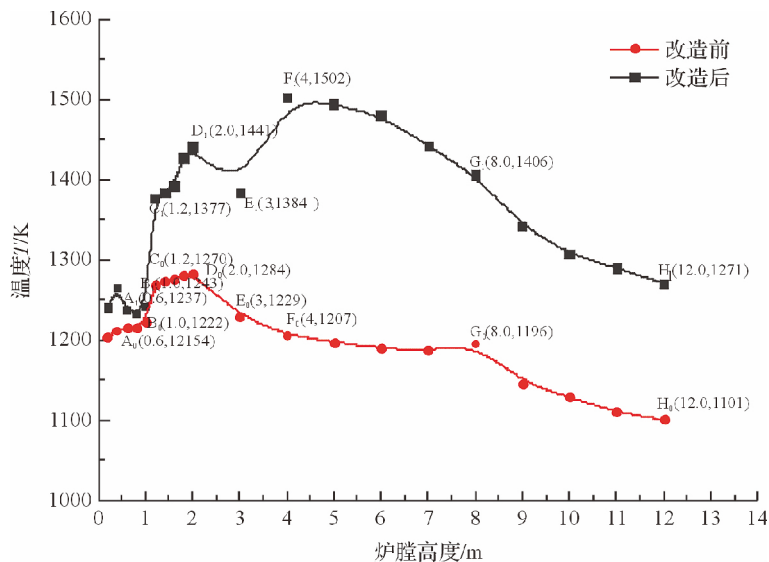


图3 链条锅炉沿炉膛高度方向各截面平均温度分布曲线

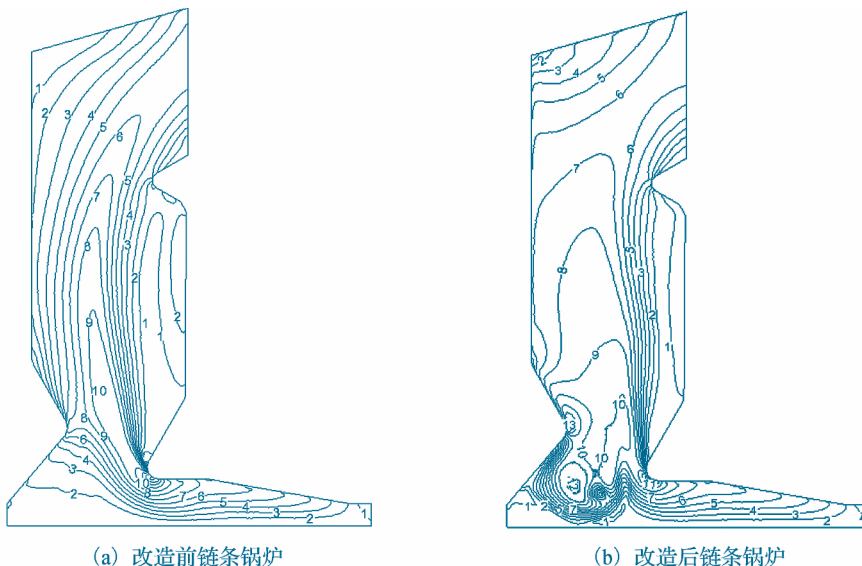
从上述分析可知,链条锅炉复合燃烧改造提高了炉膛内的整体温度,为新加入煤层的着火提供了有利的条件,从而增强了锅炉的煤种适应性,同时,也有利于提高链条锅炉的热效率以及锅炉出力。

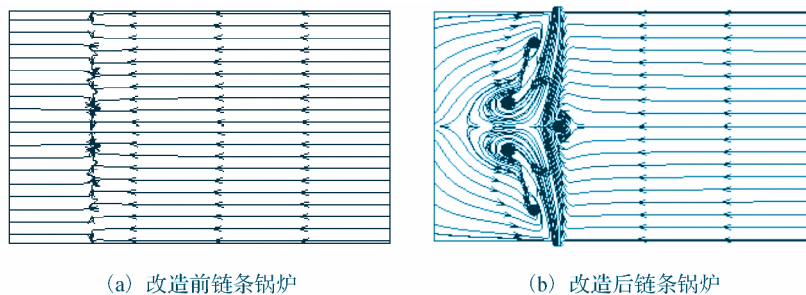
2.1.2 流速场特性分析

图4是采用复合燃烧技术改造前后炉膛内 $y=2.26\text{ m}$ 处截面的速度分布示意。从图4可以看出,沿炉膛高度方向炉膛内整体的气流速度均是先增大后减小,在前后拱形成的喉口处气流速度达到最大值。这是由于炉膛的截面积沿炉膛高度方向上先减小后扩大,在喉口处炉膛的截面积最小,因此气流速度在喉口处达到最大值。改造

前,链条锅炉喉口处的烟气流速为 $7\sim 10\text{ m/s}$;改造后,链条锅炉喉口处的烟气流速为 $10\sim 13\text{ m/s}$ 。改造后链条锅炉炉内烟气流速明显强于改造前,气流的加强,有利于炉膛内气体之间的混合,促进碳颗粒和可燃性气体的完全燃烧,从而有利于降低机械和化学不完全燃烧热损失。

图5为链条锅炉采用复合燃烧技术改造前后炉膛内 $z=0.6\text{ m}$ 处(煤粉喷口中心高度)截面的流线。对比图5(a)和图5(b)可以看出,改造后煤粉气流从两侧墙喷口相向喷入炉内,在炉膛中心线($y=2.26$)两侧附近形成了明显的回流区,回流区的气流加强了炉内的扰动,可进一步促进可燃性物质和空气之间的混合,对强化炉内燃烧十分有利。

图4 链条锅炉炉膛内 $y=2.26\text{ m}$ 处截面的速度分布

图5 链条锅炉炉膛内 $z=0.6\text{ m}$ 处截面的流线

从上述分析可知,链条锅炉复合燃烧改造加强了炉内的扰动,促进了炉内固相、气相物质之间的混合,强化了炉内燃烧过程,有利于降低不完全燃烧热损失,提高锅炉效率。

2.2 优化复合燃烧改造的送粉速度

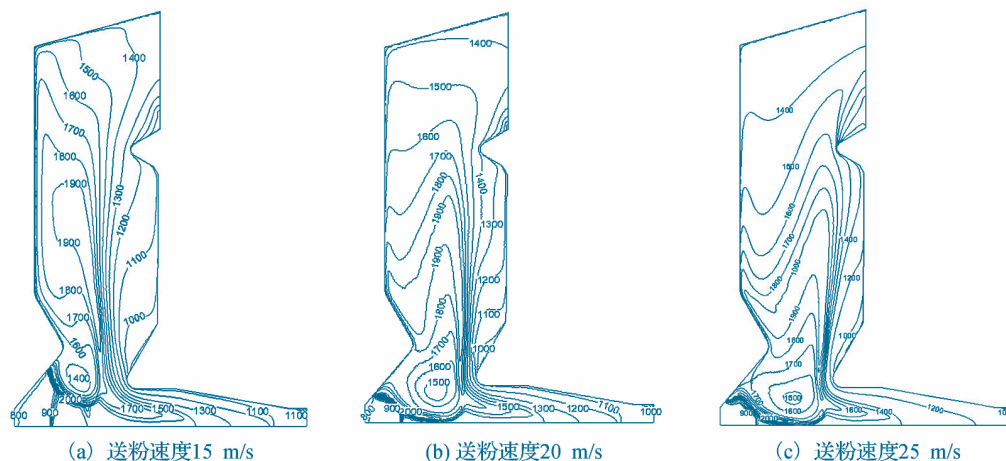
锅炉运行过程中,需要通过调整送粉速度来实现锅炉的安全、高效运行。当送粉速度过小时,不能将煤粉送入炉膛中心,而且当煤粉在贴近喷口处燃烧,容易造成喷口处高温结渣,甚至烧坏喷口;当送粉速度过大时,高速的煤粉气流相向喷入,然后向四周发散开,容易紧贴前拱壁面燃烧,造成前拱壁面高温结渣,而且送粉速度过大所需风机功率也会增大,提高了风机电耗。

为了优化复合燃烧改造的送粉速度,在保证燃料总量不变,悬浮燃烧煤粉量占总燃料量 20% 不变的情况下,分别模拟送粉速度为 15 m/s、20 m/s 和 25 m/s 三种工况下链条锅炉复合燃烧的炉内特性。

图 6 为链条锅炉采用复合燃烧技术改造后在不同送粉速度下炉膛内 $y=2.26\text{ m}$ 处截面的温度分布。从图 6(a) 和图 6(c) 中可以看出,当送粉速度为 15 m/s 时,炉内的高温区偏左;当送粉速

度为 25 m/s 时,炉内的高温区偏右。这是由于后拱处的烟气流沿着后拱不断向前冲刷,当送粉速度过小时,喷口喷出的煤粉气流容易受到后拱处的烟气流的影响,使其偏向炉膛的左侧,从而高温区偏左;而当送粉速度过大时,喷口喷出的煤粉气流受到后拱处的烟气流的影响可以忽略不计,而煤粉喷口位于喉口下部偏右处,从而煤粉气流偏向炉膛右侧,造成炉内高温区偏右。而从图 6(b) 中可以看出,当送粉速度为 20 m/s 时,炉内高温区在炉膛的中间区域,温度场更为合理,有利于防止水冷壁爆管的危险。

图 7 为链条锅炉采用复合燃烧技术改造后在不同送粉速度下炉膛内 $y=2.26\text{ m}$ 处截面的流线。比较图 7(a)、(b) 和 (c),不难发现,随着送粉速度的增大,煤粉喷口对应的炉膛中心位置的扰动越来越强,与此同时,随着送粉速度的增大,后拱上方的回流区越来越小,当送粉速度为 25 m/s 时,该回流区几乎消失。这是由于煤粉气流从两侧墙喷口高速喷入炉内,一方面,加强了炉排上方烟气流的扰动,另一方面,使得炉内烟气流速增强,强大的气流速度压迫后拱上方的回流区,使其随着送粉速度的增大而减小。

图6 链条锅炉炉膛内 $y=2.26\text{ m}$ 处截面的温度分布

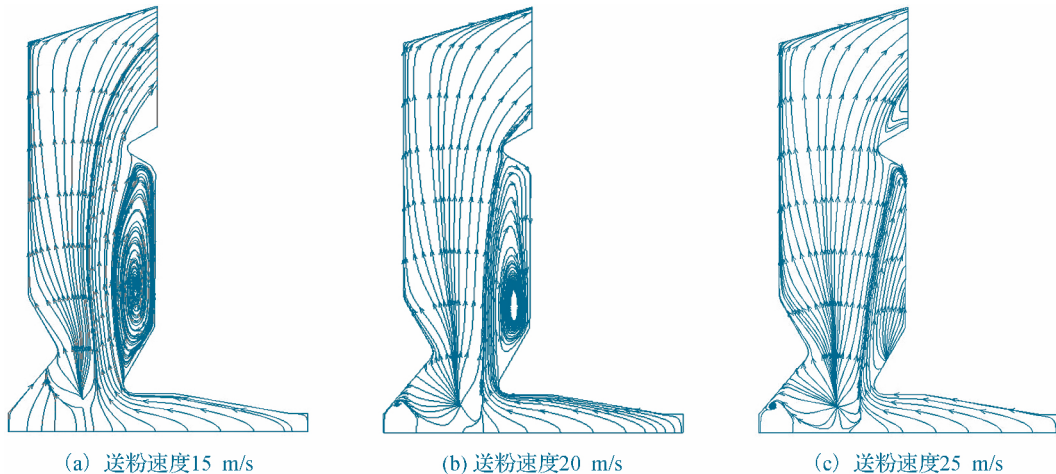


图7 链条锅炉炉膛内 $y = 2.26 \text{ m}$ 处截面的流线

综合上述分析,当送粉速度为 20 m/s 时,炉内的高温区靠近炉膛中心,温度场最为合理,能有效地预防水冷壁的爆管,同时,煤粉气流的喷入不仅加强了炉排上方烟气的扰动,而且后拱上方的回流区受影响程度较小,有利于燃料的燃尽。

3 实际运行效果

该台蒸发量为 35 t/h 的链条锅炉采用复合燃烧技术改造后,其悬浮燃烧煤粉量占总燃料量的 20% ,送粉速度为 20 m/s 。锅炉蒸汽压力保持 5.3 MPa 不变,蒸汽温度提高了 2°C ,蒸汽流量从改造前的 29 t/h 提高到了 35 t/h ,达到设计值,锅炉出力提高了 20.7% ,锅炉热效率由原来的 68% 提高到了 79% ,提高了 11% 。

4 结 论

对一台 35 t/h 的链条锅炉复合燃烧改造前后炉内燃烧特性以及送粉速度优化进行了数值计算,通过对模拟结果的分析,结论如下:

(1) 改造前,炉内高温区温度为 $1500 \sim 1800 \text{ K}$;复合燃烧改造后,炉内高温区温度为 $1500 \sim 2000 \text{ K}$,且炉内火焰充满度更好,温度分布更加均匀。从整体上来看,复合燃烧改造后,炉内平均温度比改造前提升了 $100 \sim 200 \text{ K}$ 。

(2) 复合燃烧改造前,喉口截面处烟气流速为 $7 \sim 10 \text{ m/s}$;改造后该处烟气流速为 $10 \sim 13 \text{ m/s}$,且随着高速的煤粉气流喷入炉膛内,在炉膛中心线两侧形成强烈的回流区,加强了炉内的

扰动,促进了炉内气流混合,对强化炉内燃烧十分有利。

(3) 改造后,当送粉速度为 20 m/s 时,炉内高温区在炉膛的中间区域,温度场更为合理,且煤粉气流的喷入不仅加强了炉排上方炉内气流的扰动,而且后拱上方的回流区受影响程度较小,有利于燃料的燃尽,因此,最佳送粉速度为 20 m/s 。

(4) 实际运行情况下,锅炉出力达到设计值,提高了 20.7% ,锅炉效率提高了 11% 。

参考文献:

- [1] 林鹏云,王 苑,李俊杰.燃煤链条炉排工业锅炉燃烧数值模型研究[J].工业锅炉,2010(3):9-12.
- [2] 辛少杰.燃煤工业锅炉热负荷预测的研究[D].上海:上海交通大学,2011.
- [3] 杜坤杰,沈士兴,付 军,等.煤粉复合燃烧技术在链条炉排工业锅炉上的应用与改进[J].工业锅炉,2012(6):34-36.
- [4] 许铭涛.拱形与配风方式对链条炉燃烧性能影响的数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.
- [5] 谢启强.某小型燃煤工业锅炉的节能改造分析[J].能源工程,2011(6):61-63.
- [6] 肖荣国.链条炉排加煤粉复合燃烧锅炉的传热计算方法及应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.
- [7] 姜少军,孙庆斌.应用复合燃烧技术改造链条锅炉[J].锅炉制造,2004(3):58-59.

(下转第79页)

从图 8 中可看出,随着开度的增大,叶轮出口的压力分布也更加均匀。图 8(a)、8(b)、8(c)、8(d)、8(f) 均出现了分布不均的情况。叶轮出口静压较高处会产生比较高的流动阻力,造成边界层分离,使流动损失增大。

5 结 论

(1) 用 CFX 计算了通过经验公式 $C_u r^x = \text{const}$ 不同 x 取值的压气机蜗壳的整机性能,发现在设计转速下,随着 x 增大,压气机开度增大,流通能力在一定范围内增大,压气机压比及整机效率增大,本例中 x 取 0.8 时,整体性能优于其他蜗壳,特性曲线较优且流量范围宽广,整机效率比 x 取 0 时高出约 4.5%。与原机蜗壳相比,在大流量范围内有更大的压比和更高的效率。

(2) 本算例中,随着开度的增大能使蜗壳内的流动更加均匀,扩压器内的压力分布更加均匀,一定程度上能抑制分离流动,进而降低尾迹掺混损失。但开度过大会使摩擦损失增大,导致整机效率降低。

参考文献:

- [1] 周邦宁. 离心式压气机最佳蜗壳设计[J]. 风机技术, 1997(10): 7-9.
- [2] 王企鲲, 戴 韧, 陈康明. 蜗壳进口周向非均匀流动数值研究[J]. 工程热物理学报, 2003(2): 185-188.
- [3] 丁 骏, 杜 鑫, 张龙新. 蜗壳开度对离心风机气动性能影响的研究[J]. 风机技术, 2012(5): 22-26.
- [4] CFTURBO. User manual [M]. Cfturbo Software & Engineering GmbH, 2010.
- [5] 倪计民, 何 慧, 王琦玮, 等. 计及前缘形状变化的离心式压气机流场分析[J]. 内燃机工程, 2014(1): 63-68.
- [6] 周 莉, 张 鑫. 离心压缩机蜗壳内部流动的研究[J]. 风机技术, 2010(5): 5-9, 14.
- [7] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 大同: 兵器工业第七零研究所, 1997.
- [8] 慈 蕾, 谢 蓉, 孙 涛, 等. 离心式压缩机蜗壳优化设计[J]. 燃气轮机技术, 2005(3): 40-43, 30.
- [9] 刘 亮, 夏侯国伟, 鄢晓忠, 等. 一种链条炉粉煤复合燃烧增容节能改造方案[J]. 电站系统工程, 2004, 20(2): 46-48.
- [10] 李元章. 复合燃烧技术在链条锅炉上的应用[J]. 节能, 2002(5): 37-39.
- [11] 常少卿, 于天军, 邹志荣, 等. 复合燃烧技术在抛煤机链条锅炉上的应用[J]. 应用能源技术, 2000(3): 12.
- [12] 许忠春, 张精华. 采用“复合燃烧技术”装置改造旧锅炉的效果[J]. 节能, 1999(12): 35-36.
- [13] 秦 岭. 电站锅炉数值计算建模及网格划分的讨论[J]. 能源工程, 2009(4): 13-16.
- [14] 刘典福, 张 保, 孙大玮. 垃圾衍生燃料在内旋流流化床中燃烧数值研究[J]. 能源工程, 2015(3): 66-71.
- [15] 杨 茹, 何军飞, 胡志锋, 等. 链条燃煤工业锅炉燃烧优化的数值模拟研究[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(4): 90-93.
- [16] 张永祥. 链条炉内复合燃烧性能优化数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [17] 杨明新, 吴少华, 孙绍增. 链条炉排加煤粉复合燃烧技术[J]. 热能动力工程, 1996, 11(1): 20-24.

(上接第 74 页)