

新型内外翅片管式换热器在轧钢加热炉中的应用

段武涛

(首钢特钢公司,北京 100041)

摘要:新型内外翅片管式换热器是一种高效节能的空气预热换热器,本文介绍了内外翅片管式换热器与传统插件式换热器的区别、内外翅片换热器的特点以及它在首钢特钢公司两台天然气加热炉应用与实际节能效果。

关键词:内外翅片;管式换热器;应用

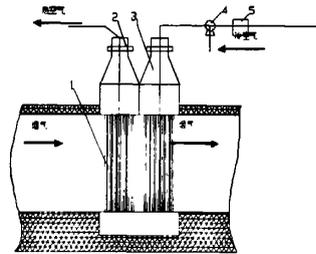
前言

轧钢加热炉作为轧钢工序的主要能耗设备,其能耗占着整个轧钢生产工序的40%以上^[1],直接影响着轧钢企业生产率的降低和产品竞争力的提高。而加热炉炉内燃料燃烧所产生的热量,有很大一部分被排出炉膛外的烟气带走,一般轧钢连续式加热炉的炉膛温度在1250~1400℃,平均排烟温度在550~900℃。它所带走的热量约占炉子热负荷的20~45%左右^[2]。降低加热炉排烟热损失的最有效方法是利用高温烟气余热来预热助燃空气,将回收的热量返回到加热炉内,从而达到节约燃料、提高理论燃烧温度、改善燃烧过程的效果。而且预热空气对于天然气的燃烧尤为重要,预热空气可以扩大天然气的着火范围,提高火焰传播速度,使燃烧过程更为稳定。一般来说,空气预热温度每提高100℃,约可节约燃料用量5%。因此,提高空气换热器性能对加热炉节能具有重要意义。新型内外翅片管式空气换热器是一种高效换热器,2005年以来分别在北京首钢特殊钢有限公司轧钢厂1、3号加热炉上投入运行后,轧钢加热炉的余热利用率显著提高,轧钢工序能耗出现较大幅度下降。

1 空气换热器的工作原理

目前轧钢加热炉上使用的换热器主要有管式换热器和

蓄热式换热器两种,其中以管式换热器应用最为广泛。但是管式换热器存在着综合传热系数小(约 $16\sim 27\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{C}$)、换热管管壁温度高^[3]、容易积灰等缺点,在长期连续生产中,换热器的性能随着使用会逐渐下降,难以满足生产中节能降耗的要求,如果想达到较好的换热效果,换热器的成本也会成倍地增加。为此我们采用了新型的内外翅片管式空气换热器系统,以提高换热器效率。首钢特钢公司轧钢厂应用的内外翅片管式空气换热器系统如图1所示。



1- 换热管;2- 膨胀节;3- 换热器;4- 风机;5- 过滤器

图1 内外翅片管式空气换热器系统示意图

一般情况下,管式空气换热器空气在管内流通,烟气在管外流通。当换热器的换热管束均为内、外光滑管时,管内侧给热系数明显小于管外侧给热系数,即管内热阻大于管外热阻,所以强化管内侧传热、降低管内侧热阻是提高空气

The high speed wire rod mill line-accurate control way of cooling water box

Cao jianye, Wang yunbo, Zhang tao, Wang dingjun, Xin ziqiang

(MCC Capital Engineering & Research Incorporation Limited)

Abstract: Thesis aim at the way of cooling water box in high speed wire rod mill line, gets across much metallurgy research, integrates foreign company(DANIELI) colling model, and integrates the data when debugging the automation, then, constitutes the colling model and founds the WFCCS (Water Farward Calculate Control System). In WFCCS, brings forward the PID control way on flux, temperature. Based on the WFCCS, achieves the accurate control way on the high speed wire rod mill line, the exit temperature of the water box can be controlled in 10 degree, the setted target is achieved, accurate controlling target is achieved, applied target is completed achieved, and is successful used in Xiangtan, Kunming Iron & Steel company.

Key words: control cooling, high speed wire rod mill line manufacture

换热器综合传热系数的关键。而管式换热器的综合传热系数 k 由烟气侧的对流给热系数 a_1 、空气侧对流给热系数 a_2 和间壁热阻三外系数决定, 对于金属换热器, 由于管壁太薄, 一般可以忽略间壁热阻。由传热学原理可以得出换热器的综合给热系数 k , 即

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}} = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}$$

由上式可以看出, 换热器综合给热系数 k 值的提高取决于烟气侧的对流给热系数 a_1 和空气侧的对流给热系数 a_2 。而且在改善换热器的综合给热系数 k 上, 只有同时提高间壁两侧给热系数, 或提高两侧中较小一侧的给热系数, 对于提高综合给热系数 k 值才是最为有效, 而且当两侧的对流系数相等时, 综合给热系数 k 值正好等于两者的一半, 也就是最佳值。内外翅片管式换热器就是通过改善、强化换热器管壁两侧的传热方式与换热面积等, 使换热器管壁内外两侧的对流给热系数 a_1 和 a_2 尽可能的相近或者相等, 以达到综合给热系数 k 的最佳值。

2 内外翅片管式换热器的特点

2.1 内外翅片管式换热器和普通内插件管式换热器的比较

普通的内插件管式换热器的插件与管壁没有接触, 它只是在管中加入不同形状的金属插件。内插件的形状种类繁多, 诸如“一”字形、“Y”字形、麻花形、螺旋片、旋流器等。其原理是通过内插件减小管内气体的流通面积, 提高管内气体流速, 改善管内气体流动阻力和方式, 增加换热面积等强化管壁对管内气体的传热过程, 从而降低换热管壁的温度, 提高换热器的对流给热系数和传热系数。但是内插件仅起扰流的作用, 可以换热的使综合传热系数比光管换热器的综合传热系数提高 2 倍左右^[6], 但是其管壁温度高的问题并没有得到真正的解决, 高温腐蚀等问题使换热器的寿命等受到影响, 制约着连续生产。内插件换热器结构如图 2 所示。

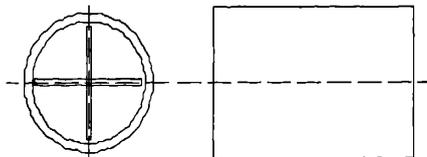


图 2 内插件换热器结构示意图

内外翅片管式换热器是通过管内采用内翅片, 管外采用环肋等形式同时改善管内外的传热方式与传热面积等, 达到改善换热器换热效果的目的。

内外翅片管式换热器的内翅片管增加了管内传热面

积, 内翅片与管壁之间的焊着率为 100%, 管内翅化比可达 3~5。与一般光滑管相比, 管内给热系数可提高 4 倍左右, 其综合传热系数也可以提高 2 倍以上。给热系数提高 3 倍以上, k 值可达 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 有效强化了管内传热。内翅片结构如图 3 所示, 各参数如表 1 所示。

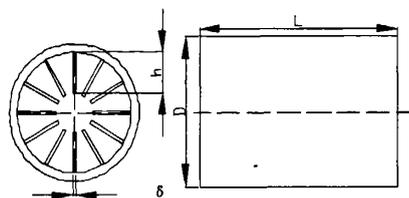


图 3 内翅片结构示意图

表 1 内外翅片管式空气换热器参数表^[9]

D	h	δ	n	β	L
38~39	12~13	1~2	12~24	3~5	1000

L-翅片管长度; h-内翅片的高度; δ -翅片厚度; D-外径; n-翅片数量; β -翅化比

采用内翅片管后, 管内给热系数明显提高。导致管外给热系数相对降低, 故在管外采用环肋, 通过调整管的内、外翅化比, 使管内侧热阻和管外侧热阻相当。以使空气换热器具有最大的传热效率。使管内管外的传热系数达到最佳匹配, 综合传热系数可以达到 $50 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 以上。

2.2 内外翅片管式换热器的特点

2.2.1 空气预热温度高

当换热器体积与面积相同时, 内外翅片管式空气换热器的空气预热温度明显高于一般插件式管式空气换热器的空气预热温度。在现场的实际测试中, 当烟气温度为 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 内外翅片管式空气换热器的热风温度可以达到 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 而一般插件式管式空气换热器的热风温度仅为 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2.2 综合传热系数大

内外翅片管式换热器通过换热管内翅片、换热管外采用环肋的方式, 使换热管内外的翅化比得到优化, 使管内外的传热系数相当, 达到最佳的综合传热系数。

2.2.3 使用寿命长, 适用性广

由于管内外翅片能直接接收来自管壁的热辐射, 然后再以对流的方式传给空气或烟气, 强化了管壁对空气和烟气的传热过程, 降低了管壁的温度, 从而增加换热器的使用寿命。

由于换热管管壁的温度比普通光管和普通插件管式换热器的管壁温度要低的多, 在实际制作换热器时, 内外翅片换热器换热管的材质可以采用碳钢、不锈钢或耐热钢。并采用镍基钎焊, 焊着率为 100%。以碳钢为例, 钎料在管壁上形成一层合金, 具有一定的防腐蚀和耐磨的等作用, 其允许使用的管壁温度可以达到 $600 \text{ }^\circ\text{C}$, 比一般碳钢的允

表2 1号加热炉改造后换热器参数

项目	烟气流量/m ³ ·h ⁻¹		烟气入口温度/℃		烟气入口温度/℃		烟气侧流阻/Pa	
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
设计参数	31260	31260	700	652	330	248	≤60	≤60
运行参数	28000	26571	590	550	350	260	55	52

项目	空气流量/m ³ ·h ⁻¹		空气入口温度/℃		空气入口温度/℃		空气侧流阻/Pa	
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
设计参数	28486	28486	20	20	400	400	<1000	≤2000
运行参数	28486	28486	15	20	260	370	800	1650

表3 3号加热炉新型内外翅片管式换热器参数

项目	烟气流量 /m ³ ·h ⁻¹	烟气出口 温度/℃	烟气出口 温度/℃	烟气侧流 阻/Pa	空气流量 /m ³ ·h ⁻¹	空气入口 温度/℃	空气出口 温度/℃	空气侧流 阻/Pa
设计参数	40990	700	275	<100	28875	20	450	<2500
运行参数	26571	700	270	52	28486	20	450	—

许使用温度高 150℃^①，所以制作换热器时可以用一般材质代替一些高合金、高成本的钢材，使换热器的适用性大大增加，投入成本陈规降低消耗，投资回收期大大缩短。

3 新型内外翅片管式换热器的应用情况

首钢特钢公司轧钢厂1号加热炉（以下简称1号加热炉）原采用的普通内插件式换热器，重约20t，换热面积为492m²，综合传热系数设计为30W/(m²·℃)，烟气入口温度为600℃，空气出口温度平均为240℃，与一般情况下空气预热温度可达烟气温度50%的指标相比仍有一定差距，且换热器在使用后期因积灰而导致其传热系数逐渐降低。

1号加热炉改造后为新型内外翅片管式换热器，改造前后所用燃料均为天然气，受现场场地等因素的制约，换热器的体积与换热面积也没有太多的变化，换热面积均为492m²；而且换热器改造前后加热的钢质与坯料的规格与尺寸没有任何地变化。1号加热炉改造前后换热器参数见表2。

首钢特钢公司轧钢厂3号加热炉（以下简为3是以加热炉）为新上的加热炉，结合我们在1号加热炉上使用内外翅片换热器成功的经验，本次在大修改造时结合炉子的设计重新设计安装了新型内外翅片管式换热器，其参数见表3。

2台新型内外翅片管式换热器安装于1、3号加热炉后，运行状况良好。1号加热炉换热器测试时烟气入口温度虽只有550℃，远未达到设计的652℃，但换热器热空气温度仍达370℃，温度效率达65%以上。3号加热炉换热器热空气温度约为450℃，而且两台加热炉的热风温度的提高也较1号加热炉使用普通内插件管式换热器时明显加快，使加热炉提温速度明显加快，即使加热炉生产的产量超过额定产量10%，而天然气单耗却无明显上升，能够适应大高合金钢生产节奏的变化，节能效果显著。另外由于我们是以

城市管网的天然气为燃料，烟所中的灰尘与杂质较少，即使未安装吹灰器，外翅片挂灰也不明显，在2007年底通过高压压缩空气进行了清理，运行状况较为稳定。

为了测试内外翅片管式换热器实际运行一段时间以后的效果，在3号加热炉运行半年以后，通过北京科技大学热能测试站于2005年11月4日对3号加热炉进行了热平衡测试，对加热炉整体及换热器进行了测试，现场实测数据见表4，表5^②。

表4 烟气及空气温度

时间	烟气温度			空气温度	
	炉尾	换热器前	换热器后	换热器前	换热器后
19:45	704.8	690.4	273.1	33.2	410.0
20:00	702.8	693.6	273.2	33.3	409.9
20:15	706.6	690.3	273.1	33.2	414.2
20:30	703.0	690.4	273.1	33.2	414.3
20:45	706.3	693.5	273.2	33.2	414.2
21:00	707.8	696.7	273.1	33.2	414.2
21:15	706.4	693.5	273.2	33.3	414.2
21:30	708.0	693.6	273.1	33.2	414.1
21:45	706.3	681.0	266.9	33.3	414.2
22:00	673.9	684.1	270.0	33.2	414.2
22:15	680.9	677.8	270.1	30.9	414.3
22:30	680.4	674.8	270.6	30.8	414.2
22:45	685.0	665.4	271.3	30.2	414.3
23:00	694.5	674.8	271.2	33.2	414.2
平均值	697.6	685.7	271.8	32.5	413.6

通过实测数据得到换热器的温度效率与热回收率如下：

换热器温度效率 E

$$E = \frac{t''_k - t'_k}{t'_y - t'_k} = \frac{453.6 - 32.5}{685.7 - 32.5} = 64.5\%$$

表5 烟气成分

分组号	CO ₂		O ₂		CO	
	换热器前	换热器后	换热器前	换热器后	换热器前	换热器后
1	10.8	8.7	2	5.7	0	0
2	10.8	8.7	2.2	5.8	0	0
3	10.9	8.7	2	5.9	0	0
4	10.9	8.7	2	5.8	0	0
5	10.8	8.6	2.1	5.9	0	0
6	10	7.8	3.5	7.4	0	0
7	9.8	8	3.6	7	0	0
8	9.8	8.1	3.8	6.8	0	0
9	9.9	8.2	3.8	6.6	0	0
10	11.8	9.4	0	4.6	0	0
平均	10.55	8.49	2.5	6.15	0	0

换热器热回收率 η

$$\eta = \frac{q_{r,k} C_k (t''_k - t'_k)}{q_{r,y} C_y t'_y}$$

根据表4和表5,换热器前烟气温度为685.7℃,该温度下烟气比热为1.499 kJ/m³,换热器前空气温度为32.5℃,该温度下空气比热为1.005 kJ/m³,换热器后空气温度为453.6℃,该温度下空气比热为1.08 kJ/m³,再根据前面的计算得:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{q_{r,k} C_k (t''_k - t'_k)}{q_{r,y} C_y t'_y} \\ &= \frac{17.46 \times 10^6}{3499.7 \times 11.509 \times 685.7 \times 1.499} \\ &= 42.17\% \end{aligned}$$

现场实测与计算结果表明,内外翅片管式换热器空气预热温度达到450℃以上,排烟温度较低,小于300℃,一般270℃左右,使烟气预热得到了充分回收,内外翅片管式换热器的温度效率达到64.5%,换热器的热回收率达到42.17%,换热器的性能指标达到并超过了设计水平。

4 节能效益测算

1号加热炉更换为内外翅片管式换热器后,热空气温度提高了110℃左右,3号加热炉采用内外翅片管式换热器后,空气预热温度比内插件管式换热器提高100℃左右。经过实测,2007年首钢特钢公司轧钢厂,2台加热炉的实际单耗为42.85 Nm³/t,2008年1~5月单耗为42.01 Nm³/t,比改造前单耗下降了5 Nm³/t以上,节能效益在800万元/年左右。两年以来,两台内外翅式换热器运行状态稳定,达到了预期的效果。

5 结论

内外翅片管式空气换热器是一种新型、高效的换热器,具有综合传热系数高、结构紧凑、空气预热温度高、减缓高温腐蚀、延长设备使用寿命、安装方便和投资回收期短等优点,是内插件式换热器的理想替代产品,特别针对使用高效清洁能源天然气的加热炉。

新型内外翅片管式空气换热器的成功应用必将给生产企业带来显著的经济效益,是较为理想的加热炉空气换热器,特别适合于老厂的技术更新与改造。

参考文献

- [1] 康亚琪 黄细阳 轧钢加热炉高效运行的新模式 钢铁工业技术论文集 2004年10月 第1页
- [2] 陆钟武 火焰炉 冶金工业出版社 1995年 第77页
- [3] 康亚琪 黄细阳 轧钢加热炉高效运行的新模式 钢铁工业技术论文集 2004年10月 第5页
- [4] 刘庸 内外翅片管式空气换热器的开发与应用 钢铁工业技术论文集 2004年10月 第16页
- [5] 刘庸 内外翅片管式空气换热器的开发与应用 钢铁工业技术论文集 2004年10月 第17页
- [6] 北京科技大学热能测试站 首钢特钢厂热平衡测试报告 2004年11月 第30、31页

Abstract: The new inner and outer finned tube recuperator is a kind of high efficient and energy saving air preheating recuperator. This paper tells the differences between the inner and outer finned tube recuperator and the traditional plug-in type, and introduces the features of the new recuperator, the applications and practical energy-saving effects of its use in the two natural gas furnaces of ShouGang Special Steel company.

Keywords: inner and outer fin; tube recuperator; applications