

火焰炉用换热器在我国的发展

罗文泉, 周大刚 (鞍山热能研究院, 辽宁鞍山 114004)

摘要: 文章回顾了火焰炉常用几种换热器在我国的发展历程。简略地比较了换热器的型式和材质, 并介绍了换热器经济优化的概况。展望了火焰炉用换热器的发展前景, 提供了换热器节约能源的总体概况和有关数据, 可发挥换热器在我国火焰炉上的节能作用。

关键词: 换热器; 火焰炉; 发展; 节能

中图分类号: TF066.2 **文献标识码:** E

Development of Heat-Exchanger Used at Flame Furnace in Our Country

LUO Wen-quan, ZHOU Da-gang

(Anshan Research Institute of Thermo-energy, Liao Ning Anshan 114004)

Abstract: The paper reviews the development of several kinds of heat exchanger used at flame furnace in our country, compares the types and materials, introduces the economic optimization, and forecasts the prospects. It is hopeful for exchangers to play an important role in energy saving.

Key words: heat-exchanger; flame furnace; development; energy-saving

1 前言

国民经济和社会发展“九五”计划和2010年远景目标纲要》规定: 今后15年, 我国经济将持续高速发展, 能源形势仍然严峻, 供需存在较大缺口, 必须坚持“节约与开发并举, 把节约放在首位”的方针, 加强《节约能源法》的宣传和贯彻执行, 加大节能工作力度, 确保“九五”期间实现5%以上的节能目标, 才能保证国民经济年均增长8%对能源的需求。

我国能源总体利用效率一直较低, 虽然近年来已达30%, 仍比发达国家至少低10个百分点。我国单位国民生产总值能耗比发达国家高6~10倍, 单位产品能耗比发达国家高出50%~100%。可见, 我国的节能潜力很大。

换热器是合理利用与节约现有能源、开发新能源的关键设备。如何把设备能耗降下来, 就成为近期

我国各行业的中心任务, 而余热利用自然是当务之急。换热器的正确设置、合理设计、性能改善等对能源的有效利用及开发有着十分重要的意义。

火焰炉节约能源、降低燃料消耗, 是一项迫切和带有长远政策性的任务。有关火焰炉用换热器研究发展的系统工作, 至今尚未开展起来。深入系统地研究换热器的发展和最新动向, 是火焰炉节能要求日益严格情况下的必然趋势。

本文回顾了火焰炉用换热器在我国的发展历程, 较系统地研究了常用几种换热器的技术演变趋势; 预示了未来换热器在火焰炉上的发展前景, 希望换热器在我国火焰炉节能降耗、降低成本方面发挥更大的作用。

2 发展历程回顾

2.1 火焰炉用换热器的发展概况

火焰炉用换热器, 自1825年问世以来, 迄今有

近 180 年的历史。从 19 世纪 20 年代开始, 搅炼炉和高炉采用铸铁管换热器预热鼓风。到 50 年代, 考贝尔和西门子分别发明了炼铁炉和炼钢炉的蓄热室, 空气预热温度得以提高。

自 20 世纪开始, 在继续使用蓄热室的同时, 一方面重新采用和发展金属换热器, 由铸铁管的换热器发展了平滑钢管和扁平的、铸铁针片管的、合金钢的整体的换热器和辐射换热器。另一方面继续采用陶质换热器, 这时是圆管或八方管砖的, 一战后随美国的均热炉传到欧洲。二战后连续加热炉多用四孔砖的陶质换热器。到 50 年代, 因耐热钢制作技术的发展和烧高热值燃料, 金属换热器得到了迅速发展。这时已出现凸翅管式、套管式对流换热器, 以及缝式、管式辐射换热器和辐射对流换热器。近年金属插件管式换热器得到空前发展。随着预热风温的提高和低热值燃料的使用, 加之耐热钢稀缺、昂贵, 陶质换热器又得到了发展。由粘土质的换热器发展到高铝质、刚玉以及碳化硅质换热器。近年来, 与燃烧器组成一体的小蓄热室(对烧)又发展起来了。

2.2 火焰炉用换热器在我国的发展历程

这里我们只回顾火焰炉常用的几种换热器在我国的发展历程。

2.2.1 金属辐射换热器

我国火焰炉使用换热器较晚, 但在 1973 年洛阳拖拉机厂已经使用金属辐射换热器, 并对其进行了改进。70 年代, 我国锻工加热炉多采用整体块状、针状、管状等对流换热器, 而且还使用了煤气辐射换热器。并指出在一定条件下, 辐射传热系数可为对流传热系数的 2~3 倍; 预热温度是块状换热器(< 250)的 1~2 倍。

80 年代, 我国对辐射换热器的研究开始深入。在辐射换热器上使用喷流技术的研究表明, 在空气侧喷流可使单位换热面上的换热量提高 23.6%, 对流给热系数 α 增大 21.88%。并且指出: 对 α 值影响最大的是 Re , 其次是 L/d ; 辐射换热器宜采用逆流换热方式, 环形截面积应沿前进方向相应空气体积增加而扩大。

90 年代金属辐射换热器几乎发展到了顶峰。1991 年菜钢 2 号均热炉, 应用辐射-对流组合式金属换热器, 在烟气温度为 900~1100 情况下, 把空气预热到 500~600, 该换热器的综合传热系数达到 63.36 W/m²·。管式辐射换热器试验研究表

明, 空气侧宜采用插入件管, 最佳空气流速为 15 m/s, 当流动进入自模化区后, 阻力系数为 0.46, 较光管的 0.42 略有提高; 综合传热系数可达 52 W/m²·。网插旋流高效辐射换热器, 可用 900~1200 烟气把空气预热到 500~650。该换热器的综合传热系数在 54~72 W/m²·之间, 使用寿命为 5~8 年。

随着对流管式换热器的发展, 为了提高空气侧的对流给热系数, 各种形状的插入件得到了广泛使用。相应辐射换热器上插入件也有所介入。一种高效辐射换热器, 就是在其环缝空气通道中安装网状二次传热面, 来强化传热效果的。也有在空气、烟气两侧都用网的插件辐射换热器的实验。

当然, 辐射换热器的发展也推动了对流换热器的改进。在比较空气烟气两侧的对流给热系数的大小之后, 应该强化给热系数较小一侧的传热。由于随着流速的提高, 空气侧给热系数比烟气侧大得多, 就有人利用金属辐射网强化烟气侧传热。金属网用铁铬铝做成, 并指出: 烟气温度高于 800, 辐射网设置在换热器前合适; 烟气温度低于 800, 辐射网设置在换热器后为宜。

2.2.2 陶质换热器

陶质换热器以蓄热形式问世, 随后换热形式很快地发展。原因是陶质换热器耐高温, 空气预热温度高, 应用后节能效果显著。粘土管砌筑的蓄热式换热器, 在烟气温度为 1200~1250 时, 可把空气预热到 800~850。但是体积庞大(6~12 m³/m³), 漏气太多(10%~20%)。用硅铝酸盐制造的蓄热式换热器——热轮(15 r/min), 由于受热膨胀的限制, 适于温度为 850 的烟气条件下运行。

美国 Hague International Corporation 研制出由换热器、烧嘴、输送管和控制系统的组成的高温废热回收系统。该系统的换热器由长 122 cm、内径 3.8 cm, 带有翼片的碳化硅管组成。在烟气 1540 时, 空气可预热到 980, 漏泄率小于 2%。每年维修一次, 更换工作温度最高的一排碳化硅光管。这样, 使得应用该系统的锻造炉热效率达到 34.9%。

我国研制的碳化硅管换热器应用于铜冶炼炉上, 烟气中的热量 48.6% 得到回收。该换热器因碳化硅高的断裂表面功、大的弹性模量、低的断裂应力, 适用于烟气温度为 850~1400 的高温, 使用寿命前两排管大于 1.5 年, 其余的可用 3~5 年。

1978年太钢初轧厂、1981年上钢五厂使用高铝碳化硅质长管(长 $\geq 1600\text{ mm}$, 含 Al_2O_3 70%~80%)换热器,寿命最长达5年之久。另外,湘钢开坯加热炉、大冶和马钢初轧均热炉都使用了这种陶质长管换热器。还有试验板翅式陶质换热器的,用堇青石质芯体、莫来石框砖是可行的,但是漏气和结构问题当时均未得到解决。

节能降耗要求空气预热温度进一步提高,随着自身预热烧嘴的发展,碳化硅正交换热器与烧嘴的组合于1989年获得国家专利。这种换热器在烟气温 1100°C 时,可把空气预热到 500°C 以上,并且碳化硅换热器漏风率在1.1%~5.0%之间。

后来,管板结构、各元件间连接面结构的研究,使得碳化硅换热器应用在锻造加热炉上。还有人把组合筋板陶瓷换热器与套管喷流金属换热器串联进行实验,结论是:①应选阻力损失较小的金属换热器;②空气流速不宜过高,陶瓷换热器漏风。

为了强化陶瓷换热器的传热,有在碳化硅管内加螺旋插件的高温换热器。管与板之间,在低温侧每根管用弹簧压紧,用可吸收热膨胀的滑动环密封。1082的烟气,可将空气预热到 651°C ,漏气率为2%。也有用星形插入件或带内翅的碳化硅管来强化传热的。在用内翅管碳化硅换热器与U型管式金属换热器组合时,可在烟气温 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 的情况下,把空气预热到 $400\sim 450^\circ\text{C}$ 。

有人对蓄热式换热器所用材料进行了研究:①碳素钢在 $873\sim 1373\text{ K}$ 时比热容大、热导率高,传热速度快,辐射强。低Cr、Mo含量的碳素结构钢(15CrA、20Cr等)抗氧化性能有所提高。②不锈钢、耐热钢等材料具有较强的抗腐蚀性能,能够满足在较浓腐蚀性气体和水蒸气气氛中使用的要求,但价格高。③陶瓷材料在 873 K 以下,比热容大、热导率高,蓄热效果好。

对蓄热体的选用,经研究得出:①尺寸以 10 mm 为宜;②形状以球、短圆柱、短空心圆柱、算盘珠、枣状为宜;③材质以氧化铝、耐火粘土,或铸铁、碳钢为宜。

对陶瓷球蓄热室传热特性的研究表明:①换向时间有一合理范围;②比表面积应为 $190\sim 250\text{ m}^2/\text{m}^3$;③球径应为 $15\sim 20\text{ mm}$;④蓄热体高度应在 $0.6\sim 0.7\text{ m}$ 之间。

2.2.3 喷流换热器

70年代以来,不少国家致力于对喷流换热器的研究。主要用于辊底式、步进式、输送带式等明火连续加热炉。Allegheny Ludlum钢铁公司1972年末开始研制,于1975年7月将第一台喷流换热器成功地安装在新卡斯特工厂的不锈钢带材生产线上。在烟气温 $1090\sim 1150^\circ\text{C}$ 时,该换热器最大回收热量的能力可达55%~65%。燃耗降低40%~51%,增加产量17%~51%。前苏联对喷流与辐射式换热器的经济效益进行了比较:比单缝隙辐射式提高了2~2.76倍;比双面缝的提高了35%~53%。

我国80年代初开始研究喷流换热的最佳结构参数。发现影响对流给热系数 α 的次要因素顺序是 S/d 、 Re 、 l/d ;200~400的换热面,在 $\text{Re}=270\sim 6000$ 时, $S/d=5\sim 7$, $l/d=5\sim 6.5$ 为宜。天津一轧在加热炉上应用喷流换热器较早:①传热系数可达 $46\sim 58\text{ W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$,是片状与管状换热器的1~2倍;②单位面积换热量约为片状与管状的1.7~3.0倍;③空气喷出速度合理时,换热器的阻力损失约 $400\sim 1000\text{ Pa}$;④单位重量的换热量是片状换热器的1.6~2.8倍。

对喷流套管内阻力损失的研究表明,作为主要结构参数的环缝面积与内管截面积之比 $f_{\text{环}}/f_{\text{内}}=0.9\sim 1.0$ 为宜,并在给出阻力损失计算式的同时,回归出阻力损失系数 K 与 $f_{\text{环}}/f_{\text{内}}$ 的关系。

喷流换热器的传热计算,可以得出喷嘴群喷流换热时的最佳结构参数:相对喷嘴面积 $f_{\text{opt}}=0.0152$; $(H/D)_{\text{opt}}=5.43$;错排 $(L_D/D)_{\text{opt}}=7.72$,顺排 $(L_Q/D)_{\text{opt}}=7.20$ 。而烟气侧换热系数在 $\text{Re}=1.5\times 10^3\sim 1\times 10^5$ 之间由实验公式计算。

邯钢一轧分厂500中型炉上使用的异形管状喷流换热器,外管用无缝管挤压成型,内管铸造后用锥形钻头钻孔制成。700的烟气可把空气预热到 350°C ;成本9万元,半年就可以回收。

喷流辐射换热器的传热系数可达 $51.2\text{ W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$;空气侧的给热系数可用 $\text{Nu}=0.275\text{ Re}^{0.474}$ 计算;在空气喷流速度为 20 m/s 时,其阻力损失为 1011 Pa 。

喷流换热器应用在台车式加热炉上,也取得了较好的经济效益。广西南宁钢铁厂的双行程套管喷流换热器,在结构上有所创新:①交错布置喷孔;②末端1/2段改孔为嘴;③为使气流分配均匀,采用了分流板的结构。

应用在成都钢铁厂的箱式喷流换热器, 在烟气温度为 700 ℃ 时, 空气预热温度为 220 ~ 300 ℃, 综合传热系数为 $34.89 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 烟气流速为 4 m/s 。上钢十厂粉煤加热炉使用立式空气喷流换热器, 喷距 12 mm, 孔距 55 mm; 喷流速度 20 ~ 25 m/s; 烟气 750 ~ 800 ℃, 空气预热 250 ~ 300 ℃。650 粉煤加热炉上的 $4 \times 50 \text{ m}^2$ 悬吊管式喷流换热器, $H/d = 6.8$, $S/d = 12 \sim 18$, 设计综合传热系数为 $47 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。各组换热器下设集灰坑, 组间砌有隔墙。运行效果好, 经济效益可观。

山西潞城某厂, 用带插件套管式喷流换热器回收炼镁加热炉烟气余热, 只是空气阻力损失略大些。调整结构参数, 降低阻力损失, 喷流换热器还可应用在反射炉上。在空气喷流速度为 24 m/s 时, 喷流换热器的阻力损失为 4980 Pa。

多孔喷流冲击换热的实验结果表明: ①整体换热的 Nu 可用 H/D 、 S/D 、 Re 、 Pr 和喷孔排数表示。②换热系数在喷流相对高度 $H/D \approx 3$ 时达到最大。

2.2.4 热管换热器

1944 年美国高格勒发明一种新的传热设备。直到 1964 年又有人提出了类似的设备, 人们才开始重视它并成功地应用于宇航技术上。这种设备就是今天被广泛应用的热管。热管按其工作温度, 可分为高温热管(工作温度为 350 ~ 2000 ℃); 中温热管(工作温度为 50 ~ 350 ℃), 和低温热管(工作温度为 -200 ~ 50 ℃)。

热管有极强的传热能力, 比良导热金属的导热能力要高出许多倍。1974 年加拿大首先把热管用于烟气余热回收。1976 年美国投入一套热管式空气预热器。预计不久的将来, 这种换热器会得到更广泛的应用。

我国 70 年代初引进热管技术, 中科院力学所 1972 年开始研究热管。南京炼油厂、石油工厂 1980 年开始实验和应用热管换热器。1984 年热管换热器正式应用在工业炉窑上。为了安全应使内压力小于 0.40 MPa, 故控制工质温度小于 250 ℃。当时, 翅化比 $\beta = 5 \sim 25$; 翅化效率 $\eta \geq 80\%$; 气-气型热管蒸发段与冷凝段长度比一般为 1.0 ~ 1.5。

1984 年鞍钢率先使用了大型钢水热管换热器, 应用在 9 号高炉热风炉上。热管长达 5 m, 热管换热器的回收期为 4 ~ 5 个月, 并于 1984 年 9 月通过冶金部组织的鉴定。后来, 威远钢厂实验了用分离式热

管换热器回收高炉热风炉的排烟余热。

回转式热管换热器, 可以应用在冲天炉上产生蒸汽; 静置式热管换热器还可以加热冲天炉用的空气。

从节约燃料的经济观点来看, 热管换热器取得的经济效益可观, 特别适合中、低温余热的回收。由于相变传热、工质的汽化潜热很大, 因此热管的内热阻很小, 能以较小的温差获得较大的传热率。

变加热段热管空气换热器, 在凌钢粉煤轧钢加热炉上应用成功。该换热器所用的每支热管, 不但进行了钝化处理, 而且还装有再生阀以防管内出现不凝结气体。

上钢一厂对型钢加热炉烟气余热进行了综合利用。同时使用管状、热管和翅片换热器, 余热回收更为彻底。宝钢 2 号高炉热风炉, 使用分离式热管换热器同时预热空气和煤气。唐钢步进式加热炉, 应用热管换热器产生 0.5 MPa、2.8 t/h 过热蒸汽。热管的烟气、空气侧均肋化, 翅化比达 8.11。

对分离长尺热管输热特性、声速极限的研究不断深入, 进而研究分离长尺热管的热流极限。对分离式热管换热过程进行的整体数模研究表明: 热管的最佳充液率为 60% 左右。考虑到工作条件的变动, 所推荐的充液率为 50% ~ 70%。

对热管换热器的防腐减垢, 可用钛酸脂改性 UFE 涂料。应用在燃油陶瓷隧道窑上的热管换热器, 使用 LDFP 低温防腐剂也取得了较好效果。

对热管换热器的效率分析, 给出了传热单元数、冷热流体热容量比对效率的影响, 有关结果可在工程设计时参考。

2.2.5 管状(插件)换热器

自铸铁管换热器问世以来, 管状换热器一直是人们所使用。先是平滑铸铁管换热器, 由于制造简单、价值便宜而被用于加热炉和热处理炉上。但其体积庞大、气密性差、寿命也较短, 它的综合传热系数仅为 $2.3 \sim 3.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。随后, 平滑钢管换热器因其结构紧凑、气密性好而被采用, 且其综合传热系数较铸铁管的提高了很多, 已达到 $17.5 \sim 29.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

我国 80 年代初期在火焰炉上使用管状换热器, 并使用日本尾花英朗著《热交换器设计手册》介绍的方法, 优化了逆流管状换热器。陕西钢厂采取烟气走管内、空气走管外的方案来降低换热器的壁温。

总结管状换热器的使用情况指出: ①4 行程时空气流速取 $7 \sim 8 \text{ m/s}$; 2 行程时取 $9 \sim 10 \text{ m/s}$ 。②自然排烟时烟气流速选 $2 \sim 3 \text{ m/s}$; 引风机排烟时选 $3 \sim 4 \text{ m/s}$; ③在温度效率为 $0.5 \sim 0.6$ 时, 把空气预热到 $400 \sim 500$, 4 行程优于 2 行程; ④4 行程换热器的高温部分($1/4$) 采用耐氧化钢管, 其余用渗铝或普碳钢管。

为了强化空气侧传热, 出现了插件管状换热器, 综合传热系数达到 $43.15 \text{ W/m}^2 \cdot$ 。上钢三厂薄板加热炉, 排烟温度在 700 以下, 使用管状换热器回收余热, 投资少、效益大。

由于采用管状换热器的企业越来越多, 有人给出插件管状换热器的设计计算方法。还有人为管状换热器编制计算程序, 为设计管状换热器提供了方便。

鞍钢中板厂 1 号加热炉使用的波纹管插件换热器, 烟气温度为 650 时, 预热空气温度为 300 , 综合传热系数为 $43 \text{ W/m}^2 \cdot$ 。在生产实践中获得了经济效益。插件管状换热器的插件, 以 “一” 字形的损失最小。在烟气温度为 $700 \sim 850$ 时, 可将空气预热到 $450 \sim 600$, 综合传热系数为 $35 \sim 45 \text{ W/m}^2 \cdot$ 。插件管状换热器换热管的优化实验表明: 圆形光管 “一” 字形扭带插件, 在 650 炉温时, 空气流速 7 m/s 最佳。

天津无缝钢管厂使用带异型插件螺纹管换热器, 烟气温度 $800 \sim 883$, 预热空气温度 $400 \sim 450$, 空气阻力损失 900 Pa , 综合传热系数达到 $47 \text{ W/m}^2 \cdot$ 。空煤气双预热的插件管状换热器应用表明, $700 \sim 750$ 烟气可把空气预热到 $400 \sim 450$, 把煤气预热到 $200 \sim 250$ 。管状插件换热器在轧钢加热炉上, U 型管插件换热器在粉煤加热炉上都得到成功的应用。

随着管状插件换热器的广泛应用, 设计计算方法日趋完善。对新型管状插件换热器进行实验研究表明: ①插件上加凸起有增强传热作用。② Re 大时短扭带插件效果好, Re 小时扭带应有一定长度。③换热器的阻力损失和给热系数, 可按回归式计算。

由于管状插件换热器强化了空气侧传热, 提高了换热器的传热效率, 但随之而来的问题是空气的阻力损失迅速增大(空气流速的增加所致)。因此人们开始寻求一种高效低阻的管状换热器, 于是产生了管状旋流换热器。经大连钢厂实践表明, 在烟气温

度为 $630 \sim 680$ 时, 管状旋流换热器可把空气预热到 $350 \sim 390$, 空气侧阻力损失为 590 Pa , 综合传热系数达到 $55 \text{ W/m}^2 \cdot$ 。

由传热过程可知, 对流传热系数与气流速度的 0.8 次方成正比, 压力损失与气流速度的平方成正比。管状换热器正向高传热系数、低压力损失、高体积紧凑度、廉价、长寿、容易制造和方便使用方向发展, 于是空间传输式换热器出现了。该种换热器传热系数可达 $75 \sim 90 \text{ W/m}^2 \cdot$, 甚至更高, 空气侧压力损失为 1800 Pa 甚至更低, 单位体积的传热面积可达 $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 甚至更大。并且还有人专门分析了换热器压力损失的成因、计算方法和减少措施, 给今后设计这种管状换热器带来很大的方便。

2.2.6 铸铁针、片管换热器

20 世纪 30 年代, 相对平滑表面而言, 铸铁双面针片管换热器以其高的传热系数 $93 \sim 116 \text{ W/m}^2 \cdot$, 为换热器的初步发展做出了应有的贡献。因其单位传热面积的传热量大、外形尺寸紧凑, 受到用户的欢迎。

片状管换热器具有结构紧凑、传热效率高、价格低、寿命长等优点, 其主要缺点是积灰严重。

片状管换热器的设计和应用表明: 高硅耐热球墨铸铁换热器的空气流速取 $8 \sim 9 \text{ m/s}$, 烟气流速取 4 m/s 为宜; 传热系数以 $21 \text{ W/m}^2 \cdot$ 为妥; 二级膨胀补偿器是该换热器的最薄弱环节, 需要加以改进。

多行程耐热球铁翅片管换热器, 在燃油加热炉上取得了热回收率 50% , 炉子热效率 $65\% \sim 70\%$, 节能 $15\% \sim 20\%$ 的效果。加热炉的经济排烟温度是 $650 \sim 759$, 换热器后烟温在 $200 \sim 250$ 时可自然排烟。

针状管换热器传热效率较片状管的高, 但其漏气率较片状管的大。片状管换热器在轧钢加热炉上广泛地应用着。

武钢热轧带钢厂使用大型翅片管换热器经验表明: ①停轧时应控制烟气温降不大于 100 /h, 防止翅片管和波形膨胀圈开裂; ②烟气中硫化物对换热器有明显侵蚀。上钢一厂对片状管换热器的积灰问题, 采取了如下措施: ①片状管外壁间距不小于 100 mm , 烟气流速小于 3 m/s ; ②尽量减少积湿灰; ③所积干灰用压缩空气吹扫。

山东莱芜钢铁总厂所用片状管换热器, 能回收 50% 的余热, 投资回收期仅半年。在用简单方法修复

铸入圈和膨胀圈的情况下, 换热器的寿命为 4 ~ 6 年。

近年来, 有人提出用经济分析观点选用换热器 (当然, 这是对从节能目的而使用的换热器而言的), 指出从传热和阻损两方面来看, 片状管换热器较好; 对烟尘较大的、烧重油的炉子宜用单侧片状管换热器。也有人专门研究片状管换热器的清灰问题: 国外用 1.5 MPa、155 °C 蒸汽清洗; 国内先用 0.68 MPa 压缩空气清灰, 后用加金属清洗剂的高压水清洗, 效果很好。

2.2.7 热媒换热器

热媒换热器, 是把两个间壁式换热器由在其中循环的载热体 (热媒) 连接起来的换热设备。热媒换热器适于从 250 ~ 450 °C 的工业废热中回收和利用余热, 热媒换热器可用于高炉热风炉的余热回收。本钢一铁厂使用热媒换热器后反映有积灰现象, 似应增加清灰装置。

3 前景展望

3.1 火焰炉用换热器的特点

火焰炉用换热器, 从材质上可分为金属换热器和陶瓷换热器两大类。粗略地看, 金属换热器的特点是: ①气密性好, 可预热高压空气或煤气, 适应各种性能燃烧器的要求。②管壁导热好, 传热系数大 ($12 \sim 58 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)。③耐高温性能差, 需稀释烟气降低烟温, 预热的空气温度受到限制。④烟温高时需热合金材料。

陶瓷换热器的特点是: ①耐高温, 烟气温度不受限制 (可达 1000 ~ 1500 °C), 能经受炉况的大幅度波动, 可靠地把空气预热到高温 (600 ~ 900 °C), 寿命达 5 ~ 20 年, 不需经常更换。②用耐火材料制成, 不需用耐热合金材料。③气密性差, 有的后期漏风影响炉子的正常操作, 不能预热高压气体。④砖壁 (管壁) 导热差, 传热系数较金属的小。⑤砖砌体积大 (占地大), 热惰性大, 不利于计算机控制。

3.2 火焰炉用换热器的比较

3.2.1 换热器型式的比较

各金属换热器之间, 可从下列 5 个方面进行比较:

(1) 传热效率, 即单位传热面积的传热量。从大到小依次是: 双面针片管式, 辐射式, 单面针片管式,

平滑钢管式和整体式换热器。

(2) 外形尺寸的紧凑性。从紧到松依次是: 双面针片管式, 单面针片管式, 整体式, 平滑钢管式和辐射式换热器。

(3) 高温耐久性。从高到低依次是: 辐射式, 整体式, 单面针片管式, 平滑钢管式和双面针片管式换热器。

(4) 抗堵塞性。从优到劣依次是: 辐射式, 单面针片管式, 平滑钢管式, 双面针片管式和整体式换热器。

(5) 制作简易性。从简到繁依次是: 辐射式, 平滑钢管式, 单面针片管式, 整体式和双面针片管式换热器。

另外, 从单位传热面积的设备重量方面比较, 优者在前的排列顺序是: 管状, 片状, 喷流, 套管和辐射式换热器。

高炉热风炉余热回收用换热器, 在烟气温度不大于 400 °C 时, 以热管式换热器为好; 热媒式换热器存在积灰问题; 焊接板式换热器散热偏大且漏气; 回转式换热器漏气率较高。

3.2.2 换热器材质的比较

(1) 金属换热器所用材料, 按材质的最高使用温度从低到高依次是: ①焊接件: 低碳钢, 渗铝低碳钢, 铝硅钢。②铸铁: 灰铸铁, 低合金, 高硅, 奥氏体, 含铬 30% 铸铁。③铸钢: 铁素体, 奥氏体铸钢。

(2) 陶质换热器所用材料, ①按材料导热系数从大到小依次是: 再结晶碳化硅, 粘土胶结的碳化硅, 粘土胶结的刚玉, 粘土碳化硅, 高铝料, 耐火粘土料。②按材料荷重软化点从高到低依次是: 再结晶碳化硅, 粘土胶结的碳化硅, 粘土胶结的刚玉, 高铝料, 粘土碳化硅, 耐火粘土料。③按材料容重从小到大依次是: 耐火粘土料, 粘土碳化硅, 粘土胶结的碳化硅, 高铝料, 粘土胶结的刚玉, 再结晶碳化硅。

3.3 火焰炉用换热器的经济优化

火焰炉没有换热器时, 不存在换热器经济优化问题。为了节约燃料而装设回收烟气余热的换热器时, 必须考虑能够收回投资才行。

单从节约燃料的经济观点来看, 预热的空气温度不宜超过 350 ~ 400 °C。粗略估计, 预热温度每提高 100 °C, 传热面积需增加一倍。因为空气预热至高于 400 ~ 450 °C 时, 所需换热器的传热面积约按双曲线增长, 曲线上部渐近于换热器入口烟气温度的直

线。如果空气预热温度超过 $350 \sim 400$,就需大的传热面积和高价的耐热金属或陶质的换热器。对于这种情况,就需要对所选换热器进行经济优化。

过去考虑投资换热器的经济效益,一般只计算换热器的单位造价(元/ m^2)和投资回收期(月),后来发展到资本回收法和收益法。资本回收法是了解设备投资金额用几年能回收的计算方法,用于判断各种节能设备投资效果和投资顺序。

收益法是计算设备投资有多少收益的方法,可作为最后判断节能设备投资效果的手段。

我国火焰炉用换热器的投资回收,计算时考虑利率最早是在1985年。对于火焰炉用换热器的经济优化,最早是受日本尾花英朗著《热交换器设计手册》的影响,探讨了逆流换热的优化问题。

对于空气预热的最佳温度研究,有逆流和顺流的最佳温度计算式。对余热回收换热器的经济最佳研究,可以导出多种换热器的最佳温度效率、最佳传热面积和最佳换热温度,以及最佳热回收率的计算公式。

关于火焰炉用换热器的优化,90年代初也开始了。先是气-气换热器的优化探讨,随着优化工作的深入,提出单位余热回收量的年净收益;热价、价和电价三者之间的关系;热管换热器的效率表达式;以及插件换热管性能的熵产分析。这是从能量和能质方面进行经济优化的概况。

3.4 火焰炉用换热器的发展前景

火焰炉烟气余热,用来预热空气(煤气)是最行之有效的节能措施,也是大有发展前途的余热回收方法。预热空气(煤气)所带入每一单位物理热,其价值高于燃料所带入每一单位的化学热。预热空气(煤气)可以改善气体、液体和粉状燃料的燃烧过程、提高理论燃烧温度,节约燃料,实现无氧化加热,也可使高温炉采用低热值燃料。在确定热回收程度时,需综合考虑热工和经济因素,优化求出最佳方案。

火焰炉烟气预热煤气时,为了避免炭黑的产生,煤气预热不宜超过 300 。低热值煤气预热时,应装

CO 浓度检测报警仪、排烟机或直通烟道以及烟道上设防爆孔等可靠的安全措施。从投资的经济效益来看,宜将空气预热温度限制在 450 以内。对于有特殊要求的空气(煤气)预热温度(如用低热值燃料时)除外。从经济观点出发,节能即降低企业生产成本,一般以优化设计换热器为宜。

从火焰炉用换热器的发展来看,较有前途的换热主要有以下几种。

(1) 适应高温烟气($900 \sim 1200$)的换热器,陶质的有:①蓄热式耐火球、短圆柱或蜂窝体填充的蓄热室;②碳化硅管换热器;③自身蓄热式烧嘴。金属的有:①强化烟气侧传热的辐射或辐射与对流组合换热器;②铸铁片状管式换热器。鉴于能源紧张和要求尽量提高热回收率,低热值燃料的使用、耐热钢稀缺而昂贵等情况,对陶质换热器的选用将会逐渐增多。

(2) 适合中温烟气($400 \sim 900$)的换热器有喷流换热器、插件换热器和旋流换热器。从连续加热炉延长预热段以降低炉尾温度,和设单独烟囱高空排烟的环保条件看,今后的对流换热器将多于辐射换热器。

(3) 适于低温烟气($100 \sim 400$)的换热器是低温防腐设计、缓蚀(钝化)制造的热管换热器。

(4) 适用含尘较大烟气的金属换热器有辐射式、卧装的片状管式、套管式、U形管式、带清灰装置的插件管式以及烟气走管内的管式换热器。

4 后语

汇集资料,编写成文。旨在提供火焰炉用换热器发展概貌和总体趋势,期望对热工同行有所裨益。

火焰炉用换热器的发展不断、前景可观,相信还将有新的换热器出现。换热器将为发掘火焰炉的节能潜力,确保“九五”期间实现5%以上的节能目标做出贡献。

纪念《中华人民共和国广告法》实施5周年