

空气-煤粉之间通过热管进行热量的间接交换,以此实现煤粉的连续流动性加热。

图2是整体热管式固相粉末换热系统示意图,其热端串联多段煤粉换热器(法兰连接),冷端设置同样数目的烟气换热器。

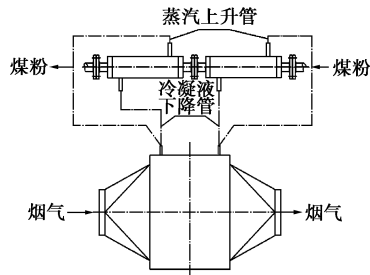


图2 整体热管式固相粉末换热系统

2 传热分析

图3为常规分离式热管的结构示意图。

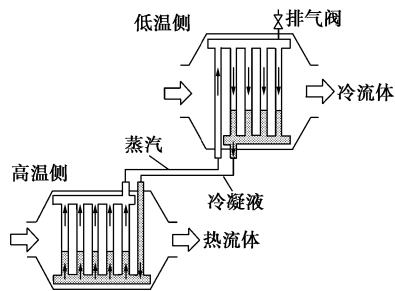


图3 常规气-气换热的分离式热管结构示意图

在常规分离式热管的蒸发段内部,从冷凝段来的工作液体在蒸发段管内壁上吸热蒸发变成蒸汽,然后流入冷凝段;而在常规分离式热管的冷凝段

内部,从蒸发段来的蒸汽在冷凝段管内壁上放热冷凝变成液体。常规分离式热管内部的传热热阻为:

$$R = R_w^e + R_e + R_e^f + R_c + R_w^c + R_c^f \quad (1)$$

式中, R_w^e 、 R_e 、 R_e^f 、 R_c 、 R_w^c 、 R_c^f 分别为蒸发段的管壁导热热阻、蒸发段内工质的蒸发热阻、工质蒸汽在外连上升管内从蒸发段流动至冷凝段的流动热阻、冷凝段内工质的冷凝热阻、冷凝段的管壁导热热阻和工质液体在外连下降管内从冷凝段流动至蒸发段的流动热阻。

常规分离式热管换热器中工质的回流依靠重力,故冷凝段通常为竖管或斜管结构,工质在冷凝段管的内壁面上膜状冷凝,冷凝液膜自上而下流动。而热管式固相粉末换热系统的冷凝段为水平放置,工质蒸汽在水平内管的外表面上膜状冷凝。

Nusselt 最先对冷凝液沿竖平壁层流时的凝结过程做了理论解析解,求解出平均冷凝换热系数为:

$$h = 0.943 \times \left[\frac{g\gamma\rho_l^2\lambda^3}{\mu_l L(T_s - T_w)} \right]^{1/4} \quad (2)$$

水平管管外膜状凝结换热系数为:

$$h' = 0.725 \times \left[\frac{g\gamma\rho_l^2\lambda^3}{\mu_l d(T_s - T_w)} \right]^{1/4} \quad (3)$$

比较式(2)、式(3),2式表述形式相同,只是括号里的特征长度和前面的系数不同,前式的特征长度为管长 L ,后式的为管外径 d 。如当长径比为50时,横管放置冷凝换热系数是竖管放置的2倍,即在相同条件下,热管式固相粉末换热系统的冷凝传热热阻只有常规分离式热管换热器的一半^[9]。同时,由于冷凝表面是内管的外表面,可有效地进行表面强化传热处理,因此冷凝传热热阻可进一步下降。

(上接第65页)

比为0.2:1、萃取级数为2时,萃取后水中有机物质质量分数低于0.01%,水循环至蒸煮装置。该生产过程中,能耗与传统方法相比减低了37.5%,用水量减少了60%左右,脱有机物效果明显提高,显著减低了甲壳素系列产品的生产成本,为大规模开发提供了有效方法。

参考文献

- [1] 郎亚军,张琴花,王远吉.甲壳素的研究与应用[J].中国食品添加剂,2004(1):83-86.
- [2] 李冬.甲壳素及其衍生物的开发应用现状[J].自然杂志,2003(2):34-39.
- [3] 徐良峰,杨建平,陈开勋.甲壳素的应用与研究进展[J].北京:化学工业出版社,2003:28-31.
- [4] 王香爱,陈养民,王淑荣,等.甲壳素的研究进展及应用[J].应用化工,2007,36(11):1134-1137.
- [5] 张雪,王雪涛.虾壳制备甲壳素工业研究[J].粮油食品科技,2007,15(4):35-48.
- [6] 扬州日兴生物科技股份有限公司.甲壳素生产中蒸煮和水洗过程热量的循环利用方法及其设备:中国,200810023935.6[P].2008-04-23.
- [7] 扬州日兴生物科技股份有限公司.甲壳素生产过程中的加碱蒸煮保温盘管式装置:中国,200820034293.5[P].2008-04-23.
- [8] 顾正桂.甲壳素生产过程中水洗和真空吸滤结合装置:中国,200820034532.7[P].2008-01-29.
- [9] 项东升,李红梅.地产龙虾壳提取甲壳素及其废水的综合利用[J].食品与生物技术学报,2008,27(2):52-54. ■

3 运行分析

整体热管式固相粉末换热系统运行时热端串联 4 段煤粉换热器,冷端也设置 4 排烟气换热器。整个系统为逆流排列,即第 1 组热管系统由第 1 排烟气换热器(烟气流向)和第 4 段煤粉换热器(煤粉流向)组成。每一组热管系统的上升管路顶端均有排放不凝性气体的单向阀以保持热管内真空度;上升管和下降管都设置测温热电阻。在烟气和空气-煤粉的进、出口也设置了测温热电阻。为简化问题,笔者认为煤粉换热器的换热管壁为定壁温加热条件,并取 4 段换热管壁温的平均值。换热系统运行数据见表 1 和表 2。

表 1 正常运行 1 h 内数据统计

时间/min	管壁温度/℃	烟气进出口温度/℃	煤粉进出口温度/℃
5	231	393 ~ 385	43 ~ 120
10	221	365 ~ 348	43 ~ 117
15	218	366 ~ 356	44 ~ 114
20	217	369 ~ 360	44 ~ 112
25	225	389 ~ 380	44 ~ 112
30	233	395 ~ 387	44 ~ 112
35	227	384 ~ 372	44 ~ 113
40	220	372 ~ 360	43 ~ 113
45	217	366 ~ 349	43 ~ 112
50	217	365 ~ 350	43 ~ 109
55	221	377 ~ 367	43 ~ 109
60	222	375 ~ 364	44 ~ 120

表 2 运行参数

项目	数值
烟气进口温度/℃	376
烟气出口温度/℃	364
煤粉进口温度/℃	44
煤粉出口温度/℃	114
管壁温度/℃	222
烟气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	83000
煤粉流量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	6300
输送空气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	230
输送空气压力/MPa	0.6

烟气比热 $1.14 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 密度 $0.55 \text{ kg}/\text{m}^3$; 煤粉比热 $1.30 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 空气比热 $1.00 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 空气导热系数 $\lambda = 3.05 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 混合物输

送速度为 $5.4 \text{ m}/\text{s}$, 换热管内径 50 mm , 每段长 10 m 。

烟气放热量

$$Q_{\text{放}} = M \times c_p \Delta T =$$

$$\frac{83000 \times 0.55}{3600} \times 1.14 \times (376 - 364) = 173.5 \text{ kW} \quad (4)$$

煤粉吸热量

$$Q_{\text{吸1}} = M \times c_p \Delta T =$$

$$\frac{6300}{3600} \times 1.30 \times (114 - 44) = 159.2 \text{ kW} \quad (5)$$

空气吸热量

$$Q_{\text{吸2}} = M \times c_p \Delta T =$$

$$\frac{230 \times 1.1}{3600} \times 1.00 \times (144 - 44) = 4.9 \text{ kW} \quad (6)$$

忽略固体颗粒和管壁间的碰撞传热,两相混合物在管内流动时,热量首先是通过管壁传给空气,之后由于空气和颗粒间的温差,再由空气传给固体颗粒(煤粉)。

比较空气和煤粉的吸热量,可忽略空气的吸热量,即相当于管壁直接传热给煤粉。

系统换热效率

$$\eta = \frac{Q_{\text{吸1}}}{Q_{\text{放}}} = \frac{159.2}{173.5} = 91.7\% \quad (7)$$

换热系数

$$h = \frac{Q}{A \Delta T} =$$

$$\frac{1000 \times 159.2}{3.14 \times 0.05 \times 40 \times (222 - \frac{44 + 114}{2})} = 177 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (8)$$

努塞尔数

$$\text{Nu} = \frac{hd}{\lambda} = \frac{177 \times 0.05}{3.05 \times 10^{-2}} = 290 \quad (9)$$

4 运行效果

该换热系统首先在河南舞钢中加钢铁公司 3 号

表 3 2007 年 5—12 月高炉主要经济技术指标

时间/年-月	煤粉温度/ $\text{t} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{℃}$	系数/ d^{-1}	焦炭比/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	煤比/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	燃料比/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	风温/℃	Si 质量分数/%
2007-05	3.22	404	148	552	1170	0.55	
2007-06	3.13	394	150	544	1149	0.72	
2007-07	3.01	433	138	593	1163	0.80	
2007-08	3.17	407	144	551	1188	0.61	
2007-09	95	3.20	390	150	540	1195	0.62
2007-10	103	3.29	365	160	525	1215	0.61
2007-11	104	3.36	358	154	512	1191	0.69
2007-12	101	3.25	366	153	519	1149	0.69

高炉应用,2007年8月15日开始实施高顶压、高风温,大胆采用煤粉预热新技术,高炉技术经济指标逐步提高,特别是煤比指标,在鼓风无富氧的条件下,通过实施煤粉预热新技术,工艺运行至2007年10月达到了煤比160 kg/t(喷煤量,下同)的历史最好水平,实施煤粉预热后燃料比大幅度降低。

对应用该换热系统前后进行了对比总结如下:河南舞钢中加钢铁公司3号高炉产生铁40万t/a,目前,通过实施煤粉预热技术,焦炭比同等条件下降低约35 kg/t,煤比提高约10 kg/t,煤粉预热可使喷入高炉的煤粉在不富氧的前提下,吨铁降低燃料比约30 kg。吨铁成本可降低约25元,增加效益约1000万元/a。

5 结语

热管式固相粉末换热系统可实现气、固两相混合物与其他介质之间的连续流动性热量交换,利用高炉排放的低热值的烟气对喷煤工艺中煤粉的加热,使得进入高炉的煤粉温度提高约70℃,增加高炉的喷煤量,减少焦炭用量,真正实现了节能降耗和降低成本的目的。这种新型的套管结构的分离式热管比常规的分立式热管更容易有效地进行各种各样

的表面强化传热处理。热管式固相粉末换热系统的研制成功,可望推动传热领域中对气、固两相流动及传热的进一步研究及相关技术的进步。

参考文献

- [1] 赵军,胡寿根,刘宗明,等.密相气固两相流管道气力输送的阻力特性[J].发电设备,2005(1):1-6.
- [2] 赵军,胡寿根,王晓宁,等.气力输送管路系统的流动特性与节能研究[J].流体机械,2005,33(12):1-4.
- [3] Kim Seyun, Lee Kye Bock, Lee Chung Gu, et al. Theoretical approach for a pressure drop in two-phase particulate-laden flows[J]. Heat and Mass Transfer, 2007, 34: 153-161.
- [4] 范卫东,章明川,何磊,等.管道内气固两相流颗粒浓度和风速测量方法的试验研究[J].仪器仪表学报,2003,24(1):13-18.
- [5] 邱朋华,陈力哲,王宏,等.水平管道细粉高浓度分层流动阻力特性的试验研究[J].热能与动力工程,2001,16(1):23-25.
- [6] 高金森,徐春明,林世雄,等.湍流气固两相流动状况的数值模拟[J].高校化学工程学报,1999,13(3):199-204.
- [7] 潘卫国,林玮,曹锋敏,等.管内空气-煤粉混合气流在水平加热段中传热特性的研究[J].中国电机工程学报,2000,20(2):42-46,50.
- [8] 南京工业大学.热管式固相粉末换热系统:中国,200710020359.5[P].2007-02-15.
- [9] 林宗虎,汪军,李瑞阳,等.强化传热技术[M].北京:化学工业出版社,2006:213-214. ■

第十届全国化学工艺学术年会征文通知

由太原理工大学和《现代化工》共同主办,太原理工大学化学化工学院和煤科学与技术教育部重点实验室承办第十届全国化学工艺学术年会将于2009年9月下旬在太原召开。本次学术年会的主题是“能源、资源可持续发展中的化学工艺”,现征集与会议主题相关的学术论文。应征论文需是尚未正式发表的煤化工、石油化工、生物化工、碳一化工、环境化工以及新能源化工领域的详细的扩展论文摘要(篇幅不超过2页A4),中英文均可。请网上投稿(<http://cnct2009.tyut.edu.cn>)。录用摘要要求提供论文全文,经同行专家评审后,在《现代化工》增刊上正式发表。论文摘要截止日期为2009年2月15日。

征文内容范围包括:

1. 资源、能源高效利用技术;
2. “原子经济性”合成技术;
3. 不使用和不产生对人类健康和环境有毒有害物质的化工过程;
4. 在温和条件下,低能耗生产过程;
5. 可再生原料的利用,特别是用生物质代替一次性矿物原料;
6. 高效催化材料和高效催化过程。

联系地址:太原市迎泽西大街79号 太原理工大学化学化工学院(邮编:030024)

联系人:于峰,刘世斌,李瑞丰

电话/传真:0351-6010121

e-mail:cnct2009@tyut.edu.cn