

一种高效壳程强化传热换热器及其工程应用

蔡业彬^{1, 2}, 胡智华¹

(1. 茂名学院, 广东 茂名 525000; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要:介绍了换热器壳程强化传热的研究现状;分析了弓形折流板换热器传热效率差的原因;阐述了螺旋折流板换热器壳程强化传热的原理;对螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器的技术性能进行了对比和经济效益分析;列举了螺旋折流板换热器的工程应用实例,并指出,螺旋折流板换热器的出现使换热设备大型化成为可能。

关键词:管壳式换热器;壳程强化传热;螺旋折流板;弓形折流板;工程应用

中图分类号:T E965 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-8805(2006) 01-0018-05

在动力、化工、炼油、制冷等工业中,换热器不仅是不可缺少的工艺设备,而且在金属消耗和投资方面也占有较大的比重。

在换热设备中,管壳式换热器占 50% ~ 70%。我国现行服役的换热设备大多采用 20 世纪 50 年代国外早期的设计结构,换热效率较低、阻力降大、易结垢,停工检修频繁。几十年来,虽做了不少的改进,但基本上保持原设计思想,尤其是壳程流动方式几乎没有太大的进展,仍沿袭传统的垂直弓形板横向流,使得换热设备的传热系数 K 值一直停滞在较低的状态。

管壳式换热器强化传热方式主要有二种:一是主动式强化传热,这是以消耗外部能量为代价的,如采用电场、磁场、光照射、搅拌、喷射冲击、流体振动、机械表面振动等手段,目前国外已将主动式强化传热的研究工作列为重点;二是被动式强化传热。由传热速率方程 $Q=KA\Delta t_m$ 可知,强化传热可以从提高传热系数 K 、扩大传热面积 A 和增大传热温差 Δt_m 三种途径来实现。但是增大传热面积 A 与提高平均温差 Δt_m 明显地受到生产工艺、设备条件、环境条件以及经济性等方面的限制。因此,提高传热系数 K (主要提高较小的对流传热系数 α_i) 及提高传热速率 Q (减少污垢热阻),是研究强化传热的重点,以改善管程、壳程流体自身流动状态来实现强化传热居多。

首先在换热设备两个传热界面之一的管程,其强化传热实验比较容易实现,因而,对其理论研究和应用研究也进行得较为彻底和完善,采用了

螺纹管、异形管、内插物等强化传热新技术,使管程传热有了较大的突破。但从间壁传热原理上讲,控制一台换热设备热效率的是传热能力相对较差一侧的传热能力,而这一侧往往是壳程。对于强化壳程传热的研究较管程进展缓慢得多,主要是研究费用较大,且难于实现所致,但也做了大量的工作。

1 壳程强化传热研究发展状况

对于壳程的强化传热来说,由于其影响因素比较多,所以有关的研究开展还不是很多。目前主要在管型和支撑结构上有一些进展。

对管型的研究与强化管程传热比较类似,是以改变管子的形状结构,使管外的传热得到强化;但是这类管同时还要考虑支撑的影响,所以这种管子和强化管内传热的管既有联系又有区别。

低肋管^[1, 2] (又称螺纹管)主要是靠管外肋化来扩大传热面积,一般适用于强化管外的传热;在管外有相变的情况下,也有较好的强化传热效果。

螺旋扁管^[3, 4]是由圆管轧制的具有一定导程的强化传热管,管子在壳体内紧密排列,壳程流体受离心力的作用周期性改变流速和流动方向,从而强化了传热。

传统管壳式换热器管束的支撑结构一般都是

收稿日期: 2005-08-01。

作者简介: 蔡业彬 (1968-), 男, 1993 年 7 月毕业于湘潭大学流变学专业,工学硕士。任茂名学院机电工程学院副教授,现在华南理工大学攻读博士学位。

单弓形(或多弓形)折流板和支持板,这样就会导致壳程的压力降大,出现死区,还有可能使管子产生流体诱导振动。针对这些问题,一些新型的折流板就出现了。

整圆形折流板^[4,5]就是其中的一种。这种折流板不是开弓形缺口,而是在板上钻大圆孔,既让管子能够穿过,又留出空隙使壳程流体通过。这种结构死区少,压降低,且在圆环形的间隙中会出现射流,提高湍流度。但这种结构必须增大管间距或留下一些不布管区,于是就增加了壳体直径。有的整圆形折流板还在大孔中间加一些小孔,这样有效地改进整圆形折流板,但这种结构的折流板在管孔与管子之间容易结垢,并导致腐蚀。

异形孔整圆形折流板^[5]是在整圆形折流板上开出矩形、梅花形等各种形状的开口。这两种结构既能支撑管子,又能使介质顺利流过折流板。它们均具有压力降小、传热性能好、防止管束振动等优点,但加工制造比较困难。

针对异形孔折流板的缺点,工业中又出现了网状整圆形折流板^[5~7]。其制造方法是先按普通折流板制造,然后将折流板上的横排圆孔以 4 个圆孔为一组,将管桥铣通。这样就不需要专用的冲压模具,又具有压力降小、传热性能好等优点。这种新型折流板是由德国的 GRIMMA 公司在 1991 年推出的,其传热性能在中、低粘度范围内效果明显优于传统的单弓形折流板换热器。

但是板式支承结构固有的缺陷仍然没有得到根本的改变,于是出现了一种新型支承结构——折流杆式支承结构^[8~11]。由于它的轴向流动方式,减少了壳程流体的滞流、回流和死区,提高了 Pe 值(佩克莱常数)、减少了压降和污垢沉积,由于杆后的卡门涡街脱落效应在传热管子表面产生紊流,提高了壳程侧膜的传热系数。折流杆的夹持作用又抑制了破坏性振动,使换热设备大型化成为可能。所以这种新型换热器引起了国内外学者的广泛注意。但是这种结构壳程流体为纵向流动,必须在高速流动状态下才能显示其良好的性能,而且折流圈的数量比较大,安装和检修都不方便,且由于折流圈的存在,不布管区也比较大。可见,折流杆换热器还有其局限性,特别是在低 Re 数时,高粘度介质中很难形成有效的卡门涡街,达不到高传热效率的要求。为了进一步提高壳程的传热能力,就产生了一种新型壳程强化传热换

器——螺旋折流板式列管换热器^[11~19]。

螺旋折流板换热器是一种高效管壳式换热器,介质在其壳程中的流动既不是横向流,也不是纵向流,而是一种螺旋状斜向流。这种流动方式能适用于包括高粘度原油、渣油在内的所有介质,这种结构显著地提高了传热效率,大幅度降低了压力降,控制了振动造成的破坏,减少了污垢沉积的可能性,为换热设备大型化提供了广阔的前景。

2 螺旋折流板换热器强化传热的原理

2.1 弓形折流板换热器传热效率差的原因分析

传统的管壳式换热器强化传热的原因在于折流板的存在,折流板促使流体流动方向剧烈地改变,使流体更易产生湍流。然而,这种结构的换热器有其自身不可克服的缺点。

- (1) 流体流向的剧烈改变,造成对换热器的冲击,易使换热器产生振动破坏;
- (2) 流体流向的频繁改变,造成流体能量损失增加,沿程压力降大大增加;
- (3) 流体基本上沿垂直管束中心线流动,因此,在折流板与壳体的交角处有较大的流动死区,减少了有效传热面积,并在死区内形成传热垢层,降低传热效率,如图 1 所示。

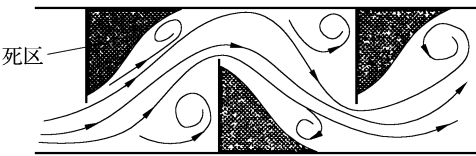


图 1 弓形折流板折流示意

2.2 螺旋折流板换热器壳程强化传热的原理

螺旋折流板换热器突破了壳程介质“Z”形折返的传统方式。它由若干块四分之一壳程横截面的扇形板组装成螺旋状折流板,介质自壳体进口向出口螺旋推进,如图 2 所示。

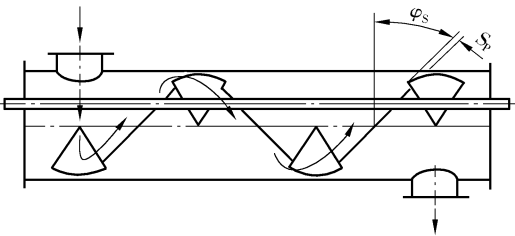


图 2 螺旋折流板折流示意

介质在壳体内连续平稳旋转流动,避免了大斜度折返带来的严重压力损失,此种结构压力降

低,故可以利用不同角度调整流通截面,使提高流速成为可能。大量的实验证明,高的膜传热系数来源于大的 Re 数,而高的流速是提高 Re 数的一个重要条件。这一条件是传统弓形折流板所不可能达到的。螺旋折流板改变了壳体结构,在保持较低压力降的情况下大幅度提高了介质流速,这样, Re 数的增加为提高膜传热系数提供了可能。同时由于折流板是螺旋状结构,使得介质形成一个旋涡,从圆心到半径方向存在较大的速度梯度,这个速度梯度场能在管子表面产生湍流,使边界层减薄,更有利于提高膜传热系数。另外由于连续的螺旋支撑,减小了管束跨距,提高了管子的固有频率,避开了流体的激振频率,从而消除了产生共振的可能性,避免了振动引起的破坏,延长设备运行寿命,降低设备维修费用。由于流体螺旋运动的有效冲刷作用,可减少污垢沉积,热阻稳定,使换热器一直处于高效运行状态,达到节能的目的。

采用螺旋折流板形式的冷凝器也具有明显的优势。由于传统的列管式冷凝器采用垂直于管束的折流结构,大部分管子长度在垂直方向没有任何连接或引流条件,在上一排管子表面凝结的液体自然下落到下一排管子表面,形成一个不利于热量传导的液膜。随着管束排数的增多,液膜逐渐加厚,就更明显削弱了传热效果,这一点可以从努塞尔特经典的冷凝关联式看到:

$$\alpha = 0.725[r\varrho^2 g\lambda^3 / \mu d_0 \Delta t]^{0.25} \quad (1)$$

$$\alpha_n = 0.725[r\varrho^2 g\lambda^3 / \mu d_{0n} \Delta t]^{0.25} \quad (2)$$

式中: α ——单排管冷凝膜传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

α_n —— n 排管冷凝膜传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

n ——冷凝管排数;

r ——蒸发潜热;

μ ——粘度, $Pa \cdot s$;

d_0 ——管子直径(外径), mm ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

ϱ ——密度, t/m^3 ;

λ ——导热系数, $W/(m \cdot K)$;

Δt ——温度差, $^{\circ}C$ 。

两者的差别为 $[1/n]^{0.25}$ 倍,这在大型管束上是一个不容忽视的热效率损失。螺旋折流板结构

可以从根本上改善这一状态。倾斜的折流板把各排管子连接起来,每根管子表面的冷凝液可以由斜板引到壳体底部去,避免了各排管子由上方流下来的冷凝液的覆盖而降低换热效果。这也是螺旋折流板冷凝器能提高换热效率的基本原理之一。

螺旋折流板换热器的综合性能(单位压降下的膜传热系数)比垂直弓形折流板换热器高 2 倍左右;许多工况下的 K 值可提高 0.3~0.5 倍。螺旋折流板换热器以平稳的介质流态代替了传统的弓形垂直折流板“Z”形折返流态,压力损失可大幅度减少,最高达 70%。

3 螺旋折流板换热器的优点与经济效益分析

3.1 螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器技术性能对比

螺旋折流板换热器与垂直弓形折流板换热器相比,其壳程单位压降下的传热系数($\alpha_0/\Delta p$)可提高 0.6~2 倍;压降损失减少 30%~70%;可以减缓污垢沉积,保持 K 值稳定,延长清洗周期 3~5 倍;可以防止振动损坏,利于大型化;可以适用于各种介质,特别是高粘度介质;螺旋折流板对冷凝器管束液膜有引流功能,可有效减薄液膜厚度,提高冷凝效果;减少新装置投资和维护费用。

3.2 经济效益分析

图 3 是同等换热能力的螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器回收热能的对比,其中斜线面积为用户多回收的热量。相同换热能力的螺旋折流板换热器设计面积平均比弓形折流板换热器减少 30%。

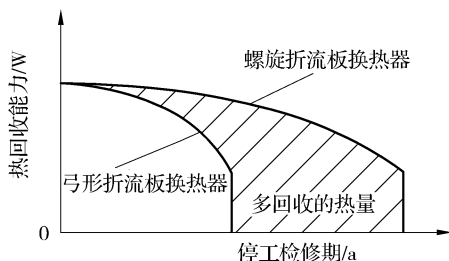


图 3 相同换热能力热回收对比

图 4 是换热面积相同的螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器热回收能力的对比。此种情况多出现在扩能改造中,壳体和换热器区配管不动,只改动芯子(管束),一般可以提高换热能力 1.3 倍。

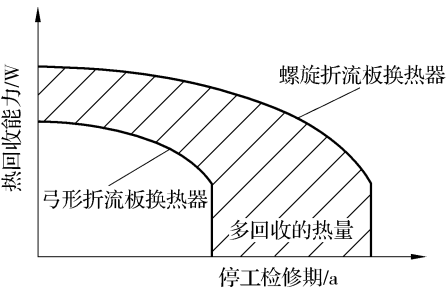


图 4 相同换热面积热回收对比

图 5 是螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器壳程压力损失的对比。其中斜线部分为机泵节约的电能,由于系统压力整体下降有利于改善静密封的泄漏问题。

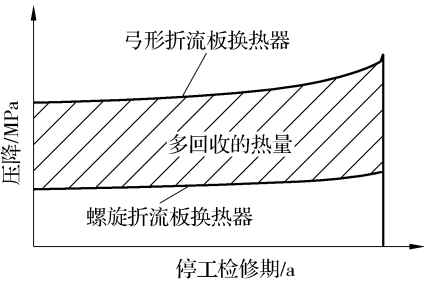


图 5 相同介质流量压降对比

4 螺旋折流板换热器的工程应用

在我国这种新型换热器日益受到关注和认可。由大连海特传热技术有限公司设计制造的最大螺旋折流板换热器直径为 4m、管长为 8m(蒸汽稀释发生器),用在抚顺乙烯装置;另外十余台分别用于抚顺石油一厂、二厂、三厂和盘锦炼油厂的催化、常减压及焦化装置上。使用结果表明,各种性能指标均优于原弓形折流板换热器。据统计,采用螺旋折流板换热器热效率都有大幅度提高。同时由于提高了 K 值,减少了换热面积,大大减少了金属消耗,从而降低了装置的设备投资。

某炼油厂常减压蒸馏装置试运一台新型螺旋折流板换热器(改造前是垂直弓形折流板换热器),其管程介质为水,壳程介质为渣油。设备投入使用后,运行稳定。改造前后标定数据和计算结果如表 1 所示。

技术经济分析如下:

(1) 改造前垂直弓形折流板换热器的年换热量为 $294.59\text{kW} \times 24 \times 365 = 2580.63\text{MW}$;改造后试用的螺旋折流板换热器的年换热量为: $589.14\text{kW} \times 24 \times 365 = 5160.87\text{MW}$ 。因此改造

后的螺旋折流板换热器比改造前的弓形垂直折流板换热器一年可多换热: $5160.87 - 2580.63 = 2580.24\text{MW}$ 。

表 1 改造前后标定数据与计算结果

比较参数	螺旋折流板 换热器	弓形折流板 换热器
渣油流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	63	63
入口油温/ $^{\circ}\text{C}$	116	116
出口油温/ $^{\circ}\text{C}$	102	109
入口水温/ $^{\circ}\text{C}$	22	22
出口水温/ $^{\circ}\text{C}$	32	25.5
换热器热负荷/ kW	589.14	294.59
加权温差/ $^{\circ}\text{C}$	83.27	74.69
换热面积/ m^2	244	244
传热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	29.0	16.2
两种结构传热系数的比值	$29.0/16.2 = 1.79$	

增加的换热能力如果折合成重油为 222t,现市场重油销售价在 0.10~ 0.15 万元/t 浮动,如果按平均市场价 0.125 万元/t 计算,折合人民币 27.75 万元/a。本次试用的螺旋折流板换热器比弓形折流板换热器芯子多付出 3.2 万元,用 0.12 年即可回收多付出的投资。

(2) 由于螺旋流动状态,螺旋折流板换热器壳程介质不易沉积,不易结垢,一般可延长 50% 的使用周期,减少相应的检修、清洗费用,同时可以按照停产检修时间差别,计算相应减少的停产损失费用。

(3) 该设备因螺旋流动方式,阻力降小,可以有效地降低压力损失,减少电耗。

5 结束语

炼油厂设备大型化是提高炼油厂效益的主要途径,但弓形折流板换热器大型化面临着很难逾越的障碍(振动失效和压降大两个致命弱点),且板式换热器防污垢沉积问题也降低了其在炼油厂的应用效果。目前国内最大的换热设备换热面积只有 $1000 \sim 2000\text{m}^2$,而国外可达 $5000 \sim 6000\text{m}^2$,甚至更多。它们的诀窍就是采用了螺旋折流板新型结构。螺旋折流板换热器的壳程既不是横向流,也不是纵向流,而是一种螺旋状斜向流,该种

流动方式能适用于包括高粘度原油、渣油在内的所有介质,这种结构显著地提高了传热效率,大幅度降低了压力降,控制了振动造成的破坏,减少了污垢沉积的可能性,为换热设备大型化提供了极大的可能。

由于螺旋折流板换热器和传统换热器的区别仅限于壳程折流板的结构,管束和壳体配合尺寸都不变,可以自由地插入到原换热器壳体中,不需要更换壳体,更不需要改变配管和安装位置。这一特点非常适用于正常检修期间更换管束,减少了更新改造的复杂程度并降低检修费用。因此,螺旋折流板换热器在我国化工、石油化工等行业中将有着广阔的应用前景。

参考文献:

- 1 黄渭堂,刘天才,孙中宁等. 螺纹槽管传热与阻力特性的实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,1998,19(1):29~34
- 2 张平亮. 新型高效换热器的技术进展及其应用[J]. 压力容器,1997,14(2):56~62
- 3 李尔国,俞树荣,何世权. 管壳式换热器新型强化传热技术[J]. 石油化工设备,1999,28(6):42~45
- 4 江楠,易宏,甄亮等. 管壳式换热器壳程强化传热研究进展[J]. 化肥工业,1998,25(6):27~32
- 5 莫莉萍. 全纵向流异形孔板管壳式换热器壳程传热与流阻研究[D]. 广州:华南理工大学,1994
- 6 崔海亭,汪云. 强化型管壳式热交换器研究进展[J]. 化工装备技术,1999,20(4):25~28
- 7 曹纬. 国外换热器新进展[J]. 石油化工设备,1999,28(2):6~9
- 8 邓先和,邓颂九. 管间支承物的结构对横纹槽管管束

强化传热性能的影响[J]. 化工学报,1992,(1):62~68

- 9 陆应生,陈慕玲,潘宁中等. 强化传热元件与高效换热器技术进展[J]. 化工进展,1998,(1):46~48
- 10 Deng Xianhe, Deng Songjiu. Investigation of heat transfer enhancement of roughened tube bundles supported by ring or rod supports[J]. Heat Transfer Engineering,1998,(2):21~27
- 11 Rajiv Mukherjee. Effectively design shell-and-tube option for refineries. CEP.94(2):21~37
- 12 ABB Lummus Heat Transfer Ltd.: A new shell-and-tube option for refineries. PT O. AUTUMN,1997,91~95
- 13 ABB Lummus Heat Transfer Ltd.: Helixchanger™, HP.1997,(6):10
- 14 南京炼油厂换热器试制组. 螺旋形折流板管壳式换热器的研究[J]. 化工炼油机械,1983,12(1):32~35
- 15 Lutchaj, Nemcansky J. Performance improvement of tubular heat exchangers by helical baffles[J]. Trans. IchemE. Part A,1990,68(5):263~270
- 16 Karal D, Stehlik P, Van Derploeg H T, et al. Helical baffles shell-and-tube heat exchangers, Part I: experimental verification[J]. Heat Transfer Engineering,1996,17(1):93~100
- 17 Stehlik P, Nemcansky, Kral D, et al. Comparison of correction factors for shell-and-tube heat exchangers with segmental or helical baffles[J]. Heat Transfer Engineering,1994,15(1):55~64
- 18 陈世醒. 螺旋折流板换热器的开发和研究[J]. 抚顺石油学院学报,1998,18(3):31~38
- 19 曾文良,张正国,林培森,王世平. 螺旋隔板换热器壳侧传热与流阻性能研究[J]. 石油化工设备,2000,29(5):15~18

• 技术信息 •

“冰轮”新型高效螺杆制冷压缩机 再获山东省科技进步一等奖

“冰轮”新型高效螺杆制冷压缩机自推出以来,由于其在技术上的重大突破,技术经济指标达到国际先进水平,于2004年荣获中国制冷学会颁发的科技进步一等奖,并于2005年再次荣获山东省科技进步一等奖。

螺杆压缩机的关键技术是转子型线的设计,这一技术一直被瑞典SRM公司所垄断。冰轮公司与西安交大联合开发的转子型线(冰轮1号、2号)获得了两项国家专利,并于2001年被国家科技部列为“十五”期间国家科技

成果重点推广计划项目。在此基础上,冰轮公司成功开发出新型高效螺杆制冷压缩机,该产品在国际上率先实现了采用传感器实录压缩机转子工作过程的P-V图。已获得8项实用新型专利,高效油分结构、排气端结构两项发明专利申请已被国家专利机构受理。

“冰轮”新型高效螺杆压缩机是拥有自主知识产权、全新设计开发的螺杆压缩机,经国家权威检测机构检测,制冷效率比国际高端产品高6.7%,噪音下降5~10dB(A)。冰轮公司已成为世界上能够生产全封闭、半封闭、开启式全系列螺杆压缩机的基地,标志着中国已成为世界上第六个具有自主开发螺杆压缩机能力的国家。

(《中国石油化工》编辑部 刘燕供稿)

ter seal tank For sulfur – bearing waste water from its structure and working principle finds out that misuse of operating medium is the main reason of failure of water – sealed tank, and man – made and environmental factors are secondary reason. Based on these, protective measures and proposals of revamp for water – sealed tank are put forwards.

Keywords Water – sealed tank, Failure, Cause and effect analysis, Protective measure

A TYPE OF HIGH EFFICIENCY HEAT EXCHANGER WITH FORCED HEAT TRANSFER ON ITS SHELL SIDE AND APPLICATION IN INDUSTRY

Chai Yebing, et al. Maoming College, P. C. 525000

Abstract This article introduces the research result of heat exchanger with heat transfer forced on its shell side; analyzes the cause of poor heat transfer efficiency of segmental baffle – heat exchanger; sets forth the principle of forced heat transfer on shell side of helical baffle – heat exchanger; makes comparison to technological performance between helical baffle – heat exchanger and segmental baffle – heat exchanger and analyzes the economy benefit. Helical baffle – heat exchanger of engineering examples are made and point out that appearance of helical baffle – heat exchanger makes large – sized heat exchanger become possible.

Keywords Shell – tube heat exchanger, Heat transfer forced on shell side, Helical baffle, Segmental baffle, Engineering application

CORROSION ON ATMOSPHERIC FURNACE TUBE AND TRANSFER LINE

Yu Xiaopeng. SINOPEC Luoyang Petrochemical Company Branch, P. C. 471012

Abstract By analyzing corrosion on the tube of atmospheric furnace and transfer line, leakage from transfer line of the furnace is mainly caused by highly sulfur contained in crude oil, serious erosion, inapposite material and equipment ageing. According to the reason of corrosion, some measures are taken, such as the transfer line is

wholly packed, material is upgraded, the distribution and corrosion regulation of active sulfur in the unit is understood, the thickness of high temperature position is measured at fixed point, all of these are for the purpose to avoid crude oil with high sulfur entering into the unit directly.

Keywords Atmospheric furnace, Transfer line, Corrosion

BAKEOUT OF OVEN AND ITS COUNTERMEASURE FOR 310t/h RECYCLE FLUIDIZED BED BOILER

Xu Hui. Power Plant of SINOPEC Shanghai Petrochemical Co. Ltd., P. C. 200540

Abstract This article introduces the requirements for bakeout of oven and main ways and steps for the first set of 310 t/h recycle fluidized bed boiler, and the relative modified measures for bakeout of oven are implemented on the second set of recycle fluidized bed boiler based on the situation of rapidly temperature rising and abnormal start of fire gone out protection in the hearth, so that the bakeout of oven is satisfactorily successful.

Keywords Recycle fluidized bed, Boiler, Bakeout of oven

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON CONTACT MODEL OF STUD AND FLANGE CONNECTION IN VIBRATION – BEAT FACILITY

Xue Jianmin, et al.. Mechanical Engineering College of Wuhan Chemical Institute, P. C. 430073

Abstract By means of establishing an entity contact model of stud and nuts and by the use of three – dimension contact element and pre – stress element to make finite element analysis on connection structure of stud and flanges in vibration – beat facility so that a conclusion of strength and seal property of this structure can be obtained. The manner of model establishment and analysis method involved in this article has a definite use for reference for analyzing the similar structure.

Keywords Contact model, Finite element analy-