

文章编号:1673-5005(2007)04-0106-06

## 螺旋折流板换热器折流板的数控加工

王正方<sup>1,2</sup>, 王 勇<sup>1</sup>, 曲大伟<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061; 2. 齐鲁石化公司 机械厂, 山东 淄博 255400)

**摘要:**螺旋折流板管壳式换热器比传统的弓形折流板换热器具有更高的换热效率,但是螺旋折流板结构实现起来十分困难,阻碍了其在工程上的应用。螺旋折流板在壳程内倾斜布置,与换热管交叉成一定角度,上面的孔为斜孔,采用传统的机械加工方法难以实现。针对2管程换热器,将一个周期的折流板分为4块,对折流板上管孔的排布方式进行研究分析,找出规律,建立了数学模型,用EIA代码编制了数控加工程序。在MITSUBISHI操作系统的数控钻铣床上,采用特殊的刀具,将折流板点焊为一摞,装夹在旋转工作台上,使之与刀具成一个固定角度,实现了阶梯式螺旋折流板上孔的加工,解决了制造的难题,提高了生产效率和钻孔精度,为螺旋折流板管壳式换热器的推广应用提供了可能。

**关键词:**折流板;螺旋折流板换热器;数控加工

**中图分类号:**TG 659; TH 065 **文献标识码:**A

## Numerical controlled process of baffles on helix-baffled tubular heat exchangers

WANG Zheng-fang<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, QU Da-wei<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Qilu Petrochemical Corporation Machinery Works, Zibo 255400, Shandong Province, China)

**Abstract:**The helix-baffled tubular exchanger is more efficiency in heat transfer than general exchangers, but the helix baffled-structure is too difficult to be fabricated, which is the main reason why it can't be used in plant. The baffles installed in the shell are not perpendicular to the tube, that is, the axis of the hole on the plate is not perpendicular to the baffle's surface, but forms into a definite angle. The baffles are very difficult to be manufactured using common machine tools. Aimed at heat exchanger with two courses in tube side, one baffle was split into four parts. The tube holes' distribution on baffles was analyzed, and the mathematical model was developed. Numerical controlled program was compiled with EIA code. The baffles were welded into a pile, then the holes were drilled using milling cutter and twist drill. The baffles were installed on Mitsubishi numerical controlled machine, and numerical controlled process was realized. This can improve production efficiency, which makes it possible that helix-baffled tubular heat exchangers can be widely applied in factory.

**Key words:**baffle-plate; helix-baffled tubular heat exchanger; numerical controlled process

螺旋折流板换热器是一种新型的管壳式换热器,比传统的弓形折流板换热器传热效率更高,管束不易振动,可以有效地降低壳程流体中的污物在换热管上的沉积,是一种节约能源的工艺设备。科学家早在20世纪60年代就提出了螺旋折流板的结构形式,但是由于制造难度较大,一直没有实现产业

化。1986年捷克共和国的科学家获得了螺旋折流板的专利,1994年由ABB LUMMUS公司实现了制造<sup>[1-2]</sup>,截至2002年全世界大约有300台这种类型的换热器在欧美等西方国家得到了应用。自20世纪90年代末我国开始对此进行研究,形成了专利并有产品在生产中应用<sup>[3-10]</sup>。管壳式换热器在石油化

收稿日期:2006-12-22

作者简介:王正方(1971-),男(汉族),山东淄博人,高级工程师,博士研究生,主要从事化工机械及制造自动化方面的工作。

工行业中广泛使用,占我国全部换热器产量的80%<sup>[11]</sup>。如果这些换热器可以改造为螺旋折流板结构,取得的经济效益将是十分可观的。螺旋折流板结构难以实现,这成为制约螺旋折流板换热器推广应用的瓶颈。传统的弓形折流板的加工方法是先由钳工划出管孔的位置线,用样冲在需要钻孔的位置打点,在摇臂钻床上用较小的钻头钻一个浅孔,检验孔距合格后再钻孔。由于螺旋折流板结构的特殊性,采用常规的机械加工方法是无法实现的。笔者采用数控加工方式对螺旋折流板换热器的折流板加工进行探索。

## 1 螺旋折流板换热器的折流板结构

螺旋折流板的结构形式来源于输送物料的搅龙,最初的折流板为连续的螺旋结构,适用于壳程流体含有固体颗粒的场合。由于流体在折流板间是螺旋形流动,因此固体颗粒不易沉积。由于此种连续的螺旋结构难以实现折流板的制造,后来陆续出现的都是断续的拟螺旋结构,或者称为阶梯折流板结构,见图1。

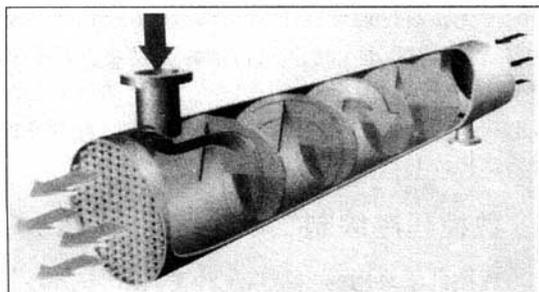


图1 螺旋折流板换热器中折流板的排布

最初的螺旋折流板是真正的螺旋形的,折流板在壳体内成一个连续的螺旋曲面,流体在壳程内呈螺旋形流动。有资料说可以采用减小螺旋折流板的厚度<sup>[12-13]</sup>,将管孔加工成椭圆孔,然后拉伸成螺旋状的办法来实现折流板的成型,此种方法是十分复杂和难以实现的。齐鲁石化公司机械厂使用数控机床,将折流板掉转固定角度,采用宏指令编制数控加工程序,配合特殊的刀具实现了拟螺旋折流板的制造。

大型的换热器直径可达2 m以上,有数千根换热管,管孔的加工是一项繁重的生产任务。螺旋折流板与换热管倾斜成一定的角度,上面的管孔为斜孔。斜孔的加工方法有3种:(1)采用特殊的钻头;(2)采用铣刀铣削;(3)采用钻模钻孔。取其中一个

周期的折流板为研究对象,见图2。螺旋折流板的厚度可以取得比普通的弓形折流板薄一些,在卧式数控钻铣床上加工,采用一个旋转工作台来实现折流板和机床刀具的夹角。如果采用制作斜面支撑的结构,由于螺旋角的变化势必要制作很多支撑,不够经济。

标准<sup>[14]</sup>规定了管壳式换热器管程分程和管孔的排布形式,管程数有1,2,4,6,8,10,12共7种,折流板上孔的排布与管板对应。螺旋折流板的结构形式不适用于管程分程较多的情形,可以采用1,2,4管程,本文中以2管程换热器为例说明。多家研究机构都得出了螺旋折流板适宜的螺旋角在35°左右的结论<sup>[15-20]</sup>,如果采用如此大的螺旋角,当换热器直径较大时,由于刀具在斜面上与折流板相交,势必造成用于孔加工的刀具具有很大的长度,并且加工孔的起始位置是一个斜面,每个孔开始加工的初始位置和终止位置都不相同,成为一种难度很大的深孔加工,必须用专用机床和特殊的深孔加工刀具来实现。考虑实际制造的可行性,螺旋角应控制在5°~15°为宜,并采用断续拟螺旋的折流板结构。

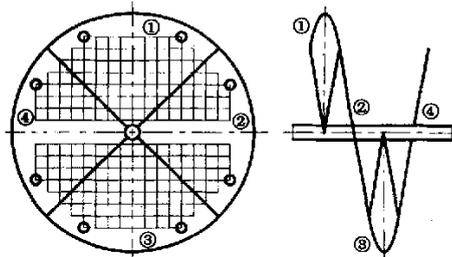


图2 2管程换热器折流板上管孔的排布

## 2 折流板上管孔的分布形式

2管程的换热器折流板的管孔排布见图2。管板上隔板槽的存在使中间一部分没有换热管,折流板和管板不平行,上面的孔为换热管的通道,折流板管孔排布的投影就是管板布孔图。折流板上孔的投影的排布分为4个区域:①,③区的孔关于x轴对称;②,④区的孔关于y轴对称。孔的排布只有①②两种基本形式,在数控机床上钻孔需要编制2个子程序。

①区的孔关于y轴对称,以左上角第一个孔为起点,奇数行沿x轴的正向依次钻孔,偶数行沿x轴的负方向依次钻孔,以减少机床空走时间。计算孔的位置坐标时,第一行的第一个孔的坐标为 $(x_{11}, y_{11})$ ,第n个孔的坐标为 $(x_{1n}, y_{1n})$ ;第二行的第一个

孔的坐标为 $(x_{21}, y_{21})$ ,第 $n$ 个孔的坐标为 $(x_{2n}, y_{2n})$ ;第 $m$ 行第 $n$ 个孔的坐标为 $(x_{mn}, y_{mn})$ 。第一行第 $n$ 个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{1n} = x_{11} + (n-1)s, \\ y_{1n} = y_{11}, \\ z_{1n} = \frac{2n - N_1 + 1}{2} s \sin \alpha; \end{cases} \quad (1)$$

第二行第1个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{21} = \frac{N_2 - 1}{2} s, \\ y_{21} = y_{11} - t, \\ z_{21} = \frac{N_2 - 1}{2} s \sin \alpha; \end{cases} \quad (2)$$

第二行第 $n$ 个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{2n} = x_{21} - (n-1)s, \\ y_{2n} = y_{21}, \\ z_{2n} = \frac{N_2 - 2n + 1}{2} s \sin \alpha; \end{cases} \quad (3)$$

第 $m$ 行第1个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{m1} = (-1)^m \frac{N_m - 1}{2} s, \\ y_{m1} = y_{11} - (m-1)t, \\ z_{m1} = (-1)^m \frac{N_m - 1}{2} s \sin \alpha; \end{cases} \quad (4)$$

第 $m$ 行第 $n$ 个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{mn} = x_{m1} - (-1)^m (n-1)s, \\ y_{mn} = y_{(m-1)1} - t, \\ z_{mn} = (-1)^m \frac{N_m - 2n + 1}{2} s \sin \alpha. \end{cases} \quad (5)$$

式中, $m$ 为孔的总行数; $N_m$ 为第 $m$ 行孔的个数; $s$ 为横向孔间距; $t$ 为纵向行间距。

②区的孔与①区的孔坐标的确定方法有所不同,见图3,以第一象限左上角第一个孔为基准,向右开始确定第一行第 $n$ 个孔的起始坐标,即

$$\begin{cases} x_{1n} = x_{11} + (n-1)s, \\ y_{1n} = y_{11}, \\ z_{1n} = z_{11} + (n-1) s \sin \alpha; \end{cases} \quad (6)$$

第二行第1个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{21} = x_{11} + (N_m - 1)s, \\ y_{21} = y_{11} - t, \\ z_{21} = z_{11} + (N_2 - 1) s \sin \alpha; \end{cases} \quad (7)$$

当 $m$ 为奇数时,第 $m$ 行第 $n$ 个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{mn} = x_{11} + (n-1)s, \\ y_{mn} = y_{(m-1)1} - t, \\ z_{mn} = z_{11} + (n-1) s \sin \alpha; \end{cases} \quad (8)$$

当 $m$ 为偶数时,第 $m$ 行第 $n$ 个孔的坐标为

$$\begin{cases} x_{mn} = x_{11} + (N_m - n)s, \\ y_{mn} = y_{(m-1)1} - t, \\ z_{mn} = z_{11} + (N_m - n) s \sin \alpha. \end{cases} \quad (9)$$

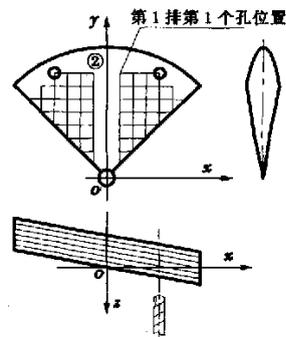


图3 折流板②在机床上的装夹

有了第一象限的钻孔子程序,采用镜像功能实现第二象限孔的加工。以上说明了管孔为正方形排列的情况。当排列形式为三角形、转角三角形排布时,只要注意区分孔间距 $s$ ,行间距 $t$ 以及各行孔的起始位置就可以编出相应的程序。固定管板和折流板上有拉杆孔,浮动管板相应位置没有孔,在钻孔时需要跳过这些位置。

### 3 数控程序编制

数控机床采用的控制系统种类繁多,仅齐鲁石化机械厂就有 MITSUBISHI(三菱)、FANUC(法那科)和 SIEMENS(西门子)等。编程语言的规则和格式也千差万别,即使是同一厂家生产的数控系统,具体到不同型号的机床也不尽相同,在使用中要参考机床附带的操作手册和程序设计手册来实现操作和编程<sup>[21-22]</sup>,本文中以3 m 数控钻铣床为例说明数控加工程序的编制。该机床于1997年由齐鲁石化机械厂与济南第一机床厂联合开发研制,采用了 MITSUBISHI 数控系统。数控机床严格按照从外部输入的程序来自动地对工件进行加工,具有较高的精度,与通用计算机一样只接受二进制信息,所以必须把每个字符转换成8 byte 信息组成的字节,每个字符在存储时占用一个内存单位。

3 m 数控钻铣床为卧式机床,工作台固定,刀具具有 $x, y, z$ 三个方向的自由度。 $x, y$ 轴行程均为3 m, $z$ 轴行程700 mm,工作台长3 m,宽1.5 m,主轴最大

转速 5 000 r/min,最大扭矩 30 kN·m,切削液为煤油,采用闭环控制系统,重复定位精度为 0.01 mm/500 mm。

该机床使用键盘编程功能,自身带有控制系统计算机,性能相当于 80486。可以采用 ISO 代码(国际标准化组织)标准或 EIA 代码(美国电子工业协会)编程,也可以编写子程序,循环调用,输入的语句存入机床的内存存储器<sup>[23]</sup>。程序框图见图 4。

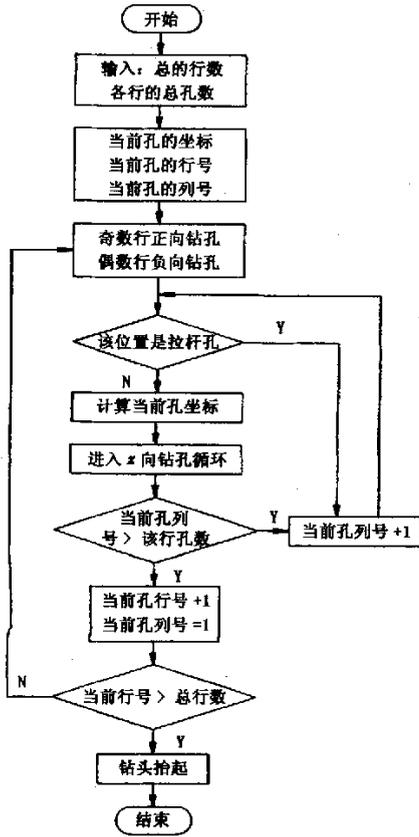


图 4 程序框图

具体程序如下:

```

O0045;
G90 G54(采用绝对坐标编程,使用 G54 坐标系);
G0 Z200.;
#101 = -353.328(第一个孔的 x 坐标);
#102 = 663.0(第一个孔的 y 坐标);
#103 = 10.0(第 1 个孔的 z 坐标);
M06 T01(换 1 号刀);
M03 S200(主轴正转,转速 200 r/min,实际转速可通过操作面板上倍率开关调整);
M08(打开切削液);

```

```

G0 X#101Y#102Z#103(定位于第一个孔);
G98 G73 F100(进入钻孔循环);
X—Y—Z—(用宏指令编程计算每一个孔的坐标值,格式为“X—Y—Z—”,实现重复钻孔,每一个孔的起点是不同的,即 z 坐标);
G0Z100.;
M30;
%;

```

每一个语句段的结束用“;”表示,每一个语句段之前不加行号,循环体内可以用“NXXXX”和“ENDXXXX”来构成封闭,用“DOXXXX”来调用子程序。当用数字来表示坐标值的时候,单位是 μm,注意小数点的位置,如 X10 数控系统将认为是 x 方向的坐标值为 10 μm,即 0.010 mm,而不是平时所习惯的 10 mm。用数字表示主轴转速、进给量等其他功能时,为整形数表示。

采用宏指令编程计算孔的坐标比较烦琐,普通的技术人员难以掌握,可以采用 Quick BASIC 语言编程计算孔的位置坐标<sup>[24-25]</sup>,利用数组储存行数 and 每行的管孔数,将计算的结果传输到数控机床,采用 DNC 的方式来提高机床的工作效率。由于数控机床价值非常昂贵,过多的占用机床本身的 CNC 控制器来编写和调试程序,会减少机床的有效工作时间,造成很大浪费,而且容易出错。如果数控机床正在进行工作,技术人员照样可以在微计算机上编程。由于在换热器设计的时候,管孔排布图是采用 AutoCAD 软件按比例绘制的,可以通过 AutoCAD 中的“Run Script”命令在计算机屏幕上模拟钻孔<sup>[26]</sup>,即时检验计算的钻孔位置是否正确,发现错误及时修正。

#### 4 折流板的加工

换热器的折流板毛坯一般采用薄钢板,周边经火焰或者等离子切割,多件点焊为一摞,不平度要大一些。在数控机床上钻孔,可以保证孔的中心距及位置精度。数控钻铣床具有较高的加工精度,重复定位精度  $\sigma \leq 0.01$  mm,即便是分开钻孔也可以保证管板和折流板上相应的孔能够对齐。

在加工折流板时采用每进刀 3 mm,快速退刀 1 mm 的加工方式实现强制断屑(图 5),使切屑成为一段段螺旋形的条状,顺利从孔中排出,而不至于缠绕在钻头上。如果形成碎屑积攒在孔中不能顺利排出,还会影响切削液的流入,使切削条件更加恶化。常用的折流板材料为 Q235-A, 0Cr18Ni9 等。0Cr18Ni9 是一个切削性能较差的钢种,韧性较大,

切屑不容易折断,易缠绕在钻头上,会降低孔的表面粗糙度,甚至发生事故。不同的材料可以根据手册选择合适的钻头和进给量<sup>[27]</sup>。孔径较大时可以先钻底孔,后扩孔。深孔钻削宏指令格式如下:

G83 G98 X—Y—Z—I-55. B3. D3. H1. F100;

其中,G83为深孔钻削固定循环指令代码;G98为孔加工完毕时刀具退回到起始平面;I为定义整个钻孔深度,本例为55 mm,工件厚度要加上钻头倒角及余量;H为每次切削进给后,刀具退出的距离,本例为1 mm;B为每一段的切削深度,本例为3 mm;D为参考平面距工件上表面的距离,本例为3 mm;F为进给量,可通过操作面板上倍率开关调整,单位mm/min。

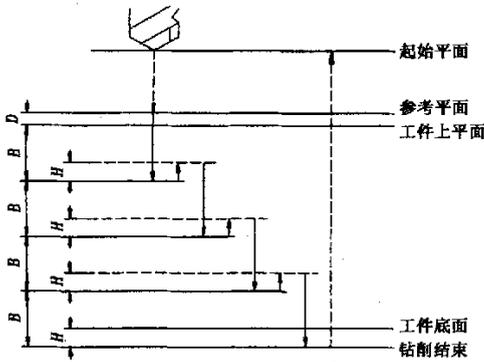


图5 单个管孔z向钻孔循环图

### 5 结束语

用数控加工的方式很好地解决了螺旋折流板换热器折流板制造的难题,用参数方式编制的宏指令程序适用于规则方式排布的阵列孔的加工,当管孔的排布方式发生改变时,只需更改相应的参数即可,十分方便。螺旋折流板换热器的管板和折流板均采用数控加工的方法完成,管孔对中性好,具有较高的精度,大大提高了产品的质量,并且为换热器的组装提供了方便。数控加工的方式也降低了工人的劳动强度,提高了劳动生产率,为大规模生产提供了可能。

#### 参考文献:

[1] 曹伟. 国外新型换热器介绍[J]. 化学工程, 2000, 28(6):50-52.  
CAO Wei. Introduction on new types of overseas heat exchangers [J]. Chemical Engineering, 2000, 28(6):50-52.  
[2] 兰州石油机械研究所. 换热器[M]. 北京: 烃加工出版

社, 1986:241-246.  
[3] 杨杰辉. 螺旋折流板换热器: 中国, 97242036. 3 [P]. 1998-05-11.  
[4] 宋小平, 裴志中. 一种改进型螺旋折流板换热器: 中国, 02240238. 1 [P]. 2002-04-23.  
[5] 王正方. 一种螺旋折流板管壳式换热器: 中国, 200320106763. 1 [P]. 2004-11-10.  
[6] 宋小平. 螺旋折流板列管换热器[J]. 石油化工设备技术, 2002, 23(1):35-36.  
SONG Xiao-ping. Spiral baffle tubular heat exchanger [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2002, 23(1):35-36.  
[7] 王世虎, 李应斌, 陈亚平. 梯式折流板换热器构想[J]. 石油化工设备, 2001, 30(6):23-25.  
WANG Shi-hu, LI Ying-bin, CHEN Ya-ping. A scheme of heat exchangers with stair-way baffles [J]. Petrochemical Equipment, 2001, 30(6):23-25.  
[8] 吴国辉, 黄渭堂, 孙中宁. 断续螺旋折流板在管壳式换热器中的应用[J]. 应用科技, 2005, 32(4):45-48.  
WU Guo-hui, HUANG Wei-tang, SUN Zhong-ning. Application of discontinuous helical baffles in shell and tube heat exchanger [J]. Applied Science and Technology, 2005, 32(4):45-48.  
[9] 赵晓曦, 邓先和, 陆恩锡. 两种不同管束的螺旋折流板换热器的性能对比[J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(8):52-55.  
ZHAO Xiao-xi, DENG Xian-he, LU En-xi. Performance comparison of two helical baffles heat exchanger with different tube bundle [J]. Petroleum and Petrochemical, 2002, 33(8):52-55.  
[10] 邓斌, 吴扬, 陶文铨. 螺旋折流板换热器壳侧流动的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(11):1106-1109.  
DENG Bin, WU Yang, TAO Wen-quan. Numerical simulation of flow in shell side of shell-and-tube heat exchangers with helical baffle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(11):1106-1109.  
[11] 王秋旺, 罗来勤, 曾敏, 等. 交错折流板换热器传热与阻力性能的实验研究[C]//中国工程热物理学会. 中国工程热物理学会 2003 年学术会议论文集. 2003:1079-1081.  
[12] 乔海星, 于军. 螺旋壳列管式换热器[C]//中国机械工程学会. 第五届全国压力容器学术会议论文集. 北京: 机械工业出版社, 2001:263-264.  
[13] 金跃, 王学, 李明义. 连续型螺旋折流板式换热器的制造[J]. 炼油与化工, 2004, 15(3):37-38.  
JIN Yue, WANG Xue, LI Ming-yi. Manufacture of continuous helix baffled exchangers [J]. Refining and

- chemicals, 2004, 15(3):37-38.
- [14] 国家技术监督局. GB151-1999 管壳式换热器[S]. 北京:中国标准出版社,1999:2.
- [15] 孙成家,杨军,陈保东. 不同折流板换热器的传热与流阻性能对比[J]. 节能技术,2005,23(1):59-61. SUN Cheng-jia, YANG Jun, CHEN Bao-dong. Performance comparison of two baffles heat exchangers with different shell sides[J]. Energy Conservation Technology, 2005, 23(1):59-61.
- [16] 朱冬生,蒋翔,陆应生. 螺旋折流板低翅片管油换热器应用研究[C]//中国化工学会. 全国化工石化装备国产化暨设备管理技术交流会论文集. 北京:化学工业出版社,2004:94-96.
- [17] 张少维,周荣兰,桑芝富. 折流板间距对换热器性能影响的数值研究[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2005,27(3):65-68. ZHANG Shao-wei, ZHOU Rong-lan, SANG Zhi-fu. Numerical simulation of heat exchangers for different baffles spacing[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2005, 27(3):65-68.
- [18] 杨军,陈保东,孙成家. 螺旋与弓形折流板换热器性能对比及螺旋角优化[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2005, 25(2):61-63. YANG Jun, CHEN Bao-dong, SUN Cheng-jia. Performance comparison between helical and segmental baffle board heat exchangers and optimization of helix angle [J]. Journal of Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, 2005, 25(2):65-68.
- [19] 王树立,彭杰,赵志勇. 螺旋折流板换热器流动特性研究[C]//中国工程热物理学会. 中国工程热物理学
- 会传热传质学术会议论文集. 2004:439-441.
- [20] 彭杰,鄢复春,李卓. 螺旋折流板换热器流动特性研究[J]. 石油化工高等学校学报,2001,14(1):71-75. PENG Jie, YAN Fu-chun, LI Zhuo. Studies on flow characteristic of heat exchangers with helical baffles[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2001, 14(1):71-75.
- [21] 清川盛雄. MITSUBISHI 三菱 CNC 控制器 MEL-DAS300 系列[M3A]程序设计手册[M]. 1991,9.
- [22] 清川盛雄. MITSUBISHI 三菱 CNC 控制器 MEL-DAS300 系列[M3A]机床操作手册[M]. 1992,1.
- [23] 《实用数控加工技术》编委会. 实用数控加工技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1995:746-761.
- [24] 王正方,徐桂根,许贵宾,等. 空气预热器管板的数控加工[C]//中国机械工程学会. 第五届全国压力容器学术会议论文集. 北京:机械工业出版社,2001:307-312.
- [25] 王正方,徐桂根,刘敏,等. 乙苯蒸汽过热器管板的制造[C]//中国机械工程学会. 第二届全国换热器学术会议论文集. 北京:机械工业出版社,2002:82-85.
- [26] 王正方,曲大伟,孙廷波. 整体式接管补强的制造[J]. 压力容器,2005,22(12):32-35. WANG Zheng-fang, QU Da-wei, SUN Ting-bo. Manufacture of nuzzles combined with reinforcement pad[J]. Pressure Vessel Technology, 2005, 22(12):32-35.
- [27] 《金属切削原理》编委会. 金属切削原理[M]. 北京:北京出版社,1985.

(编辑 沈玉英)

(上接第105页)

- [5] LOMBRANA Jose I, VILLARAN Maria C. Interaction of kinetic and quality aspects during freeze drying in an adsorbent medium[J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35:1967-1975.
- [6] J P 霍尔曼. 传热学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [7] 王照亮,成志刚,陈延,等. 利用试井资料确定油层的热物性参数[J],石油大学学报:自然科学版,2004,28(4):71-73. WANG Zhao-liang, CHENG Zhi-gang, CHEN Yan, et al. Determination of thermal parameters for oil reservoir using well testing data[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(4):71-73.
- [8] 冯洪庆,李惟毅,林林,等. 常压吸附流化冷冻干燥的影响因素实验研究[J]. 天津大学学报,2003,36(3):387-390. FENG Hong-qing, LI Wei-yi, LIN Lin, et al. Experimental study on influencing factors of atmospheric pressure adsorbent fluidized freeze-drying [J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(3):387-390.

(编辑 沈玉英)