

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.02.011

小直径全氟乙烯丙烯共聚物薄壁管的热弯成型工艺

王东亮,刘贵,裴雷振,李夕晨

(常州博瑞电力自动化设备有限公司,江苏常州 213025)

摘要:为了解决小直径热塑性塑料薄壁管热弯成型过程中易发生凹陷变形及成型后回弹问题,以外径 12 mm、壁厚 1 mm 的全氟乙烯丙烯共聚物(FEP) 90°弯管为例,通过研究一次热成型温度、穿芯工艺、弯曲半径及二次热处理温度等工艺参数对弯管成型角度精度的影响提出了一种改进的热弯成型工艺。该工艺流程为:FEP管坯经直径 9.5 mm 的聚四氟乙烯软轴穿芯后,以一定的弯曲半径限位定型并加热至 240℃,保温 30 min;空冷至 170℃,再水冷至常温,于装夹状态下去芯处理;二次加热至 90℃,并保温 30 min 后水冷至常温。通过该工艺成型的 FEP 弯管具有较高的成型精度,且无凹陷、无褶皱、并在 70℃的模拟工况下应用 30 min 无回弹。经分析 FEP 成型管性能,成型时的两次加热均未对其力学和电气应用性能造成明显影响。

关键词:全氟乙烯丙烯共聚物管;回弹;热弯成型;二次热处理;穿芯

中图分类号: TB 302.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)02-0059-06

Hot Bending Process of Minor Diameter FEP Thin-walled Tubes

Wang Dongliang, Liu Gui, Pei Leizhen, Li Xichen

(NR Electric Power Electronics Co. Ltd., Changzhou 213025, China)

Abstract : In order to solve the problems of sagging deformation and rebounding after forming in the hot bending process of minor diameter thermoplastic thin-walled tube, taking fluorinated ethylene propylene (FEP) 90° bent tube with 12 mm outer diameter and 1 mm wall thickness as example, a modified hot bending process was proposed through studying the effects of the hot forming temperature, core-through technology, bending radius and secondary heat treatment temperature on the forming angle precision of the tube. The modified process procedure is that, first, the core-through of the FEP tube is done with polytetrafluoroethylene flexible shaft with 9.5 mm diameter and fixed according to a certain bending radius, next, the tube was heated to 240℃ and kept for 30 minutes, then it is cooled to 170℃ by air cooling and continues to be cooled to room temperature by water, and core-removal is done under clamping, at last, the FEP tube is reheated to 90℃ and kept for 30 minutes, then cooled by water to normal temperature. The FEP tube formed by the modified hot bending process has high forming precision and no depression, no wrinkle, no rebounding phenomena occur in the 70℃ working conditions for 30 min. By analyzing the properties of the FEP forming tube, twice heating processes have slight significant impact on its mechanical and electrical application performance.

Keywords : fluorinated ethylene propylene tube ; rebound ; hot bending forming ; secondary heat treatment ; core-through

小直径薄壁热塑性塑料定型管在流体回路中被广泛应用,若其成型结构标准化程度较高或大批量生产,业内多采用注塑、挤出等成型工艺^[1];若应用成型结构为多品种、小批量,开模制造成本高,一般通过管坯的热弯成型来制造,热弯成型是指将管坯预弯曲成一定角度^[2-3],加热至完全软化状态,保温一定时间后再冷却固化定型的一种热塑性塑料定

型管成型工艺。

全氟乙烯丙烯共聚物(FEP)是电力系统高压直流阀模块水冷却循环系统中小直径薄壁管常用的材料,其管坯可通过热弯成一定形状的流体回路以实现散热的目的。目前在业内常用的小直径薄壁 FEP 管热弯成型工艺中,多以三个联动定位装置分别固定预弯成型管坯的两端及弯曲中心,然后加热至

通讯作者: 王东亮,工程师,主要从事电力设备制造工艺研究 E-mail: wangdl_br@nrec.com

收稿日期: 2018-11-30

引用格式: 王东亮,刘贵,裴雷振,等. 小直径全氟乙烯丙烯共聚物薄壁管的热弯成型工艺[J]. 工程塑料应用,2019,47(2): 59-64.

Wang Dongliang, Liu Gui, Pei Leizhen, et al. Hot bending process of minor diameter FEP thin-walled tubes[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2): 59-64.

220~240℃,保温一定时间后水冷却至常温而成型;其实际预弯角度小于设计角度 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$,成型后使其自然回弹至设计角度左右。该方法热弯过程中,弯曲圆弧中心易凹陷^[4]、折断、失圆^[5],成品率低,热弯定型后易回弹^[6],尤其当直流阀冷却回路工况温度达到上限70℃左右时,易出现大幅回弹,影响管内流体流动性及外观装饰性。结合文献所述^[6-8],FEP管坯在高温下热弯时,内侧受挤压收缩,外侧受拉应力扩张,冷却定型后存在残余应力和恢复塑性形变的潜能,当工作达到一定温度时,加速残余应力自由释放,塑性形变快速恢复,从而引起回弹失效。

笔者通过研究外径12 mm、内径10 mm(下文统称为 $\varnothing 12/10$)的FEP管热弯成型工艺,提出了一种改进的小直径FEP薄壁管热弯成型工艺方法:即先将FEP管坯穿芯预定型后一次加热至完全软化态,保温一定时间后空冷固化至非软化态,再水冷至常温;然后于装夹状态下去芯处理,二次加热至应用工况温度以上,并保温一定时间后水冷至常温。通过上述的成型工艺流程,可实现FEP管的高精度热弯成型。

1 实验部分

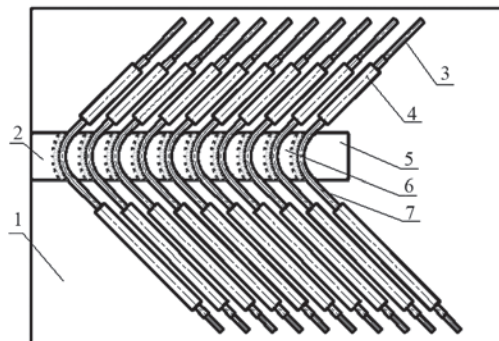
1.1 主要原料

$\varnothing 12/10$ FEP管坯:材料熔点265℃、软化温度200℃、完全软化温度240℃,江南氟塑有限公司。

1.2 主要仪器及设备

依据实验方案设计了一种拼装式的热弯成型工装,材质为铝合金,其主视图如图1所示。该工装各部分通过沉头螺钉连接在一起,其中弯曲成型块设计了可以满足弯曲半径分别为10,30,60 mm的FEP管热弯定型需求。

角度测量仪:DWM40L型,精度为 $\pm 0.1^{\circ}$,德国



1—支撑底板;2—限位块a;3—穿芯轴;4—限位块b;5—限位块c;
6—弯曲成型块;7—预弯FEP管坯

图1 FEP管热弯成型工装主视图

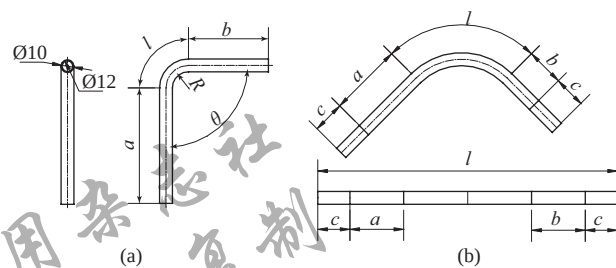
罗伯特·博世有限公司。

红外测温仪:optris P20 LT型,精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,量程0~1300℃,德国Optris GmbH公司。

电加热烘箱:GW-8型,可加热最高温度500℃,误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,苏州台华烘箱设备有限公司。

1.3 成型工艺及流程

图2为FEP定型管示意图及管坯尺寸。如图2所示,设定的FEP管热弯成型角度 θ 为 90° ,弯曲半径为 R ,两侧直线段距离分别记为 a , b ,中心线弧长记为 l ,如图2a所示。管坯两端各预留30~50 mm的修剪长度,记为 c ,其展开长度如图2b所示,故管坯总长度为 $L=a+b+l+2c$ 。



a—FEP定型管图;b—FEP定型管坯尺寸

图2 FEP定型管示意图及管坯尺寸

装夹流程:在预弯FEP管坯弯曲中心做好标记线,然后进行穿芯,穿芯软轴材料为实心聚四氟乙烯(PTFE)(熔点 $\geq 320^{\circ}\text{C}$),长度以两端大于管坯(50~100) mm为宜;穿芯后按图1装夹,使预弯中心标记线与成型槽的中心刻度线对齐,调整限位块,保证两侧限位块b所组成的夹角为 90° ,允许误差为 $\pm 1^{\circ}$ 。

工艺流程:将装夹后的FEP管同装置置于烘箱中加热至一定温度,保温30 min,取出后空冷至170℃,再水冷至常温;于装夹状态下去芯处理,同装置再次加热至90~100℃,保温30 min后取出水冷至常温,拆除装置,取出成型FEP管,清洗、修剪、检验、包装,即完成FEP管成型加工。

1.4 测试与表征

利用角度测量仪测量热弯后FEP管壁内半径侧夹角作为实际成型角度;

参照GB/T 8804.1-2003测试FEP管拉伸强度及断裂伸长率,拉伸速率为10 mm/min;

依据高压直流阀设计规范Q/GDW 527-2010和GB/T 6111-2018测试FEP管的爆破强度及电气性能,应流体主管路压力要求,其支路FEP管爆破强度要求大于2 MPa,击穿电压(2 mm)要求大于70 kV。

2 结果与讨论

2.1 一次热成型温度对成型质量的影响

根据文献所述^[6-8],热塑性管的热成型质量对温度较为敏感,不同温度下成型效果不同。对于一般热塑性塑料,随着温度升高,内部张力减小,有利于快速成型,但温度不能太高,否则会使材料熔融。FEP管在170℃时逐渐失形,此时内部残余应力得到释放,有利于成型;在软化温度200℃和完全软化温度240℃下,FEP管的成型更为容易;但温度超过240℃后其与熔点265℃较为接近,材料易熔融。故在上述分析的基础上,设计了三组热成型温度,分别为170,200,240℃,记为第1~3组,每组制样10个,成型工艺流程为:FEP管坯穿芯→装夹→一次加热→一次保温→(空冷)→水冷。其中穿芯PTFE软轴直径为9.5 mm,弯曲半径为60 mm;第1组因热成型温度为170℃,保温结束后直接水冷,第2,3组先空冷,后水冷;由于FEP管在软化状态下,塑形能力几近消失,立即置于冷水槽冷却易被压扁、划伤、折断、起皱^[7],以红外测温仪测得热成型的FEP管在空气中冷却至温度低于软化温度时再置于冷水槽中冷却。其工艺参数见表1。

表1 第1~3组热弯成型工艺参数

组 号	一次加热温度 /℃	空冷后温度 /℃	水冷后温度 /℃
1	170		25
2	200	170	25
3	240	170	25

三组FEP管经冷却至常温后,在装夹状态下抽出PTFE软芯轴,用角度测量仪测得各组平均实际成型角度及其标准偏差,结果见表2。以平均偏离角度表示平均实际成型角度与设计成型角度的偏离程度,即平均偏离角度=平均实际成型角度-设计成型角度,设计成型角度为90°。

表2 第1~3组FEP管平均实际成型角度与偏离角度 (°)

项 目	第1组	第2组	第3组
平均实际成型角度	101.8	94.96	91.58
标准偏差	3.21	1.77	0.58
平均偏离角度	11.8	4.96	1.58

由表2可以看出,各成型温度下FEP管热弯成型后的实际成型角度均大于设计成型角度,说明成型后FEP管的弯曲内侧没有持续收缩;在170℃下的实际成型弯曲角度标准偏差最大,平均偏离角度高达11.8°;在240℃下的实际成型弯曲角度标准偏差最小,平均偏离角度不及1.6°,说明在失强温度以下,FEP管一次热弯成型温度越高,成型角度的精度越高,成型形状稳定性越好。

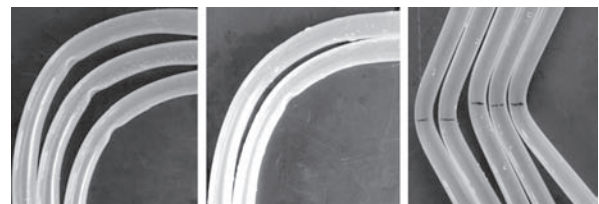
2.2 穿芯对成型质量的影响

在FEP管热弯成型过程中,弯曲中心部位较易凹陷,由于弯曲时外侧受拉应力,内侧受压应力^[6],在高温作用下,受装夹工装的束缚,压应力朝未被束缚自由度的方向释放引起应力集中部位凹陷,故在预弯成型FEP管内穿入芯轴,以限制内缩方向的自由度^[9-11],改变应力形变方向,阻止凹陷。为此,采用不穿芯以及采用直径分别为8,9.5 mm的PTFE软轴穿芯方式制样3组,分别记为第4~6组,每组制样10个,弯曲半径为60 mm,成型工艺流程为:FEP管坯(穿芯)→装夹→一次加热→一次保温→空冷→水冷→(去芯),热弯成型后对第5,6组在装夹状态下去芯处理,其工艺参数见表3。

表3 第4~6组热弯成型工艺参数

组 号	穿芯轴直径 / mm	一次加热温度 /℃	空冷后温度 /℃	水冷后温度 /℃
4		240	170	25
5	8	240	170	25
6	9.5	240	170	25

实验中发现,在装夹过程中第4组FEP管在弯曲中心处即折断4个,通过增加数量使其装夹完成后仍为10个,第5,6组无折断现象。热弯成型后发现第4组有6个样品在弯曲中心处严重凹陷,如图3a所示,凹陷率高达60%;第5组有2个样品在弯曲中心处轻微凹陷,如图3b所示;第6组未出现凹陷,如图3c所示。



(a) (b) (c)

a—未穿芯;b—穿芯轴直径8 mm;c—穿芯轴直径9.5 mm

图3 未穿芯和不同穿芯轴直径下FEP管热弯成型情况

图3的情况说明,FEP管在高温下无穿芯热弯时,弯曲中心受挤压应力作用极易凹陷,穿芯后,凹陷现象得到明显改善;穿芯轴直径与FEP预弯管内径间隙越小,凹陷率越小,成型效果得到有效保证,但当穿芯配合间隙过小时,穿芯困难,一般间隙以0.5~1 mm为宜。

表4为第4~6组的平均实际成型角度与偏离角度。从表4可以看出,这三组的平均实际成型角度和平均偏离角度相差不大,表明是否穿芯及穿芯轴直径大小对FEP管一次成型角度的影响不大。

表4 第4~6组 FEP 管平均实际成型角度与偏离角度 (°)

项 目	第4组	第5组	第6组
平均实际成型角度	91.3	91.5	91.9
标准偏差	0.67	0.68	0.71
平均偏离角度	1.3	1.5	1.9

2.3 弯曲半径对成型质量的影响

高压直流阀模块水冷却循环系统中,针对 FEP 管设计在了多种不同弯曲半径的成型管以适应结构和空间需求,使用中发现,以相同的热成型温度在穿芯状态下生产的不同弯曲半径的 FEP 成型管在同等工况下回弹程度不一。为深入考察不同弯曲半径的 FEP 热弯成型管在模拟 70℃ 工况下的回弹形变,设计弯曲半径分别为 10, 30, 60 mm, 由此制样 3 组, 分别记为第 7~9 组, 每组制样 10 个, 其成型工艺流程为: FEP 管坯穿芯→装夹→一次加热→一次保温→空冷→水冷→模拟 70℃ 工况 30 min→冷却至常温, 其中穿芯 PTFE 软轴直径为 9.5 mm, 其工艺参数见表 5。

表5 第7~9组热弯成型工艺参数

组 号	弯曲半径 / mm	一次加热温度 / °C	空冷后温度 / °C	水冷后温度 / °C
7	10	240	170	25
8	30	240	170	25
9	60	240	170	25

表 6 为第 7~9 组回弹前后的平均实际成型角度与偏离角度。

表6 第7~9组 FEP 管回弹前后的平均实际成型角度与偏离角度 (°)

项 目	平均实际成型角度	标准偏差	平均偏离角度
第7组	回弹前	96.5	1.40
	回弹后	135.1	4.25
第8组	回弹前	94.3	1.01
	回弹后	124.5	4.74
第9组	回弹前	91.5	0.64
	回弹后	115.5	4.11

由表 6 可以看出, 弯曲半径为 10, 30, 60 mm 的 FEP 管回弹前的平均实际成型角度分别为 96.5°, 94.3°, 91.5°, 其标准偏差以及平均偏离角度依次减小, 说明成型 90° FEP 定型管时, 弯曲半径越大, 一次热弯成型角度的精度及稳定性越好。将经一次加热成型后的 FEP 管置于 70℃ 模拟工况下 30 min 后, 弯曲半径为 10, 30, 60 mm 的 FEP 管均发生了回弹, 平均实际成型角度变为 135.1°, 124.5°, 115.5°, 同时标准偏差也均变大, 这表明不同弯曲半径的 FEP 管成型角度在高温工况下的回弹均较大且不稳定。另外, 可以发现, 弯曲半径越小, 在高温工况下回弹量越大。

从表 6 可知, 经一次加热成型的 FEP 管在高温工况下存在较为严重的回弹变形。为进一步探索

回弹速度与时间的关系, 按同种工艺每组各制样 20 个, 在高温工况中每隔 30 s 取出每组样品 1 个, 立即水冷后测其成型角度, 结果如图 4 所示。

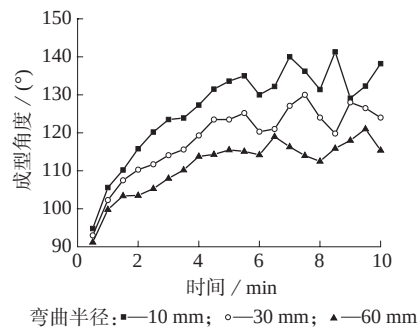


图4 不同弯曲半径的 FEP 管成型角度随时间的变化曲线

由图 4 可以看出, 在高温工况中前 2 min 内, 曲线斜率相对较大, 3 组成型管均出现了快速回弹现象, 回弹速率相当; 随着时间的持续, 回弹量均有所放缓且趋于相对稳定, 其中, 随着弯曲半径的增加, FEP 成型管回弹达到相对稳定状态的时间依次增加。图 4 说明, 高温工况下 FEP 管回弹在很短时间内发生, 且增大弯曲半径, 成型形状可更早地得到保持。

2.4 二次热处理温度对成型质量的影响

上述实验表明, 经一次加热成型的 FEP 定型管在模拟 70℃ 工况下, 均出现了相对较大幅度的回弹, 根据材料的成型过程和受力状态分析认为, 在一次成型过程中, 弯曲中心位置集中了大量的残余应力, 在模拟工况温度下, 应力自由释放, 引起回弹变形; 同时, 成型管恢复了塑性变形能力, 反向回弹的趋势未改变^[3-5]。

根据上述分析, 应对 FEP 管采用二次热处理方式, 以消除残余应力。为此制样 5 组, 分别记为第 10~14 组, 第 10 组样品不经二次热处理, 第 11 组以低于工况温度二次热处理, 第 12 组以近于工况温度二次热处理, 第 13~14 组以高于工况温度二次热处理, 且第 10~13 组均在一次热成型冷却后于装夹状态下去芯, 第 14 组在二次热处理冷却后于装夹状态下去芯。每组制样 10 个, 生产工艺流程为: FEP 管坯穿芯→装夹→一次加热→一次保温→空冷→水冷→(去芯)→二次加热→二次保温→水冷→(去芯)→模拟 70℃ 工况 30 min→冷却至常温, 其中穿芯 PTFE 软轴直径为 9.5 mm, 弯曲半径为 60 mm, 一次加热后空冷至 170℃, 水冷至 25℃; 由于设计温度均未超过 100℃, 故采用更接近工况的恒温热水加热, 其工艺参数见表 7。

表 7 第 10~14 组 FEP 管热弯成型工艺参数

组号	一次加热温度 / ℃	二次加热温度 / ℃	去芯情况
10	240		一次加热后去芯
11	240	50	一次加热后去芯
12	240	70	一次加热后去芯
13	240	90	一次加热后去芯
14	240	90	二次加热后去芯

表 8 为第 10~14 组回弹前后的平均实际成型角度与偏离角度。由表 8 可以看出,第 10 组样品回弹量与表 6 第 9 组样品回弹量差异不大,说明同种工艺下样品成型角度相对稳定;第 11 组样品回弹量略低于第 10 组,说明在低于模拟工况温度下二次热处理有助于改善成型角度的精度,但改善幅度较小;第 12~14 组样品回弹量均相对较小,第 13 组回弹量最小,回弹后的平均偏离角度为 1.17°,第 12 组样品回弹量高于第 13 组,说明在近于工况温度下二次热处理后成型角度的精度不及高于工况温度下的精度;第 14 组回弹量高于第 13 组,回弹后的平均偏离角度为 5.15°,与第 12 组基本相当,说明以高于模拟工况温度进行二次热处理时,穿芯状态下成型角度的精度低于未穿芯状态下的精度。在弯曲半径 10,30 mm 下也进行了相应实验,得到了相似的结果。综上所述,在高于模拟工况温度(90℃)下去芯二次热处理可大幅提高 FEP 管的成型角度精度及稳定性。

表 8 第 10~14 组 FEP 管回弹前后的平均实际成型角度与偏离角度(°)

项 目	平均实际成型角度	标准偏差	平均偏离角度
第 10 组	回弹前 90.88	0.63	0.88
	回弹后 114.2	3.99	24.2
第 11 组	回弹前 91.26	0.68	1.26
	回弹后 106.0	4.11	16.0
第 12 组	回弹前 91.0	0.70	1.0
	回弹后 95.4	0.91	5.4
第 13 组	回弹前 90.98	0.72	0.98
	回弹后 91.17	0.61	1.17
第 14 组	回弹前 91.17	0.65	1.17
	回弹后 95.15	0.85	5.15

另外,实验发现,第 10~13 组样品在 90℃下去芯二次热处理并未出现弯曲中心凹陷现象,说明 FEP 管在经一次穿芯热弯成型后,再去芯后二次热处理,可以避免弯曲中心凹陷。

2.5 热弯成型工艺过程对 FEP 管性能的影响

上述热弯成型实验中,一次加热和二次加热均可能造成 FEP 管的老化,对其性能有一定影响。分别取 FEP 管坯、经一次加热和二次加热后的热弯成型管样品各 5 个,测得其在电力系统中常用性能见表 9。

表 9 不同 Ø12 / 10 FEP 管的性能对比

项 目	力学性能			电气性能	
	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %	爆破强度 / MPa	击穿电压 / kV	水中电容 / pF
FEP 管坯	18.22	275%	> 2	> 70	261.5
一次加热成型管	16.37	246%	> 2	> 70	263.2
二次加热成型管	16.35	244%	> 2	> 70	263.4

由表 9 可以看出,经一次加热后,FEP 成型管的拉伸性能小幅降低,电气性能未发生明显变化;二次加热对 FEP 成型管的力学性能和电气性能均无明显影响。

2.6 工艺总结与应用

经上述实验可以发现,在 Ø12 / 10 FEP 管热弯成型过程中,合适的穿芯工艺可避免热弯过程中出现凹陷、折断、失圆等现象;在合适的弯曲半径、热处理工艺条件下,可实现一定工况下无回弹或小幅回弹。

改进的 90° 小直径 FEP 薄壁管热弯成型工艺流程为:FEP 原料→管坯制作→穿芯→装夹→一次加热→一次保温→空冷→水冷→去芯→二次加热→二次保温→水冷→修剪→检验→包装。按该工艺流程生产的电力系统高压直流阀模块水冷却循环系统用 FEP 热弯成型管如图 5 所示,其长期使用状态良好,且弯曲圆弧段无需用定型管夹固定。

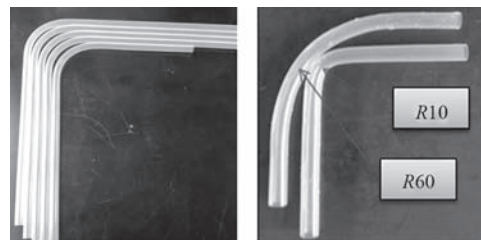


图 5 实际生产的 FEP 热弯成型管成品

同时,该工艺方法也可以用于 FEP 成型管失效后再成型,当 FEP 成型管在一定工况下发生回弹或形变失效时,将其置于(160~180)℃的烘箱中保温 5~10 min,使其完全回弹后再按该工艺方法重新热弯成型,从而避免成型管报废,进而节约了成本。

3 结语

通过探索 Ø12 / 10 FEP 薄壁管的 90° 热弯成型工艺,总结了一种改进的工艺流程,具体为:FEP 管坯经 Ø9.5 mm PTFE 软轴穿芯后限位固定于热弯装置上,一次加热至 240℃,保温 30 min;空冷固化至 170℃,再水冷至常温,并于装夹状态下去芯;二次加热至 90℃,并保温 30 min 后水冷至常温,清洗、修剪、包装。

利用 FEP 管坯在穿芯状态下一次热弯成型、保

温固化、分阶段冷却,去芯状态下二次热定型的热弯成型工艺方法,可实现 FEP 管按设计形状的高精度热弯成型。该方法工艺简单,生产成本低,可批量生产,且成型后不易回弹,为小直径热塑性塑料薄壁管的热弯成型工艺提供了一种可行性思路。

参考文献

- [1] 潘海杰,刘春梅,夏衍,等. 聚全氟乙丙烯的流变性能研究[J]. 聊城大学学报:自然科学版,2017,30(1):61-65.
Pan Haijie, Liu Chunmei, Xia Yan, et al. Rheological properties of polyperfluoroethylene propylene[J]. Journal of Liaocheng University :Natural Science Edition, 2017, 30(1):61-65.
- [2] 吴磊,张亚民,黄凯东. 弯管成型工艺及管材弯曲特性的研究现状[J]. 机电产品开发与创新,2016,29(4):23-25.
Wu Lei, Zhang Yamin, Huang Kaidong. Research status of elbow forming process and bending characteristics of pipe[J]. Development and Innovation of Mechanical and Electrical Products, 2016, 29(4):23-25.
- [3] 任胜乐,赖一楠,张元,等. 管材弯曲成形理论与技术研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011,16(6):31-35.
Ren Shengle, Lai Yinan, Zhang Yuan, et al. Research progress of pipe bending theory and technology[J]. Journal of Harbin University of Technology, 2011, 16(6):31-35.
- [4] Bai Yong, Tang Jiandong, Xu Weiping, et al. Collapse of reinforced thermoplastic pipe (RTP) under combined external pressure and bending moment[J]. Ocean Engineering, 2015, 94(15):10-18.
- [5] 贾晓晨. 弯管弯曲成形的缺陷分析及防止措施[J]. 硅谷, 2009(14):90.
Jia Xiaochen. Defect analysis and preventive measures of bending forming of elbow[J]. Silicon Valley, 2009(14):90.
- [6] 何亮,宫汝华,何根,等. 3D 盖板玻璃的热弯工艺及常见问题分析[J]. 玻璃,2018,45(10):45-48.
He Liang, Gong Ruhua, He Gen, et al. Hot bending process and common problems analysis of 3D cover glass[J]. Glass, 2018, 45(10):45-48.
- [7] Kuang Y, Morozov E V, Ashraf M A, et al. Numerical analysis of the mechanical behaviour of reinforced thermoplastic pipes under combined external pressure and bending[J]. Composite Structures, 2015, 131(3):453-461.
- [8] Kuang Y, Morozov E V, Ashraf M A, et al. Analysis of flexural behaviour of reinforced thermoplastic pipes considering material nonlinearity[J]. Composite Structures, 2015, 119:385-393.
- [9] 吴超,严勇,胡志力. 芯棒形式对薄壁管弯曲成形质量的影响[J]. 机床与液压,2015(12):52-59.
Wu Chao, Yan Yong, Hu Zhili. Effect of mandrel form on bending quality of thin-walled tubes[J]. Machine Tools and Hydraulic Pressure, 2015(12):52-59.
- [10] 康凤明,徐淑波,潘宪平. 有芯弯管成形工艺机理分析与结构优化[J]. 锻压装备与制造技术,2014,49(5):93-96.
Kang Fengming, Xu Shubo, Pan Xianping. Forming mechanism analysis and structure optimization of cored elbow[J]. Forging Equipment and Manufacturing Technology, 2014, 49(5):93-96.
- [11] 陈钱,雷君相. 芯模参数对高强度薄壁管数控弯曲成形质量的影响[J]. 锻压技术,2016,41(11):158-163.
Chen Qian, Lei Junxiang. The influence of die parameters on the quality of NC bending of high strength thin-walled tubes[J]. Forging technology, 2016, 41(11):158-163.
- [6] Chang L, Liu X L, Di F D, et al. The efficiency of magnetic hyperthermia and in vivo histocompatibility for human-like collagen protein-coated magnetic nanoparticles[J]. Int J Nanomedicine, 2016, 11:1 175-1 185.
- [7] 卢亢,陈泽楚,李婷,等. 壳聚糖的制备及其抑菌性能的研究[J]. 离子交换与吸附,2015, 31(2):1 705-1 708.
Lu Kang, Chen Zechu, Li Ting, et al. Preparation and antibacterial properties of chitosan[J]. Ion Exchange and Adsorption, 2015, 31(2):1 705-1 708.
- [8] 蔚鑫鑫,刘艳,吴光旭. 小龙虾壳中的甲壳素的提取及壳聚糖的制备[J]. 湖北农业科学,2013, 52(13):3 120-3 123.
Yu Xinxin, Liu Yan, Wu Guangxu. Extraction of chitin and preparation of chitosan from procambarus clarkii shell[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(13):3 120-3 123.
- [9] Mirazul I, Vytautas C, Chaoliang, et al. Functional fabrication of recombinant human collagen-phosphorylcholine hydrogels[J]. Acta Biomaterialia, 2015, 12:70-80.
- [10] Islam S, Bhuiyan M A R, Islam M N. Chitin and chitosan: Structure, properties and application in biomedical engineering[J]. Journal of Polymers & the Environment, 2017, 25:854-866.
- [11] Xiao Z, Tian T, Hu J, et al. Preparation and characterization of chitosan nanoparticles as the delivery system for tuberose fragrance[J]. Flavour & Fragrance Journal, 2014, 29(1):22-34.
- [12] Walters B D, Stegemann J P. Strategies for directing the structure and function of three-dimensional collagen biomaterials across length scales[J]. Acta Biomaterialia, 2014 ; 10(4):1 488-1 501.
- [13] 何静. 胶原蛋白在生物医药工程中的应用研究进展[J]. 河南科技, 2015(10):104-105.
He Jing. Progress in the application of collagen in biomedical engineering[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015(10):104-105.
- [14] Singh B, Maharjan S, Jiang T, et al. Attuning hydroxypropyl methylcellulose phthalate to oral delivery vehicle for effective and selective delivery of protein vaccine in ileum[J]. Biomaterials, 2015, 59:144-159.
- [15] Wang M, Xu L, Li C, et al. Antipolyelectrolyte swelling of amphiphilic hydroxypropyl methylcellulose phthalate gels[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 356(1-3):89-96.

(上接第 40 页)