

芯模填充对铜钛复合管绕弯截面畸变和壁厚减薄作用的模拟研究*

朱英霞,王 匀,万苗苗,施 伟,涂文斌

(江苏大学机械工程学院,镇江 212013)

[摘要] 为了提高铜钛复合管绕弯成形精度,基于所建有限元模型,研究了刚性芯模参数对复合管截面畸变和壁厚减薄的影响规律,并对比了刚性芯模填充和弹性芯模填充。研究表明:(1)随着刚性芯棒伸出量的增大,双金属复合弯管的基、覆管截面畸变率逐渐减小,壁厚减薄率逐渐增大,最佳芯棒伸出量为7mm。(2)较之无芯模填充,采用刚性芯模填充后,截面畸变显著降低,但是壁厚减薄率增大;控制截面畸变时,一定要考虑芯模对复合管壁厚减薄率的影响,并根据实际生产要求和管材尺寸结构灵活选择填充状态。(3)弹性芯模填充时,截面畸变率沿弯曲方向的分布较之刚性芯模均匀;刚性芯模较之弹性芯模可以更好地控制复合管的截面畸变,但最大差距只有1.03%。弹性芯模较之刚性芯模可以更好地控制复合管的壁厚减薄率,最大差距为3.27%。综合考虑截面畸变和壁厚减薄,弹性芯模对双金属复合管的填充效果更好。

关键词: 双金属复合管; 塑性弯曲; 芯模填充; 有限元分析

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.21.054



朱英霞

副教授、博士,从事精确塑性成形与计算机仿真研究。主持、参与国家自然科学基金青年项目、面上项目多项,入选泰兴市“双创人才”项目计划,先后进行过矩形管、双脊波导管和双金属复合管绕弯成形的研究工作,在精确塑形成形领域积累了丰富的理论知识与实践经验。

异质双金属复合管是一种特殊管材,由两种不同材质的金属材料通过变形和连接技术结合而成,一层管材通常相对较厚,起到载体作用,被称之为“基管”;另一层管材相对较薄,包覆或内衬在基管上,被称之为“覆管”^[1]。本文研究的铜钛复合管以铜为“基管”,以钛为“覆管”,由于热交换性能好、抗疲劳强度高、抗振动性能好、耐腐蚀、耐磨损,其弯曲件是应用于海军舰船、滨海电站的各类海水管路和蒸汽管路的理想材料^[2]。因此研究铜钛复合管的弯曲工艺具有较好的工程应用价值。

目前管材的塑性弯曲工艺有压弯^[3]、推弯^[4-5]、滚弯^[6]、绕弯^[7-9]等,研究众多且取得了丰硕的成果,然而有关复合管塑性弯曲工艺的研究依

旧较少。吕海源^[10]研究了双金属复合管的压弯成形工艺,认为填充PU棒能够防止双金属复合管出现内弧面失稳起皱和横截面畸变等成形缺陷。郭训忠等^[11-12]研究了双金属复合管的冷推弯工艺及芯模填充条件,发现采用刚性芯棒和低熔点合金制作的柔性芯棒均可改善复合管横截面椭圆度和壁厚均匀性,采用刚性芯棒时壁厚均匀性最好,采用柔性芯棒时界面无分层。然而上述弯曲工艺对工艺条件和管材性能要求较高,故对双金属复合管的弯曲成形并不理想。Guo等^[13]研究了铜铝双金属复合管在自由弯曲成形下的壁厚分布规律,其研究方法对本文有较好的借鉴意义。近年来,作者从绕弯成形工艺参数的优化、芯模填充样式及其作

* 基金项目: 国家自然科学基金(51601070); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20181447); 江苏省博士后科学基金(1501099B); 江苏大学高级人才科研启动基金(14JDG135)。

用、截面变形分析与控制等方面,对管材的绕弯成形工艺展开大量研究,发现芯模是控制单层金属管截面畸变的最重要工艺条件^[14-17]。研究还发现,绕弯成形适用对拉伸力要求较高的复杂弯管成形,因此将绕弯成形应用于铜钛复合管的弯曲成形^[18]。

综合上述研究还可知,芯模是控制管材弯曲成形截面畸变和壁厚的重要工艺条件^[10-12,14-17],因此本文对铜钛复合管绕弯成形的芯模填充条件展开研究。芯模的样式有很多,大致分为4类:刚性芯模、柔性芯模、液压填充和颗粒填充。目前绕弯成形中最常用的芯模样式为刚性芯模^[18-21],其结构为芯轴-芯球式。柔性芯模填充以PU、PVC棒为代表^[12,15,22]。液压填充^[8]和颗粒填充的研究相对较少。很多文献研究了刚性芯模参数如芯头个数、芯棒伸出量等,对单层管绕弯成形截面畸变和壁厚减薄率的影响。如蒋兰芳等^[19]研究表明,截面椭圆度和壁厚减薄率随着芯头个数、芯头尺寸和芯棒支撑角度的增加而减小。刘志文^[23]和巫师珍等^[24]研究了有无芯模、芯棒伸出量和芯头个数等条件对薄壁钢管弯曲成形截面畸变、壁厚减

薄的影响规律,发现采用芯棒支撑可以有效地控制弯曲成形中管材的截面扁化,当芯棒伸出量为1/4~1/3管内径、芯头个数为2~4时,管材的弯曲成形质量最好。Zhang等^[25]比较了双脊矩形管绕弯成形刚性芯模和PVC芯模填充结果,发现刚性芯模可以有效地控制双脊高度变形,而PVC芯模可以有效地控制截面凹槽变形。综合以上研究,刚性芯模的芯棒伸出量、芯头个数等参数,对控制单层管绕弯成形的截面变形和壁厚减薄有重要作用;PVC芯模在单层管弯曲成形中同样能够发挥重要的填充作用。因此,本文借鉴上述研究成果,针对铜钛复合管绕弯成形的刚性芯模填充和PVC芯模填充展开研究。

本文基于所建铜钛复合管绕弯成形有限元模型^[18],研究了刚性芯模参数对复合管截面畸变和壁厚减薄的影响规律,并对比了刚性芯模填充和弹性芯模填充对复合管截面畸变和壁厚减薄的作用,给出了不同参考因素下的最佳芯模填充建议,以促进双金属复合管绕弯成形研究的进展,从芯模填充的角度为双金属复合管塑性弯曲工艺的缺陷控制提供理论指导,为相关研究提

供较好的借鉴。

铜钛复合管绕弯成形有限元模型建立

1 截面畸变和壁厚减薄率描述

铜钛复合管绕弯成形结束后,横截面通常存在扁化(畸变),如图1(a)所示,表现为管材直径沿截面纵向缩短,沿截面横向拉伸。由于截面纵向变形最为严重,因此选取截面纵对称线上直径变化描述截面畸变:

$$\Delta\delta_i = \frac{d_0 - \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}}{d_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, d_0 是复合管T2基管(TA2覆管)原始直径, i 是沿基管(覆管)弯曲方向的代表节点(代表横截面), (x_i, y_i) 和 (x'_i, y'_i) 分别是 i 节点上的坐标,如图1(b)所示。

选取截面纵对称线上基管(覆管)上弯曲层的壁厚变化,计算减薄率,如式(2)所示:

$$\Delta t_i = \frac{t_0 - t'_i}{t_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, t_0 和 t'_i 分别是复合管基管(覆管)原始壁厚和弯曲后壁厚。

2 铜钛复合管绕弯成形有限元模型

材料的本构模型采用各向同性屈服准则和材料硬化模型,其屈服条

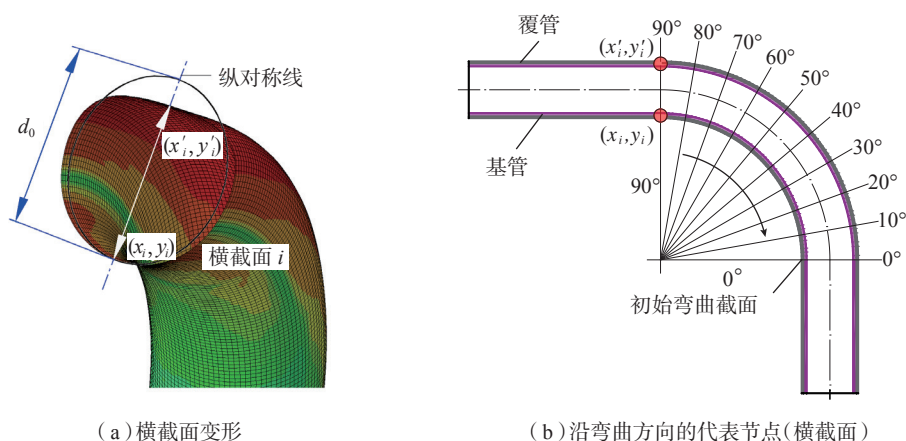


图1 复合管绕弯成形后横截面变形情况

Fig.1 Deformation of cross-section of composite tube after rotary-draw bending

件 f 为

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} s : s - K(\bar{\varepsilon}^p)^n = 0 \quad (3)$$

式中, s 为偏应力, $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变, K 和 n 是材料常数,通过单向拉伸试验获得。铜钛复合管的材料性能参数和几何尺寸如表1所示。

选用经典库伦摩擦模型描述双金属复合管与模具之间的摩擦条件,以及覆管与基管之间的接触关系;双金属复合管的网格采用S4R壳单元;最终基于ABAQUS/Explicit有限元模拟平台建立了铜钛复合管绕弯成形有限元模型,如图2^[18]所示,该模型对截面畸变和回弹的平均预测误差分别为24.20%和4.16%,因此是可靠的^[18]。

芯模建模及模拟参数

1 刚性芯模

刚性芯模包括两部分,即芯棒和芯头,有限元建模如图3所示,采用R3D4网格单元。芯棒与芯头,芯头与芯头之间采用Join+Rotation链接。芯模参数包括芯棒伸出量和芯头个数,结合生产过程中缺陷分析,其研究范围如表2所示。

2 弹性芯模

弹性芯模选用文献[15,25]中,应用于矩形管和双脊矩形管绕弯成形的PVC芯棒,其密度为1.22g/cm³,弹性模量为2395MPa,拉伸、压缩应力应变曲线如图4所示^[15]。芯模在有限元模型中被定义为弹塑性变形体,网格单元采用C3D8R,材料本构模型是压敏的,其屈服条件 f 表达如式(4)。

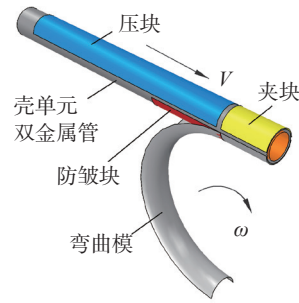


图2 铜钛双金属复合管绕弯有限元模型

Fig.2 FE model of rotary-draw bending of copper-titanium bimetallic composite tube

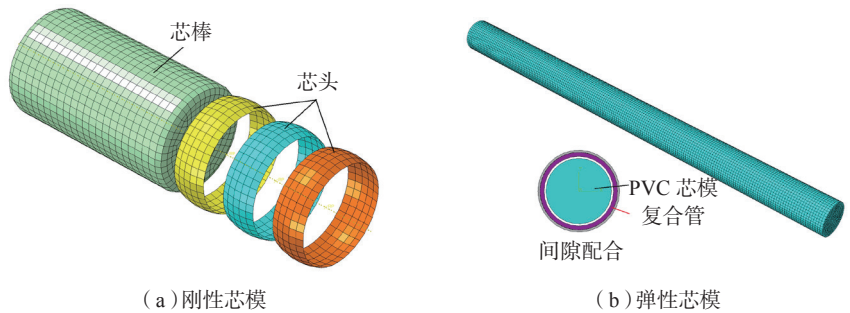


图3 芯模

Fig.3 Mandrel

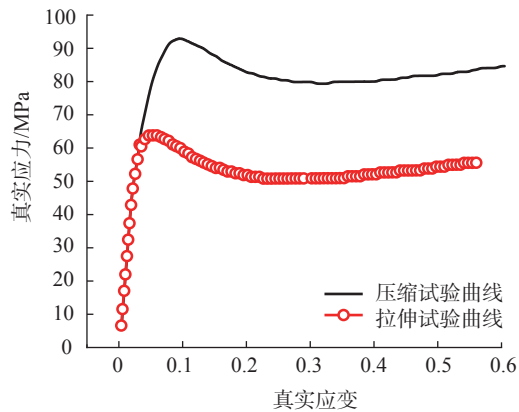


图4 弹性芯模拉伸、压缩应力-应变曲线

Fig.4 Tensile and compressive stress-strain curves of elastic mandrel

表1 铜钛复合管材料力学性能参数和几何尺寸

Table 1 Mechanical property parameters and geometric dimensions of copper-titanium composite tube materials

管层	外径/mm × 厚度/mm	弹性模量 E/GPa	强度系数 K/MPa	硬化指数 n
T2 内层基管	18 × 2	620.92	409.74	0.165
TA2 外层覆管	20 × 1	853.30	717.18	0.192

表2 刚性芯模参数研究范围

Table 2 Research scope of rigid mandrel parameters

芯棒伸出量/mm	芯头个数
3	无填充
7	1
11	2
15	③

注：③为研究其他变量时的基础模拟值。

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} s : s - \sigma_C \sigma_T + (\sigma_C - \sigma_T) \sigma_{kk} = 0 \quad (4)$$

式中, $\sigma_{kk} = \delta_{ij} \sigma_{ij}$; σ_C 和 σ_T 分别是 PVC 材料的压缩应力和拉伸应力, 与等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 之间的关系式通过拟合图 4 中应力-应变曲线获得。此外, PVC 材料本构模型采用了非关联流动法则。最终建立 PVC 材料有限元模型如图 3 (b) 所示。为了便于弯曲后取出, PVC 芯模与管坯之间采用间隙配合, 间隙设定为 0.1mm。

3 模拟的基本条件

模拟的基本参数, 如模具的运动速度、间隙、弯曲半径等, 如表 3 所示, 其中除夹块以外的其他模块与管坯间摩擦系数值, 由摩擦试验获得。

结果与讨论

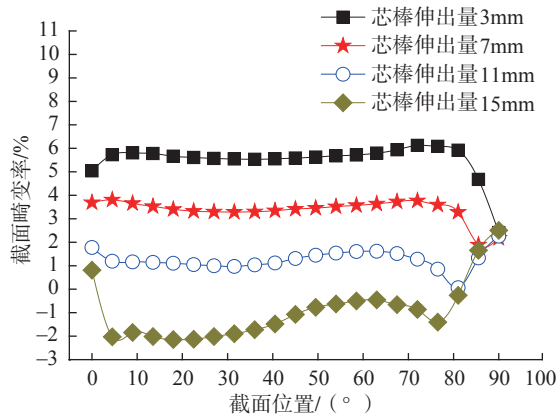
1 芯棒伸出量对截面畸变和壁厚减薄率的影响

由图 5 可以看出, 随着芯棒伸出量的增大, 双金属复合弯管的基、覆管的截面畸变量逐渐减小。当芯棒伸出量为 3mm 时, 基、覆管有最大截面畸变量, 分别为 6.12% 和 5.04%。当芯棒伸出量为 11mm 时, 基管的平均截面畸变量最小, 值为 1.26%。当芯棒伸出量为 15mm 时, 覆管的平均截面畸变量最小, 值为 0.89%。然而当芯棒伸出量为 11mm 时, 复合管弯曲过程中发生了轻微的鼓包, 如图 6 所示。当芯棒伸出量为 15mm 时, 复合管弯曲过程中发生了严重的鼓包。因此为了降低复合管的截面畸变率,

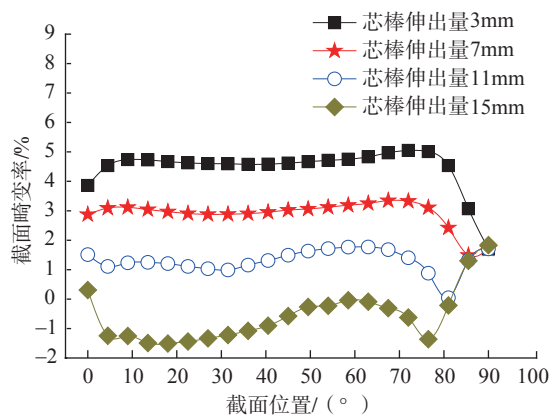
建议芯棒伸出量 ≤ 7 mm, 且在此范围内伸出越长越好。此外, 由图 5 中数据可知, 芯棒伸出量对基、覆管截面畸变的影响规律基本一致, 但基管

的截面畸变率更高。因此, 当基覆管间截面畸变率差距超过一定程度后, 管材将出现分层现象。

图 7 研究了不同芯棒伸出量对



(a) 基管



(b) 覆管

图5 不同芯棒伸出量下复合管截面畸变的分布曲线

Fig.5 Distribution curves of cross-section distortion with different mandrel extensions

表3 有限元模拟参数

Table 3 Finite element simulation parameters

模拟参数	数值
弯曲半径/mm	60
弯曲角度/(°)	90
弯曲角速度/(rad·s ⁻¹)	0.5
侧推速度/(mm·s ⁻¹)	30
夹块-管坯摩擦系数	0.57 ^[26-27]
其他模块-管坯摩擦系数	0.18
覆管-基管摩擦系数	0.46 ^[18]
芯模-管坯摩擦系数	0.02
管坯与模具间隙/mm	0~0.2

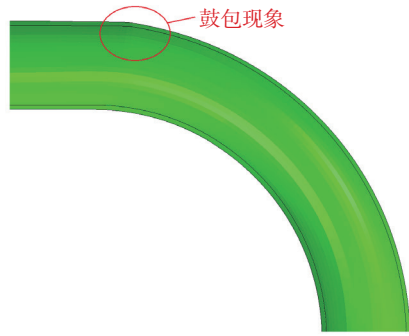
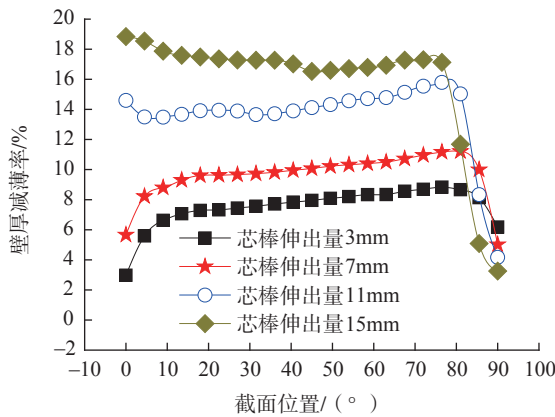
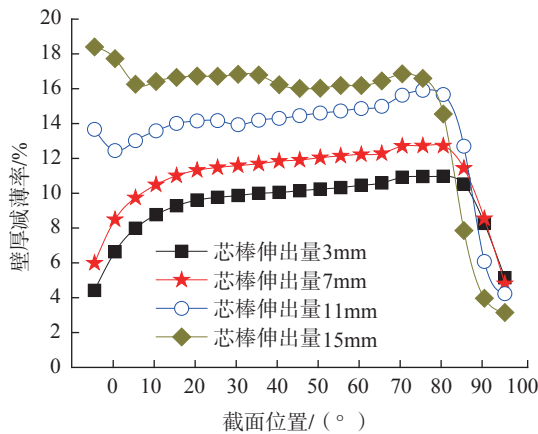


图6 芯棒伸出量为11mm时复合管发生鼓包

Fig.6 Bulging of the composite tube occurs when the mandrel extension is 11mm



(a) 基管



(b) 覆管

图7 不同芯棒伸出量下复合管壁厚减薄率的分布曲线

Fig.7 Distribution curves of wall thickness reduction rate with different mandrel extensions

复合管绕弯成形壁厚减薄率的作用规律。可以看到随着芯棒伸出量的增大,基、覆管的壁厚减薄率逐渐增大。当芯棒伸出量分别为3mm、7mm、11mm、15mm时,基管的最大壁厚减薄率分别为8.81%、11.20%、

15.8%和18.91%,覆管的最大壁厚减薄率分别为10.98%、12.77%、15.97%和18.84%。由数据可知,为了降低壁厚减薄率,芯棒伸出量越小越好。又由于芯棒伸出量为3mm和7mm时,最大壁厚减薄率相差只有2.39%(基

管)和1.79%(覆管),综合图5~7的研究结果得出,芯棒伸出量为7mm时铜钛复合管绕弯成形质量最好。此外可以看到芯棒伸出量对基、覆管的作用规律基本一致。

2 芯头个数对截面畸变和壁厚减薄率的影响

图8(a)和(b)研究了芯头个数对截面畸变的作用,可以看到没有芯模填充时,基、覆管截面畸变最大值接近10%。使用芯模填充后,截面畸变显著降低。芯头个数分别为1~3时,基管(覆管)的截面畸变率沿弯曲方向的分布非常接近,最大值均低于4%。这是由于弯曲过程中芯头起到径向支撑的作用,同时芯头的存在使弯曲过程中复合管受到的切向拉应力增大,进而降低截面畸变率。弯曲角度在35°~70°之间时,芯头个数为3的控制截面畸变效果最佳。图8(c)对比了基、覆管无芯模填充情况下和3芯头填充情况下的截面畸变率,可以看到无芯模填充时,基、覆管的截面畸变率差距相对较大,增加了复合管分层的风险;而有芯模填充时,基、覆管截面畸变率相差较小,这也相对降低了复合管分层的风险。

从图9可以看出,没有芯模支撑的时候,基、覆管的壁厚减薄率明显低于存在芯模填充的情况,最大差值可以达到6%左右。芯头个数分别为1~3时,基管(覆管)的壁厚减薄率沿弯曲方向的分布非常接近,最大壁厚减薄率分别为11%和13%。综合图8、图9的研究,当采用刚性芯模填充控制复合管绕弯截面畸变时,一定要考虑芯模对复合管壁厚减薄率的影响,综合比较可得到3芯头填充时效果较好。

3 弹性芯模对截面畸变和壁厚减薄率的影响

图10比较了弹性芯模和3芯头刚性芯模对基、覆管弯曲截面畸变的影响。可知,刚性芯模填充时,基、覆管的最大截面畸变率分别为3.88%

和 3.24%；弹性芯模填充时，基、覆管的最大截面畸变率分别为 4.49% 和 4.27%；由此可见刚性芯模较之弹性

芯模可以更好地控制钛铜双金属复合管的截面畸变，但最大差距只有 1.03%，效果并不明显。弹性芯模填

充时，截面畸变沿弯曲方向分布更均匀，这也意味着弹性芯模填充时，复合管弯曲方向的应力分布更为均

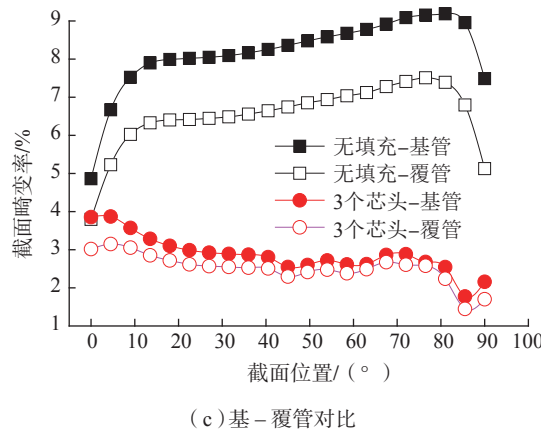
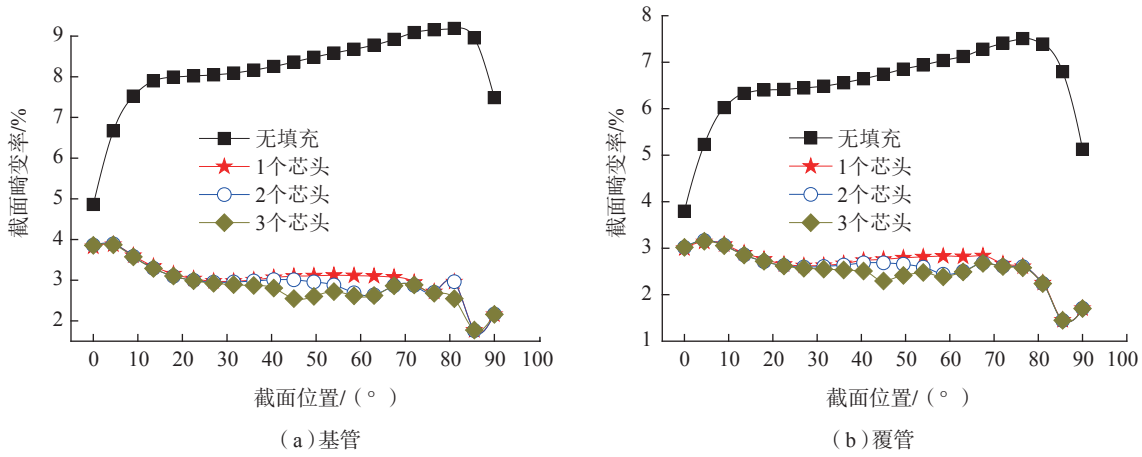


图8 不同芯头个数下复合管截面畸变的分布曲线

Fig.8 Distribution curves of cross-section distortion with different core numbers

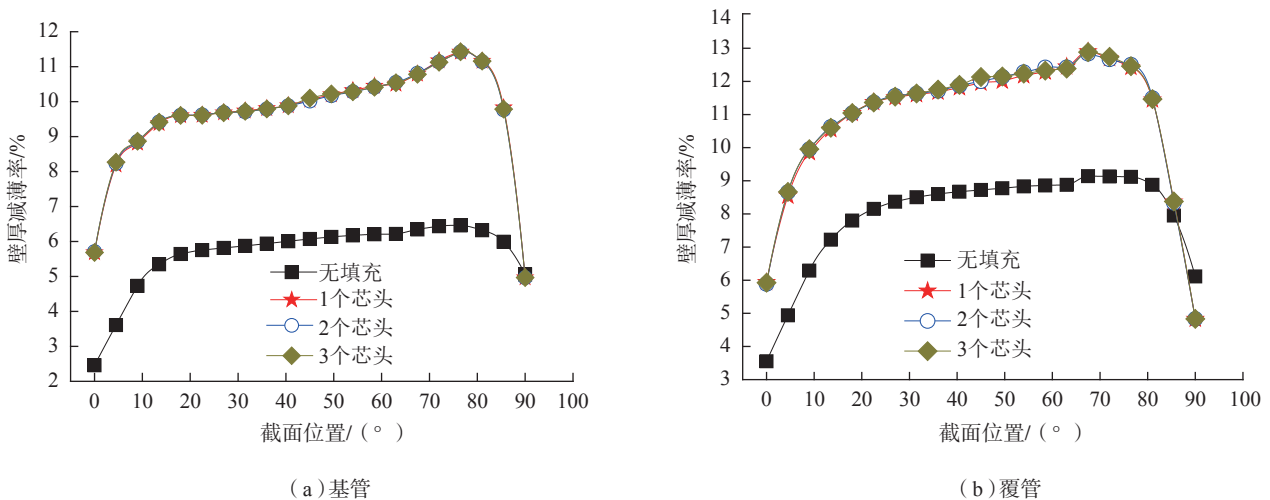


图9 不同芯头个数下复合管壁厚减薄率的分布曲线

Fig.9 Distribution curves of wall thickness reduction rate with different core numbers

匀,可以在一定程度上抑制钛铜双金属复合管的基、覆管分层。

图 11 比较了弹性芯模和 3 芯头刚性芯模对基、覆管弯曲壁厚减薄率的影响。可知,刚性芯模填充时,基、覆管的最大壁厚减薄率分别为 11.43% 和 12.88%;弹性芯模填充时,基、覆管的最大壁厚减薄率分别为 8.16% 和 10.04%。由此可见,弹性芯模可以更好地控制钛铜双金属复合管的壁厚减薄率,最大差距有 3.27%,效果比较明显。综合图 10、图 11 的研究数据,认为弹性芯模对双金属复合管的填充效果更好。

结论

(1) 随着芯棒伸出量的增加,双

金属复合管的基、覆管截面畸变率减小,而壁厚减薄率增加;为了降低复合管的截面畸变率,建议芯棒伸出量 $\leq 7\text{mm}$,且在此范围内伸出越长越好(当芯模伸出量 $\geq 11\text{mm}$ 时,复合管发生鼓包);为了降低壁厚减薄率,芯棒伸出量越小越好,由于芯棒伸出量为 3mm 和 7mm 时,最大壁厚减薄率相差只有 2.39%(基管)和 1.79%(覆管);综合考虑,最佳芯棒伸出量为 7mm。芯棒伸出量对基、覆管截面畸变的影响规律基本一致,但基管的截面畸变率更高,当基、覆管间截面畸变率差距超过一定程度后,管材将出现分层现象。

(2) 刚性芯模填充可以有效控制截面畸变,且芯头个数为 3 时,截面畸变率最小,但是芯模填充可以增

加壁厚减薄率;因此采用刚性芯模填充控制复合管绕弯截面畸变时,一定要考虑芯模对复合管壁厚减薄率的影响,并根据实际生产要求和管材尺寸结构灵活选择填充状态。无芯模填充时,基、覆管的截面畸变率差距相对较多,增加了复合管分层的风险,而有芯模填充时,基、覆管截面畸变率相差较小,这也相对降低了复合管分层的风险。

(3) 弹性芯模填充时,基、覆管的最大截面畸变率分别为 4.49% 和 4.27%,截面畸变率沿弯曲方向的分布较之刚性芯模均匀;刚性芯模较之弹性芯模可以更好地控制钛铜双金属复合管的截面畸变,但最大差距只有 1.03%,效果并不明显。弹性芯模填充时,基、覆管的最大壁厚减薄率分别为 8.16% 和 10.04%;弹性芯模较之刚性芯模可以更好地控制钛铜双金属复合管的壁厚减薄率,最大差距为 3.27%,效果比较明显。综合考虑截面畸变和壁厚减薄,弹性芯模对双金属复合管的填充效果更好。弹性芯模填充时,截面畸变沿弯曲方向的分布更均匀,这也意味着弹性芯模可以更好地抑制钛铜双金属复合管的基、覆管分层。

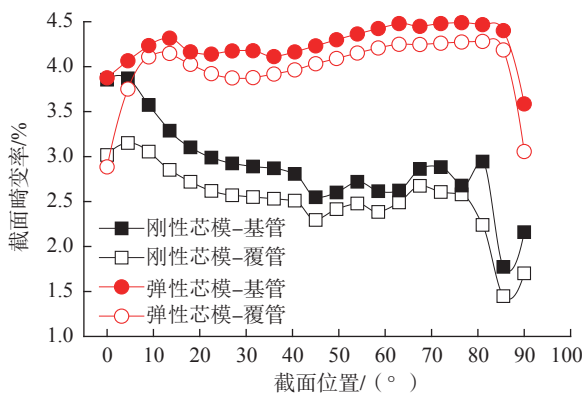


图10 不同芯模下复合管截面畸变的分布曲线

Fig.10 Distribution curves of cross-section distortion with different mandrels

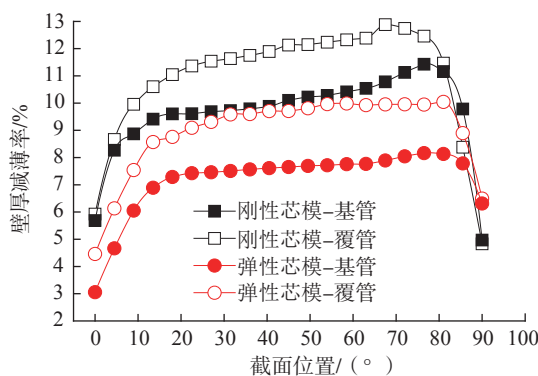


图11 不同芯模下复合管壁厚减薄率的分布曲线

Fig.11 Distribution curves of wall thickness reduction rate with different mandrels

参考文献

[1] 朱英霞,熊杭锋,陈炜,等. 异质双金属复合管的弯曲工艺研究进展[J]. 精密成形工程, 2016, 8(6): 8-14.

ZHU Yingxia, XIONG Hangfeng, CHEN Wei, et al. Research progress for bending process of dissimilar material bimetallic composite tube[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6): 8-14.

[2] 刘新华,邹文江,付华栋,等. 铜/钛双金属复合管的热旋锻制备及其界面组织性能[J]. 稀有金属, 2017, 41(4): 364-370.

LIU Xinhua, ZOU Wenjiang, FU Huadong, et al. Cu/Ti bimetal composite pipe fabricated by heating rotary swaging forming and its interface, microstructure and properties[J]. Chinese

Journal of Rare Metals, 2017, 41(4): 364–370.

[3] JIANG C P, CHEN C C. Grain size effect on the springback behavior of the microtube in the press bending process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(5): 512–518.

[4] OH I Y, HAN S W, WOO Y Y, et al. Tubular blank design to fabricate an elbow tube by a push-bending process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 260: 112–122.

[5] XU X F, WU K W, WU Y W, et al. Push-bending method development of thin-walled tube with relative bending radius of 1 using sectional elastomers as mandrel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(1–4): 995–1008.

[6] SUI Z, CAI Z Y, LAN Y W, et al. Simulation and software design of continuous flexible roll bending process for three dimensional surface parts[J]. Materials & Design, 2014, 54: 498–506.

[7] SHEN H W, LIU Y L, QI H Y, et al. Relations between the stress components and cross-sectional distortion of thin-walled rectangular waveguide tube in rotary draw bending process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1–4): 651–662.

[8] LĂZĂRESCU L. Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1–4): 85–91.

[9] LIAO J, XUE X, LEE M G, et al. On twist springback prediction of asymmetric tube in rotary draw bending with different constitutive models[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 89: 311–322.

[10] 吕海源. 金属复合管弯曲过程数值模拟与实验验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

LÜ Haiyuan. Numerical simulation and experimental verification of two-layered tube bending[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.

[11] 郭训忠, 陶杰, 唐巧生, 等. TA1–Al 双金属复合管冷推弯模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1053–1062.

GUO Xunzhong, TAO Jie, TANG Qiaosheng, et al. Cold push-bending simulation and experiment on TA1–Al bimetallic clad tube[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4): 1053–1062.

[12] 郭训忠, 陶杰, 王文涛, 等. 芯棒形式对纯铝–316L 不锈钢复合管冷推弯成形的影响研究[C]// 中国金属学会青年委员会, 北京机械工程学会. 第三届层压金属复合材料开发与应用学术研讨会文集. 北京: 中国金属学会青年委员会, 北京机械工程学会, 2012.

GUO Xunzhong, TAO Jie, WANG Wentao, et al. Effect of the mandrel style on the cold push-bending of Al–316SS clad tube [C]// Youth Committee of China metal society, Beijing Mechanical Engineering Society. Collection of the Third Symposium on the Development and Application of Laminated Metal Composite Materials. Beijing: Youth Committee of China Metal Society, Beijing Mechanical Engineering Society, 2012.

[13] GUO X Z, WEI W B, XU Y, et al. Wall thickness distribution of Cu–Al bimetallic tube based on free bending process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 150: 12–19.

[14] ZHU Y X, LIU Y L, YANG H. Sensitivity of springback and section deformation to process parameters in rotary draw bending of thin-walled rectangular H96 brass tube[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(9): 2233–2240.

[15] ZHU Y X, LIU Y L, LI H P, et al. Comparison between the effects of PVC mandrel and mandrel-cores die on the forming quality of bending rectangular H96 tube[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 76: 132–143.

[16] 李海平, 刘郁丽, 朱英霞, 等. 芯模对双脊矩形管绕弯成形截面畸变的影响[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(3): 46–53.

LI Haiping, LIU Yuli, ZHU Yingxia, et al. Influence of mandrel on cross section deformation of double-ridge rectangular tube in rotary-draw bending process[J]. Materials Science and Technology, 2014, 22(3): 46–53.

[17] ZHU Y X, LIU Y L, YANG H. Effect of mandrel-cores on springback and sectional deformation of rectangular H96 tube

NC bending[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1–4): 351–360.

[18] ZHU Y X, CHEN W, TU W B, et al. Three-dimensional finite element modeling of rotary-draw bending of copper-titanium composite tube[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5–6): 2377–2389.

[19] 蒋兰芳, 王亚群, 林姚辰, 等. 芯棒参数对超薄壁管数控绕弯成形质量的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 1–13.

JIANG Lanfang, WANG Yaqun, LIN Yaochen, et al. Effect of mandrel parameters on NC RDB forming quality of ultra-thin wall tube[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 1–13.

[20] XU J, YANG H, ZHAN M, et al. Design and optimisation of mandrel parameters for thin walled aluminium alloy tube NC bending[J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(S1): 365–369.

[21] SALEM M, FARZIN M, KADKHODAEI M, et al. A chain link mandrel for rotary draw bending: Experimental and finite element study of operation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5–8): 1071–1080.

[22] NAKAJIMA K, UTSUMI N, YOSHIDA M. Suppressing method of the cross section deformation for extruded square tubes in press bending[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(6): 965–970.

[23] 刘志文. 芯轴参数对 Q235A 大口径薄壁钢管绕弯成形质量的影响[C]// 中国机械工程学会塑性工程分会. 第十五届全国塑性工程学会年会暨第七届全球华人塑性加工技术交流会学术会议论文集. 北京: 中国机械工程学会塑性工程分会, 2017: 56–65.

LIU Zhiwen. Influence of mandrel parameters on bending forming quality of Q235A thin-wall tubes with large diameter [C]// Plastic Engineering Branch of Chinese Mechanical Engineering Society. Proceedings of the 15th Annual Meeting of China Society of Plastic Engineering and the 7th Global Chinese Plastic Processing Technology Exchange Conference. Beijing: Plastic Engineering Branch of Chinese Mechanical Engineering Society,

2017: 56-65.

[24] 巫帅珍, 王雅萍, 朱目成, 等. 芯棒参数对薄壁管绕弯成形质量影响分析[J]. 西南科技大学学报, 2016, 31(2): 99-105.

WU Shuaizhen, WANG Yaping, ZHU Mucheng, et al. Analysis of mandrel parameters on rotary bending quality of thin-walled tube[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2016, 31(2): 99-105.

[25] ZHANG H L, LIU Y L, YANG H. Deformation behaviors of double-ridged rectangular H96 tube in rotary draw bending under different mandrel types[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9-12): 1569-1580.

[26] GEARING B P, MOON H S, ANAND L. A plasticity model for interface

friction: application to sheet metal forming[J]. International Journal of Plasticity, 2001,17(2): 237-271.

[27] HIBBIT KARLSON AND SORENSEN INC. ABAQUS version 6.12 documentation[M]. USA: ABAQUS Software, 2012.

通讯作者: 朱英霞, E-mail: xial66109@163.com。

Simulation Research on Effect of Mandrel Filling on Section Distortion and Wall Thickness Reduction of Rotary-Draw Bending of Copper-Titanium Composite Tube

ZHU Yingxia, WANG Yun, WAN Miaomiao, SHI Wei, TU Wenbin
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

[ABSTRACT] In order to improve the precision of rotary-draw bending of copper-titanium composite tube, the effects of rigid mandrel parameters on section distortion and wall thickness thinning of the composite tube were studied, based on the established finite element model. The effects of rigid mandrel were compared with that of elastic mandrel. Research results show that: (1) with the increase of the extension amount of the rigid mandrel, the section distortion rate of the base covered tube of the bimetallic composite tube decreases gradually, and the wall thickness reduction rate increases gradually. The optimal extension amount of the mandrel is 7mm. (2) Compared with the coreless filling, the section distortion significantly reduces with the rigid mandrel filling, but the wall thickness thinning rate increases. When controlling the section distortion, the influence of the mandrel on the thinning rate of the composite tube should be considered, and the filling condition should be selected flexibly according to the actual production requirements and the tube size and structure. (3) When the elastic mandrel is filled, the section distortion rate along the bending direction is more uniform than that of the rigid mandrel. Compared with the elastic mandrel, the rigid mandrel can control the section distortion of the composite tube better, but the maximum difference is only 1.13%. The controlling effect of wall thickness reduction rate of elastic mandrel is better than that of rigid mandrel, and the maximum difference is 3.27%. Considering the cross section distortion and the wall thickness reduction, the filling effect of the elastic mandrel on the bimetallic composite tube is better.

Keywords: Bimetallic composite tube; Plastic bending; Mandrel filling; Finite element analysis

(责编 大漠)