

基于起皱发生的铜钛双金属复合管 小半径绕弯成形极限研究

万苗苗, 朱英霞, 陈 蓉, 涂文斌

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为了得到成形质量优良、小相对弯曲半径($R/D_2 \leq 2$, D_2 是覆管外径)的铜钛双金属复合管, 基于 ABAQUS/Explicit 有限元平台, 建立了铜钛双金属复合管绕弯-回弹有限元模型, 对铜钛双金属复合管小半径绕弯成形的起皱极限进行有限元模拟和分析。即在刚性芯模、不同芯头个数填充下, 得到防止复合管起皱发生的最小相对弯曲半径 $(R/D_2)_{\min}$ 。结果表明, 基、覆管填充区的截面畸变率(φ)均明显小于非填充区, 且填充区的 φ 随 R/D_2 减小略有增大, 非填充区的 φ 随 R/D_2 减小而明显增大, 这表明非填充区的截面起皱趋势明显高于填充区; $R/D_2 = 1.76$ 为起皱发生的分界线, 当 $R/D_2 = 1.76$ 时, 1 个芯头填充不满足复合管成形质量的要求; 2 个和 3 个芯头填充满足成形质量要求, 且 2 个芯头填充效果较 3 个芯头好; 当 $R/D_2 = 1.32$ 时, 3 种填充条件都会出现起皱, 不满足成形质量要求。为了确定最小相对弯曲半径, 进一步分析了 2 个芯头填充、 $R/D_2 = 1.71$ 和 $R/D_2 = 1.74$ 时复合管的起皱情况, 发现起皱个数 $N=1$, φ_{\max} 均超过 5%, 不满足成形精度要求。综上, 铜钛双金属复合管的成形极限为 2 个芯头填充、 $(R/D_2)_{\min} = 1.76$ 。

关键词: 双金属复合管; 绕弯成形; 起皱; 成形极限; 有限元分析

中图分类号: TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)03-0266-06

引用格式: 万苗苗, 朱英霞, 陈蓉, 等. 基于起皱发生的铜钛双金属复合管小半径绕弯成形极限研究[J]. 中国材料进展, 2023, 42(3): 266-271.

WAN M M, ZHU Y X, CHEN R, *et al.* Research on the Forming Limit of Copper-Titanium Bimetallic Composite Tube with Small Radius of Rotary-Draw Bending Based on Wrinkling[J]. Materials China, 2023, 42(3): 266-271.

Research on the Forming Limit of Copper-Titanium Bimetallic Composite Tube with Small Radius of Rotary-Draw Bending Based on Wrinkling

WAN Miaomiao, ZHU Yingxia, CHEN Rong, TU Wenbin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to obtain the copper-titanium bimetallic composite tube with excellent forming quality and small relative bending radius ($R/D_2 \leq 2$, D_2 is the outer diameter of the covered tube), a finite element model for bending-springback process of copper-titanium bimetallic composite tube is established based on the ABAQUS/Explicit finite element platform in this paper, and the wrinkling limit of the copper-titanium bimetallic composite tube with small radius bending is simulated and analyzed by finite element method. That is, with a rigid mandrel and different numbers of mandrel cores filling, the minimum relative bending radius $(R/D_2)_{\min}$ to prevent wrinkling is obtained. The results show that, the cross-section deformation rates φ in both the base tube and covered tube filling zones are significantly smaller than those in the non-filling zone. The φ in the filling zone slightly increased with the decrease of R/D_2 , while the φ in the non-filling zone significantly increased with the decrease of R/D_2 . This indicates that the tendency for wrinkling in the cross-section of the non-filling zone

is significantly higher than that in the filling zone. $R/D_2 = 1.76$ is the turning point for wrinkling occurrence. When $R/D_2 = 1.76$, one core filling does not meet the forming quality requirements. When two and three cores are filled, it meets the requirements of forming quality, and the filling with two cores is better than three cores. When $R/D_2 = 1.32$, wrinkles will appear under the three filling conditions, which does not meet the forming quality requirements. To determine the minimum relative bending radius, further

收稿日期: 2021-06-19 修回日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51601070); 国家自然科学基金面上项目(51875263)

第一作者: 万苗苗, 女, 1995 年生, 硕士研究生

通讯作者: 朱英霞, 女, 1986 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: xia166109@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202106018

analysis was carried out on the wrinkling of the composite pipe with two mandrel cores filling and $R/D_2 = 1.71$, $R/D_2 = 1.74$. It is found that number of wrinkles $N=1$ and φ_{\max} exceeded 5%, which does not meet the forming quality requirement. Therefore, the forming limit of the copper-titanium bimetallic composite tube is two mandrel cores filled and $(R/D_2)_{\min} = 1.76$.

Key words: bimetallic composite tube; rotary-draw bending; wrinkling; forming limit; finite element analysis

1 前言

铜钛双金属复合管是将铜、钛这两种管材通过机械工艺或冶金工艺结合而成的复合管。铜管较厚, 衬于底层起支撑作用, 称之为“基管”; 钛管较薄, 包覆在外层, 称为“覆管”^[1]。相比于单一材料的管材, 铜钛双金属复合管综合了铜的导电性好、抗磨损、耐腐蚀等优良性能, 以及钛的高强度、耐酸、抗震等优点, 广泛应用于海军舰船、滨海电站和蒸汽管路等工业领域^[2]。小弯曲半径的铜钛双金属复合管由于占据空间小、结构紧凑、可以显著提高管路系统装配柔性等特点, 在现代工业中具有较高的应用需求。但是, 铜钛双金属复合管在小半径绕弯成形过程中不可避免地会产生起皱、截面畸变等成形缺陷。因此, 针对起皱发生的铜钛双金属复合管小半径绕弯成形极限研究在当下变得尤为重要。

目前, 基于起皱分析的双金属复合管绕弯成形极限研究较少。但是基于起皱分析的单层金属圆管绕弯成形极限研究较多^[3-7]。其中, Safdarian^[3]通过实验和数值模拟研究发现, 当工艺条件为2个芯头填充、芯棒伸出量为15 mm、助推速度为17 mm/s时, 可有效防止相对弯曲半径(R (弯曲半径)/ D (管坯外径))为4.3的BS6059钢管发生起皱和破裂, 从而获得最佳成形质量。Safdarian等^[4, 5]进一步研究发现, 随着芯头个数的增加, 起皱趋势减小, 但断裂发生的风险显著增加; 当芯头个数为2时, 模拟得到的弯曲成形质量最佳。Xu等^[6]通过模拟计算获得了避免5A02薄壁管绕弯成形过程中发生起皱的最小相对弯曲半径, 即 $(R/D)_{\min} = 1.5$ 。Zhu等^[7]发现SUS304无缝钢管起皱主要发生在弯曲成形的直管部位, 当摩擦系数为0, 且 t (壁厚)/ $D = 0.0117$ 时, 能获得避免起皱发生的最小相对弯曲半径($(R/D)_{\min} = 4$)。上述研究表明: 芯模填充始终是影响复合管绕弯成形极限的重要工艺因素; 为了避免起皱, 管材绕弯成形存在成形极限, 该极限通常可以用最小相对弯曲半径 $(R/D)_{\min}$ 表示。

然而, 在双金属复合管绕弯成形研究中, 由于基管、覆管之间存在耦合作用^[8], 起皱发生的机理以及内外层管对工艺条件的要求与单层圆管不同。本文建立了铜钛双金属复合管绕弯-回弹有限元模型, 模拟研究了芯模填充条件对铜钛双金属复合管绕弯成形起皱的影响规律, 计算获得了最佳芯模填充工艺条件, 以及避免起皱发生的最小相对弯曲半径, 为小弯曲半径双金属复合管的实

际加工生产提供了参考。

2 刚性芯模填充的绕弯-回弹全过程有限元模型建立和参数设置

2.1 建立有限元模型

本文有限元模型的建立基于作者前期的研究, 见文献[1, 9], 选取的基管材料为T2紫铜、覆管材料为TA2钛合金, 文献[1, 9]给出了有限元模型的关键建模处理技术, 并且通过实验验证了该有限元模型的可靠性。本文建立的刚性芯模填充的有限元模型如图1所示, 绕弯成形是在夹块、压块、防皱块以及弯曲模的协同作用下完成的, 刚性芯模由芯棒和芯头两部分组成, 芯棒和芯头之间、芯头和芯头之间均采用铰链+旋转的方式连接。本文的研究结果均取自弯管发生卸载回弹之后。

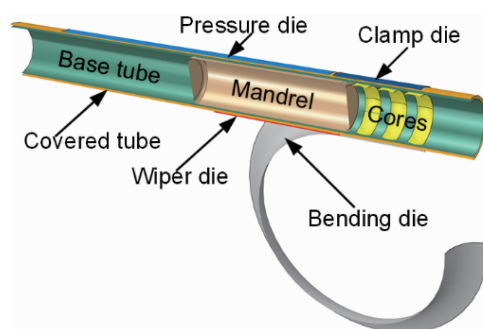


图1 铜钛双金属复合管三维有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic of finite element model of the copper-titanium bimetallic composite tube

2.2 模拟条件和参数设置

铜钛双金属复合管材料的本构模型采用各向同性屈服准则和材料硬化模型, 屈服条件如式(1)所示:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} s : s - K(\bar{\epsilon}^p)^n = 0 \quad (1)$$

式中, s 为偏应力, $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变, K 和 n 分别是基管和覆管材料的强度系数和硬化指数, 通过单向拉伸试验获得, 如表1所示。

选取库伦摩擦描述管材和模具之间的接触情况, 即:

$$f = \mu \cdot p \quad (2)$$

式中, f 为库伦摩擦力, μ 为摩擦系数, p 为接触面上的法向力。其中模块与管坯间的摩擦系数由摩擦实验获得。基管-覆管之间、管材-模具之间的接触类型选择“表面与

表 1 铜钛双金属复合管材料的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of the materials of copper-titanium bimetallic composite tube

Tube	Density ρ /($\times 10^3$ kg/m ³)	Elastic modulus E /GPa	Strength factor K /MPa	Hardening index n
T2 base tube	8.86	62.09	409.74	0.165
TA2 covered tube	4.51	85.33	717.18	0.192

表面接触”。所建有限元模型的几何参数、摩擦系数、模具-管坯间隙和侧推速度等边界条件设置见表 2。

基于本课题组前期的研究结论,见文献[10],芯头填充个数为 1~3 时,基管外径(D_1)28 mm 和覆管外径(D_2)34 mm 的铜钛双金属复合管可以完成整个绕弯过程,但是仍存在起皱、截面畸变等成形缺陷。因此,本文选择芯头填充个数为 1~3,进一步研究芯模填充条件对铜钛双金属复合管绕弯成形起皱的影响规律,从而得到防止起皱发生的最佳填充条件。为了获得避免起皱发生的铜钛双金属复合管绕弯成形极限,也即最小相对弯曲半径(R/D_2)_{min},模拟研究了 5 组相对弯曲半径,即 R/D_2 分别为 45/34, 58/34, 60/34, 75/34 和 90/34,如表 2 所示。

表 2 有限元模拟的条件

Table 2 Conditions for finite element simulation

Simulation conditions	Numerical value
Inner diameter (thickness) of base tube $D_1(t_1)$ /mm	28(2)
Outer diameter (thickness) of covered tube $D_2(t_2)$ /mm	34(1)
Bending radius R /mm	45, 58, 59, 60, 75, 90
Relative bending radius R/D_2	45/34(1.32), 58/34(1.71), 59/34(1.74), 60/34(1.76), 75/34(2.21), 90/34(2.65)
Bending angle/(°)	90
Bending angular velocity/(rad/s)	0.5
Boost speed/(mm/s)	17.5($R=45$), 29($R=58$), 29.5($R=59$), 30($R=60$), 37.5($R=75$), 45($R=90$)
Coefficient of friction between clamp die and covered tube	0.57
Coefficient of friction between other dies and covered tube	0.18
Coefficient of friction between base tube and covered tube	0.46 ^[1]
Coefficient of friction between mandrel and base tube	0.02
The gap between dies and tube/mm	0~0.2
Number of cores	1~3

2.3 双金属复合管的起皱形式

起皱是截面发生变形的特殊表现形式,主要包括内侧“褶皱”和外侧“鼓包”这两种形式,如图 2 所示。本文采用截面畸变率 φ 和起皱个数 N 来描述起皱, φ 的计算如式(3):

$$\varphi_{ji} = \frac{D_{ji} - d_{ji}}{D_{ji}} \begin{cases} i = 0^\circ \dots 90^\circ \\ j = 1, 2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, D_{ji} 表示管材的原始管径, d_{ji} 表示发生截面变形之后的管径。由式(3)可知 φ 与 N 存在如下关系:当出现 $\varphi_{i-1} < \varphi_i > \varphi_{i+1}$ 时,内侧出现一个褶皱,记作 $N_w = 1$;当出现 $\varphi_{i-1} > \varphi_i < \varphi_{i+1}$ 时,外侧出现一个鼓包,记作 $N_b = 1$,起皱个数 $N = N_w + N_b$ 。以此类推,可以通过截面畸变率判断绕弯过程中发生起皱的个数,用以判断双金属复合管的成形质量,并获得不发生起皱的最小相对弯曲半径。

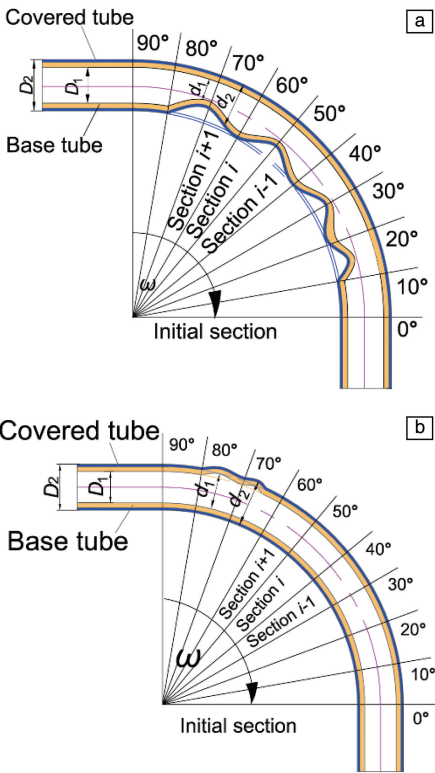


图 2 复合管的起皱形式示意图:(a)褶皱,(b)鼓包

Fig. 2 Schematic of wrinkle form of the bimetal composite tube:

(a) wrinkle, (b) bulge

3 结果与讨论

3.1 不同芯头填充个数下起皱随相对弯曲半径(R/D_2)的变化规律

基于前期针对相对弯曲半径 $R/D_2 \geq 3$ 的复合管绕弯成形的研究^[9]可知,3 个芯头填充的成形质量最佳,故本文先模拟 3 个芯头填充条件下,不同相对弯曲半径复

合管的截面畸变率的变化规律。选取4组不同相对弯曲半径(R/D_2)的复合管进行对比分析,得到基管和覆管的截面畸变率变化曲线如图3a和3b所示。由图可知,不同 R/D_2 复合管的截面畸变率随弯曲角度变化的曲线呈现出差异显著的两个区域,即非填充区和填充区。通过对比分析发现,基、覆管填充区的截面畸变率均明显小于非填充区,且填充区的截面畸变率随 R/D_2 减小略有增大,非填充区的截面畸变率随 R/D_2 减小而明显增大,这表明非填充区的截面起皱趋势明显高于填充区,且 R/D_2 越小起皱越明显。同时,还可以发现当弯曲角度大于 80° 时, $R/D_2=1.76$ 和 $R/D_2=1.32$ 的截面畸变率变化曲线出现了负值,说明 R/D_2 减小还能够增加填充区鼓包的风险,再次说明 R/D_2 越小复合管越容易起皱。此外,基管

的最大截面畸变率接近10%,覆管的最大截面畸变率小于8%,故基管的截面畸变率波动幅度较大,这表明 R/D_2 越小,基管比覆管起皱更加严重。

此外还可以看出,当 $R/D_2=1.76$ 时,起皱个数 $N_b=1$,最大截面畸变率 $\varphi_{\max}=4.85\%$,此时出现轻微鼓包(鼓包的截面畸变率 $\varphi_b<1\%$),如图4a所示。由于模拟结果与实际结果之间存在一定误差,一般认为模拟得到的截面畸变率在5%以内时,复合管满足成形质量要求。因此, $R/D_2=1.76$ 时,该复合管满足成形质量要求。当 $R/D_2=1.32$ 时,起皱个数 $N_w=3$ 、 $N_b=1$,复合管的 φ_{\max} 达到7.97%,由模拟结果(图4b)可知复合管内侧出现明显褶皱、外侧出现轻微鼓包,形状发生明显改变,极易导致基管、覆管分层,因此不满足成形质量要求。

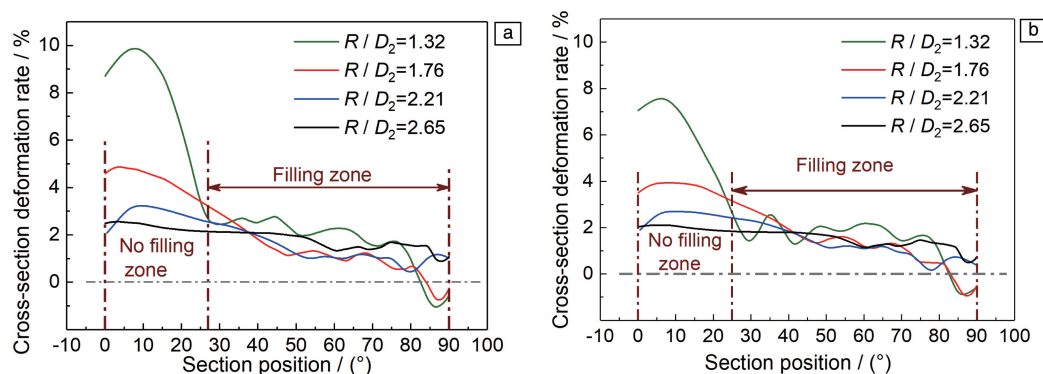


图3 3个芯头填充下不同相对弯曲半径的复合管基管(a)和覆管(b)的截面畸变率

Fig. 3 Cross-section deformation rate of base tube (a) and covered tube (b) of the bimetallic composite tubes with different relative bending radius with three cores filling

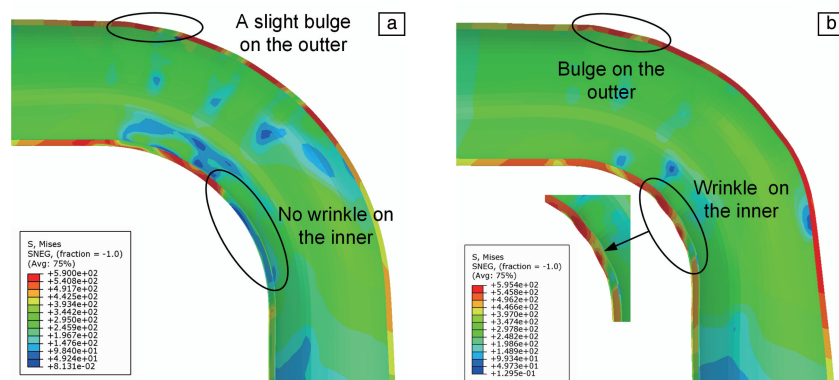


图4 不同相对弯曲半径的复合管褶皱和鼓包的模拟云图: (a) $R/D_2=1.76$, (b) $R/D_2=1.32$

Fig. 4 Simulation nephogram of wrinkling and bulge phenomenon of the bimetallic composite tubes with different relative bending radius:

(a) $R/D_2=1.76$, (b) $R/D_2=1.32$

图5为有限元计算得出的2个芯头填充下不同 R/D_2 的复合管的截面畸变率变化规律曲线。由图5可知,非填充区的截面畸变率随 R/D_2 的减小而增大。当 $R/D_2 \geq 1.76$ 时,平均截面畸变率 φ_{avg} 和最大截面畸变率 φ_{\max} 均小于

5%,且起皱个数 $N=0$,满足成形质量要求;当 $R/D_2=1.32$ 时, $N_w=1$ 、 $N_b=1$, $\varphi_{\max}=10.86\%$,基管和覆管均出现了明显的起皱,且 φ_{\max} 超过了5%,不满足成形质量要求。

图 6 为有限元计算得出的 1 个芯头填充下不同 R/D_2 的复合管的截面畸变率的变化规律曲线, 可以看出其整体变化趋势与 2 个和 3 个芯头填充时的一致, 但截面畸变率明显变大。当 $R/D_2 = 1.76$ 时, φ_{\max} 均大于 5%, 基管出现明显的外侧鼓包, 不满足成形质量要求; 当 $R/D_2 = 1.32$ 时, $N_b = 1$, 且 φ_{\max} 达到了 24%, 发生非常严重的变形, 不满足成形质量要求。

通过对比分析不同芯头填充个数的模拟结果, 发现满足成形质量要求的复合管, 其截面畸变率均随 R/D_2 的

增大而减小, 说明相对弯曲半径越大, 成形质量越佳。由图 3、图 5 以及图 6 可知, $R/D_2 = 1.76$ 为复合管绕弯成形精度是否达标的分界线。即当 $R/D_2 \leq 1.76$ 时, 1 个芯头填充得到的复合管不满足成形质量要求; 2 个和 3 个芯头填充得到的复合管能够满足成形质量要求, 且 2 个芯头的填充效果较比 3 个芯头填充的更好一些。因此, 综合考虑管材绕弯成形中壁厚减薄、拉裂和分层等潜在成形缺陷出现的情况, 芯模填充条件选择 2 芯头填充。

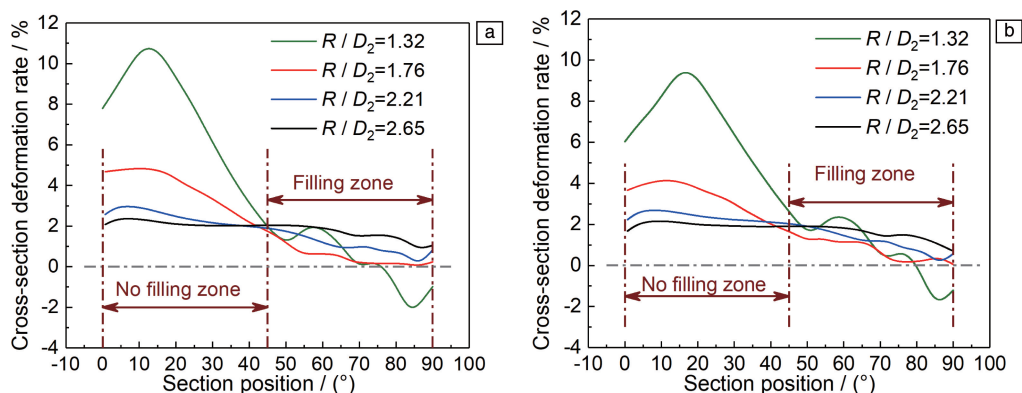


图 5 2 个芯头填充下不同相对弯曲半径的复合管基管 (a) 和覆管 (b) 的截面畸变率

Fig. 5 Cross-section deformation rate of base tube (a) and covered tube (b) of the bimetallic composite tubes with different relative bending radius with two cores filling

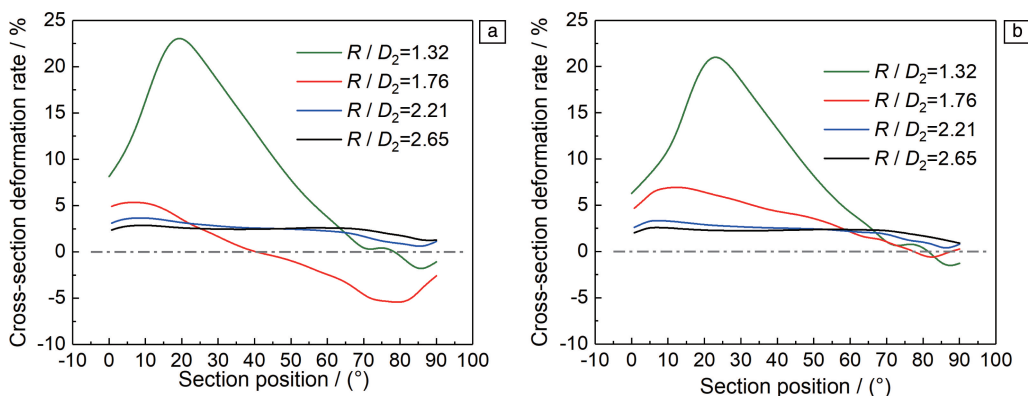


图 6 1 个芯头填充下不同相对弯曲半径的复合管基管 (a) 和覆管 (b) 的截面畸变率

Fig. 6 Cross-section deformation rate of base tube (a) and covered tube (b) of the bimetallic composite tubes with different relative bending radius with one core filling

3.2 2 个芯头填充下的成形极限确定

从上文研究得知, 小弯曲半径的复合管绕弯成形时, 2 个芯头填充的管坯成形质量最佳, $R/D_2 = 1.76$ 时没有起皱发生且成形质量好, 但不能确定 1.76 是否为最小相对弯曲半径。因此, 进一步选取 $R = 58 \text{ mm}$ ($R/D_2 = 1.71$) 和 $R = 59 \text{ mm}$ ($R/D_2 = 1.74$) 的复合管进行模拟研究, 对比分析结果如图 7a 所示。当 $R/D_2 = 1.71$ 和 $R/D_2 = 1.74$ 时, 复合管起皱个数 $N_b = 1$, φ_{\max} 均超过 5%, 不满足成形质量要求。因此, 2 个芯头填充时, 不发生起皱且满

足加工要求的最小相对弯曲半径 $(R/D_2)_{\min} = 1.76$ 。

综上所述, 在该模型下满足最佳成形质量要求的铜钛双金属复合管的成形极限为: 2 个芯头填充, 最小相对弯曲半径 $(R/D_2)_{\min} = 1.76$ 。

4 结 论

本文基于 ABAQUS/Explicit 有限元平台, 建立了铜钛双金属复合管绕弯-回弹有限元模型, 对刚性芯模、不同芯头填充个数条件下, 铜钛双金属复合管小半径绕弯

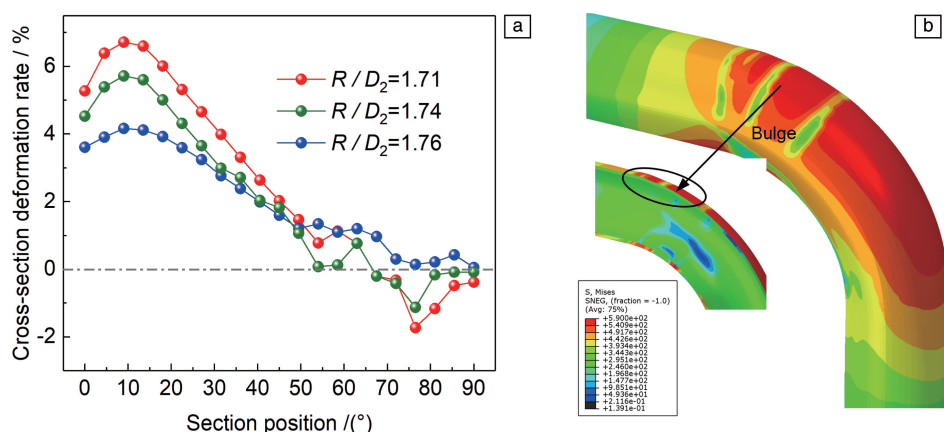


图7 $R/D_2 = 1.71$ 、 $R/D_2 = 1.74$ 和 $R/D_2 = 1.76$ 时的截面畸变率(a)； $R/D_2 = 1.71$ 的模拟云图(b)

Fig. 7 Cross-section deformation rate with $R/D_2 = 1.71$, $R/D_2 = 1.74$ and $R/D_2 = 1.76$ (a); simulation nephogram of $R/D_2 = 1.71$ (b)

成形的起皱极限进行了研究，得到以下结论：

(1) 基、覆管填充区的截面畸变率 φ 的变化曲线均出现明显的填充区和非填充区，填充区的 φ 均明显小于非填充区。且非填充区的 φ 随 R/D_2 的减小而明显增大，表明非填充区的截面起皱趋势更强，且 R/D_2 越小起皱越明显。

(2) 当 $R/D_2 = 1.76$ 时，1 个芯头填充时不满足成形质量要求；2 个和 3 个芯头填充时， $N \leq 1$ ，基、覆管的 φ_{\max} 均小于 5%，满足成形质量要求，但 2 个芯头的填充效果较 3 个芯头填充的好；当 $R/D_2 = 1.32$ 时，所有芯模填充个数下管材均有严重的起皱发生，故无法满足成形质量要求。

(3) $R/D_2 = 1.76$ 为复合管绕弯成形精度是否达的分界线，但无法确定 $R/D_2 = 1.76$ 是否为最小弯曲半径。进一步对比分析了 2 个芯头填充、 $R/D_2 = 1.71$ 和 1.74 时的起皱情况，发现此时起皱个数 $N=1$ ， φ_{\max} 均超过 5%，均不满足成形质量要求。故铜钛双金属复合管不发生起皱的成形极限为 2 个芯头填充、 $(R/D_2)_{\min} = 1.76$ 。

参考文献 References

- [1] ZHU Y X, CHEN W, TU W B, *et al.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [J], 2019, 106(5): 2377-2389.
- [2] 刘新华, 邹文江, 付华栋, 等. 稀有金属[J], 2017, 41(4): 365-372.

- LIU X H, ZOU W J, FU H D, *et al.* Rare Metals[J], 2017, 41(4): 365-372.
- [3] SAFDARIAN R. International Journal of Material Forming[J], 2019, 13(4): 493-516.
- [4] SAFDARIAN R. Journal of Mechanical Engineering Science [J], 2019, 233(16): 5568-5584.
- [5] SAFDARIAN R, KORD A. Materials Research Express[J], 2019, 6(6): 31-65.
- [6] XU X, WU K, WU Y, *et al.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology[J], 2019, 105(1-4): 995-1008.
- [7] ZHU X, OGI K, OKABE N. Materials Science Forum[J], 2019, 943: 43-47.
- [8] 朱英霞, 王匀, 陈炜, 等. 塑性工程学报[J], 2020, 27(10): 48-54.
- ZHU Y X, WANG Y, CHEN W, *et al.* Journal of Plasticity Engineering[J], 2020, 27(10): 48-54.
- [9] 朱英霞, 王匀, 万苗苗, 等. 航空制造技术[J], 2020, 63(21): 54-63.
- ZHU Y X, WANG Y, WAN M M, *et al.* Aeronautical Manufacturing Technology[J], 2020, 63(21): 54-63.
- [10] 施伟. TA2/T 钛铜双金属复合管绕弯的截面畸变及填充研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- SHI W. Study on Cross-Section Distortion and Filling of TA2/T2 Titanium-Copper Bimetallic Composite Tube in Rotary Draw Bending[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

(编辑 吴锐)