

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.04.007

# 弯管弯曲仿真中的芯棒结构建模

刘红<sup>1</sup>, 蒋兰芳<sup>2</sup>, 贾平平<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江工业大学之江学院, 浙江 杭州 310024)

**摘要:**针对芯棒结构的特殊性与多样性而引起的芯棒结构在弯管弯曲过程仿真时建模不唯一性的现象,探讨了芯棒结构的作用机理,提出了刚体球铰接、刚体销铰接、超弹体连接3种建模方法;根据同一芯棒不同分析模型的仿真效果,提出了芯头的仿真模型应根据具体的研究对象而采用不同的芯棒模型的仿真建模策略;结果表明该策略有助于提高仿真效率,避免仿真建模时的盲目性,有利于对不同要求的研究对象进行有针对性的研究。

**关键词:**弯管;芯棒结构;球铰接;销铰接;超弹体连接;仿真建模

中图分类号: TG386.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2015)04-0027-04

## Modeling Study of Mandrel Structures in the Simulation of Tube Bending

LIU Hong<sup>1</sup>, JIANG Lanfang<sup>2</sup>, JIA Pingping<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China)

**Abstract:** For the phenomenon of particularity and diversity of mandrel structure which resulting in its non-uniqueness of simulation modeling at the pipe bending process, the mechanism of mandrel structure was discussed, and three models such as rigid ball hinge, rigid pin hinge, super-elastic connecting were proposed; According to the simulation effects of different models with same mandrel, it was proposed that different mandrel models should be used depending on the research object; The results show that the strategy can help improve simulation efficiency, avoid blindness of simulation modeling, and beneficial to have specific research with different requirements.

**Key words:** bended tube; mandrel structure; rigid ball hinge; rigid pin hinge; super-elastic connecting; simulation modeling

绕弯成型 (rotary-draw-bending, RDB), 由于能够实现管件弯曲过程的数字化、精确、稳定、高效, 且绿色环保, 易于大批量生产等, 已成为满足上述高技术工业发展要求的先进塑性成型技术<sup>[1-2]</sup>。但管件弯曲成型是一个多模具约束、多成型缺陷的复杂成型过程, 容易出现减薄、起皱、截面畸变和回弹等多个质量问题。芯棒结构在管材的弯制过程中, 可对管材内壁起到一定的支撑作用, 从而改善成型缺陷<sup>[3]</sup>。根据管材成型要求的不同, 芯棒分为硬式芯棒和软式芯棒。然而如何合理地对软式芯棒进行模拟, 是目前亟须解决的一大难题。由于芯棒结构的多样性以及不同规格弯管所需芯棒结构的差异使得芯棒结构的仿真建模不尽相同。李恒<sup>[4]</sup>等人在对薄壁管数控绕弯塑性成形中摩

擦作用机理的模拟研究中, 利用运动属性为“铰接”的连接单元对芯棒和芯头以及芯头之间的接触状态进行了建模。张静静<sup>[5]</sup>等则在助推作用对大口径铝合金薄壁管数控弯曲壁厚减薄和回弹影响的研究中提到利用节点的球铰接描述芯棒和芯头及芯头间的接触状态。不过, 在 ANSYS/LS-DYNA 的显示动态程序中, 不能简单使用旋转 DOFS (UX, UY, UZ) 来模拟涉及旋转的刚体行为。杜宏伟<sup>[6]</sup>在 LS-DYNA 平台上采用杆单元连接芯头, 通过编写源代码实现了铰接, 但是给模拟带来一定的难度。本文在 ANSYS/LS-DYNA 平台上研究了芯棒结构仿真建模策略, 讨论了几种不同的建模方法, 并以弯制外径为 37.4 mm、壁厚为 1 mm 的 Q235 薄壁管材为例, 探讨了这几种芯棒结构模型的合理性

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-03-04

作者简介: 刘红 (1960), 男, 浙江杭州人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为工程分析与建模仿真、汽车配件及模具的理论与应用的研究。E-mail: hliu@zjut.edu.cn

与适用范围。

1 简化模型的建立

1.1 Q235 材料基本力学性能简介

Q235 钢属于普通碳素结构钢,含碳量 0.14% ~ 0.22%。韧性和塑性较差,但价格低廉,故广泛应用在机械结构和管道运输等场合。Q235 材料基本力学性能如表 1 所示。

表 1 Q235 材料的基本力学性能

Table 1 Basic mechanical properties of Q235

| 弹性模量<br>$E/\text{GPa}$ | 泊松比<br>$\nu$ | 延伸率<br>$\delta/\%$ | 屈服强度<br>$\sigma_s/\text{MPa}$ | 抗拉强度<br>$\sigma_b/\text{MPa}$ | 硬化<br>指数 $n$ |
|------------------------|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|
| 209                    | 0.269        | 35.7               | 235                           | 435                           | 1.178        |

1.2 模具参数及设置

参与管件绕弯成型过程的管材和模具包括:弯曲模、压块、夹紧模、防皱块和芯棒,如图 1 所示。其中弯曲模、压块、夹紧模、防皱块均设置为壳单元,并设为刚体,芯棒设置为体单元,同时也设为刚体<sup>[7]</sup>。在 ANSYS/LS-DYNA 中分别建立与之对应的几何模型并划分网格后生成单个的 part 单元。经理论公式计算以及多次弯制实验,其成型模具参数如表 2 所示。

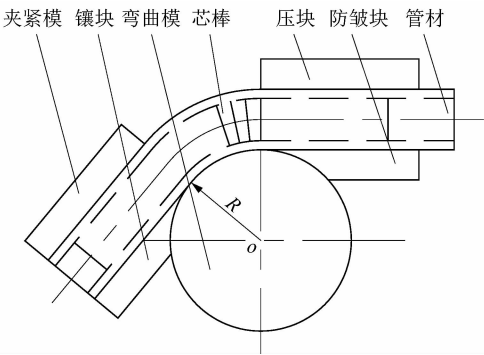


图 1 弯管模具示意图

Figure 1 Schematic diagram of bending mould

表 2 成型模具参数

Table 2 Mold parameters

| 成型<br>模具 | 长度/<br>mm | 直径/<br>mm | 厚度/<br>mm | 伸出量/<br>mm | 间距/<br>mm | 个数/<br>个 |
|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|----------|
| 夹紧模      | 100       | 38.00(内径) |           |            |           |          |
| 压块       | 420       | 38.00(内径) |           |            |           |          |
| 防皱块      | 200       | 37.76(内径) |           |            |           |          |
| 弯曲模      |           | 38.00(内径) |           |            |           |          |
| 芯棒       | 155       | 35.00     |           | 9.5        |           |          |
| 芯头       |           | 35.00     | 15        |            | 4         | 2        |
| 芯轴       |           | 18.00     |           |            |           |          |

在 ANSYS/LS-DYNA 分析中首先设置接触属性,并采用库仑摩擦模型,分别在管材内壁与芯棒,管材外壁与弯曲模弯曲部分,管材外壁与防皱块,管材夹持端

与夹紧模,管材外壁和压块内壁间根据生产中摩擦状态的不同分别建立摩擦因数为 0.05 ~ 0.30 的接触模型,另外为了实现夹紧模和管材夹紧部位之间在绕弯过程中不会产生相互滑动,建立 Rough 接触模型。

ANSYS/LS-DYNA 中笛卡尔坐标系下每个节点都有 6 个自由度,分别为沿着 X、Y、Z 坐标轴的平动和绕 X、Y、Z 坐标轴的转动,由于在建模时成型模具都已经刚体化因此在设置运动时可以选择不同形式,对于防皱块和芯棒因为在成型过程中固定不动,因此在参考点上约束全部 6 个自由度;对弯曲模和夹紧模采用刚体耦合,只释放 1 个绕 X 轴的转动,并施加 0.8 rad/s 的角速度按平稳加载方式使 2 个模具一起转动。

2 芯头模型

在薄壁管件的弯曲过程中,芯棒结构中的芯头起到了支撑管件薄壁面使其不塌陷、不起皱的作用,而芯轴的作用则是将各个芯头连接起来,以便在弯曲之后能将整个芯棒顺利取出<sup>[8]</sup>。

另一方面,从运动约束的角度看芯轴的作用是对各个芯头的运动施加了约束,即限制了芯头的随意运动,使其只能按要求的方向运动。可以看出,弯曲过程中芯轴不与管件接触产生相互作用,故管件弯曲过程的仿真基本模型并不考虑芯轴的受力与变形,只要求对芯头能提供合理的约束、保证芯头按要求的转动。按照这一要求可以给出目前常用的 2 种芯头仿真模型,即刚体球铰接模型与刚体销铰接模型,见图 2。同时图 2(c)也给出了本文将简化模型进行拓展提出的超弹体连接模型。

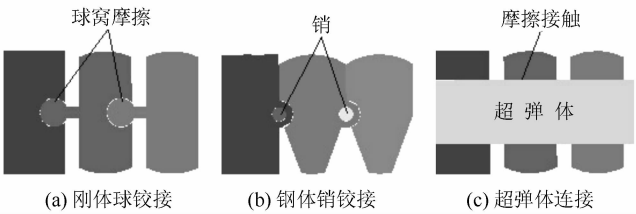


图 2 芯头模型

Figure 2 Core head model

刚体球铰接将芯轴与芯头均设置为刚体,通过球窝结构实现铰接,即限制了 3 个刚体平动自由度,芯头有 3 个转动自由度。刚体销铰接将芯轴与芯头均设置为刚体,通过销结构实现铰接,芯头只有 1 个转动自由度(与弯曲转动方向一致)。而超弹体连接将芯头设置为刚体,作为各芯头的连接单元的芯轴设置为超弹体,通过摩擦反映相互作用;超弹体提供了芯头刚体运动的自由度,可以通过调节超弹体的材料参数使芯头

获得合理的自由度。

分别将上述3个芯头模型应用到第1节所建立的Q235薄壁管材的刚体简化模型中,进行弯曲仿真计算,得到90°弯曲后管件壁厚变化云图及总的计算时间如图3~5所示。

1) 刚体球铰接模型

有限元分析软件ABAQUS可以通过设置运动副实现刚体耦合,从而构建刚体球铰接模型。而在ANSYS/LS-DYNA的显示动态求解程序中,不能使用旋转DOFS(UX,UY,UZ)来模拟涉及旋转的刚体行为<sup>[9]</sup>,因此ANSYS/LS-DYNA平台上可以通过在球窝结构处定义摩擦来实现刚体球铰接模型。相比耦合实现球铰接,摩擦方式计算量有所增加,但效果相同。图3是在ANSYS平台上的分析结果(壁厚变化率云图的对比条数据正值代表减薄率/%,负值代表增厚率/%),弯曲成型过程仿真的计算时间是3 637 s。



图3 刚体球铰接模型壁厚变化率云图  
Figure 3 Change rate of wall thickness of rigid ball hinge

2) 刚体销铰接模型

图4是刚体销铰接模型在ANSYS平台上的壁厚变化率云图,弯曲成型过程仿真的计算时间是3 363 s。

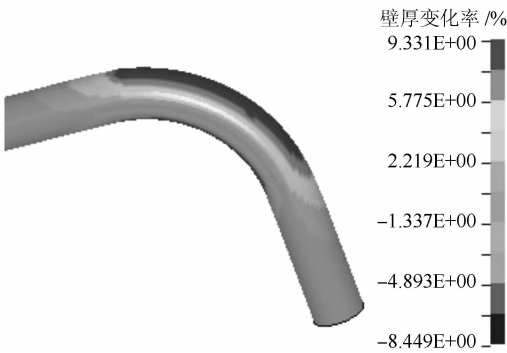


图4 刚体销铰接模型壁厚变化率云图  
Figure 4 Change rate of wall thickness of rigid pin hinge

3) 超弹体连接模型

刚体球(销)铰接模型适合关节形式的芯轴,通过铰接模型的研究有利于关节合理的间距。而对柔性较好的芯轴用超弹体来描述的优点是:比较客观地反映芯轴材料材料特性,合理地对芯头施加约束<sup>[10]</sup>。通过仿真,可以确定超弹体的材料特性,从而确定实际芯轴的材料特性。图5是在ANSYS/LS-DYNA平台上采用本模型对Q235薄壁管材弯曲过程的分析结果,弯曲成型过程仿真的计算时间是4 796 s。



图5 超弹体连接模型壁厚变化率云图  
Figure 5 Change rate of wall thickness of super-elastic connecting

这3个用于仿真计算的芯头模型,从运动约束的角度看芯轴的作用是对各个芯头的运动施加了约束,即限制了芯头的随意运动,使其只能按要求的方向运动。从仿真时间上看,刚体销铰接模型效率较高。芯头的仿真模型应根据研究对象要求的不同而采用不同的模型,为此本文提出了芯头仿真建模策略:考虑芯轴参数的仿真计算,采用超弹体连接模型;考虑弯曲模具及工艺的仿真计算决定采用刚体铰接模型。这样有助于提高仿真效率,有针对性地研究。

3 实验验证

为验证所提出的芯头模型的准确性,根据以上仿真给出弯曲工艺方案进行管材弯曲实验。本实验在某机械有限公司进行,采用数控弯管机对管材进行弯曲。同时为了方便地与仿真结果进行对照分析,弯曲前在管材的弯曲段刻线标记,然后将标记好的管材安装在弯曲模凹槽内,夹紧模夹紧,芯棒推入空心管材内进行90°弯曲实验。弯曲后的管材如图6所示。

从管壁厚度变化云图可以看出管材在弯曲90°后,采用刚体球铰接模型的管材减薄率最大为10.01%,增厚率最大为8.152%;采用刚体销铰接模型的管材减薄率最大为9.331%,增厚率最大为



图6 弯曲后的管材

Figure 6 Bended tube

8.449% ;而采用超弹体连接模型的管材减薄率最大为9.737%,增厚率最大为8.064%。分别对获得的3种管材进行截面切割,在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 处每隔 $15^{\circ}$ 截取平面,获得减薄率和增厚率的变化曲线,并对3种芯棒模型的管材对应的减薄率、增厚率以及椭圆率与实验值进行比较,如图7所示。

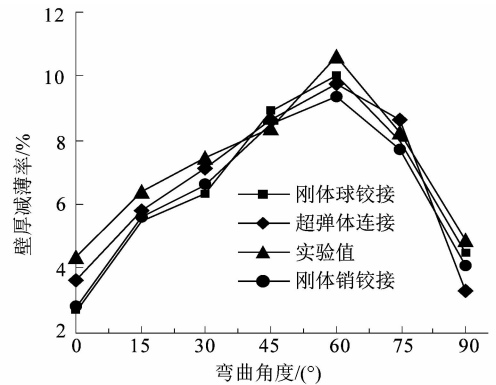
由上可见,3者仿真结果趋势几乎相同,并且仿真值与实验值的误差也在允许范围内。刚体球铰接模型、刚体销铰接模型很好地限制了芯头的水平方向运动,只能转动;而超弹体连接模型则在保证芯头转动的前提下还允许一定的线位移。很显然,刚体铰接模型仅对芯头提供约束,保证了正常的弯曲成型,但不能反映芯轴的材料特性,因此刚体铰接模型主要用途是对弯曲成型过程的工艺分析。而超弹体连接模型在弯曲成型过程的仿真分析中得到了芯轴的变形与受力状态,从而既可以对弯曲成型过程的工艺进行分析,又可以研究芯轴的材料特性与尺寸。

#### 4 结语

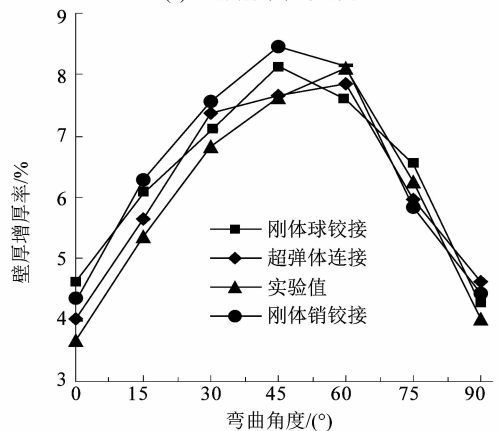
芯头的仿真模型应根据研究对象的要求而采用相应的模型,为此本文提出了芯头仿真建模策略:当研究芯轴参数时,用超弹体连接模型;研究弯曲模具及工艺时,用刚体铰接模型。该策略有助于提高仿真效率、进行有针对性的研究。

#### 参考文献:

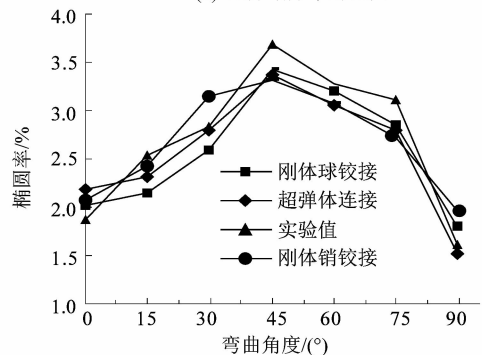
- [1] 卫原平. 金属塑性成形过程的有限元数值模拟[D]. 上海:上海交通大学,1995:5-8.
- [2] 胡福泰,刘玉峰,黄学玲,等. 管材与型材无模弯曲基本力学分析[J]. 锻压技术,1996,19(4):22-24.
- [3] HASANPOUR K, AMINI B, POURSIINA M, et al. The effect of anisotropy on thin-walled tube bending [C]//The 8<sup>th</sup> International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes ( Numisheet 2011 ), Seoul, Korea: American Institute of Physics,2011:187-193.
- [4] LI Heng, YANG He, ZHAN Mei, et al. Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2007,47(7/8):1164-1175.



(a) 壁厚减薄率对比图



(b) 壁厚增厚率对比图



(c) 椭圆率对比图

图7 结果对比图

Figure 7 Comparison chart of results

- [5] 张静静,杨合,詹梅,等. 助推作用对大口径铝合金薄壁管数控弯曲壁厚减薄和回弹的影响[J]. 塑性工程学报,2008,15(1):60-65.
- [6] 杜红伟. 薄壁管有芯旋转模弯成形回弹与伸长的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2010:24-26.
- [7] 贾美慧,唐承统,王文刚. 工艺参数对管材绕弯成形质量的显著性影响分析[J]. 机床与液压,2012,40(21):29-33.
- [8] 林芳,鄂大辛,张敬文. 单元类型对有限元计算弯管截面畸变及壁厚变化的影响[J]. 精密成型工程,2012,4(3):57-61.
- [9] 胡国良,任继文. Ansys11.0 有限元分析入门与提高[M]. 北京:国防工业出版社,2008:71-72.
- [10] 艾治勇. 弯管的弯曲成形分析及其力学特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2005:47-48.