

综述

## 四辊卷板机弯卷成形工艺的研究进展

马晨波, 张子恒, 张玉言, 孙见君, 李 想

(南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 四辊卷板机弯卷成形工艺可将板材加工为弧形件、筒形件、锥形件以及多边形件等定或变曲率件, 该工艺以其高效、灵活、省材和成形精度高等优点而被广泛应用。从工艺方法与流程、工艺过程理论模型及建模影响因素 3 个方面综述了四辊卷板机弯卷成形工艺。介绍了弯卷成形中非对称式弯卷方法与对称式弯卷方法的工作原理、工艺流程及特点; 针对工艺流程中的连续滚弯过程, 总结了 3 类线性滚弯数学模型和非线性滚弯数学模型的特征、适用性和精度等; 分析了影响工艺过程建模的材料硬化特性、弯卷道次数和板材卸载回弹 3 方面因素。最后, 探讨了当前研究存在的问题和未来可能的发展方向。

**关键词:** 四辊卷板机; 弯卷成形; 连续滚弯; 数学模型; 工艺流程

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.001

**中图分类号:** TG335

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 05-0001-12

## Research progress on roll-bending process of four-roll plate rolling machines

Ma Chenbo, Zhang Ziheng, Zhang Yuyan, Sun Jianjun, Li Xiang

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** The roll-bending process of four-roll plate rolling machines can process the plate into fixed or variable curvature parts such as curved parts, cylindrical parts, conical parts and polygonal parts. This process is widely applied due to its advantages of high efficiency, flexibility, material saving and high forming accuracy. Therefore, the roll-bending process of four-roll plate rolling machines was reviewed from three perspectives: process methods and flow, theoretical models of the process, and influencing factors of establishing the model. Firstly, the working principles, process flows and characteristics of asymmetric and symmetric roll-bending process were introduced. Secondly, for the continuous roll-bending process in the process flow, the characteristics, applicability and accuracy of three types of linear and nonlinear roll-bending mathematical models were summarized. Furthermore, the three factors affecting the modeling of the process were analyzed, including the material hardening characteristics, the roll-bending passes and the unloading springback of plate. Finally, the current research issues and possible future development directions were discussed.

**Key words:** four-roll plate rolling machine; roll-bending; continuous roll-bending; theoretical model; process flow

卷板机是实现金属板材弯卷成形的一类重要的工艺装备, 通过施加载荷和轴辊运动使得板材依次经历弹性弯曲变形、弹塑性弯曲变形和卸载回弹变形 3 个阶段<sup>[1]</sup>, 获得诸如圆柱面、椭圆面和方圆面等单曲率或多曲率筒形制件<sup>[2-3]</sup>。亦可通过改变辊子形状、增加卷锥装置或将工作辊倾斜一定角度等

方法进而卷制出锥形件<sup>[4]</sup>。与其他冷成形技术相比, 卷板机弯卷成形技术以成形曲率灵活、材料适应范围广、成形质量好和设备自动化程度高等优点而被广泛应用于各类工程领域<sup>[5]</sup>, 例如航空航天、军工兵器、船舶生产、土木工程 (隧道、管段)、风能收集、工程机械 (锅炉、圆柱形储罐、热交换器、反应堆和小型家用产品) 等领域<sup>[6-7]</sup>。

卷板机按辊数的不同主要分为三辊卷板机和四辊卷板机。四辊卷板机和三辊卷板机的工作原理均是利用各个工作辊之间的相互配合完成对板材的两端预弯曲操作 (压弯和滚弯) 以及剩余部分的连续滚弯操作 (滚弯), 从而实现板材整体的弯卷成形<sup>[8-10]</sup>。但相比于三辊卷板机, 四辊卷板机无需预

收稿日期: 2023-10-12; 修订日期: 2024-01-19

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (SBE2021030576)

作者简介: 马晨波 (1983-), 男, 博士, 教授

E-mail: machenbo@njfu.edu.cn

通信作者: 张子恒 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: zhangziheng@njfu.edu.cn

弯配套设备, 两侧辊可以方便板材对中, 无需调头即可实现板材的两端部预弯, 减少了因为剩余直边过大导致的板材浪费, 降低了加工成本。同时, 四辊配合工作使得板材的成形精度、生产率和操作效率更高, 设备的灵活性方面也有所改善<sup>[10]</sup>。因此, 基于四辊卷板机的四辊弯卷成形工艺在板材弯卷成形工程领域的应用需求越来越多。从 20 世纪 80 年代左右开始, 学者们便展开了对四辊弯卷成形工艺的全面研究<sup>[1,11]</sup>, 至今已经有了一套基本的四辊弯卷成形工艺方法与流程。

板材的四辊弯卷工艺过程由压弯工艺和滚弯工艺组成, 板材成形的大部分卷制工作由连续滚弯工艺来实现, 其工艺参数是否精确对于板材整体成形质量的优劣具有至关重要的影响。因此, 研究这一过程的滚弯机理对于运用四辊弯卷成形工艺实现板材的高质量成形尤为重要。由于滚弯工艺过程受卷板机工作轴辊挠曲变形、板材重力、材料硬化特性、板材卸载回弹以及成形工艺参数等多种因素的耦合影响, 相比试验研究, 采用理论研究能够更加清晰地揭示其滚弯机理。大量学者结合弹塑性弯曲力学与相关数学原理建立了针对这一重要滚弯过程的理论模型, 通过有限元方法模拟这一复杂弯卷过程, 并采用试验方法验证了理论数值的合理性和可行性, 为利用四辊弯卷工艺实现板材的高质量成形提供了理论基础。

本文介绍了四辊弯卷成形工艺方法的工作原理以及相应的工艺流程, 并针对弯卷工艺流程中的连续滚弯过程, 总结了 3 类线性滚弯数学模型和非线性滚弯数学模型的模型特征、模型适用性和精度等, 综述了四辊弯卷工艺过程建模影响因素中材料硬化特性、弯卷道次和板材卸载回弹的相关研究。指出了四辊弯卷工艺需要进一步研究的内容, 并提供了与其他技术相结合的研究手段与方法。

## 1 四辊卷板机弯卷工艺方法与流程

四辊卷板机的工作辊是由一对上、下辊和一对侧辊组成, 其工作原理则是依据金属板材的三点成圆原理。整个弯卷过程中金属板材依次经历弹性弯曲变形阶段、弹塑性弯曲变形阶段和卸载回弹阶段, 最后得到期望曲率的制件。对于四辊弯卷工艺方法, 根据连续滚弯操作中卷板机的左右两侧辊是否对称布置参与板材成形, 可分为非对称式弯卷方法 and 对称式弯卷方法, 其中这两种弯卷方法中对板材两端

的预弯曲操作是一致的。本节针对这两种弯卷方法, 分别介绍其具体的工艺流程。

### 1.1 非对称式弯卷方法

非对称式弯卷方法是指在连续滚弯操作中左右侧辊非对称布置, 并且只有其中一个侧辊的辊位决定板材弯卷成形后的曲率。非对称式弯卷方法的基本工艺流程如图 1 所示<sup>[11]</sup>。非对称式弯卷工艺流程主要分为 6 个步骤, 其中端部预弯曲操作分为端部预弯准备和端部部分滚弯卷制两个步骤, 即步骤 2 和步骤 3; 连续滚弯操作则为步骤 4 和步骤 5。端部预弯曲操作和连续滚弯操作在执行顺序上可以有所调整, 进而形成 3 种非对称式弯卷方法: (1) 左侧预弯曲操作-连续滚弯操作-右侧预弯曲操作<sup>[10-13]</sup>, 有利于提高滚弯效率; (2) 左侧预弯曲操作-右侧预弯曲操作-连续滚弯操作<sup>[14-16]</sup>, 有利于降低工作轴辊负荷; (3) 连续滚弯操作-左侧预弯曲操作-右侧预弯曲操作, 有利于提高滚弯稳定性。在工程应用中可以根据实际需求来选择具体的非对称式弯卷方法。

### 1.2 对称式弯卷方法

相对于非对称式弯卷方法, 对称式弯卷方法只在连续滚弯操作中有所区别, 并不是一侧辊参与滚弯成形, 而是两侧辊同时进给相同位移量, 即对称布置来实现板材弯卷成形, 对称式连续滚弯工艺方法示意图如图 2 所示<sup>[17]</sup>。

针对上述对称弯卷的卷板设备存在设备结构复杂、调试维修困难和生产成本较高等缺点, 赵军等<sup>[18]</sup>发明了一种新型结构的对称式四辊弯卷装备, 并提出相应的对称式弯卷工艺方法。该对称式弯卷工艺方法具有成形精度高、剩余直边小、生产效率高、设备结构简单等优点<sup>[19]</sup>。新型卷板装备的 4 个轴辊采用对称式分布, 依据四点弯曲等弯矩成形原理对板材进行卷制, 两上辊和两下辊的跨距可以调节以卷制不同曲率的筒件。Yu G C 等<sup>[20]</sup>在前者的基础上, 对于这种基于四点弯曲成形原理的对称式四辊弯卷新工艺进行了深入研究, 通过数值模拟和试验研究充分证明了该卷板工艺方法的可行性。基于有限元分析方法模拟了一次下压和二次下压工艺, 对比发现, 二次下压弯曲工艺能够使得压痕处更均匀, 接口处板料对中性更好, 成形精度更高, 新型对称式四辊弯卷工艺流程如图 3 所示。

运用对称式弯卷工艺方法在滚弯过程中可以使得板材成形更加稳定, 工作辊的负荷也有所降低, 但精确控制两侧辊同时抬升相同位移量对于设备的

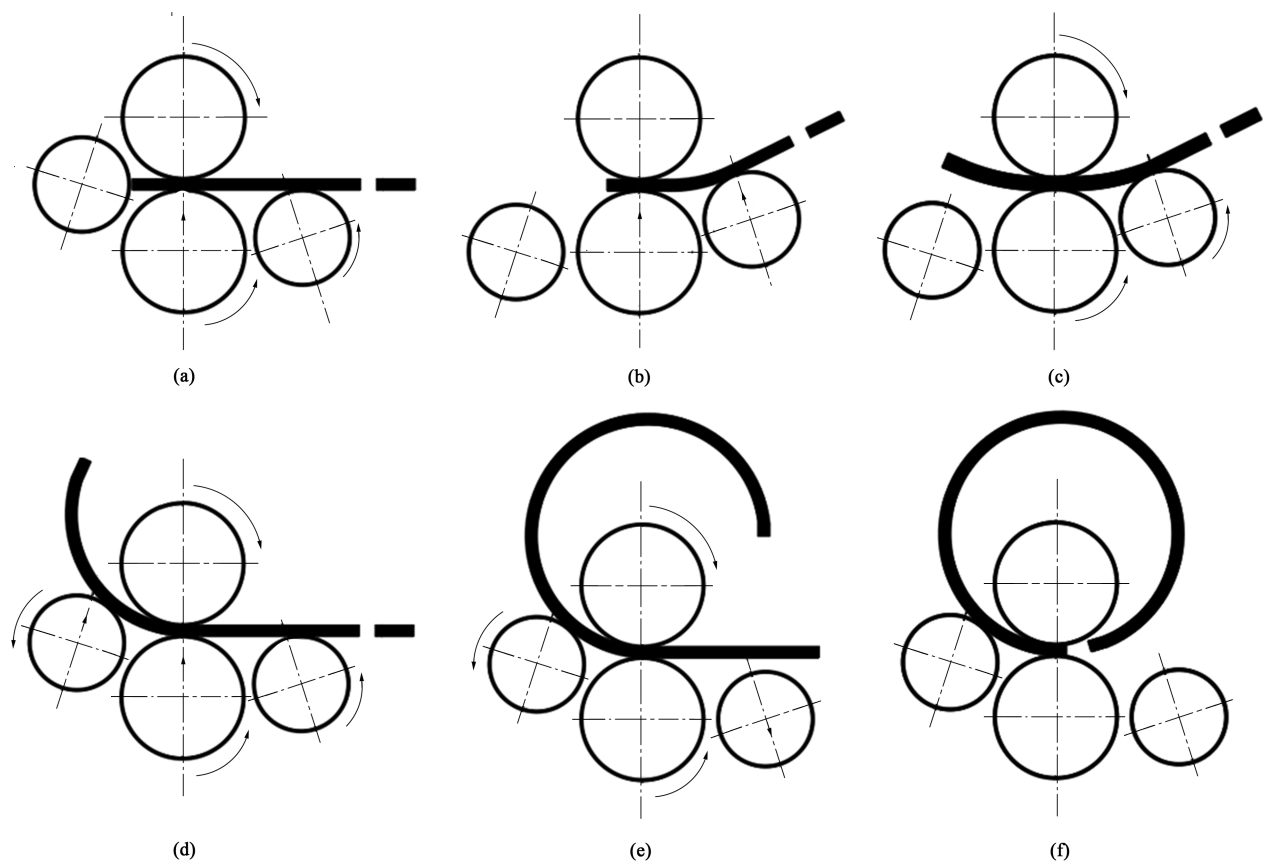


图 1 非对称式弯卷工艺流程

(a) 步骤 1: 板材对中 (b) 步骤 2: 退料和左侧端部预弯 (c) 步骤 3: 左侧端部部分卷制 (d) 步骤 4: 换辊和连续滚弯 (e) 步骤 5: 继续连续滚弯 (f) 步骤 6: 右侧端部卷制

Fig. 1 Process flow of asymmetrical roll-bending

(a) Step 1: Alignment of plate edge (b) Step 2: Return of plate and pre-bending of left side (c) Step 3: Roll-bending of left side (d) Step 4: Roll exchange and continuous roll-bending (e) Step 5: Continue continuous roll-bending (f) Step 6: Roll-bending of right side

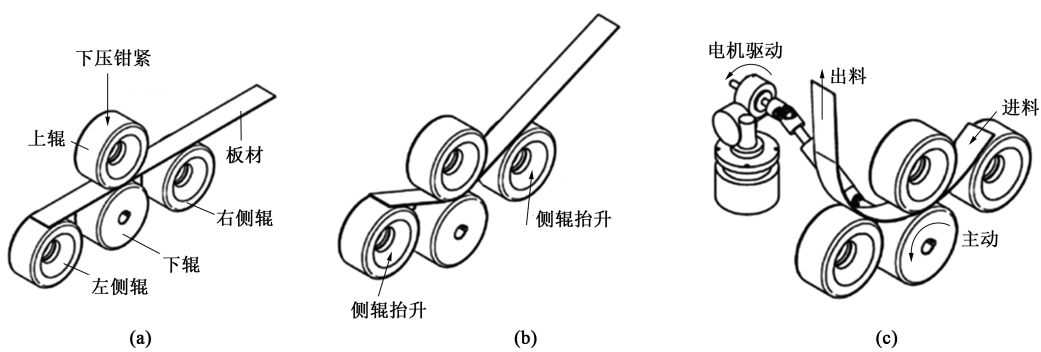


图 2 对称式连续滚弯工艺示意图

(a) 上辊下压 (b) 两侧辊抬升相同位移量 (c) 连续滚弯成形

Fig. 2 Schematic diagrams of symmetrical continuous roll-bending process

(a) Downward displacement of top roll (b) Equal displacement of side rolls in upward direction (c) Continuous roll-bending

机电液系统要求较高。相比而言，非对称式弯卷工艺方法以其操作灵活，弯卷效率更高，并且更加适合机电液系统控制而广泛应用。随着四辊卷制对象

向着大直径、大厚度、高强度等方向发展，以上针对板材的一次弯卷成形工艺方法与流程已经逐渐不能满足工程需求。增加弯卷过程中连续滚弯操作次

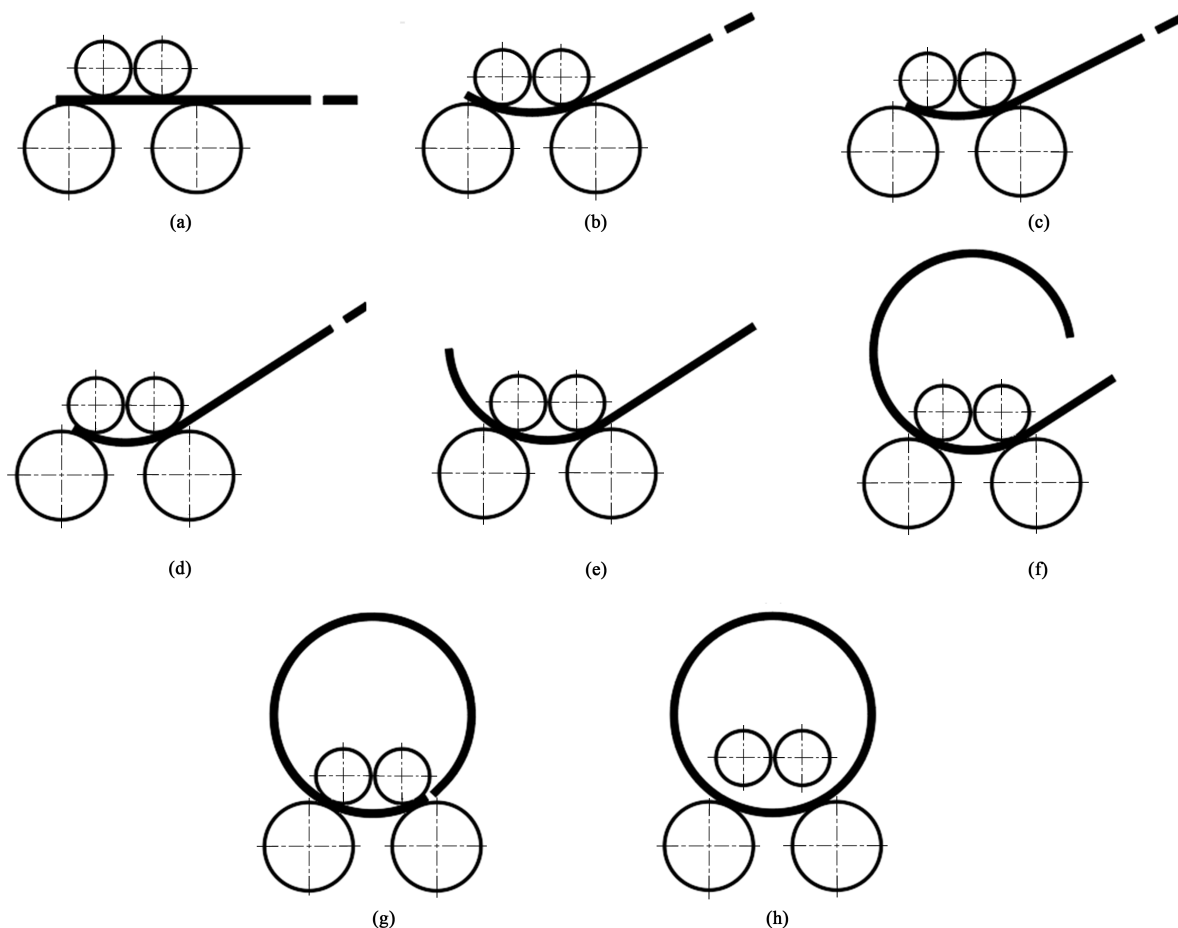


图3 新型对称式四辊弯卷工艺方法示意图

(a) 送料 (b) 首次下压 (c) 反向卷制 (d) 二次下压 (e) 卷制过程 1 (f) 卷制过程 2 (g) 卷制结束  
(h) 卸载回弹

Fig. 3 Schematic diagrams of a novel symmetrical four-roll roll-bending process

(a) Process of plate conveying (b) Initial downward displacement (c) Reverse roll-bending (d) Secondary downward displacement  
(e) Roll-bending process 1 (f) Roll-bending process 2 (g) Roll-bending process completed (h) Unloading springback

数的多道次滚弯工艺应运而出,但目前针对四辊多道次弯卷成形工艺方法与流程的研究较少,还需进一步研究其工艺流程并进行优化。

## 2 四辊弯卷工艺过程理论模型研究

利用弹塑性弯曲力学结合数学模型对四辊弯卷机理的研究是对采用计算机辅助制造 (Computer-Aided Manufacturing, CAM) 和计算机数控 (Computer Numerical Control, CNC) 技术实现板材弯卷自动化的关键。由弯卷理论模型得出的装备结构优化参数和成形工艺参数影响着板材成形的几何精度,为此大量国内外学者致力于板材弯卷过程中力学和数学模型的深入研究。早期理论模型分析的弯卷成形过程中的弯矩、驱动转矩以及

工作辊受力等力学参数可以为四辊卷板装备的结构强度和刚度设计提供依据<sup>[21-22]</sup>,驱动功率参数则在合理选取电机规格上具有重要实际价值<sup>[23-24]</sup>。随着对金属弯卷成形件精度要求的不断提高,配合着数控系统实现高精度自动化生产的四辊卷板机被广泛应用于工程领域,学者们更加关注于弯卷工艺全过程,尤其是连续滚弯工艺过程中理论模型的研究。

针对弯卷工艺流程中连续滚弯过程的理论模型,以分析板材滚弯过程中的几何变形是否线性变化角度,并从模型特征和模型精度以及适用性等方面,总结归类为 3 类线性滚弯数学模型以及非线性滚弯数学模型,如表 1 所示。表 1 中所述的不同板材厚度在工程中一般作如下分类:(1)厚度小于或等于 5 mm 左右为薄板;(2)厚度大约在



表 1 各类滚弯数学模型

Table 1 Various types of roll-bending mathematical models

滚弯模型类别	模型特征	模型适用性和精度
第 1 类线性滚弯模型	(1) 假设滚弯过程中板材为线性几何变形； (2) 假设滚弯段曲率中心与上、下辊辊心共线。	薄板、中板和厚板的对称滚弯和非对称滚弯过程，精度较低
第 2 类线性滚弯模型	(1) 假设滚弯过程中板材为线性几何变形； (2) 考虑滚弯段曲率中心偏离上、下辊辊心连线； (3) 剩余直边参数按照经验选取。	薄板、中板和厚板的非对称滚弯过程，精度较低
第 3 类线性滚弯模型	(1) 假设滚弯过程中板材为线性几何变形； (2) 考虑滚弯段曲率中心偏离上、下辊辊心连线； (3) 考虑滚弯段曲率中心偏移对下辊位置的影响（夹点偏移）； (4) 剩余直边参数可由理论计算获取。	薄板、中板、厚板和特厚板的非对称滚弯过程，精度适中
非线性滚弯数学模型	(1) 考虑滚弯过程中板材的非线性几何变形； (2) 考虑滚弯段曲率中心偏离上、下辊辊心连线； (3) 考虑滚弯段曲率中心偏移对下辊位置的影响。	薄板、中板、厚板和特厚板的非对称滚弯过程，精度较高

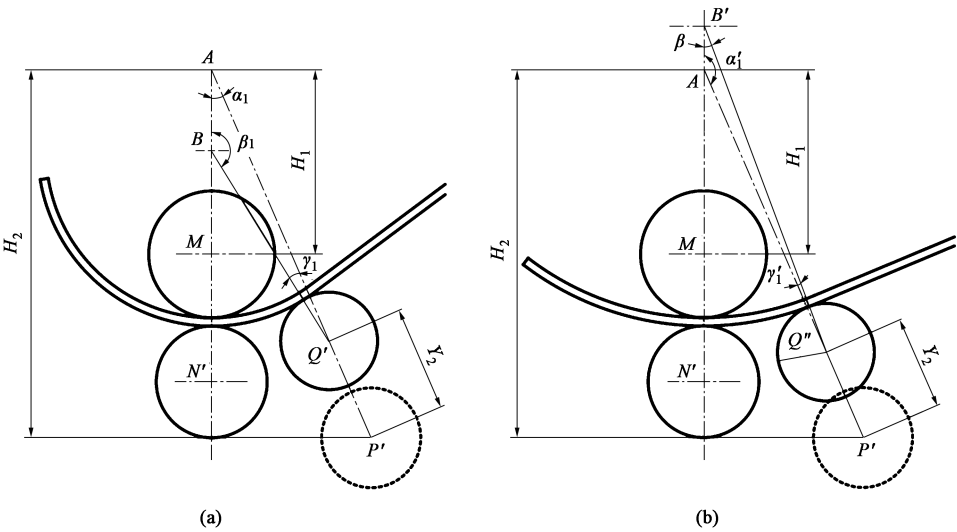


图 4 第 1 类线性滚弯数学模型示意图

(a) 第 1 种筒体中心点位置情况 (b) 第 2 种筒体中心点位置情况

Fig. 4 Schematic diagrams for the first type of linear roll-bending mathematical model

(a) Central position of cylindrical part for case 1 (b) Central position of cylindrical part for case 2

5~20 mm 之间为中板；(3) 厚度在 20~60 mm 之间为厚板；(4) 厚度大于 60 mm 为特厚板。陈德道等<sup>[15]</sup>采用数学建模方法对四辊卷板机各轴辊工作位置进行了几何化参数表示，并忽略板材在滚弯成形过程中的非线性变形，假设板材在变形区内曲率一致，由此建立了在预弯和连续滚弯工艺流程时的数学模型，如图 4 所示。该模型假设在上下辊的夹持力作用下，预弯和连续滚弯段曲率中心与上、下辊辊心共线，并且根据滚弯时筒体的中心点位置分布分为图 4a 和图 4b 两种不同情况，可称之为第 1 类线性滚弯数学模型。图 4 中，点 A 为侧辊进给线与

上下辊中心连线的交点，点 M、N' 和 P' 分别为上辊、下辊和进给前侧辊中心， $H_1$  为点 A 与点 M 之间距离， $H_2$  为点 A 与点 P' 之间纵向距离， $Y_2$  为侧辊进给量。当成形筒体中心点在线段 AM 上时，为第 1 类情况，如图 4a 所示，点 B 为成形筒体中心点，点 Q' 为进给后侧辊中心， $\alpha_1 = \angle Q'AB$ 、 $\beta_1 = \angle ABQ'$ 、 $\gamma_1 = \angle AQ'B$ 。当成形筒体中心点在 AM 延长线上时，为第 2 类情况，如图 4b 所示，相应地，点 B' 为成形筒体中心点，点 Q'' 为侧辊进给后的中心点。徐兆军<sup>[25]</sup>在该数学模型的基础上得出侧辊进给位移量与弯卷曲率半径之间的工作关系曲线，关系

曲线表明侧辊的进给量与弯卷曲率半径之间为非线性关系,在设计卷板机控制系统时可以根据侧辊检测精度、弯卷曲率半径的范围来选取合适的工作关系曲线。王艳等<sup>[26]</sup>通过四辊多道次滚弯试验表明,第 1 类线性滚弯数学模型推导所得的板材成形半径与试验数据相比误差为 11.2%,具有较好的适用性。

上述研究均是应用在非对称式薄板和中厚板滚弯成形中的第 1 类线性滚弯数学模型,由于假设滚弯段曲率中心与上下辊辊心共线,所以,同样适用于两侧辊对称式连续滚弯。但实际工程中中厚板非对称滚弯段曲率中心往往会偏离上、下辊辊心连线,这时第 1 类线性滚弯数学模型便不再适用,需要考虑曲率中心的偏移以修正模型。Salem J 等<sup>[24]</sup>假设板材滚弯过程曲率一致并通过分析力学和几何关系,提出了一种针对成形件中心偏离上、下辊辊心连线的四辊卷板机滚弯成形时侧辊位移量数学模型,如图 5 所示,可称之为第 2 类线性滚弯数学模型。图 5 中,  $D_a$ 、 $D_b$ 、 $D_c$  分别为上辊、下辊、侧辊直径,  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ 、 $O_4$  分别为上辊、下辊、右侧辊、左侧辊中心点,点  $F$  为侧辊进给线与上下辊中心连线的交点,点  $O$  为成形件中心点,点  $E$  为直线  $OO_1$  与直线  $FO_3$  的交点,  $S$  为该模型中的几何参数,  $H_3$  为点  $F$  与点  $O_1$  之间距离,  $H_4$  为点  $E$  与点  $O_1$  之间距离,  $\alpha_2 = \angle O_1OO_2$ 、 $\beta_2 = \angle O_1OO_3$ 、 $\gamma_2$  为直线  $OO_2$  与直线  $FO_3$  形成的锐角,  $\delta_2 = \angle OEF$ 、 $\varphi_2 = \angle OO_1F$ 、 $\theta_2 = \angle OO_3F$ 。运用第 2 类线性滚弯数学模型的实例计算与试验结果比较发现,对于弯卷半径为 350 mm 的板材,侧辊位移量的理论值与实际值只存在 5.6 mm

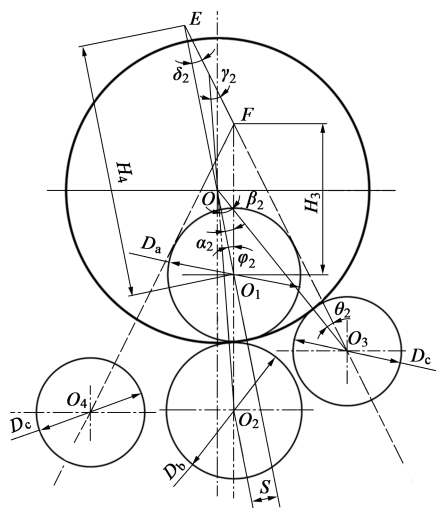


图 5 第 2 类线性滚弯模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram for the second type of linear roll-bending mathematical model

的误差,在此基础上通过少量试卷便可以得到更加精准的位移值。该理论模型与基于对正钳紧式三辊卷板机连续滚弯工艺所建立的理论模型类似<sup>[27-28]</sup>。王艳等<sup>[29]</sup>由该模型推导的板材成形半径值同仿真试验值相比误差在 10% 以内,与滚弯试验数据相比误差在 15% 左右,进一步说明了该数学模型具有一定的可靠性。第 2 类线性滚弯模型中几何参数  $S$  对模型的精度影响较大,几何参数通过理论剩余直边来计算,合理的剩余直边数值能够使得模型输出工作辊辊位更加精确。工程上对于理论剩余直边数值往往按照经验取 1~2 倍的板材厚度<sup>[30]</sup>。李建等<sup>[13]</sup>基于该数学模型,采用 VC++ 软件开发出四辊卷板机位移计算程序,通过输入卷板机结构参数、板材性能参数和几何参数,并取剩余直边为 1.3 倍的板厚,从而得到各成形步骤的工艺参数,卷制出的工件直径与预定值较为吻合,计算出的辊位参数与实际使用参数误差仅为 5%。肖善超等<sup>[12]</sup>同样基于第 2 类线性滚弯数学模型并采用 VB 开发出四辊卷板的工艺计算软件,对于卷制外径为  $\Phi 2888$  mm 的筒节,输入相应结构、性能和几何参数并取剩余直边为 1.67 倍的板厚,进而得到侧辊位移为 678.0002 mm。通过试验得到完成卷筒所需的最佳侧辊位移为 672.8 mm,与模型误差率仅为 0.8%。

由于第 2 类线性滚弯数学模型中的剩余直边参数是按照经验公式确定,在实际工程应用中具有盲目的试错性,同时模型中并未考虑非对称弯卷时板材曲率中心的偏移对下辊位置的影响,下辊位置误差的存在通过影响侧辊进给位移的推导进一步导致了模型精度的下降。汪兴等<sup>[30]</sup>结合数学-力学分析,确定板材曲率中心偏移后下辊的精确位移,建立板材弯矩和受力与侧辊和下辊位移之间的关系,提出了四辊卷板机工作轴辊位移量的一种计算模型,可称其为第 3 类线性滚弯数学模型,如图 6 所示。图 6 中,点  $a$  为上辊中心点,点  $b_1$  和点  $c$  分别为板材滚弯前的下辊和右侧辊中心,滚弯时下辊和右侧辊的进给量为  $Y_1$  和  $Y_2$ ,点  $b_2$  和点  $c_1$  为板材滚弯后的下辊和右侧辊中心,点  $f$  为侧辊进给线与上下辊中心连线的交点,  $P_1$ 、 $P_r$ 、 $P_2$  分别为板材滚弯时与下辊、上辊、右侧辊的接触点,  $\rho_i$  为第 3 类线性滚弯模型中回弹前圆筒件内半径,点  $O_s$  为成形件中心点。试验结果表明,通过第 2 类线性滚弯模型计算的侧辊相对位移误差在 2.2%~2.4% 之间,而第 3 类线性滚弯模型计算的理论与实际值更加接近,误差仅为 1.3%。同时,该模型通过弯矩和压力确

定剩余直边与下辊位置角之间的几何关系,从而避免了剩余直边按照经验取值导致的误差。第3类线性滚弯模型表明,下辊与侧辊的位移是相互影响、相互依赖的,在连续滚弯过程中不同的轴辊位移和压力组合可以滚弯得到同一曲率的弯板。

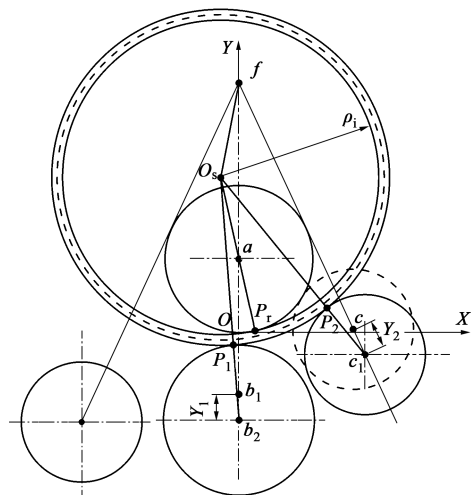


图6 第3类线性滚弯模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram for the third type of linear roll-bending mathematical model

以上3类线性滚弯数学模型建模时虽然都假设了板材滚弯成形段曲率一致,忽略了滚弯成形过程中的非线性几何变形以及工作侧辊的弹性变形,但其模型简单、使用方便且计算精度能够满足大部分的实际需求,因而被广泛应用于工程领域中。针对板材滚弯成形过程中连续变化的曲率,非线性滚弯数学模型相比线性滚弯模型更为准确地描述了板材在实际连续滚弯工艺中的板材几何变形状态,但其建模以及求解过程相对复杂,目前对于这种精度更高的非线性滚弯数学模型研究较少。图7为非线性滚弯数学模型示意图。图7中, $O_t$ 、 $O_b$ 、 $O'_s$ 分别为上辊、下辊、进给前左侧辊中心点, $O''_s$ 为进给后左侧辊中心点, $F'_t$ 、 $F'_b$ 、 $F'_s$ 分别为上辊、下辊、左侧辊对于板材的压力, $C'_t$ 、 $C'_b$ 、 $C'_s$ 分别为上辊、下辊、左侧辊与板材的接触点, $\omega$ 为上辊转速, $r_t$ 为非线性滚弯模型中成形件回弹前内半径, $v$ 为板材进给速度,点 $O_c$ 为成形件中心, $\theta'_s$ 为板材发生弹塑性变形区域对应的圆心角, $-X_0$ 为在 $XOY$ 坐标系下原左侧辊圆心位置对应横坐标。Lin Y H等<sup>[31]</sup>使用四辊卷板机弯卷板材,基于杆件大挠度弹塑性平衡微分方程,以板材滚弯段曲率为主要变量,系统研究了具有指数应变硬化规律的板材连续滚弯过程。Hua M等<sup>[32]</sup>建立了四辊卷板机非对称弯卷过程中连续滚

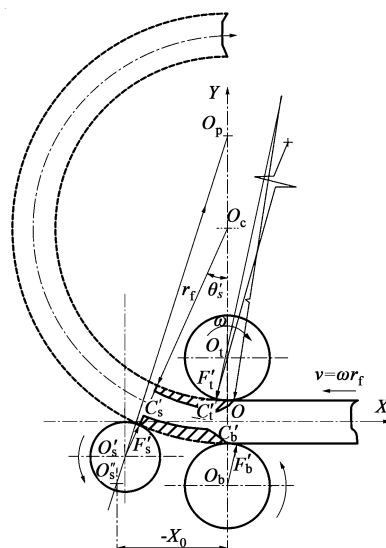


图7 非线性滚弯模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of nonlinear roll-bending mathematical model

弯工艺的数学模型,考虑了板材在弹性弯曲阶段和弹塑性弯曲成形阶段中连续变化的曲率,研究表明,在各个弯曲阶段,板材的最大塑性变形通常会发生在上辊与板材之间的接触区域,在板材从工作侧辊运动至上、下侧辊之间的过程中,板材在有效变形区域的曲率半径逐渐减小。周晗琼<sup>[33]</sup>根据弹塑性弯曲的基本理论进行数学假设,考虑后继变形中弹性变形对板材应力、应变的影响,推导出板材任意截面处的应力-应变关系和曲率-弯矩关系;接着考虑滚弯过程中板材曲率的连续变化,结合轴辊在预弯和连续滚弯过程中与板材的夹点偏移现象,分析了轴辊在滚弯成形过程中的几何位置与板材的受力情况,分别建立了四辊卷板预弯阶段和多道次滚弯阶段的数学模型。对于预卷制期望半径为1000 mm的板材,运用此非线性滚弯模型经过多道次滚弯试验得出的实际板材成形半径为1005.3 mm,偏差率仅为0.53%,充分地证明了模型的精确性。

上述着重介绍了3类线性滚弯数学模型以及非线性滚弯数学模型,目前第3类线性滚弯数学模型以其模型简单和应用方便以及相对于第1、2类滚弯模型精度更高并且能较好地满足实际需求而最适合应用在工程领域中。若需要四辊弯卷成形工艺的精度更高,则须使用非线性滚弯数学模型,学者们仍需要对于这类非线性模型进行深入研究,在保证精度的基础上能够适当简化模型以方便应用在工程中。目前,对于四辊弯卷成形工艺主要还是针对于单道次弯卷工艺,下一步应更加注重多道次弯卷工艺以



及全面分析四辊弯卷成形工艺流程中每个工艺步骤,并对包括卷板道次、轴辊弯曲力、驱动扭矩、板材进给速度以及侧辊进给位移量在内的各个成形工艺参数进行优化。

### 3 四辊弯卷工艺过程建模的影响因素

在四辊弯卷工艺过程理论建模时需要考虑多类因素的影响,包括:(1)轴辊在弯卷工作过程中的挠曲变形;(2)板材重力以及板材与轴辊间的摩擦等板材物理属性;(3)材料硬化特性;(4)弯卷道次数、板材成形弯曲力、轴辊驱动扭矩、加工速度和工作侧辊辊位参数等成形工艺参数;(5)板材的卸载回弹。综合考虑到以上所有类型因素的影响进而建立理论模型是困难的,可以根据实际情况考虑其中通过影响理论模型的适用性和精度进而影响四辊弯卷成形质量较大的一类或几类因素。本节主要从影响四辊弯卷模型精度和适用性较大的材料硬化特性、弯卷道次数和板材卸载回弹这 3 方面因素对以往的相关研究进行综述。

#### 3.1 材料硬化特性因素

板材的硬化特性是四辊弯卷工艺过程理论建模时须考虑的重要因素之一。板材在加工过程中会发生硬化现象,硬化现象导致材料在其应力超过屈服应力后变得难以继续塑性变形,不同材料的硬化特性差异较大,其真实应力-真实应变曲线是比较复杂的。Hua M 等<sup>[34]</sup>提出了一种用于解决具有任意应变硬化材料本构定律的连续边缘滚弯过程的数学模型。研究结果表明,材料应变硬化会引起边缘部分滚弯过程中相关物理量数值的增

加,如板材与辊子之间的接触角度偏移、施加在辊子上的力以及为实现所需的板材曲率而产生的侧辊上升量。为了方便实际应用和理论研究,学者们会将试验所得的应力-应变曲线简化为某种函数模型。工程上对于这些函数模型需要其不仅便于实际应用,还要将较为准确地描述材料的力学性质。因此,学者们通常将材料的真实应力-真实应变曲线转化为图 8 中的 3 种材料模型,其中  $\varepsilon_{s1}$ 、 $\varepsilon_{s2}$ 、 $\varepsilon_{s3}$  为 3 类模型的初始屈服应变。3 类线性滚弯模型建模时均选用理想弹塑性模型,建模方便但精度一般,可基本满足工程需求。周迟<sup>[14]</sup>在假设板材厚度和中性层不变的基础上基于梁的基本理论,选用双线性硬化模型,推导出板材在加载和卸载阶段中弯矩和曲率的关系,通过试验验证了基于双线性硬化规律得出的解析模型的正确性。并且相比于理想弹塑性模型,双线性硬化模型更加真实地反应了板材实际硬化规律,使得弯卷模型的精度得以提高,板材成形质量更佳。指数硬化模型综合考虑了屈服强度、抗拉强度、伸长率、收缩率、板材初始几何参数等多种因素的影响。Lin Y H 等<sup>[31]</sup>和 Hua M 等<sup>[34]</sup>在假设板材材料满足指数型硬化模型的基础上,考虑工作轴辊由于非对称度引起的弹性变形,建立了针对中板和厚板的四辊端部预弯压弯和连续滚弯理论模型,并利用大挠度弹塑性变形平衡微分方程确定板材成形过程中的挠度与弯矩关系,相比于线性弯矩分布,提高了弯卷成形模型精度,实现了板材的高质量弯卷成形。

在工程应用中常会选用双线性硬化模型或者指数硬化模型以提高模型精度,一般按如下方式选用这两种模型:当板材变形程度较小时采用双线性硬

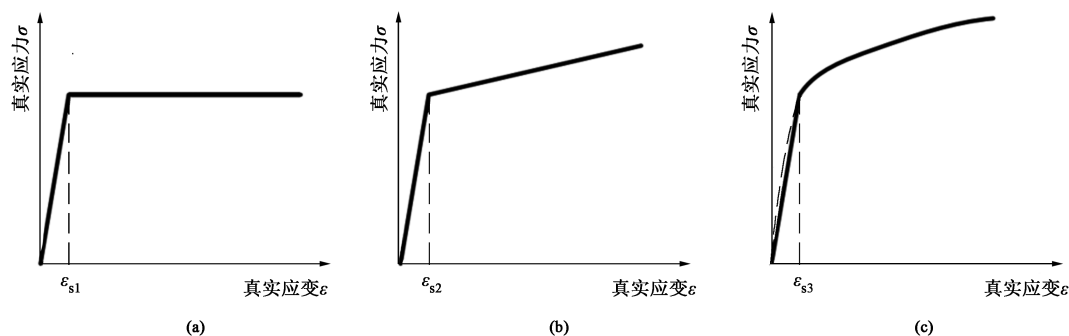


图 8 3 种材料模型的真实应力-真实应变曲线

(a) 理想弹塑性曲线 (b) 双线性硬化曲线 (c) 指数硬化曲线

Fig. 8 True stress-true strain curves for three material models

(a) Ideal elastic-plastic curve (b) Bilinear hardening curve (c) Exponential hardening curve



化模型的计算精度更高<sup>[14,33]</sup>,当变形程度较大时采用指数硬化模型精度更高<sup>[31,34]</sup>。在建立弯卷数学模型时,能否合理地选用材料硬化模型将对模型的适用性和精度产生重要的影响。

### 3.2 弯卷道次因素

四辊卷板机在实际工程应用中可以实现对薄板的一次弯卷成形,成形效率高。但由于卷板机自身规格和工作能力的限制,很多板材不能实现单道次的弯卷成形,同时单道次成形会使得筒体表面产生起皱、翘曲等缺陷。多道次弯卷成形可以减小回弹,降低轴辊成形弯曲力,减少缺陷进而提高成形质量,但其也会降低成形效率。因此,在建立四辊弯卷过程理论模型时需要综合考虑卷板机自身规格和卷制的板厚,以及板材材料特性,并合理考虑弯卷道次数,进而建立对应道次数的弯卷模型。林逸汉等<sup>[35]</sup>提供了算法来决定一般应变硬化板材时的最小滚弯道次数,以及每次滚弯过程中板材的残余曲率,同时研究了指数应变硬化板材的多道次滚弯过程的弯曲性能。研究同时还表明,对于功率有限的四辊弯卷系统,若要卷制较宽较厚的板材至较小的曲率半径和较好的圆度,多次连续滚弯过程是必要的,因此,考虑多道次弯卷的理论模型在此情况下是最为适用的。郝瑞霞等<sup>[36]</sup>通过有限元数值模拟,基于建立的单道次和多道次数值模型分析了多道次成形工艺。研究发现,多道次成形较单道次成形可以显著提高板材成形能力,抑制起皱等成形缺陷的产生,弯卷道次数对四辊弯卷成形效果有着重要的影响。王艳等<sup>[26]</sup>建立了单道次与三道次弯卷理论模型,并基于模型输出工艺参数经过四辊三道次弯卷成形试验后发现,与单道次弯卷成形相比,经过三道次弯卷成形后,预弯段成形半径相对于连续滚弯段的误差从7.3%降低至1.7%,即三道次弯卷模型的适用性和精度更高,基于该模型的四辊弯卷成形工艺可以有效提高板材弯卷成形质量。周迟等<sup>[37]</sup>针对中厚板进行了多道次弯卷成形过程与机理的分析,推导了板材在加载和卸载过程中弯矩和曲率的关系,并建立了四辊多道次弯卷成形数学模型。基于理论模型计算出每道次侧辊进给量,进行多道次弯卷试验,研究结果表明,每道次的成形力与相邻两道次间的半径间隔值和该道次的初始曲率半径有关,并且采用在前面道次增大相邻两道次半径间隔值、后续道次减小相邻两道次半径间隔值的方法能够提高卷板机工作效率,相比于单道次理论模型,基于多道次理论模型的四辊弯卷工艺精度更高,更加适合于中

厚板的高质量弯卷成形。

在实际工程应用中,四辊卷板机卷制大部分的中厚板仍需要采用多道次弯卷成形方法,但目前大部分理论模型的建立仍基于单道次弯卷成形工艺,对于四辊多道次弯卷成形理论模型的研究不够全面和深入,主要体现在多道次弯卷成形及回弹原理尚不全面,材料硬化对板材成形的影响规律尚不清楚,每道次的侧辊位移进给量计算不精确以及如何确定不同情况下最佳弯卷道次数以达到较高滚弯效率等方面。因此,还需深入开展以上方面的研究,优化四辊多道次卷弯工艺参数和成形路径,进而提高基于多道次弯卷模型的板材弯卷成形精度和效率。

### 3.3 板材卸载回弹因素

在板材四辊弯卷塑性成形过程中,其横剖面上塑性变形区和弹性变形区同时存在,因此,卸载后板材曲率半径较卸载之前增大,弯曲角则较之前减小,形成板材的卸载回弹现象。王玉华等<sup>[38]</sup>展开了Invar 36合金厚板的四辊滚弯成形工艺研究,通过分析基于有限元模拟获得的等效应力和应变分布发现,设定弯曲半径越大,板料厚度越小,上、下辊夹持力越小,则弹塑性变形中弹性应变占比越大,回弹越显著。板材四辊弯卷成形卸载后将不可避免地产生回弹现象,明确板材的回弹特性规律能够为板材四辊弯卷工艺提供理论支撑。在建立四辊弯卷过程理论模型时通常考虑板材的卸载回弹特性进而建立回弹理论模型,回弹理论模型是否合理将直接影响理论模型的精度,目前板材的回弹模型仍以工程回弹理论为基础,利用回弹前后的力学参数与几何参数建立回弹解析公式,或者在卸载回弹阶段引入曲率-弯矩关系,建立隐式方程组进行求解。部分学者通过引入回弹角以表征回弹规律,回弹角主要的影响因素包括板材材料弹性模量、硬化指数、屈服应力、板材厚度、弯曲半径和弯曲弧长等。李建等<sup>[39]</sup>基于板材弹塑性弯曲工程理论,对板材弹复过程进行了理论解析,并建立了成形阶段中性层上任一质点卸载前后转角、弯曲半径数学表达式。研究发现,回弹角在弯曲初期变化幅度最大,随后逐渐减小并趋于一个定值。通过试验结果表明,回弹角理论计算值与试验数据吻合较好,最大偏差为0.58°,这证明了建立的回弹理论计算模型的合理性与可靠性。高桂艳等<sup>[40]</sup>建立了板材弹复前的挠曲线关系方程,进而依据平面弯曲弹复方程,解析了卸载弹复后板料的挠曲线方程。通过两种板材的预弯

试验和模拟方法得出的数值对比弹复后板料上各点挠度的理论值,结果表明平均相对误差分别小于3%和5%,验证了回弹解析模型的合理性,基于该回弹模型的四辊弯卷理论模型精度更高。

上述学者都是建立四辊弯卷回弹的理论模型,并基于有限元分析进行数值模拟和利用试验结果来对比验证理论模型的合理性和可靠性。此外,板材滚弯阶段成形工艺参数对回弹模型的精度影响较大,但考虑这类因素进而建立模型较为困难,相关研究较少。目前,仍需针对复杂材料特性的中厚板考虑弯卷道次数、板材成形弯曲力、加工速度等成形工艺参数的影响进一步建立精度更高的板材回弹模型。

## 4 结语

板材的四辊弯卷成形工艺过程是一个涉及到几何变形的非线性、材料相关特性的非线性以及装备结构参数、板材物理属性参数和成形工艺参数等方面的复杂问题,建立理论模型并用解析求解方法来描述这一过程是复杂和困难的。因此,在理论研究的基础上,可以借助现代计算机技术对板材的弯卷成形过程进行仿真模拟研究,实现四辊弯卷过程更为有效和精确的描述。为方便后续学者继续深入四辊弯卷成形工艺的研究,基于以上对于四辊弯卷工艺的相关综述,从四辊弯卷工艺方法与流程、工艺过程理论模型以及建模影响因素3个方面给出进一步需要研究的内容,并提供结合机器视觉、机器学习和专家系统方面的研究手段与方法:

(1) 在四辊弯卷成形工艺方法和流程方面,目前工程上仍以非对称式弯卷方法为主,需要重点研究针对大厚度、高强度板材的多道次弯卷工艺流程,并对其弯卷流程进行优化;

(2) 在四辊弯卷成形工艺过程理论模型方面,还需进一步结合力学和数学相关理论,综合考虑板材滚弯过程中几何变形的非线性、材料相关特性的非线性以及成形工艺参数对成形质量的影响这几个方面因素,建立更加精确的非线性滚弯数学模型。在保证非线性模型精度的基础上,尽量简化以方便应用于工程实际中;

(3) 在四辊弯卷工艺过程建模的影响因素方面,针对具有复杂各向异性的宽厚板材建立四辊弯卷理论模型时,需要重点分析与板材材料的屈服强度、

抗拉强度、伸长率、收缩率、相对强化系数和弹性模量等材料性能相关的硬化特性因素、板材回弹性因素以及适合于中厚板成形的多道次因素,并考虑这3个因素对于理论建模的耦合影响;

(4) 可以将机器视觉应用于四辊卷板机弯卷过程,利用对板材弯卷的实时曲率半径识别,进而不断调整工作辊辊位,实现卷制、识别、修正曲率半径这3个步骤的迭代进行,最后达到成形的精确度要求;

(5) 针对四辊弯卷成形过程受复杂因素耦合影响的特点,采用机器学习方法,建立四辊弯卷定曲率或变曲率成形回弹后的板材曲率预测模型,分析和挖掘复杂因素耦合影响下的板材回弹规律;

(6) 研究和开发板材四辊弯卷工艺的专家系统,实现在不同四辊卷板机结构参数下,对不同材料特性和物理属性的板材成形提供出一套特定的四辊弯卷工艺流程和成形工艺参数,提高板材弯卷成形的质量和效率。

## 参考文献:

- [1] 仇志强,宋建丽,付建华,等. 板材弯卷成形工艺的研究现状[J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (1): 1-6, 84.  
Zhang Z Q, Song J L, Fu J H, et al. Research status of plate bending and roll-bending process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (1): 1-6, 84.
- [2] Shinkin N V. Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production [J]. Steel in Translation, 2017, 47 (4): 235-240.
- [3] 李永堂,梁涛,雷步芳,等. 我国大型卷板机研究现状和发展趋势[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55 (5): 15-19.  
Li Y T, Liang T, Lei B F, et al. Research status and developing trend of large plate bending machine [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2020, 55 (5): 15-19.
- [4] 黄春峰. 圆锥筒形零件的压力加工成形[J]. 航空制造技术, 2003, (4): 92-93.  
Huang C F. Pressure forming of conical part [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003, (4): 92-93.
- [5] 何雪婷,王玉华,朱富慧,等. 板材弯卷成形技术的研究进展[J]. 模具技术, 2017, (6): 55-60.  
He X T, Wang Y H, Zhu F H, et al. Research progress of plate roll-bending processes [J]. Die and Mould Technology, 2017, (6): 55-60.
- [6] Hadžić N, Keran Z, Hadžina M, et al. Analysis of elastic-plastic steel plates forming based on typical shipyard's roller bending machine [J]. Ocean Engineering, 2019, 190: 106438.
- [7] 邢伟荣. 卷板机的现状与发展[J]. 锻压装备与制造技术, 2010, 45 (2): 10-16.

- Xing W R. Status and development of the bending machine for plate [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2010, 45 (2): 10-16.
- [8] Zhang Z Q, Song J L, Fu J H, et al. A refined model of three-roller elastoplastic asymmetrical pre-bending of plate [J]. *Journal of Iron and Steel Research: International*, 2014, 21 (3): 328-334.
- [9] Cai Z Y, Lan Y W. Analysis on the straight-end problem in thin-plate three-roll bending [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2011, 80-81: 585-590.
- [10] Hua M, Sansome D H, Rao K P, et al. Continuous four-roll plate bending process: Its bending mechanism and influential parameters [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 45 (1-4): 181-186.
- [11] Hua M, Baines K, Cole I. Bending mechanisms, experimental techniques and preliminary tests for the continuous four-roll plate bending process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 48 (1-4): 159-172.
- [12] 肖善超, 姚久军, 沙心勇. 四辊卷板机侧辊位移计算模型研究 [J]. *一重技术*, 2017, (4): 48-51, 72.
- Xiao S C, Yao J J, Sha X Y. Mathematical model for side roller displacement calculation of 4-roller plate benders [J]. *CFHI Technology*, 2017, (4): 48-51, 72.
- [13] 李建, 陈举庆, 姚久军. 四辊卷板机弯卷工艺及辊位移计算模型 [J]. *一重技术*, 2015, (3): 1-5, 44.
- Li J, Chen J Q, Yao J J. Modeling and computation of the four-roller bending process and roller displacement [J]. *CFHI Technology*, 2015, (3): 1-5, 44.
- [14] 周迟. 四辊卷板成形工艺技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- Zhou C. Research on Four-roll Plate Bending and Forming Technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [15] 陈德道, 杨晋, 安虎平. 四辊卷板机侧辊工艺位移计算模型的研究 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2015, 50 (3): 44-48.
- Chen D D, Yang J, An H P. Study on calculation model of process displacement for side rollers in four-roll plate bending machine [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2015, 50 (3): 44-48.
- [16] Hua M. The Mechanics of Continuous Roller Bending of Plates [D]. Birmingham: University of Aston, 1986.
- [17] Leacock G A, McCracken D, Brown D, et al. Numerical simulation of the four roll bending process [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27 (4): 370-376.
- [18] 赵军, 徐常富. 对称式四辊卷圆工艺方法及装置 [P]. 中国: CN104324988B, 2016.
- Zhao J, Xu C F. Symmetrical four-roll circular rolling process method and device [P]. China: CN104324988B, 2016.
- [19] Cao H Q, Yu G C, Yang C F, et al. Research on a control strategy of the symmetrical four-roller bending process based on experiment and numerical simulation [J]. *Symmetry*, 2021, 13 (6): 940.
- [20] Yu G C, Zhao J, Xu C F. Development of a symmetrical four-roller bending process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104 (9-12): 4049-4061.
- [21] Hua M, Cole I M, Baines K, et al. A formulation for determining the single-pass mechanics of the continuous four-roll thin plate bending process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 67 (1): 189-194.
- [22] Hua M, Sansome D H, Baines K. Mathematical modeling of the internal bending moment at the top roll contact in multi-pass four-roll thin-plate bending [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 52 (2): 425-459.
- [23] 苏传德. 卷板机电机驱动功率的计算 [J]. *山东冶金*, 1999, (3): 44-45.
- Su C D. Calculation of motor driven power of coiling plate machine [J]. *Shandong Metallurgy*, 1999, (3): 44-45.
- [24] Salem J, Champlaud H, Feng Z, et al. Experimental analysis of an asymmetrical three-roll bending process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83 (9-12): 1823-1833.
- [25] 徐兆军. 四辊卷板机卷制圆筒控制数学模型 [J]. *制造业自动化*, 2013, 35 (12): 62-64.
- Xu Z J. The mathematical model of cylinder bending control of four-roller bending machine [J]. *Manufacturing Automation*, 2013, 35 (12): 62-64.
- [26] 王艳, 胡捷飞, 许光辉, 等. 四辊预弯与连续滚弯成形的机理与试验分析 [J]. *塑性工程学报*, 2016, 23 (4): 69-75.
- Wang Y, Hu J F, Xu G H, et al. Theoretical and experimental analysis of four-roll pre-bending and continuous bending [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2016, 23 (4): 69-75.
- [27] 于兴亚. 非对称式三辊卷板机最小弯卷半径的计算 [J]. *锻压装备与制造技术*, 1978, (6): 9-10.
- Yu X Y. Calculation of minimum bending radius of asymmetrical three roll bender [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 1978, (6): 9-10.
- [28] 龚发云, 王训响. 非对称式三辊弯板机卷板数学模型的研究 [J]. *湖北工业大学学报*, 2005, (3): 13-15.
- Gong F Y, Wang X X. Research about mathematical model of asymmetrical three roll bender [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2005, (3): 13-15.
- [29] 王艳, 朱新庆, 胡捷飞, 等. 四辊卷板机连续滚弯成形工艺的数值模拟研究 [J]. *系统仿真学报*, 2018, 30 (5): 1772-1780.
- Wang Y, Zhu X Q, Hu J F, et al. Research on numerical simulation of continuous roll forming process of four-roll plate bending machines [J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30 (5): 1772-1780.
- [30] 汪兴. 四辊卷板机滚弯成形工艺研究及软件开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- Wang X. Research on Roll Forming Process and Software Development of Four-roll Bending Machine [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [31] Lin Y H, Hua M. Influence of strain hardening on continuous plate roll-bending process [J]. *International Journal of Non-Liner Me-*



- chanics, 2000, 35 (5): 883-896.
- [32] Hua M, Baines K, Cole I M. Continuous four-roll plate bending: A production process for the manufacture of single seamed tubes of large and medium diameters [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, (39): 905-935.
- [33] 周哈琼. 大型四辊卷板机卷制工艺关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- Zhou H Q. Research on the Key Technologies of the Bending Process of Large Four-roller Plate Bending Machines [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [34] Hua M, Lin Y H. Effect of strain hardening on the continuous four-roll plate edge bending process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 90: 12-18.
- [35] 林逸汉, 李凡, 张迪. 四辊轮多次弯板成形过程的刚性夹持模型 [J]. 复旦学报: 自然科学版, 2002, (5): 495-500.
- Lin Y H, Li F, Zhang D. Rigid pinch-type modeling of the multi-pass four-roll plate bending process [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2002, (5): 495-500.
- [36] 郝瑞霞, 付文智, 李明哲. 多道次多点成形过程的数值模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2006, 13 (1): 18-21.
- Hao R X, Fu W Z, Li M Z. The study on numerical simulation of multi-steps of multi-point forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13 (1): 18-21.
- [37] 周迟, 孙宇, 武凯, 等. 四辊卷板多道次滚弯成形建模与工艺参数分析 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (3): 35-41.
- Zhou C, Sun Y, Wu K, et al. Modeling and analysis of process parameters in multi-pass four-roll bending [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (3): 35-41.
- [38] 王玉华, 邓景煜, 何雪婷, 等. Invar 36 合金厚板四辊滚弯成形及回弹规律研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 59-64.
- Wang Y H, Deng J Y, He X T, et al. Study on four-roller roll-bending forming and springback of thick Invar 36 alloy plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 59-64.
- [39] 李建, 赵军, 展培培, 等. 板料自由弯曲成形及回弹理论解析 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (4): 1-6.
- Li J, Zhao J, Zhan P P, et al. Theoretic analysis of forming and springback for sheet metal air bending [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (4): 1-6.
- [40] 高桂艳, 于高潮, 赵军, 等. 四辊卷圆成形及其弹复解析 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 55-62.
- Gao G Y, Yu G C, Zhao J, et al. Rolling round process of four-roll and its springback analysis [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 55-62.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、挤压与拉拔、轧制、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生、金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册)

(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

**邮局汇款信息:**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-804

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部