

基于量纲分析的柔性立管骨架层辊弯成型弯曲变形特征预测

王心悦¹, 阎军^{1,2}, 袁振钦³, 李文博¹, 卢海龙¹, 陈金龙^{2*}

1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 工程力学系, 大连 116024

2. 大连理工大学宁波研究院, 宁波 315016

3. 招商局海洋装备研究院有限公司, 深圳 518066

摘要 柔性立管是海洋油气开发的关键运输装备, 骨架层是其最内层结构, 由扁平的钢板经过多道次辊弯和缠绕锁扣2道成型工艺加工制成。由于骨架层结构特征复杂, 几何参数繁多, 且钢板在成型过程中存在纵向及横向变形, 导致辊弯成型过程中关键加工参数对其变形特征影响尚不清晰。基于量纲分析原理, 建立了多道次辊弯关键加工参数与骨架层变形特征(弯曲角度)关系的量纲表达式, 并且采用多项式回归和符号回归方法分别获得了量纲表达式展开形式, 明确加工参数(弹性模量、钢板厚度、辊轮半径、辊轮间距)对骨架层弯曲角度的影响, 结论显示钢板厚度对弯曲角度影响较大, 当厚度从1 mm增大至2 mm时, 弯曲角度下降了27.74%。

关键词 柔性立管; 骨架层; 辊弯成型; 弯曲角度; 量纲分析

海洋中蕴含着丰富的油气资源, 在海洋油气开发中, 柔性立管连接着水下生产系统与水上储运设备(海洋平台、浮式生产储运装置等), 是油气开发的关键运输装备^[1]。与钢制立管相比, 柔性立管是由金属材料层与高分子材料层多层结构复合而成, 具有较小的弯曲半径, 受浮体、波浪、海流运动等引起

的弯曲载荷有着更好的顺应性^[2], 广泛地应用于海洋浮式生产系统。其结构如图1所示, 通常包括: 骨架层、内护套层、抗压铠装层、防磨层、抗拉铠装层、聚合物层、外护套层。多层复杂结构特征使得柔性立管的加工制造存在困难, 目前国内应用于深水领域及高温高压工况下的柔性立管主要依赖于进口^[3]。

收稿日期: 2023-06-27; 修回日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1906233, 52201312); 大连市支持高层次人才创新创业项目(2021RD16); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2002108); 江苏省自然科学基金项目(BK20201198); 宁波市自然科学基金项目(2021J002)

作者简介: 王心悦, 硕士研究生, 研究方向为柔性立管设计与分析, 电子信箱: 1851394249@qq.com; 陈金龙(通信作者), 高级工程师, 研究方向为海洋管缆工程中关键力学问题, 电子信箱: chenjl_nbi@dlut.edu.cn

引用格式: 王心悦, 阎军, 袁振钦, 等. 基于量纲分析的柔性立管骨架层辊弯成型弯曲变形特征预测[J]. 科技导报, 2024, 42(13): 86-94; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.01885

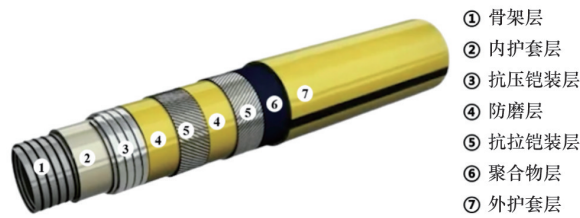


图1 深水柔性立管结构示意图

骨架层是柔性立管的最内层结构,主要用于抵抗深海环境中的外部静水压力,外压过大会使得柔性立管发生压溃失效。根据规范 API 17B^[4],为保证柔性立管具备一定的柔顺性,骨架层结构及截面如图2所示,可以看到,骨架层截面形状复杂,使得其加工制造面临较大困难。如图3所示,骨架层加工制造由2道成型工艺组成,分别为多道次辊弯成型和缠绕锁扣成型。其中在多道次辊弯成型过程中,钢板经过多组辊轮的挤压作用后成型为异型结构;在缠绕锁扣成型过程中,该异型结构通过锁扣轮机组成型为具有螺旋缠绕特征的骨架层管道,其螺旋角度接近90°。在骨架层多道次辊弯成型过程中,钢板发生多次塑性变形及回弹变形,导致其最终形成的弯曲角度尚不明确,严重影响着骨架层的成型质量。

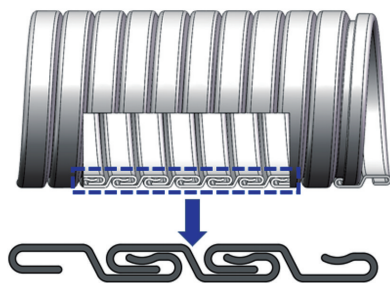


图2 骨架层结构及截面示意

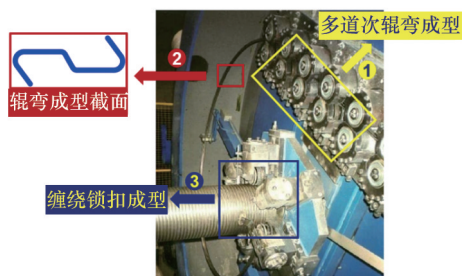


图3 骨架层成型示意

目前有研究探讨了加工参数对辊弯成型结果的影响。Safdarian等^[5]建立数值模型模拟了槽钢辊弯成型过程,并使用实验方法验证了数值模型的准确性,之后进一步探讨了关键加工参数(辊轮间距、板材厚度、成型增量角等)对样品边缘纵向应变和弓形缺陷的影响。Sheu等^[6]根据统计学原理,使用数值模型和正交取样建立了数学模型以描述成型后的U型槽变形特征(如弯曲角度、长度等),并通过方差分析明确各参数(弯角半径、摩擦系数等)对长度的影响。上述研究是通过有限元软件进行有限次数值模拟而得到的,当加工参数及试件尺寸参数发生变化时,需重新建立数值模型进行相关分析,降低了工作效率。因此一些研究人员在上述基础上进一步进行预测和优化。付泽民等^[7]针对金属板材折弯成型中的回弹现象,通过量纲分析方法建立了描述加工参数(板厚、凸模半径等)和板材回弹半径的显式数学表达式。Zeng等^[8]建立了U型通道辊弯成型数值模型,根据数值模拟结果建立响应面模型,以最小化回弹角度为优化目标,对辊弯成型过程中的加工参数(成型角增量、辊轮半径)进行了优化。

到目前为止,针对骨架层辊弯成型研究较少,且仅停留在加工成型阶段^[3,9],并未建立有效数学模型研究加工参数对成型结果的影响。本研究基于量纲分析原理,得到关键加工参数与骨架层弯曲角度的量纲表达式,用于描述骨架层辊弯成型中的板材变形特征。

1 骨架层多道次辊弯过程量纲表达式建立

量纲分析是在物理领域中建立数学模型的一种方法^[7],其利用物理定律的量纲齐次原则和用于量纲分析建模的 Buckingham π 定理,将各物理量间相互关系简化为无量纲项之间的关系,为实验方案设计和实验数据处理提供极大的便利^[7,10],因此,本文将基于量纲分析法,简化骨架层辊弯成型过程中各加工参数的相互作用,建立关键加工参数与弯曲角度之间的量纲表达式。根据文献[5,9],辊弯成

型问题涉及众多加工参数,其中弹性模量(E)、钢板厚度(ρ)、辊轮半径(R)、辊轮间距(t)对骨架层弯曲角度有着重要影响,因此,本文将分析这些加工参数对内弯角弯曲角度(θ)的影响(外弯角会在锁扣阶段进一步成型,不做讨论),各加工参数实际含义如图4所示。

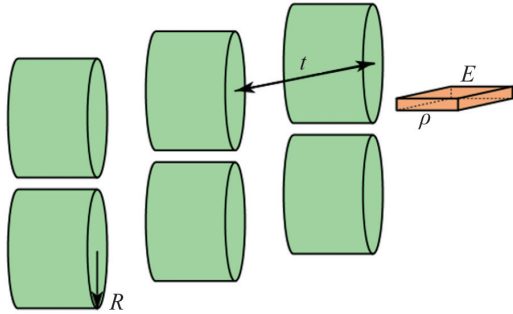


图4 辊弯成型加工参数示意

内弯角弯曲角度与这些参数的关系为

$$\theta = \varphi(E, \rho, R, t) \quad (1)$$

将其记作更一般的形式

$$f(\theta, E, \rho, R, t) = 0 \quad (2)$$

取3个基本量纲,长度 L 、质量 M 和时间 T ,式(2)中各物理量的量纲分别是

$$\theta=1 \quad [R]=L \quad [\rho]=L \quad [t]=L \quad [E]=L^{-1}MT^{-2} \quad (3)$$

为将弹性模量 E 与其他参数建立联系,引入屈服强度 σ_s (其量纲为 $L^{-1}MT^{-2}$), σ_s 取固定值(298.02 MPa)^[9],令

$$\omega = \frac{E}{\sigma_s}$$

即将弹性模量 E 转化为无量纲项,则式(2)可变为

$$f(\theta, \rho, R, t, \omega) = 0 \quad (4)$$

式(3)变为

$$\theta=1 \quad [R]=L \quad [\rho]=L \quad [t]=L \quad [\omega]=1 \quad (5)$$

由此可得到量纲矩阵

$$A_{3 \times 5} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由于量纲矩阵 A 的秩为1,即齐次方程

$$Ay = 0 \quad y = (y_0, y_1, y_2, y_3, y_4)^T \quad (7)$$

有4个基本解。

$$\begin{cases} y_0 = (1, 0, 0, 0, 0)^T \\ y_1 = (0, 1, -1, 0, 0)^T \\ y_2 = (0, 1, 0, -1, 0)^T \\ y_3 = (0, 0, 0, 0, 1)^T \end{cases} \quad (8)$$

根据 Buckingham π 定理,由这4个基本解可得到4个无量纲项

$$\begin{cases} \pi_0 = \theta^1 \rho^0 R^0 t^0 \omega^0 = \theta \\ \pi_1 = \theta^0 \rho^1 R^{-1} t^0 \omega^0 = \frac{\rho}{R} \\ \pi_2 = \theta^0 \rho^1 R^0 t^{-1} \omega^0 = \frac{\rho}{t} \\ \pi_3 = \theta^0 \rho^0 R^0 t^0 \omega^1 = \omega \end{cases} \quad (9)$$

且存在某个函数 F 使得

$$F(\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (10)$$

式(10)可转化为

$$\pi_0 = \psi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) \quad (11)$$

即

$$\theta = \psi\left(\frac{\rho}{R}, \frac{\rho}{t}, \omega\right) \quad (12)$$

至此,基于量纲分析方法,建立了骨架层内弯角弯曲角度与加工参数间的函数关系的量纲表达式,如式(12)所示,式中函数 ψ 的具体展开形式将在下面进行讨论。由于骨架层加工研究较少,缺乏相应的实验数据,因此本文将建立数值模型来获得样本数据,为确定 ψ 的具体展开形式提供数据支持。

2 骨架层多道次辊弯成型有限元仿真

2.1 模型设计

使用 ABAQUS 有限元软件^[11]对骨架层多道次辊弯过程进行模拟。通过对骨架层截面进行简化,骨架层辊弯成型目标截面及辊花图(用于描述钢板变形过程)如图5所示,在辊弯成型截面中共存在4个弯曲角,分别为外侧2个 127° 弯曲角(以下简称外弯角),内侧2个 60° 弯曲角(以下简称内弯角)^[9]。骨架层成型截面共由7个道次辊弯成型,内弯角由前2个道次成型,每个道次成型 30° ,外弯角由后6

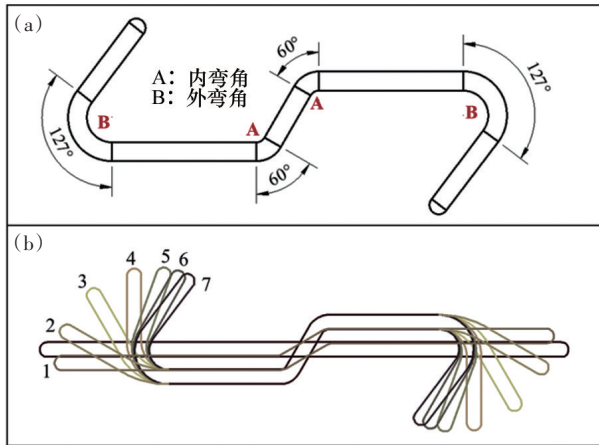


图5 成型目标截面弯曲角度(a)及辊花图(b)

个道次成型,从第2道次到第4道次,每个道次成型30°,最终成型至90°,第5道次开始,成型角度适当减小,具体成型角度分配如表1^[9]所示。

表1 各道次对应内、外弯角角度变化情况

道次编号	内弯角角度/(°)	外弯角角度/(°)
1	0→30	0
2	30→60	0→30
3	60	30→60
4	60	60→90
5	60	90→110
6	60	110→120
7	60	120→127

在骨架层辊弯成型仿真模型中,成型系统可以简化为轧辊和钢板两部分,如图6所示,模型加工参数取值:钢板长度为150 mm、钢板厚度为1.6 mm、钢板宽度为63.6 mm、辊轮间距为135 mm、辊轮半径为55 mm。对轧辊而言,其变形远小于钢板,从计算效率和计算精度两方面考虑,建模时需将其设定为解析刚体。一对轧辊之间的间隙形状应为当前道次所需成型截面形状,图7为第3道次与第4道次轧辊几何模型示意图。

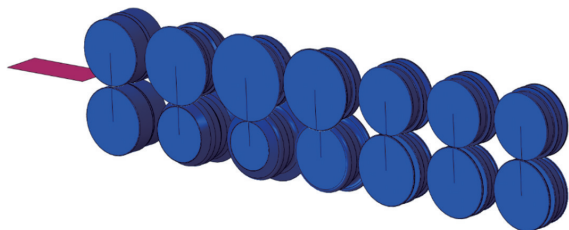


图6 骨架层多道次辊弯成型有限元模型图



图7 轧辊几何模型示意图

对钢板而言,根据规范 API 17B^[4],钢板材料选择316L不锈钢,其弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3,其塑性数据如图8^[9]所示。

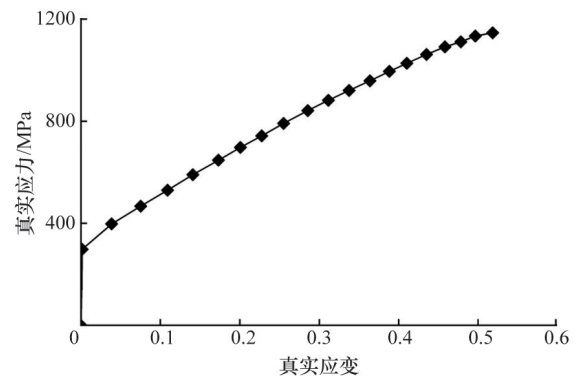


图8 316L不锈钢真实应力-真实应变曲线

2.2 网格划分及相互作用

由于钢板厚度方向的尺寸远远小于其长度和宽度方向尺寸,若采用实体单元,为避免沙漏效应,厚度方向网格尺寸较小,网格数量较多,从而导致计算时间显著增加,因此本研究选择4节点减缩积分壳单元(S4R),在壳的厚度方向采用7个积分点。由于辊弯成型目标截面弯曲角数多,弯曲角度大,因此沿宽度方向普遍采用细化网格,网格在宽度方向和长度方向的尺寸分别为1.5和4 mm。辊轮和钢板间产生摩擦,法向设置为“硬接触”,切向摩擦系数为0.1^[5]。

2.3 边界条件及分析步骤

如图9所示,辊轮只能绕自身对称轴匀速旋转,其余自由度均被限制;在钢板前端施加均匀速度以模拟前端钢板的拖拽效果。采用较大的钢板

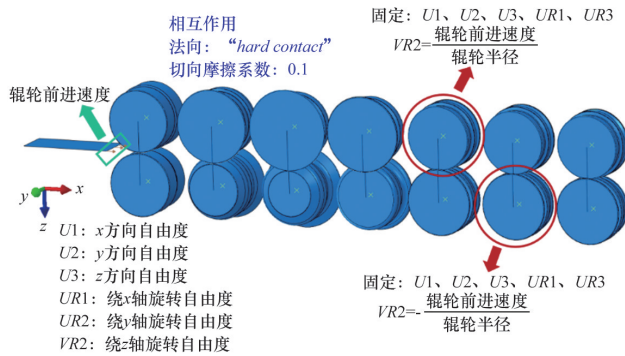


图9 边界条件

前进速度可以显著减少计算时间,提高计算效率,且钢板前进速度对辊弯成型数值模拟结果的影响很小^[12],因此本研究钢板前进速度设为1500 mm/s。

由于辊弯成型中存在着大量接触摩擦,同时也要考虑板材的塑性和几何大变形,采用隐式算法极易造成收敛性困难。由于显式算法不存在计算收敛性问题,只需保证时间增量步长小于最小稳定时间步长便可保证结果的准确性^[13],因此本研究采用显式算法计算骨架层多道次辊弯成型过程,即利用动力学方法求解准静态问题。在模拟过程中,为保证计算的准静态响应的合理性,只需保证辊弯成型过程中动能内能比小于0.05^[11]。本研究辊弯模型动能内能比曲线如图10所示,可以看到,只有钢板刚进入第1组辊轮时动能内能比大于0.05,其余时刻动能内能比均小于0.05。

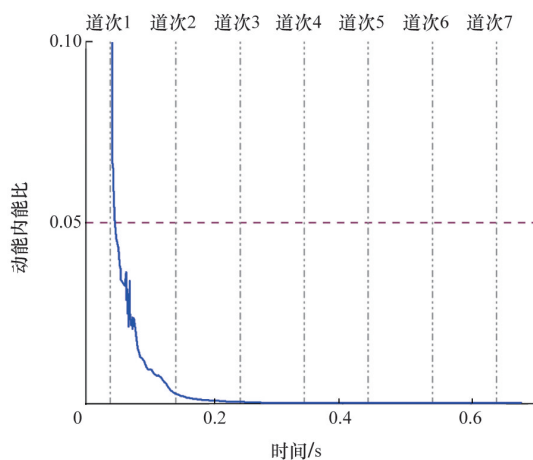


图10 骨架层多道次辊弯加工过程动能内能比曲线

辊弯成型过程及钢板最终变形如图11所示。辊弯成型后,截面内弯角弯曲角度为 49.01° ,与设计值相差18.3%,外弯角弯曲角度为 130.79° ,与设计值相差2.98%。由于骨架层在辊弯成型后还需进行缠绕锁扣成型,而缠绕锁扣成型会对外弯角进一步弯曲,并实现骨架层螺旋互锁。因此本文仅讨论各加工参数对内弯角弯曲角度(θ)的影响。

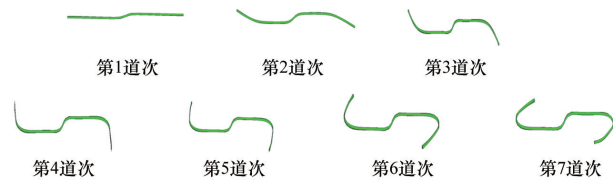


图11 钢板辊弯变形过程

3 数学模型建立

前文基于量纲分析方法,建立了式(12)所示的量纲表达式,建立了内弯角角度 θ 与加工参数的关系,但是式中函数 ψ 的形式仍未可知,因此接下来将基于函数 ψ 的展开形式进行研究。

优化拉丁超立方取样^[14]是实验设计中的一种常用取样方法,该方法是一种改进的拉丁超立方取样方法,对拉丁超立方取样获得的样本点的分布进行优化,使得新样本点分布均匀且具备随机性。在优化拉丁超立方取样过程中,各加工参数的取值范围如表2所示,得到1000组样本点,通过Python程序对ABAQUS参数化建模,计算1000组样本点对应的辊弯成型过程,得到成型后的截面内弯角弯曲角度,单个模型耗时约1.21 h(4核,3.70 GHz CPU,16 GB内存)。

在确定函数 ψ 的展开形式的过程中,为保证展开形式不仅可以拟合已知数据特征,还可拟合未知数据特征,因此使用80%的样本点数据(以下简称训练样本)确定量纲表达式展开形式,20%的样本点数据(以下简称测试样本)测试展开形式对未知数据特征的拟合精度。

本研究选择 R^2 作为精度评判的标准,取值范围为0~1,当 R^2 为1时,表明拟合结果与真实结果完全一致,计算如式(13)所示

表2 加工参数取值范围

取值范围	弹性模量 E/GPa	辊轮间距 t/mm	辊轮半径 R/mm	钢板厚度 δ/mm
下限	180	130	50	1
上限	210	140	60	2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (13)$$

式中, y_i 为真实值, \hat{y}_i 为拟合值, \bar{y}_i 为真实结果的平均值。

3.1 多项式回归方法

回归分析是研究变量间统计关系的方法,其目的是根据各种不同的回归方法建立自变量和因变量之间的关系。多项式回归可以适应各种形状的数据分布,且可以直观地表现出不同自变量对因变量的影响程度,因此在这里采用多项式回归方法,具体表达式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1, j>1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \dots \quad (14)$$

式中, y 是目标函数, x 是设计变量, β 是多项式系数, n 是设计变量的总个数。

多项式模型回归方法的实质为:确定多项式的阶数 n (模型中的最高幂次)后,将 N 组设计变量和目标函数代入多项式,即可得到 N 组包含 $n+1$ 个未知多项式系数的一阶线性方程,进而将复杂问题转化为针对多项式系数的线性回归问题,最终基于最小二乘法确定多项式中的各多项式系数。

不同多项式阶数对应的多项式回归方法有着不同的计算精度。通常来说,低阶多项式模型难以充分反映复杂问题的本质特征,而高阶多项式模型为达到高计算精度需要较多的样本数据,因此确定合适的多项式阶数成为多项式回归的关键步骤。

本研究使用了不同阶数的多项式回归方法分别确定量纲表达式的展开形式,得到不同阶数的多项式回归分别在训练样本和测试样本上的模型精度(以下分别简称为训练精度和测试精度),结果如图12所示。

可以看到:(1) 4阶多项式回归的训练精度为0.954,测试精度为0.962,当多项式阶数在4~6阶范围内时,其训练精度和测试精度均不再发生变化,

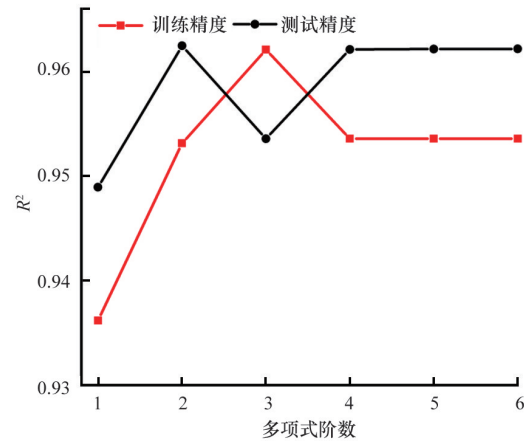


图12 1阶到6阶多项式回归对应训练精度与测试精度

原因为4阶多项式回归已可以充分描述骨架层辊弯成型的弯曲变形特征(内弯角弯曲角度),加上样本数据满足了高阶多项式回归的样本需求,因此精度不再发生变化;(2) 1阶多项式回归的训练精度和测试精度均低于高阶的多项式回归,表明1阶多项式回归难以完全反映骨架层辊弯成型弯曲变形特征;(3) 2阶多项式回归的测试精度为0.962,在各阶多项式回归的测试精度中最高,且2阶多项式回归表达式相对简单,因此使用2阶多项式回归展开量纲表达式,其展开形式如式(15)所示,展开形式中的各项系数 $c_0 \sim c_9$ 对应值分别为: 104.27、-408.78、-4587.63、-0.03、-1406.32、37732.59、0.017、52816.00、0.60、0.000021。

$$\theta = c_0 + c_1 \pi_1 + c_2 \pi_2 + c_3 \pi_3 + c_4 \pi_1^2 + c_5 \pi_1 \pi_2 + c_6 \pi_1 \pi_3 + c_7 \pi_2^2 + c_8 \pi_2 \pi_3 + c_9 \pi_3^2 \quad (15)$$

基于2阶多项式回归表达式,单独分析弹性模量、钢板厚度、辊轮半径、辊轮间距对内弯角弯曲角度的影响,结果如图13所示,可以看到:(1) 拟合角度与实际角度二者误差极小,最大误差发生在钢板厚度为2 mm时,仅为4.43%,这也再次证明了展开形式具备很高的精度;(2) 钢板厚度对骨架层内弯角弯曲角度影响较大,厚度由1 mm增大至2 mm时,弯曲角度下降了27.74%,因为厚度较大的钢板

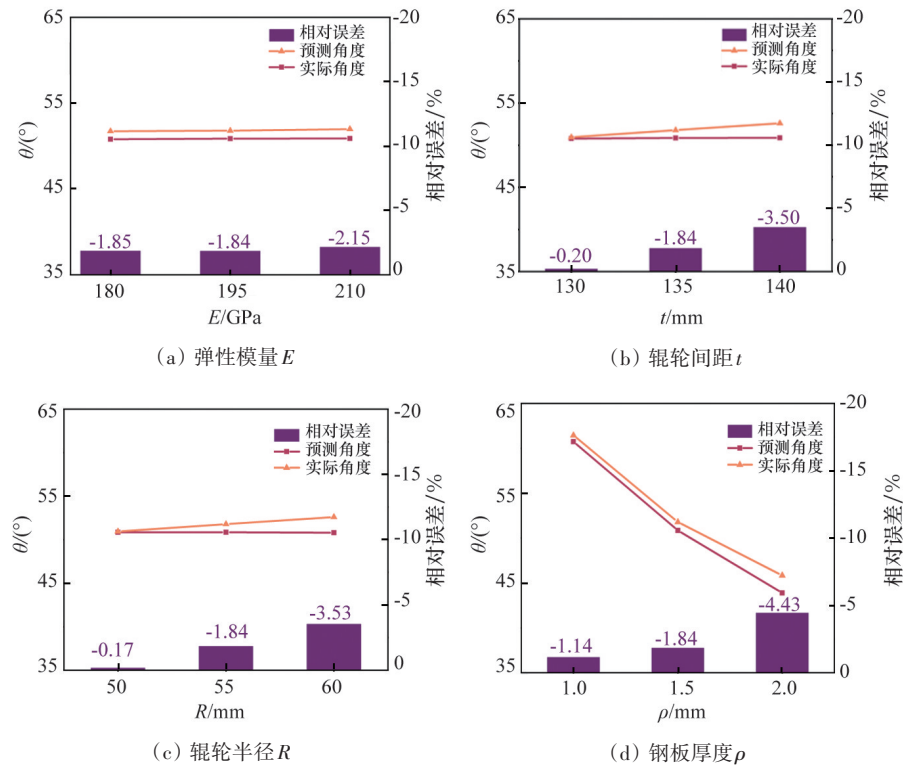


图13 多项式回归模型单一因素误差分析

可以储存更多的应变能,当钢板离开辊轮后,部分储存的应变能得以释放,使其发生更大的弹性回弹,从而使得弯曲角度下降。

3.2 符号回归方法

符号回归^[15-17]也称函数辨识,是一种基于进化算法^[18]上的回归方法。传统回归方法往往需要提前制定函数的参数化模型,但符号回归不需要提前制定函数模型,便可在数据中以拟合误差最小为目标确定函数模型和相关参数,最终可以得到一个显性的数学函数表达式。为避免多项式回归中的潜在影响因素未被发现,因此本文又使用符号回归方法确定式(12)所示的量纲表达式的展开形式,建立骨架层内弯角弯曲角度与加工参数间的关系。基于符号回归的量纲表达式展开形式如式(16)所示,式中各项系数 $c_0 \sim c_{18}$ 对应值分别为:-10.10、12.38、-17.37、11.13、0.11、1.42、2.24、11.20、5.35、1.65、0.10、1.40、11.60、2.29、-0.57、-1.12、3.14、-0.09、21.12。对符号回归展开形式进行误差分析,训练精度为0.955,测试精度为0.957,二者均大于0.95,表明该式同样可以预测骨架层辊弯成型的内弯角弯曲角度。

$$\theta = \left(\frac{\left((c_0 + c_1) - \frac{c_2}{c_3} \right) c_4}{c_5 c_6 \pi_3 - \frac{(c_7 + c_9 \pi_2) c_{10}}{c_{11} c_{12}}} + \frac{c_{13}}{c_{14} \pi_3} \right) + \left(c_{15} \pi_3 c_{16} \pi_1 \right) c_{17} + c_{18} \quad (16)$$

由于符号回归展开形式过于复杂,因此保留计算过程中权重较大的项,对其展开形式加以简化,简化后由18项变为7项,简化形式如式(17)所示,式中各项系数 $c_0 \sim c_7$ 对应值分别为:2.94、0.30、-89.88、1.65、2.09、-0.37、-1.45、21.12。且相较于式(16)而言,简化符号回归展开形式与原展开形式的训练精度与测试精度仅在小数点后6位后有所变化,表明权重较大的项均保留下来。

$$\theta = \frac{1}{c_0 \pi_3} + \pi_3 \pi_1 c_1 + \frac{1}{c_2 \pi_3 + \frac{\pi_1 (c_3 + \pi_2 + c_4) c_5}{c_6 \pi_1}} + c_7 \quad (17)$$

基于简化符号回归展开形式对弹性模量、钢板厚度、辊轮半径、辊轮间距各个加工参数单独进行分析,结果与图13高度保持一致,表明基于2种不同原理所构造的量纲表达式展开形式均可以很好地预测骨架层辊弯成型内弯角弯曲角度。

4 结论

针对骨架层多道次辊弯成型后的内弯角弯曲角度进行研究,基于量纲分析方法建立了骨架层弯曲角度 θ 与加工参数(弹性模量 E 、钢板厚度 ρ 、辊轮半径 R 、辊轮间距 t)之间的量纲表达式,并基于多项式回归和符号回归方法分别确定了量纲表达式的具体展开形式,且这2种展开形式均能较好地预测骨架层辊弯成型内弯角弯曲角度。此外,基于2阶多项式回归展开形式对各加工参数进行分析,发现钢板厚度对骨架层内弯角弯曲角度有重要影响,随着厚度增大,弯曲角度明显减小;同时该展开形式的拟合角度与真实角度误差均小于5%,再次验证了模型的准确性。

参考文献(References)

- [1] 阎军, 英玺蓬, 步宇峰, 等. 深水柔性立管结构技术进展综述[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(6): 745-749.
- [2] 刘小艳. 面向目标油田的动态管缆线型设计与分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [3] 李鹏. 海洋柔性管道加工工艺力学研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [4] American Petroleum Institute. API 17B[R]. Washington: American Petroleum Institute, 2014.
- [5] Safdarian R, Moslemi Naeini H. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 92: 130-136.
- [6] Sheu J J. Simulation and optimization of the cold roll-forming process[C]//Proceedings of AIP Conference Proceedings. Columbus: AIP, 2004: 452-457.
- [7] 付泽民, 莫健华, 陈伟, 等. 基于量纲分析法的金属板材折弯回弹数学模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 53-58.
- [8] Zeng G, Li S H, Yu Z Q, et al. Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method[J]. Materials & Design, 2009, 30(6): 1930-1938.
- [9] 隋云杰. 深水柔性管道骨架层加工力学研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [10] 倪玲英. 工程流体力学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2012.
- [11] Hibbitt K. Abaqus: Getting started with abaqus/explicit (interactive version) [M]. Providence: ABAQUS, Inc. 2002.
- [12] Tehrani M S, Hartley P, Naeini H M, et al. Localised edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(2): 184-196.
- [13] Abaqus 6.12 documentation[M]. Providence, Rhode Island, US: Simulia, Dassault Systemes, 2012.
- [14] Park J S. Optimal Latin-hypercube designs for computer experiments[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 1994, 39(1): 95-111.
- [15] Dumitrescu D, Dumitrescu A, Jain L C, et al. Evolutionary computation[M]. Boca Raton: CRC Press, Inc. 2000.
- [16] 林海. 基于符号回归的高频旋转悬臂机构振动特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [17] 盛文韬. 基于多目标优化的符号回归泛化性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [18] Koza J R. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection[M]. Cambridge: MIT Press, 1992.

Prediction of bending deformation characteristics of flexible tubular carcass layer roll bending with dimensional analysis

WANG Xinyue¹, YAN Jun^{1,2}, YUAN Zhenqin³, LI Wenbo¹, LU Hailong¹, CHEN Jinlong^{2*}

1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, International Research Center for Computational Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
2. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China
3. China Merchants Marine and Offshore Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518066, China

Abstract Flexible riser is a critical transportation device for offshore oil and gas development, and its innermost structure is the carcass layer, which is built from flat steel plates through multiple passes of roll bending and winding lock forming processes. Due to the complex structural characteristics and numerous geometric parameters of the carcass layer, as well as the longitudinal and transverse deformations of the steel plate during forming process, the influence of key processing parameters on its deformation characteristics during roll bending shaping is not clear. In this paper, based on dimensional analysis principles, dimensionless expressions for the relationship between key processing parameters and the deformation characteristics (bending angle) of the carcass layer in multi-pass roll bending are established. Using polynomial regression and symbolic regression methods, the expanded forms of dimensionless expressions are obtained to clarify the effects of processing parameters (elastic modulus, steel plate thickness, roller radius, roller spacing) on the bending angle of the carcass layer. Conclusion shows that the steel plate thickness has a significant impact on the bending angle and that when the thickness increases from 1 mm to 2 mm, the bending angle decreases by 27.74%.

Keywords flexible pipes; carcass layer; rolling forming; bending angle; dimensional analysis ●



(责任编辑 王微)