

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0706

工艺参数对汽车 EGR 管件三维弯曲成形质量的影响分析

何金明^{1,2}, 白永洁³, 束学道^{1,2*}, 徐海洁^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211;
3. 宁波阿能集团, 浙江 宁波 315145)

摘要: 为减少汽车废气再循环(Exhaust Gas Recirculation, EGR)管件三维弯曲缺陷, 提高成品率, 本文建立了 304 不锈钢本构模型, 采用数值仿真与实验相结合方法对模型成形参数中相对壁厚、相对半径对管材的最大主应变、最大壁厚减薄率等影响因素进行探索, 分析相对壁厚、相对弯曲半径对管材弯曲过程中成形质量的影响。结果表明, 管材在弯曲成形过程中, 相对壁厚越小, 相对弯曲半径越小, 则管材越容易产生裂纹以及失稳起皱等缺陷; 随着弯曲角度的增大, 管材弯曲最大壁厚减薄率值的增大趋于平缓。对于易发生塑性变形的金属材料, 其相对壁厚及相对弯曲半径的取值是否合适是减少其裂纹产生的关键因素。故研究结果可为获得高质量的管件提供理论支撑。

关键词: EGR 管件; 三维弯曲; 相对壁厚; 相对弯曲半径

中图分类号: F407.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 03-0028-08

自国家实施“十四五”规划以来, 推动“碳达峰碳中和”战略成为了重要议题。燃油汽车尾气排放的大量 CO₂ 导致全球温室效应不断加剧, 同时也排放如 CO、NO_x 等有害气体, 对全球气候环境造成了巨大影响^[1]。特别是 2023 年“美国毒云”事件更加凸显了气候环境问题的紧迫性。面对日益严峻的环境问题和国家对环境问题的高度重视, 环保产业得到快速发展, 汽车发动机 EGR(Exhaust Gas Recirculation, EGR)的研发和制造也成为了汽车制造业的热门课题。

汽车发动机 EGR 的研发和制造涉及到许多管件, 其中绝大多数是弯曲管件。因此要实现汽车发动机 EGR 的高效量产, 就必须对弯曲管件的成形质量提出更高要求。目前, 弯曲管件的生产工艺流程主要包括清洗、管端成形、弯管成形、电阻焊、钎焊等步骤, 其中有许多技术问题需要注意和攻克。弯管成形是非常关键的一个步骤, 并且是一个复杂的多参数耦合过程, 涉及到三个主要的非线性因素:

几何非线性、物理非线性和边界非线性。几何非线性主要指坯料在成型过程中出现的大幅度位移、转动和变形; 物理非线性指材料特性对成型结果的影响; 边界非线性则是指模具与工件之间接触摩擦对成型结果的影响。这些非线性因素相互耦合, 会直接影响到最终的成型结果^[2]。在成形加工过程中, 如果各种参数选择不当, 通常会出现起皱、拉裂、截面畸变、回弹等质量缺陷^[3]。

为解决上述问题, 国内外学者从不同角度开展了研究。王永军^[4]利用 MATLAB 网络技术提出拉弯成形预测控制模型, 以改善板材加工效率, 但不适用于弯管成形。吴秀林^[5]利用 Stewart 机构的智能弯管机优良设计, 以提高弯曲式质量, 不过由于场地和设备上的局限, 还无法达到高精度运动输送的需要。Tang^[6]研究材料应力和应变计算方法虽然有效, 但弯管精度低, 并且还存在适用性欠佳的问题。Kumar^[7]使用 ABAQUS 有限元分析软件系统, 采用了如三维空间模型、网格划分等多种方

收稿日期: 2023-07-10.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51975301); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ22E050002); 宁波市重点研发计划项目(2022Z064)。

第一作者: 何金明, 硕士研究生, 主要研究方向: 金属塑性成形。E-mail: 2111081108@nbu.edu.cn

*通信作者: 束学道, 博导/教授, 主要研究方向: 塑性成形工艺与设备。E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

法,以期更准确地预测和分析复杂的弯曲受力情况,从而提高管材的弯曲精度和使用效果,但由于缺乏可行的方案,尚未能够提供一个最佳的几何参数.

综上所述,当前研究主要集中在成形质量控制和应用领域等方面,尽管已经取得了一些进展,但仍然存在模型适用性、成形质量不稳定等问题.因此,建立合适的有限元仿真模型,并与实验相结合研究工艺参数对弯管成形质量的影响仍是当今亟待解决的重要课题.

本文针对产生管件缺陷的影响因素,基于实验基础,通过 Dynaform 有限元分析软件建立弯管成形的有限元模型,对弯管成形过程进行模拟,根据后处理结果对弯管成形过程中弯管成形产生裂纹以及起皱等缺陷的原因进行剖析,为获得高质量的管件提供理论支撑.

1 管件材料成分及本构模型

304 不锈钢具有出色的耐腐蚀性、高强度和高韧性等特点,已被广泛应用于多个领域,并且已成为一种理想的不锈钢材料.其主要化学成分包括镍和铬,此外钢硬度也是一个重要指标,通常要求铬质量分数不低于 18%,镍质量分数不低于 8%^[8].其具体化学成分见表 1.

本构模型是用来描述材料在不同应力状态下变形和破坏行为的数学模型.在描述 304 不锈钢的力学性质时,可以采用线性弹性模型和塑性本构模型相结合的方式.

(1)线性弹性模型.线性弹性模型适用于 304 不锈钢在较小应变范围内具有良好线性弹性特性的情况,该特性可以通过胡克定律来描述.根据胡克定律,304 不锈钢的应力-应变关系可用如下方

表 1 304 不锈钢的化学成分 %

成分	含量
C	≤0.08
Mn	≤2.00
P	≤0.045
S	≤0.030
Si	≤1.00
Cr	18.0~20.0
Ni	8.0~11.0

程式表示:

$$\sigma = E \times \varepsilon, \quad (1)$$

式中: σ 为应力; E 为弹性模量; ε 为应变.

(2)塑性本构模型.在高应变范围内,304 不锈钢将经历塑性变形,其本构模型可采用 von Mises 屈服准则和材料流动规律进行描述. von Mises 屈服准则是一种常用的塑性本构模型^[9],可用如下方程式表示:

$$f = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 - 2Y^2 \leq 0, \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力; Y 为屈服强度.

材料流动规律可用如下方程式表示为:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad (3)$$

式中: K 为材料流变参数; ε_0 为参考应变率; n 为材料的硬化指数.

在弯管成形过程中,评估起皱趋势可以通过调用 FLD 曲线来实现. FLD 曲线常被用于描述金属在成形过程中的局部失效情况,而起皱是其中一种常见的失效现象.因此,FLD 曲线可以作为起皱的评估准则.另外在破坏准则方面,可采用应变硬化准则来描述 304 不锈钢的破坏行为,该准则基于材料等效塑性应变达到设定临界值时发生的破坏.通过选择合适的破坏准则,可以对 304 不锈钢在成

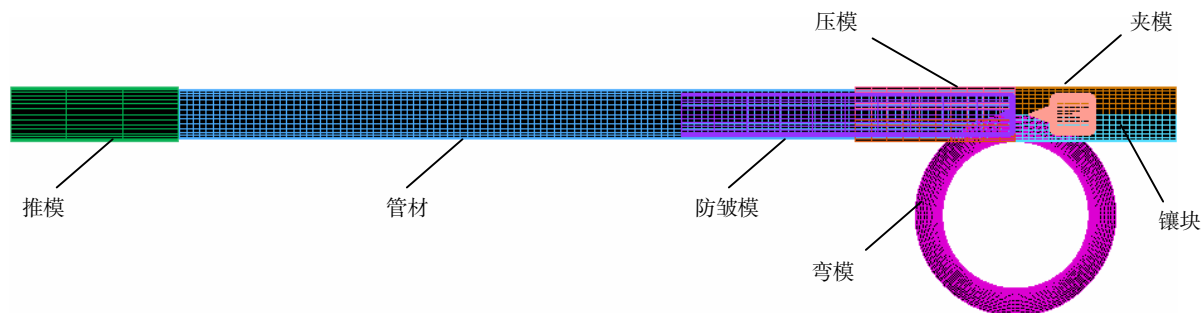


图 1 汽车 EGR 管件弯曲三维有限元模型

形过程中的破坏行为进行评估和预测。

2 有限元仿真模型建立

为能够得到较为准确的有限元分析结果,在直接加载时,所设置的硬化条件、变形条件、工艺参数等定义条件需要与得到真实应力—应变曲线的拉伸试验条件相吻合。

运用 Dynaform 有限元分析软件,建立如图 1 所示的汽车 EGR 管件弯曲的三维有限元模型^[10]。

在前处理过程中,选择薄壳单元作为管材模型,并将弯模、压模、镶块、夹紧模和防皱模等模具模型简化为刚性实体单元。管材长度设置为 250 mm,并且被均匀地划分为 500 个网格,每个网格长度为 0.5 mm。在材料库中,选择 304 不锈钢作为管材材料,材料最小抗拉强度(R_m)为 515 MPa,最小屈服强度(R_p)为 205 MPa,弹性模量(E)为 207 GPa,泊松比(ν)为 0.28,硬化指数(n)为 0.502。304 不锈钢应力—应变曲线如图 2 所示。

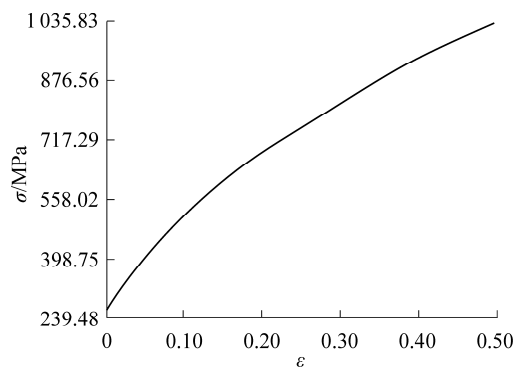


图 2 304 不锈钢 σ — ε 曲线图

工序设定上,管材进给距离设置为 50 mm,弯管初始弯曲角度设置为 30° ,根据弯管模半径的不同,设置相对应的弯曲半径。对于接触方式,管坯与模具设定为面—面接触,摩擦定律选用库仑摩擦定律^[11],304 不锈钢摩擦系数设定为 $\mu=0.125$ 。为确保零间距的安装,夹紧模、镶块和管坯之间的接触处被严格控制在 0 mm,而其余部位的接触处则被精确控制在 0.1 mm 以内。此外,针对特殊的管材结构,还需要进行精确调节芯棒和球头接触处,以确保接触处的稳固性。有限元分析软件通过中心差分法、动态显示时间积分法以及 LS-DYNA 非线性动力有限元进行计算机模拟,能够实现高效、准确的有限元分析^[12]。

3 工艺参数对弯管成形质量的影响

3.1 相对弯曲半径对弯管成形质量的影响

弯管相对弯曲半径指弯管半径与管壁厚度的比值,通常用 R/h' 表示。弯管半径 R 指弯管曲线的半径,它描述了弯管曲率的大小。弯管壁厚 h' 指弯管壁厚,通常用来衡量弯管的强度和承载能力。选取规格为 20 mm $\times$ 1 mm 的 304 不锈钢管及其不同的相对弯曲半径,通过 Dynaform 有限元仿真分析软件进行仿真分析。模拟中的弯管初始弯曲角度设定为 30° ,每次递增 30° ,最大弯曲角度为 150° 。

在不同相对弯曲半径下,选取规格为 20 mm $\times$ 1 mm 的管材进行 90° 弯曲操作。图 3 即为相应的最大主应变值和最大主应力值的对比情况。

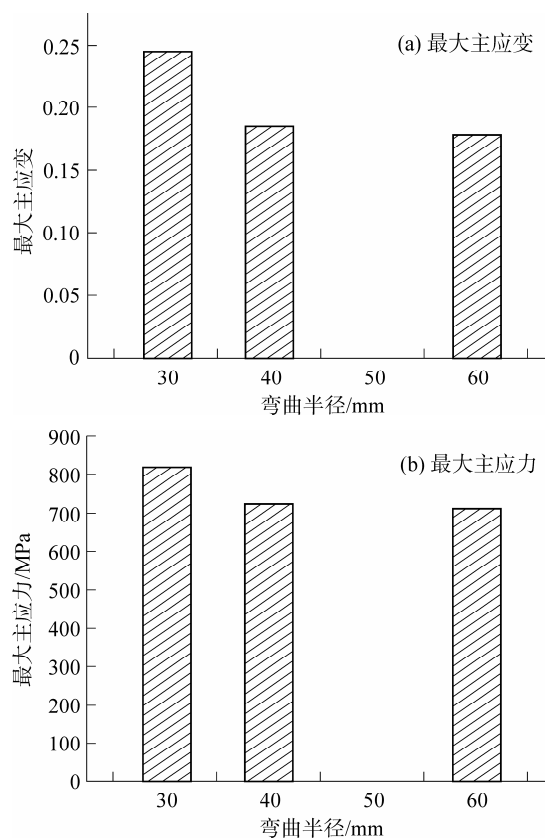


图 3 最大主应变与最大主应力柱状图

根据图 3 的结果可见,当相对弯曲半径减小时,管壁所受应力和应变增加,容易导致产生裂纹^[13]。接下来可进一步探究规格为 20 mm $\times$ 1 mm 弯管在不同相对弯曲半径下的最大壁厚减薄率变化。其中,壁厚减薄率公式为:

$$H = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: H 为壁厚减薄率; h_0 为原始壁厚; h 为弯曲成形后的壁厚。

为此, 进行了一系列仿真实验, 并绘制了如图 4 所示的不同相对弯曲半径下最大壁厚减薄率曲线对比图。由图可见, 弯管最大壁厚减薄率随弯曲角度的增大而增大, 但在较小角度下增长幅度较大, 随后增长幅度趋于平缓。另一方面, 当弯管相对弯曲半径较小时, 其最大壁厚减薄率更大。

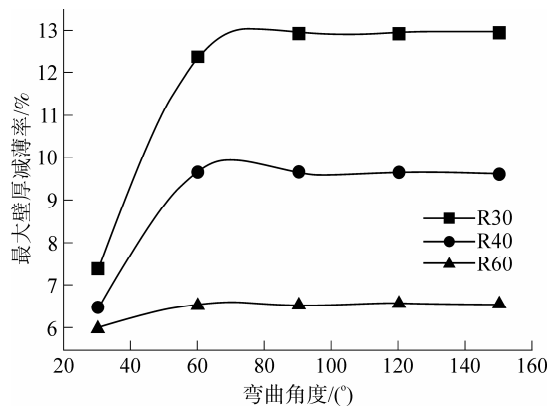


图 4 不同相对弯曲半径下的最大壁厚减薄率

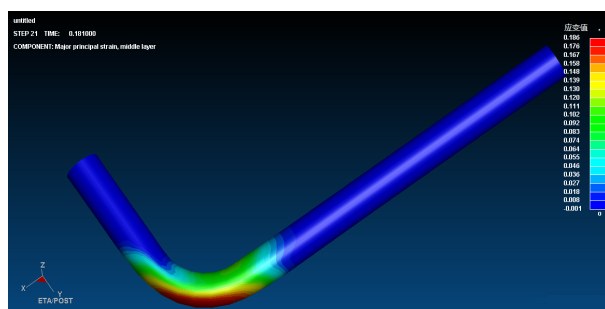
当相对弯曲半径小于某个临界值时, 弯管壁厚应力则会超过材料极限强度, 从而导致裂纹的

产生^[14]。这是因为相对弯曲半径越小, 弯管在弯曲过程中所受应力增大, 使得弯管的壁厚减薄率也增大。在弯曲过程中, 弯管外侧管壁的金属内部会被拉伸, 而内侧管壁的金属内部则会被压缩, 从而导致管壁的不均匀变形^[15]。若弯管相对弯曲半径过小, 弯管外侧管壁可能会被拉伸到超过其极限强度, 从而导致破裂。

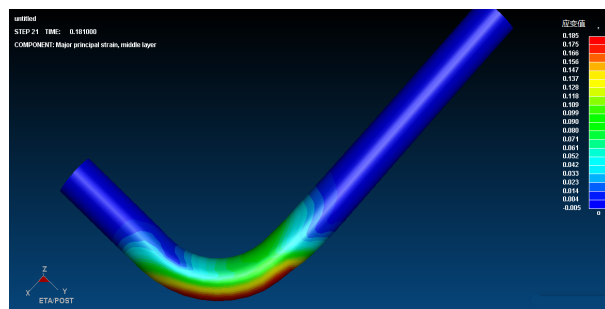
因此在设计和制造弯管时, 需要考虑材料的强度和弯曲要求, 选择合适的相对弯曲半径。同时, 需要采取相应措施来减小壁厚的减薄率。此外, 还需要注意弯管的制造工艺和质量控制, 确保弯管的壁厚均匀, 避免出现缺陷, 以确保弯管的安全性和可靠性。

3.2 相对壁厚对弯管成形质量的影响

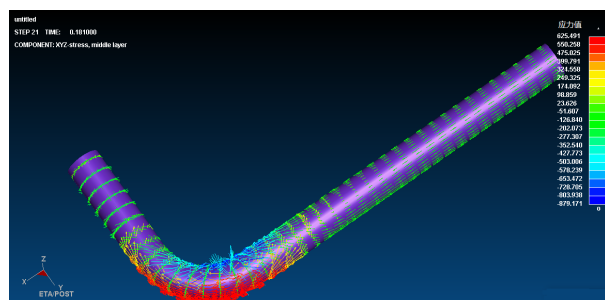
弯管相对壁厚是弯管壁厚与其直径的比值, 通常用 h/D 表示。弯管壁厚 h 是弯管壁厚度, 通常用来衡量弯管的强度和承载能力。而弯管直径 D 则指弯管截面直径, 常用来描述弯管的尺寸大小。相对壁厚是弯管在弯曲过程中体现弯管承受外载荷能力的一个重要指标。通过 Dynaform 有限元仿真分析软件对 304 不锈钢管进行有限元仿真模拟, 管材规格分别为 $16 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 和 $20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 表示外径分别为 16 mm 和 20 mm, 壁厚均为 1 mm



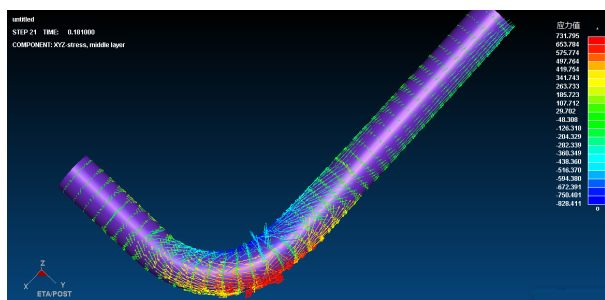
(a) 16 mm × 1 mm 最大主应变云



(b) 20 mm × 1 mm 最大主应变云



(c) 16 mm × 1 mm 应力矢量云



(d) 20 mm × 1 mm 应力矢量云

图 5 最大主应变云图及应力矢量云图

(文后相关规格表述与此相同). 并将其相对弯曲半径均设置为 2. 在模拟中, 弯管初始弯曲角度设定为 30° , 每次递增 30° , 最大弯曲角度为 150° . 当 2 种规格的管材弯曲 90° 时, 得到如图 5 所示的最大主应变云图与应力矢量云图. 这些模拟结果为进一步分析和评估弯管的性能提供了重要的参考依据.

根据图 5 所示, 弯管在成形过程中受到外侧切向拉应力和内侧切向压应力的影响, 导致弯管弯曲部分的内外侧发生应力集中. 这种应力集中会降低弯管的强度和耐久性, 甚至可能导致弯管的破裂或变形. 在相同相对弯曲半径情况下, 规格为 $20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 弯管的最大主应变要大于规格为 $16\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的弯管, 最大主应力也呈现相同趋势. 因此在弯曲过程中, 在其他影响因素相同的情况下, 相对壁厚越小, 弯管在成形过程中不仅存在应力集中现象, 而且最大主应变和主应力也越大. 因此, 相对壁厚较小的弯管在成形过程中更容易出现褶皱和拉裂缺陷.

对于弯管出现裂纹的情况, 主要研究了弯管的壁厚减薄率. 弯管的壁厚减薄率是指在弯管成形过程中, 弯曲部位的壁厚相对于直管部位壁厚减少的程度. 在弯管成形过程中, 由于管材受到弯曲力作用, 弯曲部位的管壁会发生拉伸和压缩, 导致管壁厚度减少. 如果壁厚减薄率过大, 就会降低弯管强度和耐久性, 甚至出现裂纹和断裂等问题. 因此, 弯管的壁厚减薄率可以直观地反映弯管在成形过程中出现裂纹的风险.

图 6 为弯曲角度不同时的最大壁厚减薄率的变化曲线图对比. 从图中横向观察可知, 随着弯曲角度的增加, 弯管最大壁厚减薄率呈不断增加趋势. 然而在较小角度下, 增长幅度较大; 而随着角度继续增加, 增长幅度逐渐趋于平缓^[16-17]. 从纵向观察可知, 当相对弯曲半径相同时, 相对壁厚越小, 弯管的最大壁厚减薄率越大. 这是因为相对壁厚较小意味着弯管的内径相对较大, 而管壁相对较薄^[18]. 因此在相同工作条件下, 弯管受到的应力也相对较大, 导致壁厚减薄率增加.

相对壁厚较小的弯管会产生较大壁应力, 从而容易出现裂纹. 当弯管的相对壁厚小于一定值时, 管壁应力超过了材料极限强度, 就会发生裂纹.

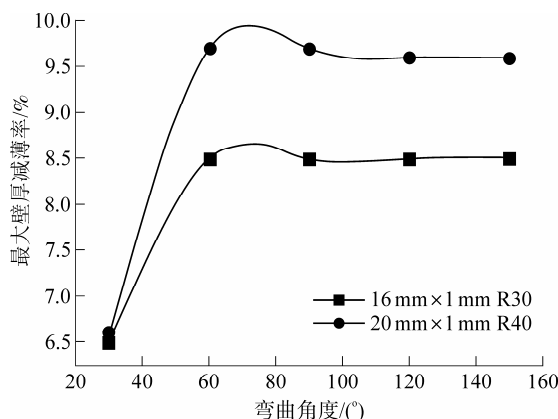


图 6 最大壁厚减薄率变化对比情况

因此, 在设计和制造弯管时, 需要根据材料的强度和弯曲要求选择合适的相对壁厚, 以避免裂纹的产生.

4 实验及结果验证

4.1 实验条件

实验中采用 304 不锈钢管材, 其管外径为 $d_0=16\text{ mm}$ 和 20 mm , 管壁厚为 $h_0=1\text{ mm}$. 弯管极限角度 θ 选取为 150° , 并使用不同弯曲半径的弯模进行实验. 实验采用型号为 SFWGJ/SZWGJ 的 30 数控弯管机进行管材的弯曲. 在弯曲过程中, 由于 304 不锈钢的弯曲形式属于有芯绕弯, 因此需要使用芯棒来提供支撑.

实验选择子弹头芯棒和常规一球头芯棒进行测试. 实验开始前, 对管材的几何参数进行测量和筛选. 当弯管成形完成后, 采用激光线切割方式对试样进行切割, 以便准确测量并计算管材弯曲后的壁厚减薄率和椭圆度. 此外, 实验还考虑了拉裂的可能性以及截面畸变程度.

4.2 实验结果分析

4.2.1 实验现象及分析

实验选用 $16\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 和 $20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 2 种规格 304 不锈钢管材进行研究. $16\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 管材采用 R25、R28、R30 和 R50 4 种半径的弯模, 而 $20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 管材采用 R30、R40 和 R60 3 种半径的弯模. 实验结果表明, 在各种弯曲半径下, 管材均不会发生拉裂现象. 然而当相对弯曲半径较小时, 弯曲角度越大, 管材越容易发生失稳起皱现象. 尤其是当相对弯曲半径等于 1 时, 即使弯曲角度只

有 30° , 也发生了失稳起皱现象。

当弯管的相对弯曲半径等于 3 时, 即使弯曲角度为 150° , 弯管也没有发生失稳起皱。因此, 在进行弯管成形过程中, 在保证模具夹紧弯管, 芯棒设置默认伸出量的情况下, 相对于弯曲半径较大的弯管, 当弯曲角度较小时, 弯管就不易发生拉裂以及失稳起皱的现象。

相对壁厚和相对弯曲半径是影响管材弯曲过程中起皱的关键因素。随着相对壁厚和相对弯曲半径的减小, 管材在弯曲过程中越容易产生裂纹和不稳定皱纹等缺陷。同时, 弯曲角度的增加也会增加管材弯曲的最大壁厚减薄率。

当弯曲角度增大时, 管材内侧管壁被压缩的程度会超过其极限强度, 从而导致管材失稳起皱。此外, 弯曲角度增大还会导致管材内径变小, 从而进一步增加管材失稳起皱的风险。当相对弯曲半径越大时, 管材的弯曲角度就相对较小, 此时管材内侧和外侧的壁厚受到的应力分布就比较均匀, 因此管材失稳起皱风险较小^[19]。

为减少起皱的发生, 需要合理控制弯曲角度, 弯曲角度过大会增加管材弯曲内侧的壁厚, 容易产生起皱。此外, 如果能合理选择相对壁厚和相对弯曲半径, 就可以减少起皱。一般来说, 相对壁厚和相对弯曲半径应尽量大, 但也不能过大。同时, 加工工艺也要进行相应优化(如加工速度、加工温度、加工润滑等), 同样可以减少起皱的发生。

综上所述, 通过控制弯曲角度、选择合适的相对壁厚和相对弯曲半径以及优化加工工艺等措施, 都能有效减少管材在弯曲过程中的起皱现象。

4.2.2 实验数据结果对比分析

实验分别对规格为 $16\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 和 $20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的弯管进行弯曲, 并通过轴向与径向剖面测量其各处壁厚。将有限元法的仿真结果(FEM)与实验(EXP)所测得的壁厚减薄率进行比较, 结果如图 7 所示。

通过实验与仿真数据的对比, 可以发现在弯曲角度小于等于 90° 情况下, 两者数据较为吻合, 最大误差分别为 3.03%、3.51%、2.702%、3.077%, 误差均小于 5%。然而当弯曲角度大于 90° 时, 实验数据与仿真数据存在较大偏差。这种差异主要是由于实验数据受到许多不可控因素的影响, 如模

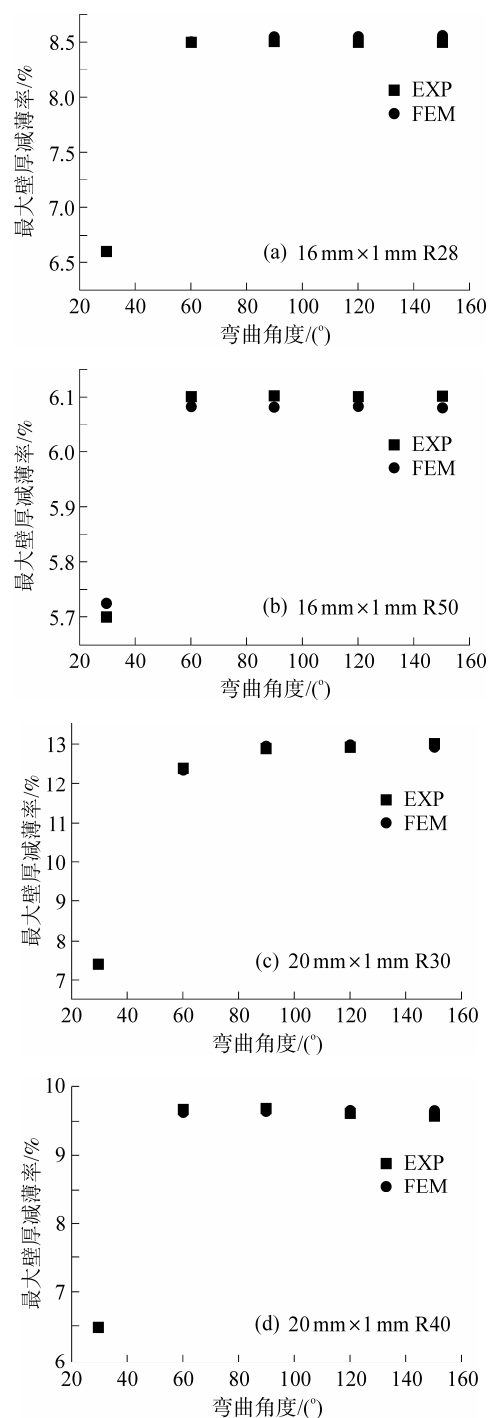


图 7 壁厚减薄率有限元仿真与实验结果的对比

具精度、测量误差、材料性质误差和材料变形等。尽管存在差异, 但两者总体趋势相同, 因此通过仿真数据可以验证相对弯曲半径和相对壁厚对弯管成形质量的影响。

此外, 实验还测试了弯管在成形过程中的截面畸变率。截面畸变率是指在弯曲加工过程中, 由

于应变的非均匀分布而导致弯管截面形状变化程度的度量. 图 8 显示了 $16\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 和 $20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 弯管截面畸变率的对比情况. 从图 8 的横向观察, 随着弯曲角度的增加, 弯管截面畸变率也增加. 此外, 当相对弯曲半径较大时, 截面畸变率的增长幅度较为平缓. 从图 8 的纵向观察, 相同规格的弯管, 其相对弯曲半径越小, 截面畸变率越大. 因此, 相对弯曲半径是影响弯管截面畸变的重要因素^[20].

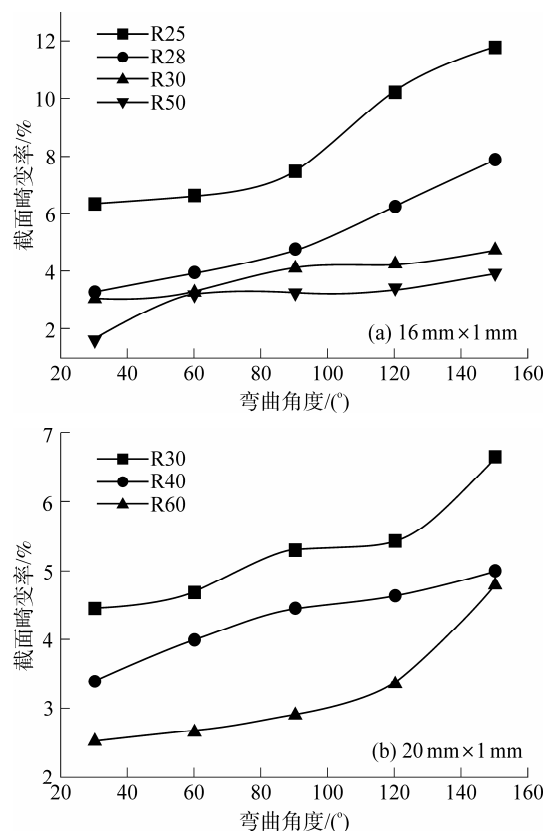


图 8 弯管截面畸变率对比图

随着弯曲半径的减小, 管材应力也减小, 从而导致截面形状发生明显变化. 内部压缩应力和外部拉伸应力的作用导致管材形状发生显著变化, 并进一步影响截面形状. 为了减小管材截面的畸变率, 应尽可能选择较大的弯曲半径.

5 结论

(1)在工艺参数中, 相对弯曲半径和相对壁厚对于弯管的成形质量具有重要影响. 随着相对弯曲半径的减小, 壁厚也会变得更小, 从而使得管材的壁厚减薄率会更高, 增加了管材出现破裂的风

险.

(2)相对壁厚和相对弯曲半径是影响管材弯曲过程中起皱的关键因素. 当管材弯曲角度增加时, 由于相对壁厚和相对弯曲半径的减小, 管材外部壁厚会超出其极限强度, 导致管材不稳定, 并产生皱纹.

(3)研究表明, 对于相同规格的管材, 缩小相对弯曲半径会显著增加弯管的截面畸变率. 意味着在相对弯曲半径逐渐减小的情况下, 确保弯管截面畸变率控制在合理范围内将面临更多限制. 因此, 相对弯曲半径成为控制截面畸变率的一个关键参数.

参考文献:

- [1] 张传正. 基于驾驶意图识别的纯电动汽车整车控制策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [2] 许杰. 薄壁管数控弯曲精确成形过程参数优化研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [3] 吴文杰. 液压无芯绕弯弯管机的自动弯管控制及弯管工艺参数优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [4] 王永军. 拉弯精确成形智能控制技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [5] 吴秀林. 基于 Stewart 平台机构的智能弯管机的优化设计与运动控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [6] TANG N C. Plastic-deformation analysis in tube bending [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(12):751-759.
- [7] KUMAR A. Optimizing the rotary draw tube bending process to avoid wrinkles[J]. International Journal of Modelling and Simulation, 2008, 28(3):281-291.
- [8] 方振兴. 304 钢表面钴基合金激光熔覆工艺研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [9] 杨洪刚. 管板电阻点焊熔核形成机理及特征分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [10] 林兵兵. 薄壁圆管小弯曲半径数控绕弯成形工艺研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- [11] 孙屹博, 于波, 吴国雄. 关节轴承锥曲面模具冷挤压装配时外圈的成形仿真与分析[J]. 轴承, 2019(12):16-21.
- [12] 樊子天, 鄂大辛, 陈吉生. 材料性能和相对壁厚对管材助推弯曲影响的分析[J]. 精密成形工程, 2013, 5(2):16-19, 60.
- [13] 余心宏, 董秋月, 赵小军. 飞机小半径导管中频压缩弯曲工艺研究[J]. 航空制造工程, 1998(2):19-21.
- [14] 陈戟铭. 薄壁管数控弯曲成形壁厚变薄的数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

- [15] 古涛, 鄂大辛, 任颖, 等. 管材弯曲壁厚变形的有限元模拟与试验分析[J]. 模具工业, 2006, 32(4):17-20.
- [16] 杨睿萌, 岳韬, 林磊, 等. 不锈钢连续多弯导管数控弯曲成形数值仿真与工艺优化[J]. 锻压技术, 2022, 47(9): 105-111.
- [17] 苟毓俊, 双远华, 周研, 等. 镁合金管材大曲率无芯弯曲损伤及壁厚变化研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(8):2422-2428.
- [18] 叶小奔. 数控弯管机工序动作及弯管截面质量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [19] 张鹤鹏. 板材粘性介质压力下的褶皱消除过程研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- [20] 刘大海, 陈劲东, 李波, 等. TA18 中强钛合金管数控弯曲成形工艺与结构参数显著性分析[J]. 锻压技术, 2021, 46(4):156-165.

Analysis of the influence of process parameters on the quality of three-dimensional bending forming of automotive EGR pipes

HE Jinming^{1,2}, BAI Yongjie³, SHU Xuedao^{1,2}, XU Haijie^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China; 3.Ningbo Aneng Group, Ningbo 315145, China)

Abstract: In order to improve the yield rate and reduce three-dimensional bending defects in automotive EGR pipes, a constitutive model for 304 stainless steel is developed in this study. A combined approach of numerical simulation and experimental analysis is used to investigate the effects of relative wall thickness and relative radius on the maximum principal strain and maximum thinning rate of the pipes during forming. The impact of relative wall thickness and relative bending radius on the forming quality of the pipes is also analyzed. The results demonstrate that pipes with smaller relative wall thickness and relative bending radius are more prone to defects such as cracks and instability wrinkles during the bending forming process. Furthermore, the increase in the maximum thinning rate of the pipes during bending becomes less significant as the bending angle increases. The appropriate selection of relative wall thickness and relative bending radius is crucial for reducing crack formation in metal materials that are susceptible to plastic deformation. These findings provide valuable theoretical support for achieving high-quality pipe fittings.

Key words: EGR pipe fittings; 3D bending; relatively thick wall thickness; relative curved radius

(责任编辑 章践立)