

引用格式: 宋思楠, 贾雄飞, 孙志超. FeMnSi/NiTiNb 复合管旋转挤压界面成形质量研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(8): 785-792.
SONG S N, JIA X F, SUN Z C. Study on the Surface Forming Quality of FeMnSi/NiTiNb Composite Pipe by Rotary Extrusion[J]. Materials China, 2025, 44(8): 785-792.

FeMnSi/NiTiNb 复合管旋转挤压界面成形质量研究

宋思楠, 贾雄飞, 孙志超

(西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 旋转挤压工艺为镍基/铁基形状记忆合金复合管成形提供了可能的途径, 但由于两种材料强度、塑性等差异较大, 成形过程中容易出现变形不协调和不均匀, 导致界面流速差大、分层等问题。为此设计了3种变形模式, 通过有限元模拟研究了坯料温度、挤压比和模具角度对复合管旋转挤压界面成形质量关键指标——界面流动速度差和径向压应力的影响规律。发现: 随着坯料温度、挤压比和模具角度的增大, 3种变形模式下的界面流动速度差均呈现增大趋势; 随着坯料温度的降低和挤压比的增大, 3种变形模式的径向压应力均呈现增大趋势; 随着模具角度的增大, 内定外缩和内扩外缩模式的径向压应力呈现减小趋势, 而整体缩径模式的径向压应力却呈现增大趋势; 综合比较后确定了旋转挤压合理的变形模式: 内扩外缩模式。

关键词: 复合管; 旋转挤压; 数值模拟; 工艺参数; 变形模式

中图分类号: TG139+.6; TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)08-0785-08

Study on the Surface Forming Quality of FeMnSi/NiTiNb Composite Pipe by Rotary Extrusion

SONG Sinan, JIA Xiongfei, SUN Zhichao

(School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The rotary extrusion process provides a possible new way for forming Ni-based Fe-based shape-memory alloy composite pipes. However, due to the large differences in strength and plasticity between the two materials, during the forming process, the deformation is not harmonious and non-uniform, which leads to the problems of large flow velocity difference and delamination at the composite pipe interface. For this reason, this paper designed three deformation modes, the effects of billet temperature, extrusion ratio and die angle on the flow velocity difference and radial compressive stress were studied by finite element simulation. It is found that the differences of interfacial flow velocity under the three deformation modes increase with the increase of billet temperature, extrusion ratio and die angle; with the decrease of billet temperature and the increase of extrusion ratio, the radial compressive stresses increase; with the increase of die angle, the radial compressive stresses under the internal fixing and external reduction mode and the internal expansion and external reduction mode show a decreasing trend, however, the radial compressive stress under the overall reduction mode shows an increasing trend. Then the reasonable deformation mode of the rotary extrusion is determined; the internal expansion and external reduction mode.

Key words: composite pipe; rotary extrusion; numerical simulation; process parameters; deformation mode

1 前言

随着我国航空航天、机械工程等领域的不断发展,

对高精度、高可靠性的管接头需求日益迫切^[1-3]。以铁基为外管、镍基为内管制备的记忆合金复合管接头可恢复应变大, 性价比高, 易于实现高可靠稳定连接, 从而成为高性能、高可靠性管接头的首选。旋转挤压工艺是在传统挤压的基础上施加扭矩旋转凸模或凹模, 通过模具的旋转降低摩擦并引入较大的剪切变形, 有利于均匀变形和细化晶粒, 同时强烈的三向压应力状态有利于低塑性金属的变形并使界面易达到冶金结合^[4-6], 从而为镍基/铁基复合管成形提供了可能的途径。然而由于镍

收稿日期: 2024-03-28 修回日期: 2024-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20186)

第一作者: 宋思楠, 男, 2000年生, 硕士研究生

通讯作者: 孙志超, 男, 1974年生, 教授, 博士生导师,

Email: zcsun@nwpu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202403024

基、铁基记忆合金管坯强度、塑性等差异大, 导致在旋转挤压成形时异质金属变形不协调, 极易引发界面附近材料流动速度差和分层; 同时, 为了获得良好的界面结合性能, 需要界面在挤压过程中产生足够大的径向压应力来消除空隙, 并在后续热处理中实现界面冶金结合。因此, 探明复合管旋转挤压成形工艺参数对界面成形质量的影响以获得具有小的内外层坯料流速差和大的界面径向压应力的复合管, 成为制造高性能复合管首先要考虑的问题。

近年来国内外学者针对单一金属旋转挤压变形行为^[7-11]、微观组织和力学性能^[12-16]展开了研究。Ma 等^[7]深入分析了旋转模具坯料挤压成形过程中钢坯外表面扭转角和挤压载荷的理论表达式, 发现当模具转速超过某一临界值时, 钢坯和旋转模具会发生打滑现象。Li 等^[8]通过建立的扭矩模型评估了旋转挤压筒坯料挤压成形过程中坯料的变形行为, 发现坯料外表面周向扭转角的变化与挤压温度、旋转角速度、摩擦因子呈现正相关关系, 而与挤压速度呈现负相关关系。Li 等^[9]理论分析了旋转挤压特征区的转速分布, 利用上限法导出了固定容器内钢坯的扭转长度, 发现钢坯的扭转长度随转速的增加而减小。Che 等^[10]应用旋转反挤压工艺成形 AZ80 镁合金, 发现旋转圈数的增加有利于累积应变的增加和降低挤压载荷。

在双金属材料挤压方面, 众多学者针对复合棒^[17-20]、复合板^[21-24]及复合管^[25-27]开展了研究。Khosravifard 等^[17]研究了挤压参数对 Al/Cu 双金属棒料界面附近两种金属流动速度的影响, 发现界面附近的流速差随套管厚度的增加和面积的减小而减小。Knezevic 等^[25]设计了 3 种不同变形模式的挤压模具, 发现变形模式为 parallel tube extrusion design(整体缩径模式)时复合管沿壁厚方向应变梯度最小。Haghighat 等^[26]通过平衡旋转模具施加的力矩与芯轴上的周向摩擦力矩, 确定了容器内物料的扭转长度, 合理进行了坯料分配。Alcaraz 等^[27]发现两种材料屈服应力比和初始厚度比是影响复合管挤压成形质量的关键参数, 其中随着硬质材料体积分数的增加, 复合管出现挤压失稳和断裂等缺陷的趋势增加, 成形质量变差。王宇^[28]研究了工艺参数对双金属记忆合金复合管挤压成形性的影响, 发现镍基内管的变形量明显高于铁基外管, 随着减薄量、摩擦系数和凹模入口角的增加, 内外管的协调性变差, 不利于内外管的界面结合。Golovko 等^[29]研究发现对于塑性、变形抗力差异大的双金属管制备, 极易由于内外管坯流速不均引发界面分层和孔洞缺陷, 且变形不均匀很容易导致复合管组织不均匀。

因此, 本研究对 FeMnSiCrNi/NiTiNb 记忆合金复合管的制备, 在传统挤压的基础上引入凹模旋转, 以复合管内外层坯料流速差比和界面径向压应力作为评价指标, 研究变形温度、挤压比、模具角度对复合管界面成形质量的影响, 并确定适合镍基/铁基复合管旋转挤压成形工艺的变形模式, 为高界面结合强度、高可靠性的记忆合金复合管成形提供指导。

2 旋转挤压有限元模型与变形模式设计

2.1 旋转挤压有限元模型

本文采用 FeMnSiCrNi(66%Fe、15%Mn、5%Si、9%Cr、5%Ni(质量分数))铁基记忆合金和 NiTiNb(47%Ni、44%Ti、9%Ni(原子百分数))镍基记忆合金, 分别用于成形复合管的外层和内层。两种材料的自建本构模型如下。

铁基记忆合金本构模型:

$$\dot{\varepsilon} = 8.39691 \times 10^{15} [\sinh(4.767 \times 10^{-3} \sigma)]^{5.770073} \cdot \exp\left(-\frac{3.870988 \times 10^5}{RT}\right) \quad (1)$$

镍基记忆合金本构模型:

$$\dot{\varepsilon} = 5.53634 \times 10^9 [\sinh(5.92 \times 10^{-3} \sigma)]^{4.941165} \cdot \exp\left(-\frac{2.421809 \times 10^5}{RT}\right) \quad (2)$$

图 1 为复合管旋转挤压设备的结构示意图, 挤压针固定, 上模以 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下压, 为减小外层坯料与挤压筒的摩擦及充分发挥摩擦的主动作用, 将挤压筒随动下压速度设置为 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时凹模旋转速度设置为 $0.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[7, 8], 为减小凹模朝同一方向旋转对管坯外表面造成损伤, 采用正反方向旋转。使用 DEFORM 软件模拟时, 不考虑模具和管坯、管坯和管坯之间的传热, 采用 1/4 轴对称模型, 将上模、芯模、随动挤压筒、旋

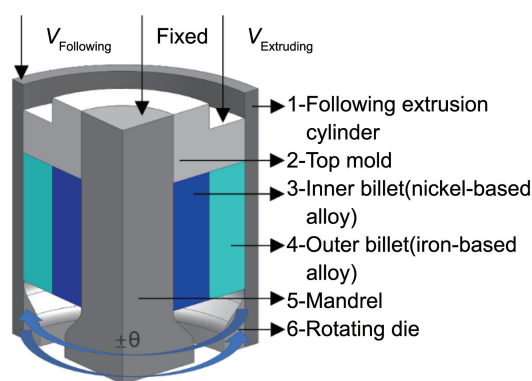


图 1 复合管旋转挤压的设备结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of the rotary extrusion equipment for composite tube

转凹模设置为刚体，将外层坯料与随动挤压筒、外层坯料与凹模、内层坯料与外层坯料、内层坯料与芯模之间的摩擦系数分别设置为 0.3, 0.2, 0.577, 0.2。

2.2 变形模式设计

针对 FeMnSi/NiTiNb 复合管旋转挤压过程，本文设计

了可能的 3 种变形模式，如图 2 所示。变形模式 a 为内定外缩模式，即内层管坯内径不变，外层管坯外径缩小(图 2a)；变形模式 b 为内扩外缩模式，即内层管坯内径扩大，外层管坯外径缩小(图 2b)；变形模式 c 为整体缩径模式，即整个内层管坯内径和外层管坯外径均缩小(图 2c)。

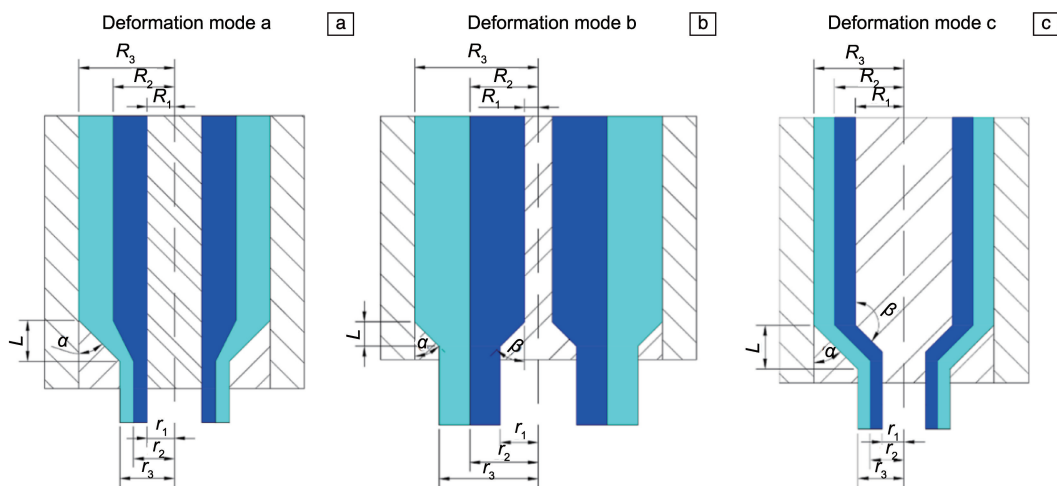


图 2 3 种旋转挤压变形模式示意图：(a) 内定外缩，(b) 内扩外缩，(c) 整体缩径

Fig. 2 Schematic diagram of three deformation modes for rotary extrusion: (a) inner diameter fixed and outer diameter reduced, (b) inner diameter enlarged and outer diameter reduced, (c) inner and outer diameter reduced

对于 3 种变形模式，设定复合管成品内径都为 12 mm，外径都为 17.5 mm；坯料高度为 20 mm，挤压行程为 15 mm。分别改变坯料温度、挤压比和凹模角度以研究它们对界面成形质量的影响。

3 结果与讨论

3.1 内外层坯料界面流速差

设定挤压比为 3.0，模具角度为 45°，坯料温度分别为 850, 900, 950 和 1000 °C 进行模拟。图 3 为 3 种变形模式、不同坯料温度下，内外层坯料流动速度分布图，可以看出，在 3 种变形模式下内外层坯料在旋转挤压过程中均出现了一定的流动速度差，且均为内层坯料的流动速度大于外层坯料的流动速度。

为直观表示各变形模式下内外层坯料之间流动速度差随坯料温度的变化情况，在内外层坯料前端已经通过凹模圆角的区域，分别选取 20 个点，图 3d 给出了取点位置，导出这些点的数据，流动速度差由 $\Delta v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$ 计算(其中 n 为内外层坯料前端取点个数， x_i 为内层坯料前端点 i 的流动速度值， y_i 为外层坯料前端点 i 的流动速度值)。

图 4 为 3 种变形模式不同坯料温度下内外层坯料流动速度差统计图，可以发现，在 3 种变形模式下，随着

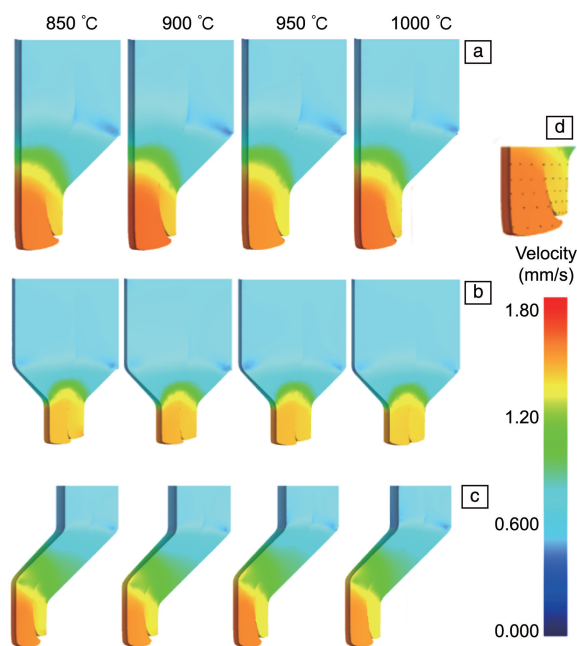


图 3 3 种变形模式、不同坯料温度下内外层坯料流动速度分布图：(a) 内定外缩，(b) 内扩外缩，(c) 整体缩径；(d) 取点示意图

Fig. 3 Flow velocity distribution diagram of the inner and outer billet at different billet temperatures under three deformation modes: (a) inner diameter fixed and outer diameter reduced, (b) inner diameter enlarged and outer diameter reduced, (c) inner and outer diameter reduced; (d) schematic diagram of the pointing

坯料温度的升高, 内外层坯料流动速度差都呈现出增大的趋势。这是因为两种材料的流变应力随温度升高的变化程度不同导致的, 因此, 变形温度不宜过高。其中, 当坯料温度由 850 升高至 1000 °C 时, 整体缩径模式下内外层坯料流动速度差由 0.138 升高至 0.184 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 较其余两种变形模式增大更多。值得注意的是, 在内扩外缩模式下, 在 900 和 950 °C 时, 内外层坯料的流动速度差基本相同, 均为 0.031 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 且该变形模式在 3 种变形模式中内外层坯料流动速度差最小。

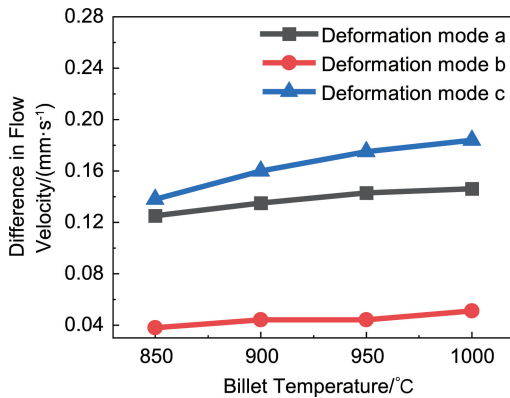


图 4 3 种变形模式、不同坯料温度下内外层坯料流动速度差统计图
Fig. 4 Statistics of the flow velocity difference between the inner and outer billet at different billet temperatures under three deformation modes

设定坯料温度为 900 °C, 模具角度 45°, 挤压比分别为 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 进行模拟。图 5 为 3 种变形模式不同挤压比下内外层坯料流动速度图, 可以看出, 3 种变形模式下, 随着挤压比的增加, 内外层坯料的流动速度有所增加。其中内扩外缩模式下, 当挤压比为 2.5 时, 内层坯料流动速度在 1.25 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右; 当挤压比增大至 4.0 时, 其增大到 1.65 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。此外可以发现, 该变形模式下内外层坯料之间的流动速度差在云图上表现并不明显, 这表明内外层坯料之间的流动速度差较小。

图 6 为 3 种变形模式不同挤压比下内外层坯料流动速度差统计图, 可以看出, 在 3 种变形模式下, 内外层坯料流动速度差均随着挤压比的增大而增大, 因此 3 种变形模式下挤压比都不能太大。就内外层坯料的流动速度差随挤压比增大的增幅而言, 内定外缩模式下由挤压比为 2.5 时的 0.126 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐渐增大至挤压比 4.0 时的 0.169 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 增幅 0.043 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 内扩外缩模式下增幅为 0.038 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 整体缩径模式下增幅为 0.065 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。内扩外缩模式下内外层坯料流动速度差非常小, 即使挤压比增大至 4.0 时, 流动速度差也仅

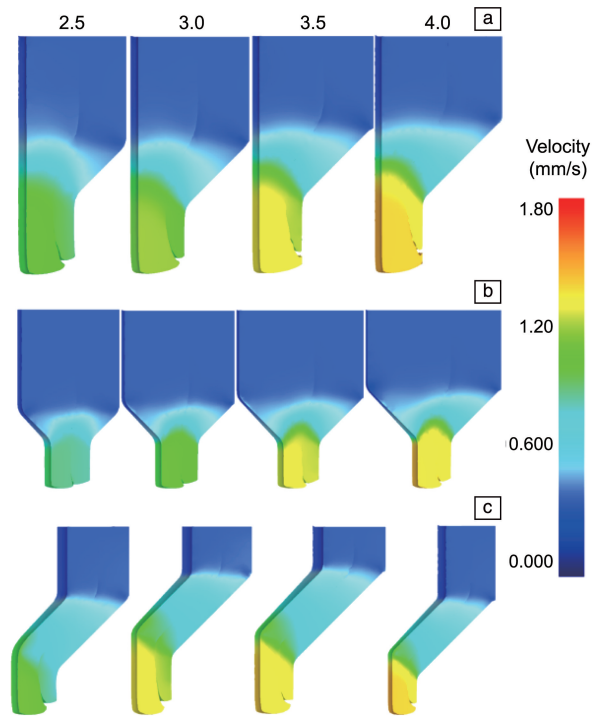


图 5 3 种变形模式不同挤压比下内外层坯料流动速度分布图: (a) 内定外缩, (b) 内扩外缩, (c) 整体缩径

Fig. 5 Flow velocity distribution diagram of the inner and outer billet at different extrusion ratios under three deformation modes: (a) inner diameter fixed and outer diameter reduced, (b) inner diameter enlarged and outer diameter reduced, (c) inner and outer diameter reduced

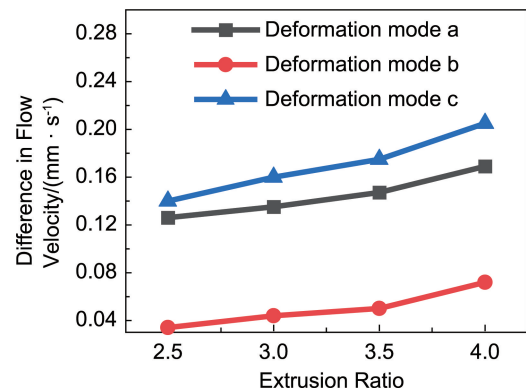


图 6 3 种变形模式不同挤压比下内外层坯料流动速度差统计图
Fig. 6 Statistics of the flow velocity difference between the inner and outer billet at different extrusion ratios under three deformation modes

为 0.072 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 当挤压比为 2.5 时, 流动速度差更是低至 0.034 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

设定坯料温度为 900 °C, 挤压比为 3.0, 模具角度分别为 30°, 45°, 60° 进行模拟。图 7 为 3 种变形模式不同模具角度下内外层坯料流动速度图, 可以看出, 内定外缩和内扩外缩模式下, 在 3 种模具角度

下, 内外层坯料的流动速度分布都较为均匀, 即流动速度差较小。但是在内定外缩模式下, 随着模具角度的变化, 内层坯料的流动速度没有出现明显的波动, 一直在 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 外层坯料的流动速度发生了变化, 即模具角度主要是通过影响外层坯料的流动速度进而对内外层坯料流动速度差产生了影响; 而内扩外缩模式下, 随着模具角度的增大, 外层坯料的流动速度没有出现明显的波动, 一直在 $1.35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 但内层坯料的流动速度发生了改变, 即该模式下模具角度主要是通过影响内层坯料的流动速度进而对内外层坯料流动速度差产生了影响, 这与内定外缩模式正好相反; 整体缩径模式下, 当模具角度为 60° 时, 内外层坯料已经不能完全填充模具型腔, 这表明该模具角度已经不适用于复合管的旋转挤压成形, 在此条件下成形的复合管其性能也将不符合要求。

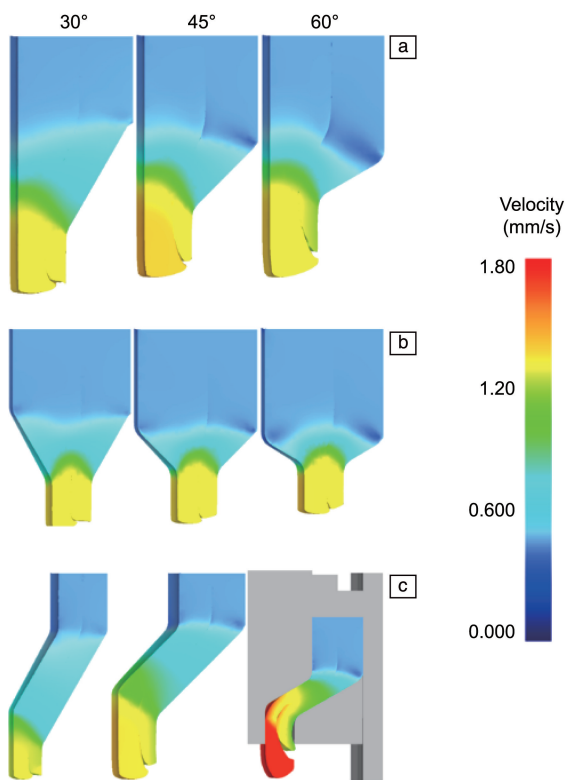


图 7 3 种变形模式不同模具角度下内外层坯料流动速度分布图: (a) 内定外缩, (b) 内扩外缩, (c) 整体缩径

Fig. 7 Flow velocity distribution diagram of the inner and outer billet at different die angles under three deformation modes: (a) inner diameter fixed and outer diameter reduced, (b) inner diameter enlarged and outer diameter reduced, (c) inner and outer diameter reduced

图 8 为 3 种变形模式不同模具角度下内外层坯料流动速度差统计图, 可以看出, 在 3 种变形模式下, 内外层坯料流速差均随着模具角度的增大而增大。内

定外缩模式下, 当模具角度为 30° 时, 流动速度差仅为 $0.048 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 当模具角度为 60° 时, 流动速度差增大至 $0.181 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见, 该模式下过大的模具角度不利于复合管的成形。内扩外缩模式下, 当模具角度为 60° 时, 流动速度差仅为 $0.059 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 当模具角度为 30° 时, 流动速度差更是低至 $0.016 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 内外层坯料各自的流动速度随模具角度的增大略有增大趋势, 但幅度并不明显, 可见该变形模式非常有利于异质金属的协调流动。整体缩径模式下, 随着模具角度的增大, 内外层坯料流动速度差相较于另外两种变形模式明显增加, 当模具角度增加到 60° 时, 流动速度差骤增至 $0.512 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

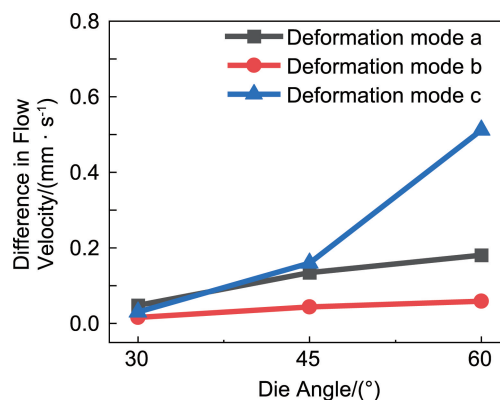


图 8 3 种变形模式不同模具角度下内外层坯料流动速度差统计图
Fig. 8 Statistics of the flow velocity difference between the inner and outer billet at different die angles under three deformation modes

3.2 界面径向压应力

设定挤压比为 3.0, 模具角度为 45° , 坯料温度分别为 $850, 900, 950$ 和 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行模拟。图 9 为 3 种变形模式不同坯料温度下界面径向压应力分布图。在 3 种变形模式下, 内外层坯料的界面径向压应力都在凹模圆角处达到最大, 且区域内随着挤压行程的增加, 当内外层坯料流出凹模圆角处后, 界面径向压应力随之降低。

为了量化比较 3 种变形模式下径向压应力随坯料温度的变化情况, 在最大径向压应力区域的内外层坯料界面处分别进行取点, 并将这些点的径向压应力值取平均进行统计。

图 10 为 3 种变形模式不同坯料温度下径向压应力统计图, 可以发现, 在 3 种变形模式下, 随着坯料温度的升高, 界面处径向压应力的值都随之降低。根据镍基和铁基合金的本构方程可知, 这是由于流变应力会随着温度的升高而降低导致的。在相同的坯料温度下, 内扩外缩模式和整体缩径模式下的内外层坯料径向压应力相当, 都高于内定外缩模式, 这表明其更有利于复合管的焊接。

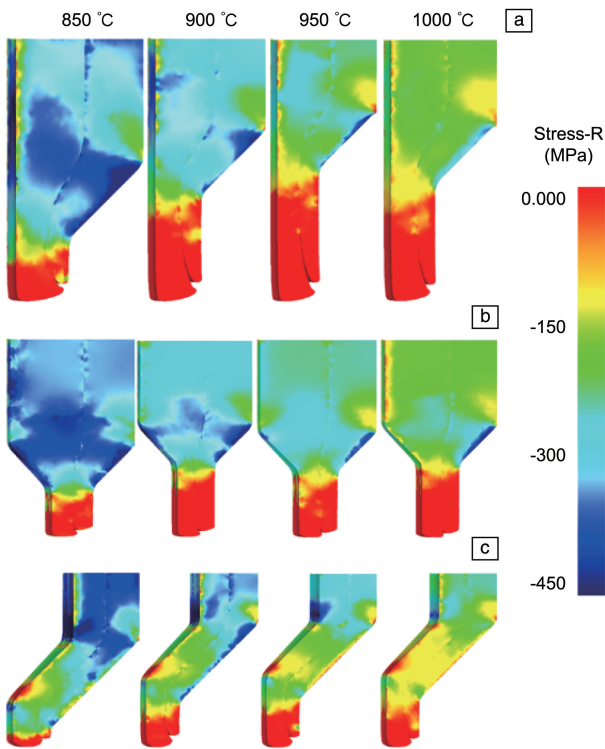


图 9 3 种变形模式不同坯料温度下径向压应力分布图: (a) 内定外缩, (b) 内扩外缩, (c) 整体缩径

Fig. 9 Radial compressive stress distribution of the inner and outer billet interface at different billet temperatures under three deformation modes: (a) inner diameter fixed and outer diameter reduced, (b) inner diameter enlarged and outer diameter reduced, (c) inner and outer diameter reduced

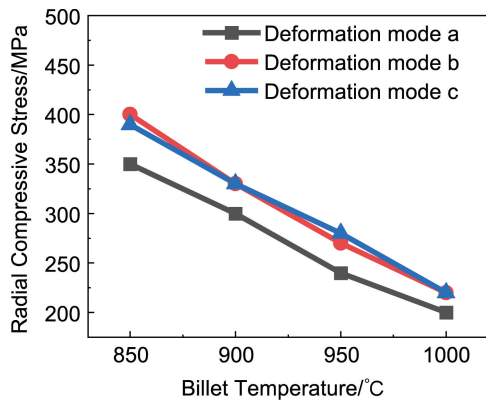


图 10 3 种变形模式不同坯料温度下径向压应力统计图

Fig. 10 Statistics of the radial compressive stress at different billet temperatures under three deformation modes

设定坯料温度为 900 °C, 模具角度 45°, 挤压比分别为 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 进行模拟。图 11 为 3 种变形模式不同挤压比下, 内外层坯料界面径向压应力分布图, 可以发现, 3 种变形模式下, 界面处径向压应力的最大值随着挤压比的增大有增大的趋势。这是由于随着挤压比的增大, 坯料的变形程度随之增大, 变形过程中产生的

径向压应力也随之增大。

图 12 为 3 种变形模式不同挤压比下径向压应力统计图, 可以发现, 在 3 种变形模式下, 径向压应力均随着挤压比的增大而增大, 因此 3 种变形模式下挤压比都不能太大。在相同挤压比情况下, 整体缩径模式下径向压应力最大, 内定外缩模式下最小, 径向压应力越高, 越有利于复合管的焊合。

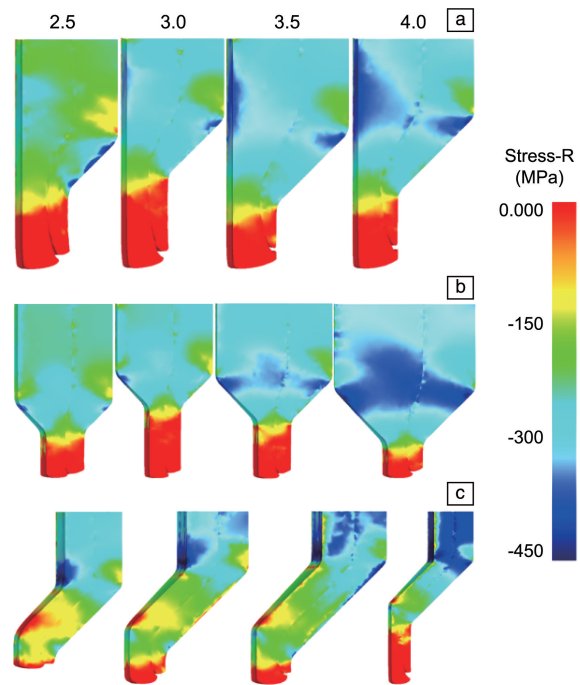


图 11 3 种变形模式不同挤压比下, 内外层坯料界面径向压应力分布图: (a) 内定外缩, (b) 内扩外缩, (c) 整体缩径

Fig. 11 Radial compressive stress distribution of the inner and outer billet interface at different extrusion ratios under three deformation modes: (a) inner diameter fixed and outer diameter reduced, (b) inner diameter enlarged and outer diameter reduced, (c) inner and outer diameter reduced

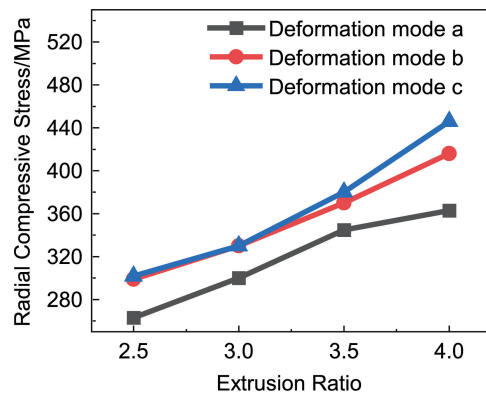


图 12 3 种变形模式不同挤压比下径向压应力统计图

Fig. 12 Statistics of the radial compressive stress at different extrusion ratios under three deformation modes

设定坯料温度为 900 °C, 挤压比为 3.0, 模具角度分别为 30°, 45°, 60° 进行模拟。图 13 为 3 种变形模式不同模具角度下, 内外层坯料界面处径向压应力分布图, 可以看到, 最大径向压应力的值随着模具角度的增大有减小的趋势。

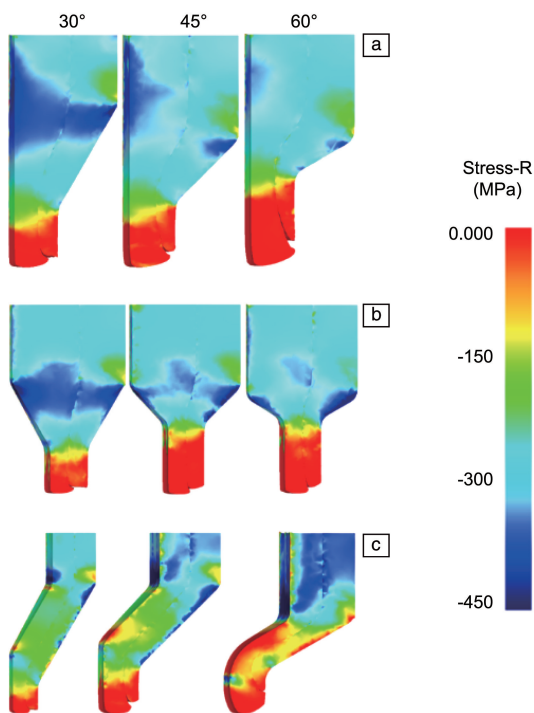


图 13 3 种变形模式不同模具角度下, 内外层坯料界面径向压应力分布图; (a) 内定外缩, (b) 内扩外缩, (c) 整体缩径

Fig. 13 Radial compressive stress distribution of the inner and outer billet interface at different die angles under three deformation modes: (a) inner diameter fixed and outer diameter reduced, (b) inner diameter enlarged and outer diameter reduced, (c) inner and outer diameter reduced

图 14 为 3 种变形模式不同模具角度下径向压应力统计图, 可以看出, 在内定外缩和内扩外缩模式下, 随着模具角度的增大, 径向压应力的平均值随之减小, 在这两种变形模式下成形时, 较小的模具角度有利于获得较大的径向压应力, 更利于复合管的成形要求; 整体缩径模式下, 区域内径向压应力的值随着模具角度的增大呈现增大的趋势, 这与前两种变形模式相反, 当模具角度为 30° 时, 区域内径向压应力均值为 274 MPa, 当模具角度增大至 60° 时, 其值增大至 411 MPa。虽然在整体缩径模式下, 较大的模具角度有利于获得更大的径向压应力, 但较大的模具角度会引起内外层坯料流动速度差的骤增, 因此该变形模式下模具角度仍不宜过大。

通过上述研究发现, 内定外缩模式和整体缩径模式

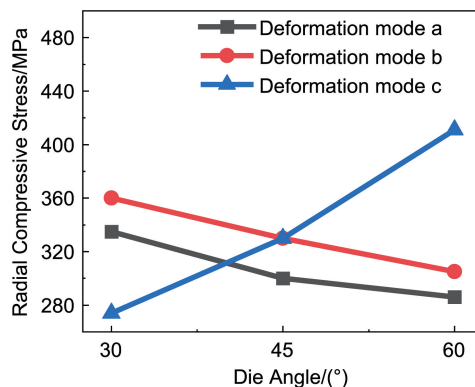


图 14 3 种变形模式不同模具角度下径向压应力统计图

Fig. 14 Statistics of the radial compressive stress at different die angles under three deformation modes

下虽然径向压应力相对较大, 但内外层坯料流速差大, 且随着坯料温度、挤压比、模具角度的增大增长幅度越来越大, 这将非常不利于内外层坯料协同流动。内扩外缩模式下内外层坯料流速差最小, 非常有利于复合管内外层坯料协同流动, 促进并流减少分层; 且该变形模式下界面径向压应力适中, 在 300 MPa 以上, 即有利于复合管焊合的应力范围内工艺窗口更宽, 非常有利于复合管的焊合。因此综合对比下, 本文优选内扩外缩模式作为镍基/铁基复合管旋转挤压成形工艺。

4 结 论

通过建立的复合管旋转挤压有限元模型, 分析了变形温度、挤压比、模具角度对镍基/铁基复合管旋转挤压界面成形质量关键指标(流动速度差和径向压应力)的影响规律。

(1) 随着坯料温度的升高, 3 种变形模式的内外层坯料流动速度差均呈现增大趋势, 这是由于镍基和铁基合金的流变应力随温度变化的变化程度不同所致; 3 种变形模式的径向压应力均随坯料温度升高呈现降低趋势, 这是由于镍基和铁基合金的流变应力会随着温度的升高而降低导致的。

(2) 随着挤压比的增大, 3 种变形模式的流动速度差和径向压应力均呈现增大趋势, 可见变形程度的加大虽不利于两种材料的协调流动, 但对内外管坯的结合却有好处, 呈现出一定的矛盾性。

(3) 随着模具角度的增大, 3 种变形模式下的流动速度差均呈现增大的趋势; 径向压应力方面, 3 种变形模式下有所差异, 内定外缩模式和内扩外缩模式下, 径向压应力随着模具角度的增大而减小, 而整体缩径模式下径向压应力随着模具角度的增大而增大。

(4) 内扩外缩模式下, 内外层坯料流速差最小, 且

界面径向压应力适中, 选定其作为镍基/铁基复合管旋转挤压成形工艺。

参考文献 References

- [1] MOHAMAD A, MEHDI G. *Results in Materials* [J], 2023, 19: 100435.
- [2] ZHANG F L, YUAN Z H, ZHANG F Z, *et al.* *Engineering Failure Analysis*[J], 2019, 105 : 837-855.
- [3] 高晓轲, 安旭龙, 孙文文. *中国材料进展*[J], 2024, 43(2): 124-135.
- GAN X K, AN X L, SUN W W. *Materials China*[J], 2024, 43(2): 124-135.
- [4] SUN C Y, CONG Y P, ZHANG Q D, *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 253: 99-108.
- [5] ZHAO K N, XU D X, LI H X, *et al.* *Materials Science and Engineering: A*[J], 2019, 764: 138194.
- [6] GREENWOOD H, THOMPSON F C. *Nature*[J], 1931, 128(3221): 152.
- [7] MA X, BARNETT M R, KIM Y H. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2004, 46(3): 465-489.
- [8] LI F, BIAN N, XU Y C, *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2014, 88: 37-44.
- [9] LI F, BIAN N, XU Y C. *Mechanics Research Communications*[J], 2014, 61: 27-35.
- [10] CHE X, WANG Q, DONG B B, *et al.* *Metals and Materials International*[J], 2020, 26(12): 1786-1796.
- [11] KIM Y H, PARK J H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 143-144: 735-740.
- [12] CHE X, WANG Q, DUAN X W, *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 24: 4711-4729.
- [13] TANG W, YANG X, TIAN C, *et al.* *Materials Science and Engineering: A*[J], 2022, 860: 144237.
- [14] YAN L, ZHANG Z, LI G, *et al.* *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2021, 877: 160229.
- [15] CHE X, WANG Q, DONG B B, *et al.* *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2021, 9(5): 1677-1691.
- [16] LI J, YANG J G, YAN D J, *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(2): 183-188.
- [17] KHOSRAVIFARD A, EBRAHIMI R. *Materials & Design*[J], 2010, 31(1): 493-499.
- [18] BOHLULI H, KHALILI K, SEYEDKASHI S M H. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*[J], 2021, 33: 52-62.
- [19] SAPANATHAN T, KHODDAM S, ZAHIRI S H. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 571: 85-92.
- [20] EIVANI A R, TAHERI A K. *Materials Letters*[J], 2007, 61(19): 4110-4113.
- [21] ZHANG W, HU H J, GAN S, *et al.* *Materials Today Communications* [J], 2023, 37: 107164.
- [22] WU Y, FENG B, XIN Y, *et al.* *Materials Science and Engineering: A* [J], 2015, 640: 454-459.
- [23] TANG J W, CHEN L, ZHAO G Q, *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 784: 727-738.
- [24] GUO L L, WANG J Q, YUN X B, *et al.* *Materials Science and Engineering: A*[J], 2021, 802: 140670.
- [25] KNEZEVIC M, JAHEDI M, KORKOLIS Y P, *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2014, 95: 63-73.
- [26] HAGHIGHAT H, MAHDAVI M M. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(11): 3392-3399.
- [27] ALCARAZ J L, GIL-SEVILLANO J. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1996, 38(2): 157-173.
- [28] 王宇. FeMnSiCrNi/NiTiNb 异种形状记忆合金复合管挤压成形研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- WANG Y. Investigation of Extrusion Forming of FeMnSiCrNi/NiTiNb Dissimilar Shape Memory Alloy Composite Pipe [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [29] GOLOVKO O, BIELIAIEV S M, NÜRNBERGER F, *et al.* *Forschung Im Ingenieurwesen-Engineering Research*[J], 2015, 79(1-2): 17-27.