

环件径-轴双向轧制数值模拟及其多轧辊的联合控制

朱兴林^{1,2}, 时静茹¹, 马秉馨^{1,2}, 张智源^{1,2}

(1. 河南工学院 材料科学与工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 新乡市材料成形技术与模具重点实验室, 河南 新乡 453003)

摘要: 环件轧制过程是热力耦合作用下高度非线性、非稳态的热成形工艺, 其工艺参数多, 轧辊控制复杂, 难变形材料的环件轧制技术还缺乏高效、便捷的数值研究手段。以轧制曲线为基本变量, 建立了各轧辊之间的运动学和动力学关系, 随后基于 FORGE 有限元软件平台, 依据 $\Phi 3000$ mm 数控环轧机建立了环件轧制的有限元模型。模型采用力及力矩控制抱辊, 通过多轧辊联合控制, 能够成功实现对偏心、椭圆等弱刚度现象的预测。通过 Inconel718 合金全尺寸环件轧制实验, 验证了所建有限元模型的可靠性。该模型预测结果的相对误差小于 3%, 并在机匣等典型薄壁件的研制中得到了工程化应用。

关键词: 环件轧制; 数值模拟; 轧辊控制; Inconel718 合金

中图分类号: TG335.11

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2024)04-0020-05

0 引言

环件轧制是利用环件轧制设备, 在多个轧辊共同作用下使环坯壁厚逐渐变薄、直径逐渐增大、截面轮廓逐渐成形的连续局部塑性成形技术。环件轧制具有生产成本低、环件内部质量好、精度高、生产效率高等优点, 已经成为各种齿轮环、法兰环、轴承环以及火车车轮等无缝环形件的主要制造技术, 在航空、航天、能源、交通等许多工业领域中得到了广泛的应用^[1-2]。然而, 环件轧制工艺是一个多场耦合作用下高度非线性、非稳态的热成形工艺, 其工艺参数多, 轧辊控制非常复杂。轧制过程中, 如果轧辊的运动参数设置不正确, 很容易产生截面不完整、直径误差、同心度偏差、边缘毛刺和局部褶皱等各种成形缺陷^[3-4]。目前, 针对环轧工艺各轧辊的联合控制, 还缺乏行之有效的优化分析方法。

华林教授团队对环件轧制技术进行了系统深入的理论研究, 提出了环件轧制的咬入孔型条件、塑性锻透条件、刚性稳定条件和运动稳定性条件等, 揭示了环件轧制的力能作用规律, 初步建立了环件轧制成形理论框架^[5-7]。随着计算机技术的迅速发展, 采用

有限元方法模拟轧制过程能够弥补各种解析或半解析方法的不足, 缩短研究周期并大大降低研究成本, 是当前最有效、精确、详细的工艺验证方法。数值模拟过程中, 各轧辊之间的运动轨迹及力能参数的协同控制, 是保证模拟结果和实际环件成形质量相一致的关键。因此, 针对轧辊的控制算法及基于闭环控制的有限元模型被越来越多地关注。杨合教授团队^[8]在环轧三维模型中实现了利用液压调节机构控制抱辊的方法, 提出了连杆总成参数设计和液压滑块临界压力设计等关键技术。邓加东等^[9]基于力学分析, 建立了环件刚度条件数学模型, 提出了一种导向辊液压缸压力控制方法。HIRT 教授团队^[10]将环件轧制生产所运用的工业控制方法与 CAE 仿真模拟技术相结合, 通过虚拟传感器获取轧制过程环件几何尺寸和轧辊力能参数, 实时反馈调节轧辊运动参数, 实现了环件轧制过程闭环控制仿真模拟。

环件轧制技术虽然已经有了一定的实验和理论基础, 但随着对环件结构、成形精度、组织性能要求的不断提高, 对环件轧制过程数值模拟向智能化方向发展的要求也越来越迫切, 而环件轧制技术研究手段的片面性和局限性也日益凸显^[11-12]。受商业软件平

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 河南工学院博士科研启动基金 (KQ1819); 河南省科技攻关项目 (232102220064)

第一作者简介: 朱兴林 (1985—), 男, 河南新乡人, 讲师, 博士, 主要从事宇航难变形材料精密塑性成形原理与技术研究。

台本身的制约,或是研究者对有限元模型主观的简化,使得有限元模拟结果在一定程度上与实际情况存在差异,这势必会影响对环件综合成形质量的评价。因此,如何准确地结合有限元模拟技术,建立一个符合生产实际,高效且准确的有限元模型是目前环轧领域研究的重点。本文将轧制曲线为基本变量,建立各轧辊间的运动学和动力学关系,依据 $\Phi 3000$ mm 数控环轧机,基于 FORGE 有限元软件建立环件轧制的有限元模型,通过各轧辊的联合控制,以实现偏心、椭圆等弱刚度现象的预测,再现环件在轧制过程中的实际变形状态,并通过 Inconel718 合金全尺寸环件轧制实验,对所建有限元模型的可靠性进行验证。

1 径-轴双向轧制运动学、动力学关系的建立

环件轧制过程参数多,各参数间具有的复杂的运动学、动力学关系是研究环件轧制技术重要的理论依据。现有的环轧运动学、动力学公式多针对轧制过程中某一时刻的静态描述,未考虑进给策略与各个轧辊之间的瞬时关系。本文以轧制曲线为变量,通过对环件轧制过程中环件瞬时尺寸、驱动辊转速、抱辊力矩等运动学、动力学参数的计算,为有限元模型中各轧辊耦合控制方法的建立提供理论依据。

图 1 为环轧工艺示意图。图中主辊和锥辊为驱动辊,在电机作用下分别作旋转运动并通过摩擦作用带动环坯旋转;芯辊做径向的进给运动压迫着环坯,使其在旋转过程中产生径向的塑性变形,壁厚逐渐变薄。抱辊通过抱辊臂产生扭矩,对环坯形成夹持,起到定心的作用。

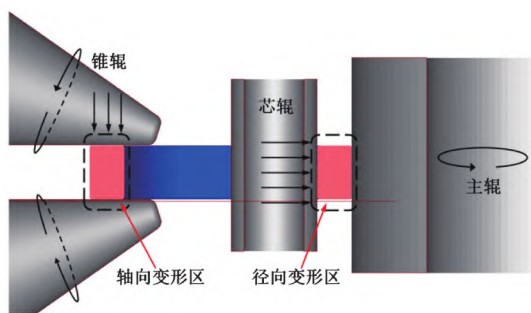


图 1 环轧工艺各轧辊的运动学关系

1.1 轧制曲线及进给速度的确定

图 2 为环件径-轴双向轧制过程中,坯料截面向环件截面演化的示意图。坯料与环件顶点的连线称为轧制曲线,用于表征径向与轴向进给量的分配关系。图中 Δb_0 和 Δh_0 分别表示径向进给量和轴向进给量,假设 Δb 和 Δh 分别表示轧制过程中某时刻已完成的径向进给量和轴向进给量, $V_b(t)$ 和 $V_h(t)$ 分别表示径向和轴

向瞬时进给速率。 α_t 为轧制曲线切线的角度,可用来表征某时刻径向进给速度和轴向进给速度的比例关系。若轧制曲线为线性的,则表明轧制过程中, α_t 始终为恒定值,即径向进给速度与轴向进给速度的比值始终不变。根据图 2 中轧制曲线的线性关系,可以得到轧制过程中某时刻径向与轴向进给量以及径向与轴向瞬时进给速度之间的比例关系如下:

$$\Delta h = \Delta b \cdot \tan \alpha_t \quad (1)$$

$$V_h(t) = V_b(t) \cdot \tan \alpha_t \quad (2)$$

实际轧制过程中,径向与轴向的进给速度不会始终满足比例关系,均会因设备原因或轧制要求随着成形进度进行适当的调整。因此,在计算环件瞬时尺寸时,就要考虑芯辊及锥辊速度的变化历程。

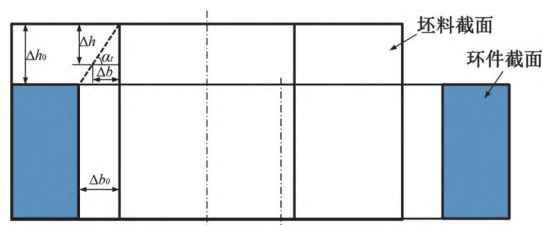


图 2 径-轴双向轧制截面变化示意图

1.2 环件瞬时高度及瞬时外径

若 D_0 、 d_0 分别表示轧制前坯料的内、外径, D_t 、 d_t 分别表示轧制过程中某时刻环件的内、外径,则根据体积不变原理有:

$$\frac{\pi(D_0^2 - d_0^2)}{4} = \frac{\pi(D_t^2 - d_t^2)}{4} \quad (3)$$

考虑芯辊及锥辊速度的变化历程,则环件瞬时壁厚 b_t 及瞬时高度 h_t 为:

$$b_t = b_0 - \int_0^t V_b(t) dt \quad (4)$$

$$h_t = h_0 - \int_0^t V_h(t) dt \quad (5)$$

式中: b_0 和 h_0 分别为坯料的初始壁厚和初始高度, $V_b(t)$ 和 $V_h(t)$ 分别表示轴向和径向瞬时进给速率。将式 (2) 带入式 (5) 得:

$$h_t = h_0 - \tan \alpha_t \cdot \int_0^t V_b(t) dt \quad (6)$$

根据式 (3) — (6) 计算得环件的瞬时外径为:

$$D_t = \frac{(D_0 + d_0) \cdot h_0 \cdot b_0}{2[h_0 - \tan \alpha_t \cdot \int_0^t V_b(t) dt] \cdot [b_0 - \int_0^t V_b(t) dt]} + b_0 - \int_0^t V_b(t) dt \quad (7)$$

瞬时外径的获取将是我们在后续有限元模型中,建立抱辊模块及锥辊运动模块的重要依据。

1.3 锥辊的瞬时转速

除主辊外,锥辊在其旋转方向上做主动旋转,在一定程度上可帮助主辊驱动环件旋转。然而,锥辊的旋转速度要和主辊的旋转速度相匹配,即锥辊与环件接触的线速度要等于主辊与环件接触的线速度,以避免在切向上阻碍或加速环件的旋转,从而造成偏心的现象。锥辊直径沿其母线方向逐渐增大,因此,在计算其旋转线速度时,必须考虑锥辊与环件的接触位置。为确保锥辊与主辊具有相同的驱动速度,锥辊与坯料接触的位置必须与主辊保持相同的线速度,即:

$$\omega_d \cdot (D_d / 2) = \omega_c \cdot (D_c / 2) \quad (8)$$

式中: ω_d 和 ω_c 分别主辊和锥辊的转速, D_d 和 D_c 分别主辊和锥辊的直径。为了保证锥辊线速度与主辊始终相等,随环件直径的增大,锥辊要与环件在水平方向上保持相对静止,即与环件外径保持同步的水平移动,那么锥辊水平移动的瞬时速度可近似地等于环件外径的瞬时增长速率。用式(7)对时间进行求导,可得到环件外径的瞬时增长速率 V_D 为:

$$V_D = \frac{dD_t}{dt} = (D_0 + d_0) \cdot h_0 \cdot b_0 \cdot V_b(t) \cdot \left[\frac{\tan \alpha_t}{2(h_0 - \Delta b \cdot \tan \alpha_t)^2 \cdot b} + \frac{1}{2(h_0 - \Delta b \cdot \tan \alpha_t) \cdot b^2} \right] - V_b(t) \quad (9)$$

1.4 抱辊力及抱辊力矩

环件轧制时,在环件两侧通常各有一个定向辊,称为抱辊。抱辊与坯料接触,通过抱辊臂旋转并对坯料施加压力,可起到定心与稳定环件的作用。图3为抱辊几何位置的示意图。由图可知,环件瞬时外径为 D_t ,根据主辊、环件及抱辊之间的几何关系有:

$$AF^2 = \left(AC - \frac{D_t}{2} \cdot \sin \beta_t \right)^2 + \left(CO - \frac{D_t}{2} \cdot \cos \beta_t \right)^2 \quad (10)$$

根据设备属性,抱辊旋转轴位置固定不变,则 AF 、 AC 、 CD 均为恒定值。由 $\triangle ABF$ 几何关系得:

$$\cos \theta_t = \frac{AC - (D_t / 2) \cdot \sin \beta_t}{AF} \quad (11)$$

由式(10)得:

$$\sin \beta_t = \left(\frac{1}{AC^2 + CO^2} \right) \cdot [AC \cdot M \pm \sqrt{(AC \cdot M)^2 - (AC^2 + CO^2) \cdot (M^2 - CO^2)}] \quad (12)$$

式中 M 可计算得到:

$$M = \frac{AC^2 + CO^2 + D_t / 4 - AF^2}{D_t} \quad (13)$$

式中: D_t 是关于轧制时间 t 的瞬时尺寸。将式(12)代入式(11)中,即可得到抱辊绕旋转轴转动的瞬时角度 θ_t 。

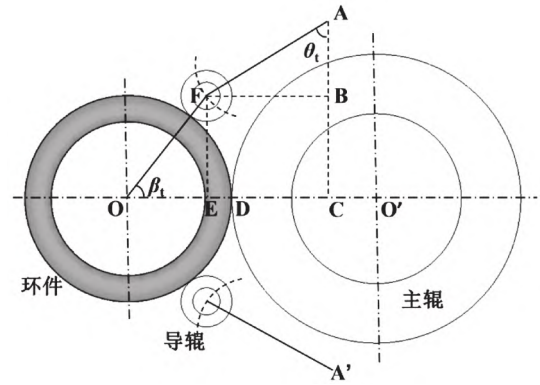


图3 抱辊几何关系示意图

实际生产中,抱辊通过抱辊臂施加力矩对环件形成夹持作用。在有限元模拟中,如果采用几何关系定位抱辊,则必定与实际情况存在偏差,影响模拟准确度。另外,几何定位不能模拟轧制过程中经常出现的椭圆、偏心等情况,也无法预测因此而产生的影响。因此可通过计算抱辊与环件的瞬时压力得到抱辊力矩,并随环件尺寸变化实时控制抱辊力。

芯辊与抱辊在旋转方向随动,因此可忽略其切向力。参考图3所示的几何关系及环件受力情况,设抱辊对环件的径向力为 P_3 ,文献[6]根据受力平衡条件得到了抱辊对环件的径向压力为:

$$P_3 = P_1 \cdot \frac{1 + R_2 / R_1}{(2R_2 \sin \beta_t) / L + \cos \beta_t} \quad (14)$$

式中: P_1 为主辊对环件的径向压力, R_1 、 R_2 分别为主辊和芯辊的半径。然后由几何关系计算瞬时抱辊力矩为:

$$M_r(t) = \frac{P_3}{\cos(180^\circ - \beta_t - \theta_t)} \cdot AF \quad (15)$$

2 有限元模型中多轧辊的联合控制方法

现有的环件轧制模型常常对轧辊运动的处理过于简化, 在很大程度上使轧制过程过于理想化。比如, 采用约束圆心的方式忽略抱辊或采用位移对抱辊进行控制, 没有考虑环件摆动、椭圆、偏心等弱刚度现象, 从而影响最终的预测精度。为了建立一个既符合生产实际, 又高效、准确、稳定运行的有限元模型, 本文基于 FORGE 有限元软件, 根据由 Wagner Banning 公司生产的 $\Phi 3000$ mm 数控环轧机, 建立了环件轧制三维热力耦合有限元模型, 如图 4 所示。

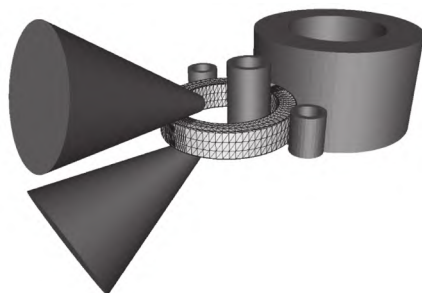


图 4 三维热力耦合有限元模型

为了模拟环轧机各个轧辊真实的工作状态, 以轧制曲线为基本变量, 根据所建立的各个轧辊的运动学及动力学关系, 对各轧辊的控制方法进行了二次开发, 将控制模块的各项数据与软件平台进行对接, 从而在数值模拟过程中实现了各轧辊间的配合联动。主要的轧辊控制模块有以下几种:

(1) 芯辊转速迭代计算与控制模块 (Sub-Mandrel-Control)。轧制过程中, 芯辊做径向进给运动, 在旋转方向上无约束, 即芯辊是由环件旋转而带动其在周向的运动。本文对芯辊转速采用了内变量迭代求解, 实现了锥辊在旋转方向上随动的运动方式, 这样处理是为了减小芯辊对环件旋转的切向阻力, 避免环坯表面拉伤或局部变形, 改善咬入条件。

(2) 锥辊转速匹配计算模块 (Sub-Axial-Speed)。锥辊采用恒转速且沿水平方向运动的方式, 使锥辊线速度与环坯线速度实时地匹配。依据上述对环件的瞬时外径 D_t 及环件瞬时增长速率 V_D 的分析, 实时地控制锥辊沿水平方向的后退速度。

(3) 径向 / 轴向进给速度匹配关系计算模块 (Sub-Roll-Curve)。芯辊做径向的进给运动, 上锥辊做轴向向下的进给运动。两个方向进给速度的匹配直接影响环坯的变形方式, 从而影响环件最终的应变、温度的分布。因此, 文本建立了径向 / 轴向进给速度的匹配策略, 能够依据轧制曲线的变化, 实时改变芯辊及锥辊的进给速度。

(4) 抱辊轨迹及抱辊力计算模块 (Sub-Center-Roll)。抱辊对环件的抱持作用是通过对抱辊施加力矩来实现的, 抱辊的旋转中心根据轧机抱辊臂旋转轴的实际位置进行设定。依据式 (15) 中抱辊力矩 $M_r(t)$ 的计算, 对抱辊力实施动态控制, 使模拟过程与实际轧制情况更加吻合, 并能够真实地反映偏心、椭圆等轧制状态。

通过以上轧辊控制模块的建立及各模块的有序配合, 模型成功实现了轧机工作状态的真实再现。图 5、图 6 就是抱辊力过大和锥辊转速不匹配而引起的轧制失稳现象的再现。

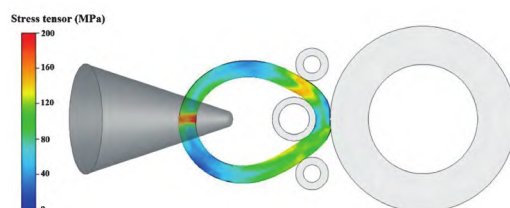


图 5 抱辊力过大引起椭圆现象

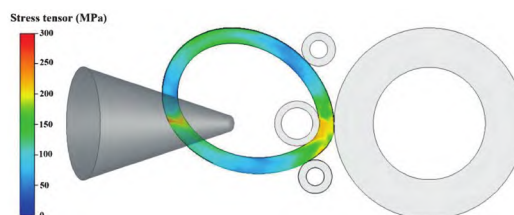


图 6 锥辊转速不匹配引起环件偏移

3 有限元模型的验证实验

为了验证模型的可靠性, 在 Wagner Banning 公司生产的 RAW 3000-700 轧机上进行 Inconel718 合金全尺寸环件轧制实验。轧制实验主要的过程参数列于表 1 中, 成形后实验件与模拟环件的对比如图 7 所示。

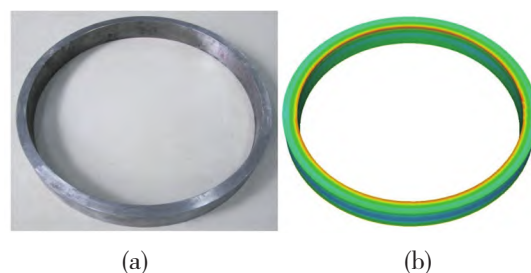


图 7 成形环件的对比：(a) 实验环件；(b) 模拟环件

图 8 所示为环件尺寸随轧制时间演化曲线的对比。由图可知, 模拟结果中各尺寸的演化曲线与轧制实验基本重合, 能够清晰描绘出环轧过程的三个阶段, 即咬入阶段、稳定轧制阶段和修圆阶段。在轧制前期实验环件的长大速度略快, 但最终环件尺寸趋

表 1 轧制实验主要的过程参数

轧制工艺参数		轧制工艺参数	
主辊转速 (r/min)	20	锥辊转速 (r/min)	40—50
坯料初始温度 (℃)	1020	芯辊进给速度 (mm/s)	0.875
轧辊预热温度 (℃)	300	锥辊进给速度 (mm/s)	0.35
轧制时间 (sec)	40	坯料转运时间 (sec)	20
坯料尺寸 (mm)	Φ610×Φ450×125	环件尺寸 (mm)	Φ900×Φ800×115

于一致。误差的产生可能是由于实际生产中轧辊控制精度不足、椭圆度偏差、测量误差等原因引起的。模拟结果的最大相对误差约为 3%，表明本文所建立的 Inconel718 合金环件轧制有限元模型能够精确地再现环件成形的演化过程，并能够在此后的研究中作为高效的、便捷的研究手段，节省研究成本，缩短研究周期。

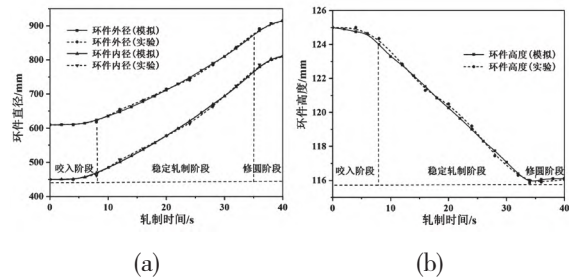


图 8 实验与模拟尺寸演化的对比：(a) 环件直径；
(b) 环件高度

4 结论

本文以环件径轴双向轧制曲线为基本变量，通过对轧制过程中环件瞬时尺寸、驱动辊转速、抱辊力矩等运动学、动力学参数的计算，为有限元模型中各轧辊联合控制方法的实现提供了理论依据。

基于 FORGE 有限元软件平台，通过建立芯辊转速迭代计算与控制模块、锥辊转速匹配计算模块、抱辊轨迹及抱辊力计算模块等轧辊控制模块，成功实现了各轧辊的联合控制，真实再现了环件轧制的成形过程，并通过 Inconel 718 合金全尺寸环件轧制实验，验证了模型的预测精度。

参考文献：

[1] 兰箭, 钱东升, 邓加东, 等. 高性能环类零件绿色智能轧制研究进展 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 186–197.

[2] 钟明君, 于浩. 环件轧制技术的研究现状及发展趋势 [J]. 热加工工艺, 2024, (19): 10–15.

[3] ZHU X L, MA B X, SU G, et al. Blank design method for C-section profile ring rolling based on FEM and RSM[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 65: 649–660.

[4] ZHU X L, LIU D, XING L J, et al. Microstructure evolution of inconel 718 alloy during ring rolling process[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(6): 775–783.

[5] HUA L, DENG J D, QIAN D S. Recent development of ring rolling theory and technique[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2017, 54(1–3): 65–87.

[6] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[7] 胡正寰, 华林. 零件轧制成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[8] LI L Y, YANG H, GUO L G, et al. A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 205(1): 99–110.

[9] DENG J D, HUA L, QIAN D S, et al. Modeling and application of ring stiffness condition for radial-axial ring rolling [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016, 110: 66–79.

[10] JENKOUK V, HIRT G, FRANZKE M, et al. Finite element analysis of the ring rolling process with integrated closed-loop control[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 267–270.

[11] 黄维鑫, 郭良刚. Φ11m 超大型 2219 铝环多工步轧制研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27(12): 51–57.

[12] 杨智皓, 路晓辉, 兰箭, 等. 环件轧制多尺度数值模拟研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29(3): 1–12.

(下转第 31 页)

[9] WANG J J, WANG L. A bi-population cooperative memetic algorithm for distributed hybrid flow-shop scheduling [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2021, 5(6): 947–961.

[10] YING K C, LIN S W. Minimizing makespan for the distributed hybrid flow shop scheduling problem with multiprocessor tasks [J]. Expert Systems With Applications, 2018, 92: 132–141.

A Learning-Based Algorithm for Distributed Hybrid Flow Shop Scheduling

CHEN Xuefeng, ZUO Yang

(School of Electronic Information Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The distributed hybrid flow shop scheduling problem holds significant importance in modern manufacturing as it contributes to enhanced productivity and cost reduction. However, the intricate nature of the DHFSP poses a major challenge when seeking solutions. To address this issue, this paper proposes an adaptive learning algorithm based on iterative greedy that incorporates a learning mechanism with the objective of effectively minimizing the maximum completion time. The algorithm comprises three components: firstly, an initialization strategy is employed to construct the initial solution; secondly, the core of the algorithm lies in its dynamic learning mechanism that utilizes historical feedback to intelligently select perturbation strategies based on accumulated optimization experience, thereby progressively enhancing the quality of the solution; and lastly, a roulette selection strategy further enhances the algorithm's ability to explore the global optimal solution. The experimental results demonstrate that the algorithm proposed exhibits significant performance advantages over existing comparison algorithms in addressing the DHFSP.

Key words: DHFSP; adaptive; roulette; learning mechanism

(责任编辑 王 磊)

(上接第 24 页)

Numerical Simulation of Radial-Axial Ring Rolling Process and Combined Control of Rolls

ZHU Xinglin^{1,2}, SHI Jingru¹, MA Bingxin^{1,2}, ZHANG Zhiyuan^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2.Xinxiang Key Laboratory of Materials Processing Technology and Mould, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Ring rolling process is a highly nonlinear and unsteady hot forming process under the action of thermodynamic coupling. The process parameters are numerous and the rolls control are difficult. There is still a lack of efficient and convenient numerical research methods for ring rolling process. Taking the rolling curve as the fundamental variable, the kinematics and dynamics relationships of each roll were established as the theoretical basis. Then based on FORGE software, a finite element model was established according to $\Phi 3000\text{mm}$ CNC ring rolling mill. Through the combined control of rolls, the weak stiffness defects such as eccentricity and ellipse can be predicted successfully. The reliability of the FE model was verified by full size ring rolling test of Inconel718 alloy. The relative error of the predicted result is less than 3%, and this model has been applied to the development of typical parts.

Key words: ring rolling; numerical simulation; roll control; Inconel718 alloy

(责任编辑 吕春红)