海洋平台消防管道滚槽工艺仿真分析及参数优化

王景锋[1]，苏明[1]，江国和[2]，吴刚[2]，曹凯宇[2]，陈伟[2*]
（1. 上海振华重工（集团）股份有限公司，上海 200125；2. 上海海事大学商船学院，上海 201306）

摘 要：针对海上风电换流站消防冷却管道滚槽卡箍连接中存在的加工精度不一及安装漏水问题，开展滚槽工艺参数优化研究。文章基于 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学模块，建立了 Q235 无缝钢管滚压过程的三维有限元模型，引入 Johnson-Cook 本构方程与损伤准则，系统分析单次进给深度（每次滚压时沿槽深方向的推进距离，2.0~2.5 mm）对管道等效塑性应变及材料损伤演化的影响。仿真结果表明，对于 ϕ70 mm×2.4 mm 规格的管道，最大等效塑性应变随单次进给深度增加总体呈上升趋势；2.2 mm 工况下最大等效塑性应变为 0.248，仍低于 0.3 的失效阈值，2.3 mm 工况下达到 0.295 并逼近失效阈值，2.4 mm 工况下增至 0.324 并超过失效阈值。综合材料离散性及加工余量，建议将 2.2 mm 作为单次进给深度的推荐上限，并采用“浅压多圈”的工艺策略，以降低沟槽根部损伤与开裂风险，为海洋平台管路滚槽工艺参数优化提供量化依据。

关键词：海洋平台；管道；滚槽；工艺参数优化
中图分类号：U6；U656.6；TU513 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-7874（2026）11-0036-05
doi：10.7640/zggwjs202611006

Simulation analysis and parameter optimization of grooving process for fire protection pipelines on offshore platforms

Wang Jingfeng[1], Su Ming[1], Jiang Guohe[2], Wu Gang[2], Cao Kaiyu[2], Chen Wei[2*]
（1. Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China）

Abstract: To address inconsistent machining accuracy and water leakage during installation of grooved clamp connections in fire-protection and cooling pipelines on offshore converter stations, a study was conducted to optimize grooving process parameters. A three-dimensional finite-element model of the rolling process for Q235 seamless steel pipes was established using the ANSYS/LS-DYNA explicit dynamics module. The Johnson-Cook constitutive model and damage criteria were introduced to systematically analyze the effects of single-pass feed depth (the groove-depth change in each rolling pass, 2.0-2.5 mm) on the equivalent plastic strain and material damage evolution. The results show that, for a ϕ70 mm×2.4 mm pipe, the maximum equivalent plastic strain generally increases with single-pass feed depth. The strain is 0.248 at 2.2 mm, remains below the failure threshold of 0.3, rises to 0.295 at 2.3 mm and approaches the threshold, and reaches 0.324 at 2.4 mm, exceeding the threshold. Considering material variability and machining allowance, 2.2 mm is recommended as the upper limit for single-pass feed depth. A "shallow pressing with multiple passes" strategy is therefore proposed to reduce damage and cracking risk at the groove root and provide quantitative guidance for the grooving process optimization of offshore platform pipelines.

Key words: offshore platform; pipeline; grooving; process parameter optimization

0 引言

卡箍式连接（又称沟槽连接）通过在管端加工环形沟槽，配合橡胶密封圈与卡箍外壳实现管道的紧固与密封。相比传统的焊接或法兰连接，该

收稿日期：2026-01-05 修回日期：2026-02-09
作者简介：王景锋（1978— ），男，陕西宝鸡人，硕士，高级工程师，主要从事钢结构/海上风电设计与科技创新相关管理工作。
*通讯作者：陈伟，E-mail：chenwei12@zpmc.com

方式具有安装空间要求低、抗震性能好、施工便捷等显著优势，目前已从陆上民用系统普及至海洋平台消防及冷却管路系统，其工艺核心在于滚槽加工。加工时钢管置于滚槽机的下托轮上，电机驱动下托轮旋转并利用摩擦力带动钢管转动，同时液压缸推动上压轮向下运动对管壁施加径向压力。在上下滚轮的强力挤压下，管壁局部发生剧烈的塑性变形，最终形成满足卡箍安装要求的沟槽结构。然而，滚槽过程属于典型的局部大变形非线性接触问题，管材在极短时间内承受极高的应变率并伴随复杂的应力状态。若单次进给深度控制不当，极易导致沟槽根部材料出现微观裂纹甚至韧性断裂，从而破坏管道的结构完整性，为后续管路运行造成渗漏或爆管风险。

目前国内学者对滚槽工艺相关的研究主要集中于焊管滚槽成型与焊缝开裂控制方面，封壮壮等[1]研究了 HFW 焊管滚槽时焊接残余应力、滚压圈数、单次滚压进给量、滚压初始位置等因素对加工中焊缝开裂的影响，基于数值仿真并开展试验验证，得出了量化的指导数据，滚压加工时滚压圈数不宜小于 6 圈，实际滚压时应采用均匀下压方案。段凌宇[2]以 ERW 焊管为研究对象，分别从材料的焊接性、焊接工艺参数、焊管成型、表面镀锌、滚槽加工过程等方面，详细分析了滚槽开裂现象的原因并提出了解决办法和防范措施：1）从原材料控制、生产过程管理入手，提高焊缝强度；2）改进试验方法，特别要加强首件检验，使焊缝缺陷及时暴露；3）使用中必须了解焊接钢管的特点，滚槽加工过程中应小心防护，避免焊缝受损。

针对海洋平台广泛使用的 Q235 无缝钢管，在滚槽过程中的微观损伤演化规律及单次进给极限尚缺乏深入的量化研究。如何精准确定单次滚压的“工艺红线”，在保证成型效率的同时规避材料损伤风险，是提升海洋工程管路制造质量的核心挑战。为此，本文基于 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学平台，引入 Johnson-Cook 损伤准则，通过三维有限元模型系统探究不同单次进给深度下的应变分布与材料失效规律，量化工艺安全阈值，为滚槽工艺参数的优化提供理论支撑。

1　有限元模型建立

1.1　材料本构与损伤模型

本研究涉及大塑性变形过程，需要依赖本构方程对材料力学行为的准确描述，本构方程是连接载荷与材料变形的核心模型，而 ANSYS 内置的本构方程参数多为默认理想值，所以要在仿真设置中通过调整设置 JC 参数，以提高仿真的准确性。

根据 Johnson-Cook 本构模型[3]，有

$$\sigma=(A+B\varepsilon^{n})(1+C\ln\dot{\varepsilon})[1-(T^{*})^{m}] \tag{1}$$

$$T^{*}=\frac{T-T_{\tau}}{T_{m}-T_{\tau}} \tag{2}$$

式中：σ 为等效流动应力；A 为初始屈服强度；B 为应变硬化系数；ε 为等效塑性应变；n 为应变硬化指数；C 为应变率敏感系数；$\dot{\varepsilon}$为无量纲塑性应变率，$\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_{p}/\dot{\varepsilon}_{0}$，$\dot{\varepsilon}_{p}$ 为等效塑性应变率，$\dot{\varepsilon}_{0}$ 为参考应变率；T^{*} 为无量纲温度；m 为热软化指数；T 为当前温度；T_{τ} 为参考温度；T_{m} 为材料熔点。本文中的温度均采用开尔文温标，单位为 K。

为准确预测滚槽过程中的材料开裂与失效，引入 Johnson-Cook 损伤准则[4]。材料的失效断裂应变 ε_{f} 定义为：

$$\varepsilon_{f}=[D_{1}+D_{2}\exp(D_{3}\sigma^{*})][1+D_{4}\ln\dot{\varepsilon}][1+D_{5}T^{*}] \tag{3}$$

式中：ε_{f} 为失效断裂应变；D_{1} 为基准失效应变参数；D_{2}、D_{3} 为应力三轴度相关参数；D_{4} 为应变率敏感参数；D_{5} 为温度敏感参数；σ^{*} 为应力三轴度，$\sigma^{*}=\sigma_{m}/\sigma_{eff}$，$\sigma_{m}$ 为平均应力，σ_{eff} 为 Mises 等效应力。

采用平均应力定义后，不再单独引入压力 p 的正负号，以避免符号约定不同造成歧义。

基于上述定义，采用线性累积损伤演化准则计算单元的损伤参数 D：

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{f}} \tag{4}$$

式中：$\Delta\varepsilon$ 为等效塑性应变增量。

已有研究分别从滚槽开裂、Johnson-Cook损伤预测及金属材料应变率效应[5]等方面开展了相关研究。本文采用郭子涛等[3]给出的 Q235 钢修正 Johnson-Cook 本构关系及参数，见表 1。上述参数直接影响材料屈服、硬化、应变率效应及温度软化响应，进而影响滚槽过程应力应变计算结果的可靠性。

根据 Tian 等[6]针对海洋管道用 Q235 钢开展准静态与动态拉伸试验，基于 Johnson-Cook 损伤模型拟合得到基准损伤参数 D_{1}=0.291 8，与 0.3 接近。结合本文常温滚槽工况及工程安全裕度比较需求，取 0.3 作为等效塑性应变的工程参考失效阈值，用于工艺风险分区；材料的严格断裂判定仍以 Johnson-Cook 累计损伤准则 D=1 为依据。

表 1 Johnson–Cook 模型参数(Q235 钢)

Table 1 Johnson–Cook model parameters(Q235 steel)

初始屈服强度 A/MPa	硬化系数 B/MPa	应变率敏感系数 C	硬化指数 n	温度修正参数 m_1	温度修正参数 m_2	参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$/s^{-1}	参考温度 T_r/K	熔点 T_m/K
293.8	230.2	0.065 2	0.578	1.762	1.278	2.1×10^{-3}	293	1 795
注：参考温度为 293 K(约 20 ℃)，熔点为 1 795 K(约 1 522 ℃)。								

1.2 尺寸选择

本文以外径 70 mm、壁厚 2.4 mm 的 Q235 无缝钢管为研究对象，其结构尺寸如表 2 所示。研究中未涉及其他直径钢管，结论适用于同类规格管道，后续可扩展研究多规格管道。

表 2 钢管和沟槽的尺寸

Table 2 Dimensions of steel pipes and grooves

mm

钢管外径	壁厚	管端至沟槽边尺寸	沟槽宽度	沟槽最小允许壁厚	钢管总长
70	2.4	15.88	7.14	1.24	200

1.3 三维模型搭建与网格划分

模型网格划分如图 1 所示，采用扫掠方法进行网格划分，源面网格类型设置为四边形/三角形，单元选项为整个钢管。利用几何体尺寸调整将钢管的网格单元尺寸设置为 1 mm。同时对与钢管接触的上压轮与下托轮的接触部分进行局部网格加密处理，其网格单元尺寸分别为 3 mm 与 2 mm。最终其网格单元总数为 1 478 050，节点为 1 673 600，既保证了求解精度，又控制了计算规模。为了降低有限元计算量，保证优化效率，本试验仅将总体三维模型中的滚压模块提取出来进行有限元仿真计算，并建立用于滚槽过程计算的简化装配体模型。



图 1 网格划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grid division

1.4 模型有效性与可靠性验证

滚槽过程属于典型的非线性动态接触问题，为确保有限元计算结果的可靠性，通过对比有限元仿真结果与实际加工完成试件验证模型的准确性。将仿真得到的沟槽几何形貌与实际加工出的管件进行对比，发现两者在滚槽深度、宽度及边缘隆起特征上吻合度极高。特别是仿真模型准确预测了沟槽根部的高应变集中区，这与实际生产中观测到的裂纹高发位置一致。这种宏观形貌与微观损伤预测的双重一致性，有力证明了本文构建的三维有限元模型是正确且可靠的。

1.5 工艺参数、材料模型、物理参数等定义

在 Solidworks 建立三维几何模型，将管件与滚压轮模型导入 ANSYS Workbench 中的 LS–DYNA 模块，定义管道的材料属性，根据实际工况，设置 Q235 的材料参数，按照相关参数进行设置后，并完成边界条件设置，实际滚压轮材料选择 40Cr，仿真中设置为刚体，不考虑其变形[7]。

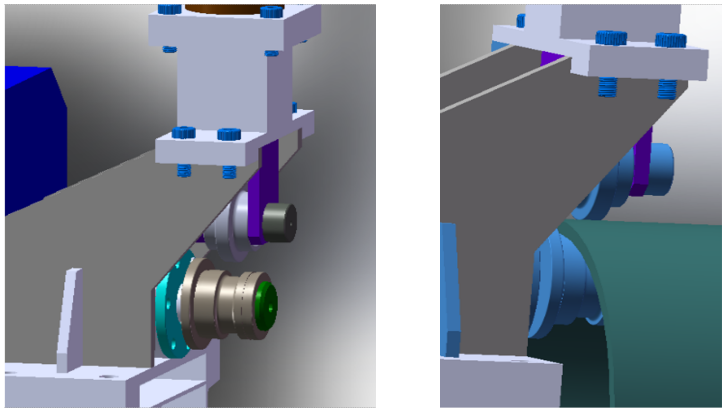
1.6 仿真运行参数的设置

本文中，滚压深度与滚槽深度均指沟槽相对管道原始外表面的径向凹入深度，统一称为滚槽深度；单次进给深度指每次滚压时沿槽深方向的推进距离，即单次加工增量。

将管件与滚压轮模型导入 ANSYS Workbench 中的 LS–DYNA 模块，设置单次进给深度及滚轮转速。滚轮转速固定为 60 r/min，以控制转速及应变率效应对工况比较的影响。本文仅设置单次进给深度分别为 2.0 mm、2.1 mm、2.2 mm、2.3 mm、2.4 mm 和 2.5 mm 的 6 组仿真工况，分析其对应力应变分布的影响。全文所述 6 组工况均指上述同一组参数方案，滚槽深度为成型几何尺寸，不作为另一独立工况参数。

2 仿真分析结果

传统的滚槽工艺研究往往主要关注最终滚槽深度是否达标，而加工过程中材料内部损伤的累积同样值得关注。为界定 Q235 无缝钢管的单次加工安全范围，本文基于 ANSYS/LS–DYNA 显式动力学平台，引入 Johnson–Cook 损伤准则，对单次进给深度为 2.0~2.5 mm 关键工艺区间的等效塑性应变与材料损伤状态进行分析。图 2 展示了滚



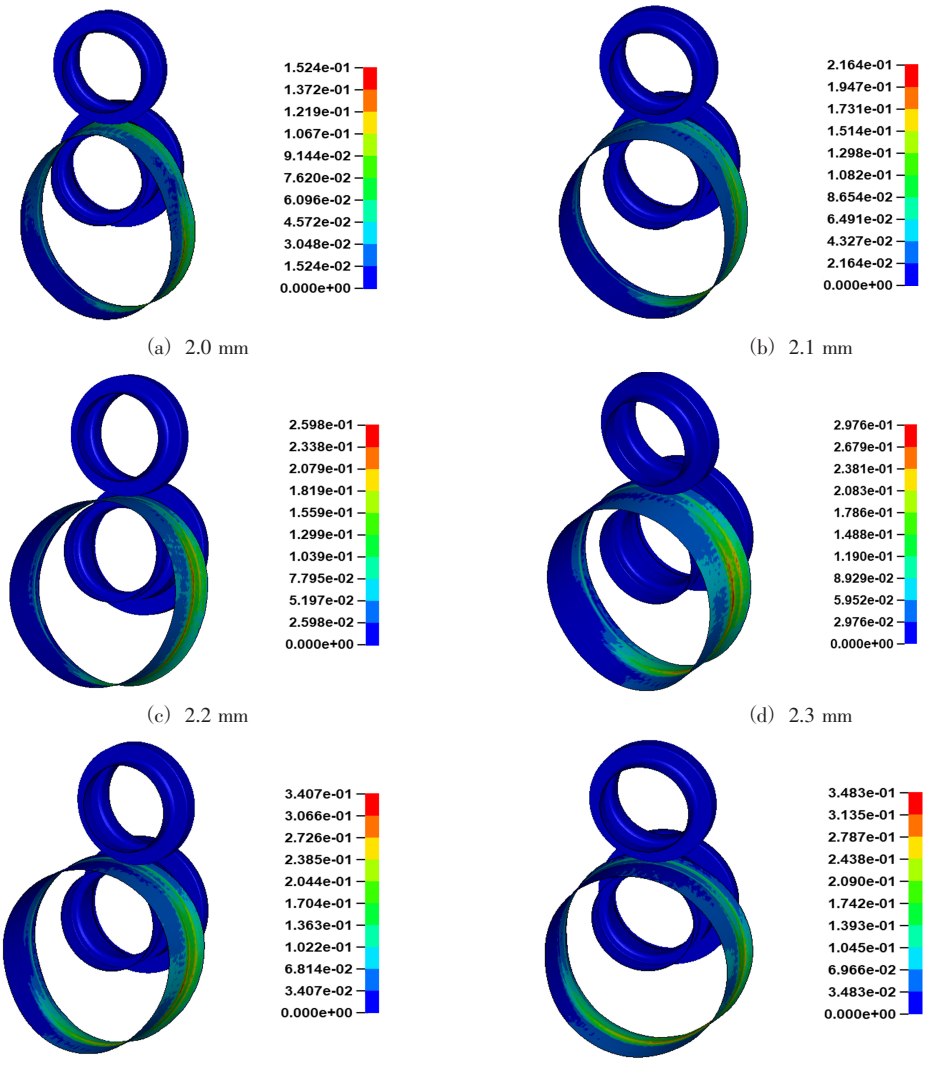
（a）执行模块　　（b）执行状态

图 2　滚压执行模块及状态示意图

Fig. 2　Schematic diagram of rolling execution module and its states

槽执行模块及其仿真运行状态。

沿用 1.6 节所列 6 组工况，以 0.1 mm 为步长考察 2.0~2.5 mm 的单次进给深度。图 3 展示各工况下管道的等效塑性应变云图。



（a）2.0 mm　　（b）2.1 mm

（c）2.2 mm　　（d）2.3 mm

（e）2.4 mm　　（f）2.5 mm

图 3　不同工况下的等效塑性应变云图

Fig. 3　Equivalent plastic strain contour maps under different working conditions

2.1 关键工艺区间的损伤演化全谱系分析

仿真结果表明，在单次进给深度 2.0~2.5 mm 的 6 组工况中，最大等效塑性应变随单次进给深度增加总体呈上升趋势，并由安全区逐步进入接近阈值及超过阈值的高风险区。各工况分析如下：

1）在 2.0 mm 工况下，沟槽根部最大等效塑性应变为 0.152，约为 0.3 失效阈值的 50.7%。材料处于较稳定的塑性变形阶段，具有较大的安全裕度。

2）在 2.1 mm 工况下，最大等效塑性应变上升至 0.195，仍明显低于 0.3 失效阈值。与 2.0 mm 工况相比，在保持较大安全裕度的同时提高了单次进给深度。

3）在 2.2 mm 工况下，最大等效塑性应变为 0.248，低于 0.3 失效阈值，但相较 2.0 mm 工况已明显增大。考虑管材壁厚公差、材料离散性及实际加工波动，本文将 2.2 mm 作为单次进给深度的推荐上限，以保留必要的工程安全余量。

4）在 2.3 mm 工况下，最大等效塑性应变达到 0.295，已十分接近 0.3 失效阈值。虽然数值上尚未超过阈值，但安全余量仅为 0.005，实际生产中易受材料性能离散及加工误差影响，因此不建议作为常规单次进给深度参数。

5）在 2.4 mm 工况下，最大等效塑性应变达到 0.324，超过 0.3 失效阈值，表明该工况已进入材料失效风险区，沟槽根部产生裂纹的可能性显著增加。

6）在 2.5 mm 工况下，最大等效塑性应变进一步增至 0.348。危险单元应变历史曲线（见图 4）在约 0.024 s 附近出现明显阶跃，结合高应变水平表明该工况下局部变形与损伤进一步加剧。

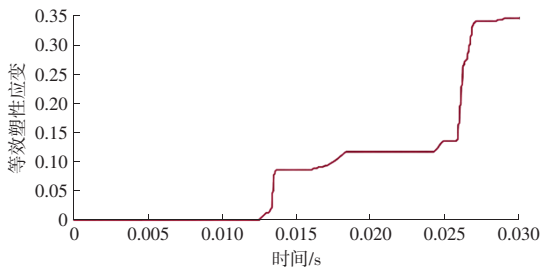


图 4 危险单元的应变历史曲线

Fig. 4 Strain history curve of the critical element

2.2 基于全谱系的工艺窗口界定

基于上述 6 组数据，对最大等效塑性应变及相邻工况增幅进行汇总见图 5。增幅比定义为相邻 2 组工况最大等效塑性应变的相对增长率，即 $R_i=(\varepsilon_i-\varepsilon_{i-1})/\varepsilon_{i-1}\times100\%$。由于 2.0 mm 为首个工况，不存在前一工况，因此该点不定义增幅比，增幅比曲线自 2.1 mm 工况开始。计算结果表明，2.1~2.5 mm 各相邻工况的相对增幅总体呈下降趋势；最大等效塑性应变则随单次进给深度增加而单调上升。综合 0.3 参考失效阈值及工程安全余量，2.2 mm 可作为推荐单次进给深度上限；2.3 mm 为接近阈值的高风险工况，2.4 mm 及以上已超过参考失效阈值。

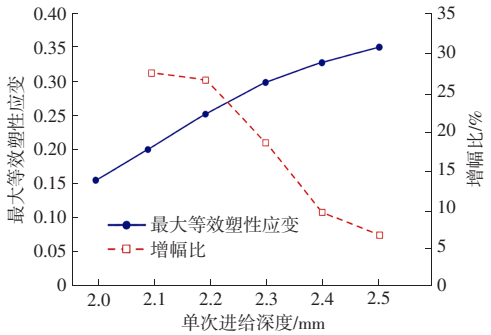


图 5 单次进给深度与最大等效塑性应变及增幅比

Fig. 5 Single-pass feed depth versus maximum equivalent plastic strain and increase ratio

3 结语

基于 ANSYS/LS-DYNA 平台建立 Q235 无缝钢管滚槽过程三维有限元模型，并对 2.0~2.5 mm 单次进给深度下的等效塑性应变与损伤演化规律进行分析，主要结论如下：

1）确定了单次进给深度的安全控制范围。对于 ϕ70 mm×2.4 mm 的 Q235 无缝钢管，2.2 mm 工况下的最大等效塑性应变为 0.248，低于 0.3 失效阈值；2.3 mm 工况下增至 0.295 并逼近阈值；2.4 mm 工况下达到 0.324 并超过阈值。综合工程安全余量，建议将 2.2 mm 作为单次进给深度推荐上限。该上限针对每次滚压的槽深推进距离，不表示最终滚槽深度上限。

2）提出“浅压多圈”的工艺策略。随着单次进给深度增加，最大等效塑性应变总体上升，但 2.3~2.5 mm 区间相邻工况的相对增幅逐渐减小。采用减小单次进给深度、增加滚压圈数的方式，有利于降低沟槽根部局部损伤与开裂风险。

3）研究结果表明，单次进给深度与滚压圈数的协同控制是提高滚槽成形质量和连接可靠性的关键。实际生产中宜在首道滚压时保留适当安全

（下转第 79 页）