



UNS N08811 铁镍基合金管材热穿孔工艺优化实践

王博文¹, 拓雷锋², 李亚杰², 宋博¹, 李强¹, 董亚彪¹, 李树伟¹

(1 山西太钢不锈钢钢管有限公司, 太原 030008; 2 太原科技大学, 太原 030024)

摘要:与周期长、成材率低、成本高的热挤压工艺相比, UNS N08811 铁镍基合金管材采用热穿孔工艺生产可显著降低生产成本, 但穿孔过程中易产生表面横向裂纹, 影响产品合格率和使用安全。为降低此品种穿孔缺陷率, 采用 JMatPro 软件分析了材料热加工性能, 采用 Simufact 软件模拟了 N08811 铁镍基合金管坯热穿孔过程中的温度变化与应力变化; 结合现场工艺试验, 得出此材料热穿孔合适的出钢温度为 1 130~1 150 °C; 穿孔过程中需要调整出钢节奏, 控制终轧钢温不高于 1 220 °C; 管坯加热和冷却时须快速通过 660~850 °C 温度, 减少有害相形成; 为降低穿孔过程中温升梯度和应力变化, 应延长从顶头接触管坯到穿孔完成的整个变形过程, 使穿孔过程中管坯碾轧-穿孔-圆整过程受力更加均匀, 温度曲线和应力曲线更为平缓; 通过改进穿孔顶头设计, 减小顶头圆弧段弧度, 增长顶头长度, 增大平直段的角度, 降低咬入椭圆系数, 降低轧辊速度等措施, 可有效降低 N08811 铁镍基合金管坯热穿孔缺陷率, 保证产品表面质量。

关键词: UNS N08811; 铁镍基合金; 无缝管; 热穿孔

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00268 **中图分类号:** TG337. 1

Optimization Practice of Hot Piercing Process for UNS N08811 Iron-Nickel-Based Alloy Pipe

Wang Bowen¹, Tuo Leifeng², Li Yajie², Song Bo¹, Li Qiang¹, Dong Yabiao¹, Li Shuwei¹

(1 Shanxi Taigang Stainless Steel Tubes & Pipes Co., Ltd., Taiyuan 030008, China;

2 Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Compared with hot extrusion process with the long cycle, low yield, and high cost, the production of UNS N08811 iron-nickel-based alloy pipes using hot piercing process can significantly reduce production costs. However, surface transverse cracks are prone to occur during the piercing process, which affects the product qualification rate and safety of use. To reduce the piercing defect rate of this product, JMatPro software was used to analyze the thermal processing performance of the material, and Simufact software was used to simulate the temperature and stress changes during the hot piercing process of N08811 iron-nickel-based alloy pipe billet; Based on spot technology tests, the suitable outlet heating temperature for hot piercing of this material was 1 130 °C-1 150 °C; During the piercing process, it was necessary to adjust the steel extract rhythm and control the final rolling steel temperature not to exceed 1 220 °C; It was necessary to quickly pass through the temperature range of 660 °C-850 °C to reduce the formation of harmful phases when heating and cooling; In order to reduce the temperature gradient and stress changes during the piercing process, the entire deformation process from the top contact with the pipe billet to the completion of piercing should be extended, so that the stress during the rolling piercing rounding process of the pipe billet was more uniform, and the temperature and stress curves were smoother; By improving the design of the piercing cone, reducing the curvature of the cone arc section, increasing the length of the cone, increasing the angle of the straight section, reducing the biting ellipse coefficient, and lowering the rolling speed, the hot piercing defect rate of N08811 iron-nickel-based alloy pipe billet can be effectively reduced, ensuring the surface quality of the product.

Key Words: UNS N08811; Iron-nickel Base Alloy; Seamless Pipe; Hot Piercing

UNS N08811 (Incoloy 800HT, 以下简称 N08811) 是含铬、钛、铝等元素的奥氏体铁镍基合金, 具备优良的高温力学、高温抗氧化和耐腐蚀性能, 广泛应用于化工、电力和新能源产业等^[1-3]。管坯锻造和热加工过程中易形成横向微裂纹, 并在冷

加工时扩展形成横向裂纹缺陷, 如图 1 所示^[4-5], 严重影响产品质量和使用安全性^[6]。N08811 无缝管制造常用的热挤压工艺周期长 (主要为管坯加工准备时间)、成材率 (88.3%) 相对较低 (管坯加工及扩孔挤压过程导致金属损耗)、工序成本高; 如采用热

基金项目: 山西省重点研发计划(202102150401002)

作者简介: 王博文(1984—), 男, 硕士, 高级工程师;

E-mail: wangbw@tisco.com.cn;

收稿日期: 2024-11-28

通信作者: 拓雷锋(1984—), 男, 博士, 副教授;

E-mail: tuoleifeng@tyust.edu.cn

穿孔工艺制造,可显著提高工艺成材率(95.5%),缩短制造周期(由挤压3~5天降为1~2天),降低工序成本(由挤压的6 310元/吨降为2 680元/吨)。在两辊斜轧穿孔工艺中,咬入过程坯料表面主要受三向压应力,坯料中心部位是一向压应力和两向拉应力,如图2所示。随着变形的深入,坯料中心不仅受到拉应力作用,同时增加了切应力作用。相对挤压过程三向压应力,穿孔过程应力变化更加复杂,穿孔比挤压工艺更容易产生裂纹缺陷。加之铁镍基合金材料中合金化元素多,易疏松和偏析,材料敏感性高也是增加穿孔不稳定的一个重要因素。

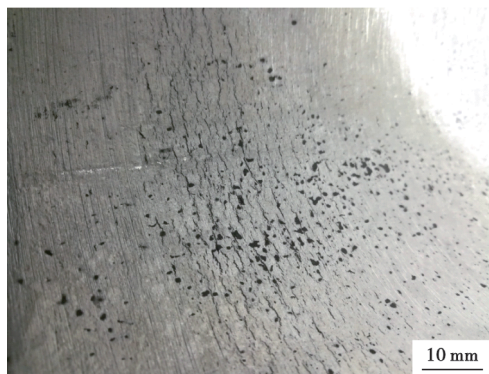


图1 N08811铁镍基合金穿孔荒管内壁横向微裂纹形态
Fig. 1 Transverse crack morphology on the inner wall of N08811 iron-nickel-based alloy raw pipe

作为单相奥氏体组织合金,虽然N08811铁镍基合金热加工温度区间比较宽泛,但合适的斜轧穿孔温度区间较小^[7],穿孔过程中温度控制困难,需通过材料性能分析和试验确定加热制度和穿孔工艺,针对性的进行工模具设计,解决穿孔过程中内表面微裂纹问题,提高穿孔管合格率。

1 试验材料与方法

UNS N08811化学成分应符合ASME SB407—2023标准,与常见的800、800H铁镍基合金相比,该产品C、Al和Ti元素含量高($w[C]$ 为0.06%~0.10%, $w[Al+Ti]$ 为0.85%~1.2%),具体见表1。

采用JMatPro材料分析软件分析N08811铁镍基

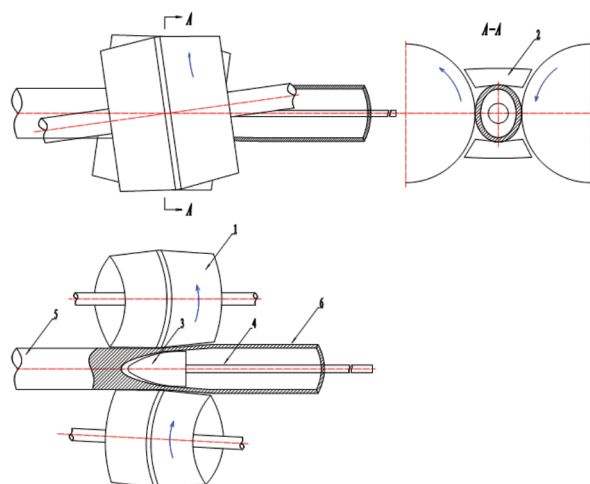


图2 斜轧穿孔工艺过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of oblique rolling piercing process

合金CCT曲线和TTT曲线,其边界条件为:起始温度860℃,终止温度600℃,冷却速度分别为10、1.0、0.1、0.01℃/min。

设计了不同出钢温度进行穿孔试验,试验条件为:管坯直径 $\phi 110$ mm,通过环形炉分别加热至1 080、1 130、1 180、1 230℃出钢,在89型穿孔机上进行穿孔,穿孔后入水快速冷却,酸洗后检查内外表面质量,并取样进行金相观察。

2 理论及试验分析

2.1 材料热加工性能分析

通过JMatPro材料分析软件分析N08811铁镍基合金CCT曲线和TTT曲线,其边界条件为:起始温度860℃,终止温度600℃,冷却速度分别为10、1.0、0.1、0.01℃/min,如图3所示。通过CCT曲线可以看出,在不同冷却速度下均会有 γ 相(600~710℃)、 σ 相(615~837℃)、LAVES相(627~801℃)等第二相产生;通过TTT曲线可以看出,在各析出相含量为0.5%时与时间和温度的关系,可得出660~850℃是N08811铁镍基合金析出相易大量产生的温度敏感区。在进行加热工艺设计时必须快速加热通过660~850℃温度区间,穿孔后入水快速冷却。

根据高温加热区间温度对N08811铁镍基合金性能的影响曲线^[8]和高温下材料的黏度值模型,参

表1 N08811管坯化学成分(质量分数)

Table 1 The chemical composition of the N08811 pipe billet

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Al+Ti	Cu
要求值	0.06~0.10	≤1.00	≤1.50	≤0.030	≤0.015	30.0~35.0	19.0~23.0	≥39.5	0.85~1.20	≤0.75
实际值	0.08	0.5	1.0	0.015	0.001	33.4	21.3	42.5	1.05	0.03

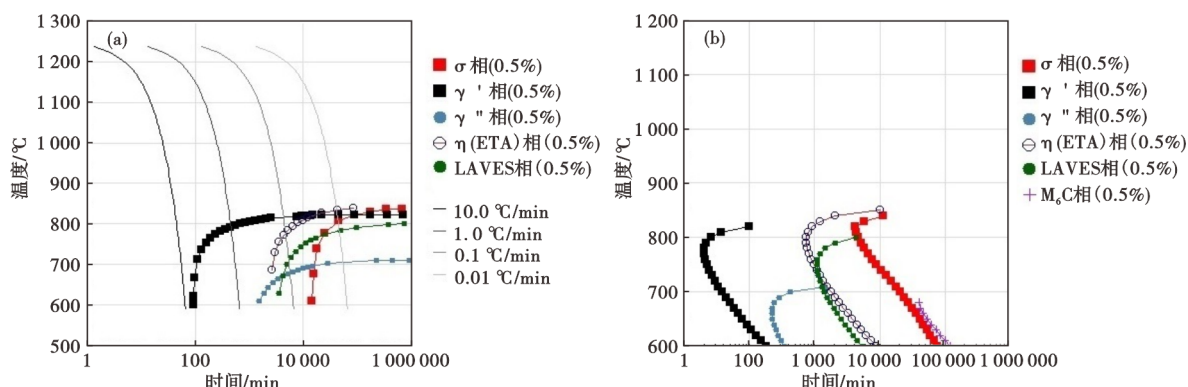


图3 模拟N08811铁镍基合金CCT曲线(a)和TTT曲线(b)

Fig. 3 Simulate (a) CCT curve and (b) TTT curve of N08811 iron-nickel-based alloy

考曹宇等^[9]建立的热变形本构方程,如式(1)。

$$\dot{\epsilon} = 7.704 \times 10^{15} [\sinh(0.00606\sigma)]^{5.775} \exp[-427.360/(RT)] \quad (950 \sim 1100 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ;R为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$;T为变形温度, $^\circ\text{C}$; σ 为峰值应力, N/mm^2 ;

由式(1)可知,在 $950 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以上时,变形温度越高,材料应变速率越小,变形力越小; $1250 \sim 1280 \text{ } ^\circ\text{C}$ 材料黏度最低,有利于变形;但 $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以上时,材料塑性下降,晶界断裂的趋势增大^[10],可能导致穿孔内裂缺陷的产生^[11]。

2.2 热穿孔过程仿真模拟

采用Simufact材料加工及热处理工艺有限元仿真软件模拟 $\phi 60 \text{ mm}$ 和 $\phi 110 \text{ mm}$ 两个规格的N08811管坯热穿孔过程,重点对管坯温度、应力变化情况进行分析,以找出穿孔过程中管坯不同部位的温度变化规律和材料应力变化,分析可能产生缺陷的因素。设定边界条件为:管坯与顶头之间摩擦系数为0.1,管坯与导板之间摩擦系数为0.4,管坯与轧辊的界面摩擦采用库仑模型,摩擦系数为0.9;管坯初始温度 $1150 \text{ } ^\circ\text{C}$,顶头温度 $300 \text{ } ^\circ\text{C}$,轧辊温度 $100 \text{ } ^\circ\text{C}$,管坯与轧辊间热传导系数 $20 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,管

坯与环境热传导系数 $0.2 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[12-13]。

(1) $\phi 60 \text{ mm}$ 规格管坯穿孔过程模拟

穿孔过程进行到10%、40%、70%和90%的管坯温度分布如图4所示,由图4可以看出,随着穿孔过程进行,钢温升高,变形部位的温度显著高于未变形部位的温度,主要是由于金属变形过程中的摩擦热导致金属温度升高。

由图5可以看出,在穿孔过程中,管坯头部先产生变形,由于变形导致头部温度高于中部和尾部,随着穿孔进行、顶头深入,中部温度开始升高,当顶头达到尾部的时候,温度达到最高,此时,头部和中部温度略有降低。

不同穿孔阶段应力变化趋势如图6所示,分别为穿孔过程进行到10%、40%、70%和90%的应力分布模拟结果,由图6可以看出,变形区域中顶头周围以及表面所受应力最大,即管材的心部和表面所受应力最大。

图7显示了穿孔过程中管坯中心位置头、中、尾部应力变化情况,可以看出,随着顶头的深入,最大受力区域由头部转移至中部,最后转移至尾部。

(2) $\phi 110 \text{ mm}$ 规格管坯穿孔过程模拟

图8分别为N08811 $\phi 110 \text{ mm}$ 管坯穿孔进行到

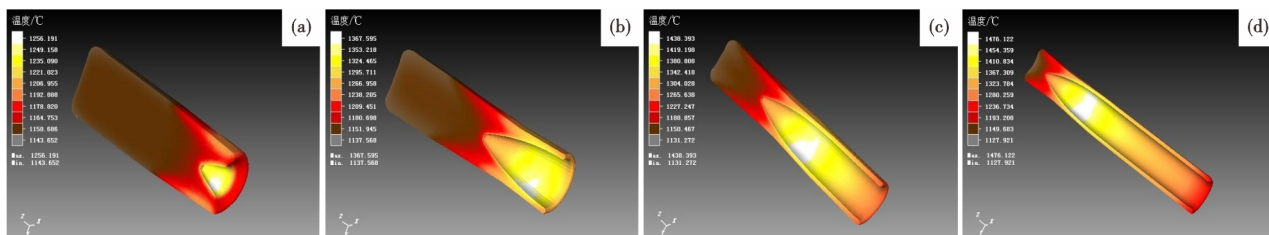


图4 N08811 $\phi 60 \text{ mm}$ 管坯穿孔过程温度分布模拟:(a)10%,(b)40%,(c)70%,(d)90%

Fig. 4 Temperature distribution simulation of N08811 $\phi 60 \text{ mm}$ pipe billet piercing process : (a) 10%, (b) 40%, (c) 70%, (d) 90%

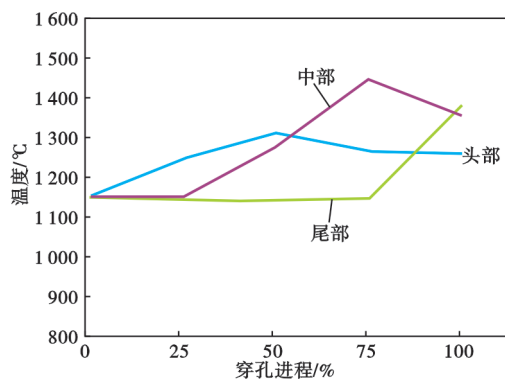


图5 N08811 φ60 mm管坯穿孔过程中心位置温度变化曲线
Fig. 5 Temperature variation curve at the center position during the piercing process of N08811 φ60 mm pipe billet

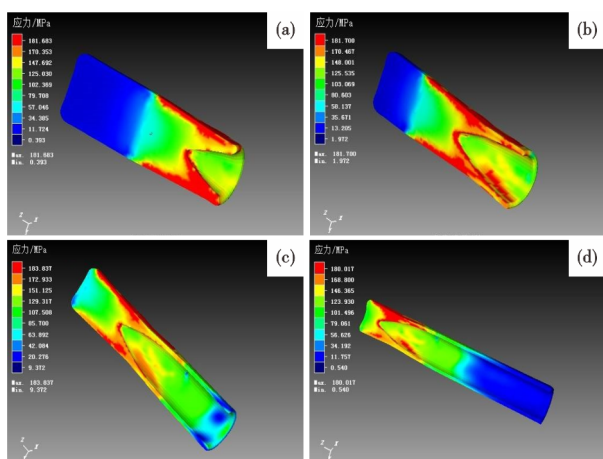


图6 N08811 φ60 mm管坯穿孔过程应力分布模拟:(a) 10%, (b)40%, (c)70%, (d)90%

Fig. 6 Stress distribution simulation of N08811 φ60 mm pipe billet piercing process: (a) 10%, (b) 40%, (c) 70%, (d) 90%

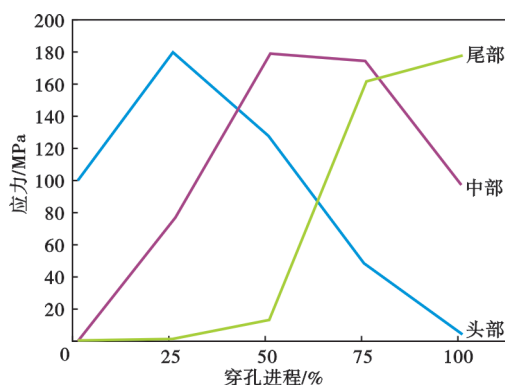


图7 N08811 φ60 mm管坯穿孔过程中心位置应力变化曲线
Fig. 7 Stress variation curve at the center position during the piercing process of N08811 φ60 mm pipe billet

10%、40%、70%和90%的温度分布图,与φ60 mm规格相比,管坯表面与中心部位温度梯度更大,穿孔

过程中管坯温降也更慢。

由图9可以看出,与φ60 mm规格相比,穿孔过程的温升更高,一方面是由于变形量大,另一方面则是由于规格更大,热量更难以散失,导致温升更显著。

穿孔过程应力变化趋势如图10所示,为穿孔进行到10%、40%、70%和90%的应力分布图;与φ60 mm规格相比,由于尺寸变大,应力变化更加剧烈。

图11显示了管坯中心位置头、中、尾部应力变化情况,与φ60 mm相似,随着顶头的深入,最大受力区域由头部转移至中部,最后转移至尾部;由于所用穿孔顶头更大更长,中部所受应力最大的平直段部分明显更长。

由以上模拟结果可以看出,管坯尺寸越大,穿孔过程中温升梯度越大,不同部位应力变化也更加剧烈;顶头变形段长度会显著影响穿孔过程的温度和应力变化;管材的心部和表面所受应力变化最大,导致这两个部位最容易出现缺陷。

虽然从理论上,材料流变应力随变形温度的升高和应变速率的降低而降低^[14-15],高温和低变形速率有利于降低变形力,但依据工艺试验结果(2.3节),温度过高会加剧微裂纹产生倾向;为降低穿孔过程中温升梯度和应力变化,应延长从顶头接触管坯到穿孔完成的整个变形过程,使温度曲线和应力曲线更为平缓^[16]。

2.3 穿孔工艺实验结果与分析

对比不同穿孔温度下穿孔机轧制电流,按从小到大分别为 1 230 °C < 1 180 °C < 1 130 °C < 1 080 °C,与上节分析相符。观察荒管内表面质量,1 080 °C下荒管内表面无裂纹,但有轻微内螺旋现象,应为温度较低及顶头尾部曲线不合理导致^[17];1 130 °C下荒管内外表面良好;1 180 °C下荒管内表面已有少量横向微裂纹出现;1 230 °C下荒管内外表面粗糙,内表面有明显横向微裂纹出现。

由不同温度下穿孔荒管金相照片(图12)可见,1 080、1 130 °C穿孔温度下荒管晶粒尺寸近似,存在少量混晶现象;1 180 °C穿孔温度下荒管晶粒较为均匀;1 220 °C穿孔温度下晶粒已显著长大。

2.4 缺陷分析

将上节试验中1 180 °C穿孔温度下的荒管酸洗、在微裂纹处剖开,腐蚀抛光后进行金相观察(图13),可见微裂纹深度约为0.45 mm,主要为穿晶断裂,断裂处周围晶粒基本未受影响,未见明显的晶

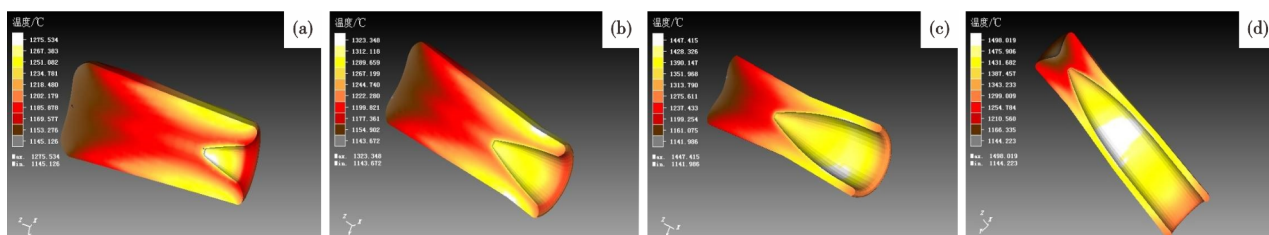


图 8 N08811 $\phi 110$ mm 管坯穿孔过程温度分布模拟: (a)10%, (b)40%, (c)70%, (d)90%

Fig. 8 Temperature distribution simulation of N08811 $\phi 110$ mm pipe billet piercing process : (a) 10%, (b) 40%, (c) 70%, (d) 90%

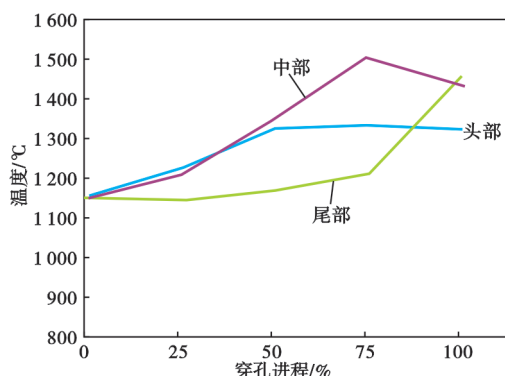


图 9 N08811 $\phi 110$ mm 管坯穿孔过程中心位置温度变化曲线

Fig. 9 Temperature variation curve at the center position during the piercing process of N08811 $\phi 110$ mm pipe billet

界有害相析出;对断裂处进行能谱分析,元素含量正常(图 14);总体呈典型的热应力开裂特征,验证了 2.2 节的模拟结果。

3 模具改进与工艺优化

3.1 改进穿孔顶头设计

为了得到较高的使用寿命,相对于低合金钢穿孔所用的铬镍钼合金顶头,不锈钢和高合金材料穿孔所用的钼基顶头通常设计的锥形头部(圆弧段)较短,均整段和定径段较长^[17];对于 N08811 铁镍基合金管坯,这样的设计经实践证明易造成内表面微裂纹缺陷。

根据上节分析,针对 N08811 铁镍基合金高温变形抗力大,热加工性能不好的特性,使变形过程管坯温度曲线和应力曲线更为平缓,对穿孔顶头前端弧度进行优化,使顶头锥形头部(圆弧段)、均整段、定径段之间的连接更加圆滑和平顺,使穿孔过程中管坯碾轧-穿孔-圆整过程受力更加均匀,可有效的减少穿孔管内表面发生裂纹的机率。

以 $\phi 110$ mm 管坯穿孔所用的 $\phi 94$ mm 顶头为例,顶头直径保持不变,顶头平直段 L2 加长 15 mm,顶头圆弧段弧度由原来的 R200 mm,变为 R177.6 mm,顶头的长度增加 8 mm。减小平直段的角度,由原来的 3° 变为 2° 。改进前和改进后穿孔顶头设计如图 15、图 16 所示,顶头尺寸见表 2。

3.2 选定穿孔加热制度

根据实际测量记录,设定穿孔温度为 $1\ 180\ ^\circ\text{C}$ 时,穿孔过程材料表面升温可能达到 $50\ ^\circ\text{C}$ 以上,即终轧温度超过 $1\ 220\ ^\circ\text{C}$,由 2.3 节试验结果,此时材料晶粒会明显长大,影响材料塑性并导致内裂问题,需要调整出钢节奏,保证终轧温度不高于 $1\ 220\ ^\circ\text{C}$ 。根据 2.2 节试验结果,考虑管坯出炉到开始轧制的温降影响,选定出钢目标温度为 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$,上下限分别为 $1\ 130$ 、 $1\ 180\ ^\circ\text{C}$ 。

具体穿孔加热制度见表 3。加热时间根据坯料尺寸动态调整,具体为 $\phi 85$ mm 以下管坯,加热时间为

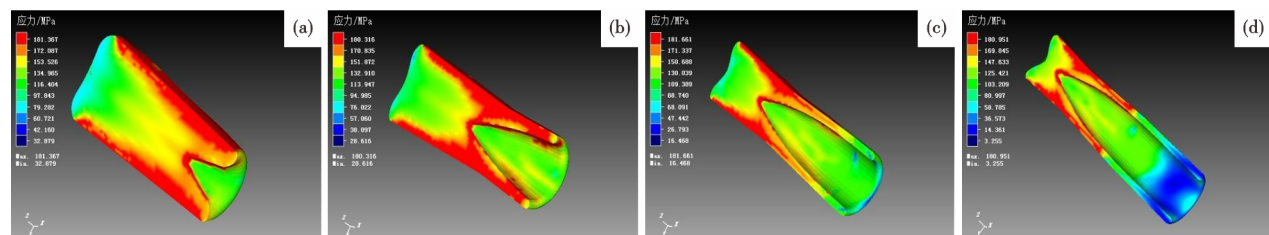


图 10 N08811 $\phi 110$ mm 管坯穿孔过程应力分布,穿孔进程分别为: (a)10%, (b)40%, (c)70%, (d)90%

Fig. 10 Stress distribution simulation of N08811 $\phi 110$ mm pipe billet piercing process, piercing progress : (a) 10%, (b) 40%, (c) 70%, (d) 90%

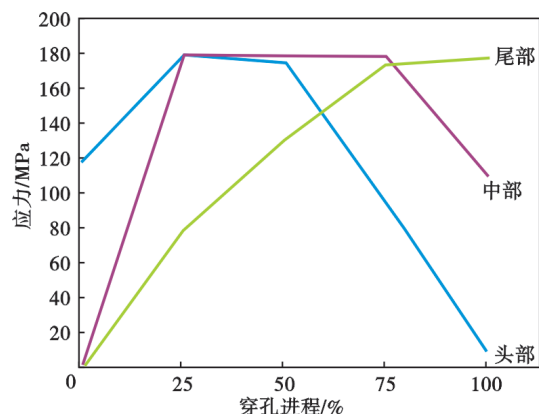


图 11 N08811 φ110 mm 管坯穿孔过程中心位置应力变化曲线

Fig. 11 Stress variation curve at the center position during the piercing process of N08811 φ110 mm pipe billet

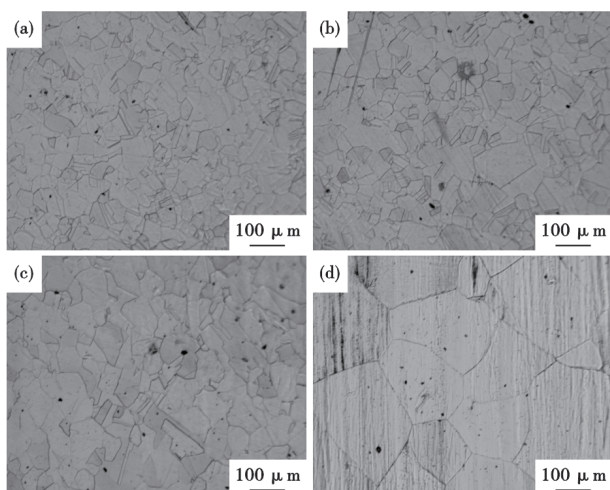


图 12 不同穿孔温度下 N08811 荒管金相照片:(a)1 100 °C, (b)1 140 °C, (c)1 180 °C, (d)1 220 °C

Fig. 12 Metallographic photos of N08811 raw pipe at different piercing temperatures: (a)1 100 °C, (b)1 140 °C, (c)1 180 °C, (d)1 220 °C

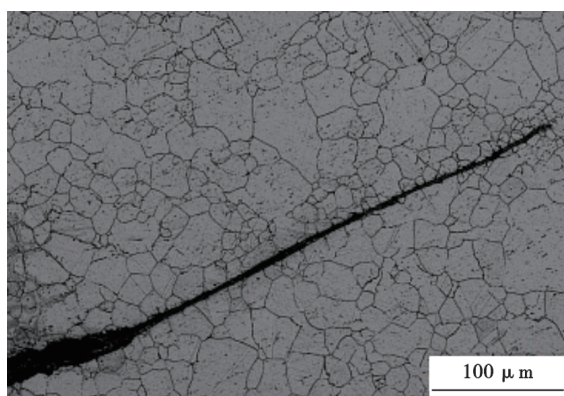


图 13 N08811 荒管微裂纹处金相照片

Fig. 13 Metallographic photo of N08811 raw pipe microcrack

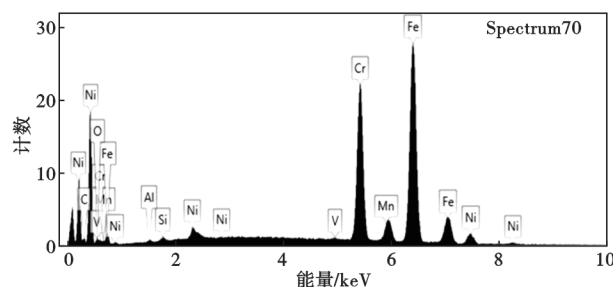


图 14 N08811 荒管微裂纹处能谱分析结果

Fig. 14 Results of energy spectrum analysis of N08811 raw pipe microcracks

120 s/mm; φ100~φ155 mm 管坯, 加热时间为 90 s/mm; φ160~φ219 mm 管坯, 加热时间为 75 s/mm; φ250 mm 以上管坯, 加热时间为 60 s/mm; 同时执行工艺要点: 1) 停机超出 60 min 时, 均热段、加热段同时降温到 660 °C 以下, 避免有害相形成; 2) 随时监控炉温与钢温变化, 炉温与钢温温差不能超出 10 °C; 3) 按轧制节奏均衡加热, 管坯不能快速送至均热段。

3.3 优化穿孔过程参数

为降低穿孔过程中的变形热和应力变化, 增加了轧辊间距, 在导板距不变的情况下, 将咬入的椭圆系数(导板距/轧辊距)从原来的 1.08 降低到 1.03, 减少坯料咬入椭圆度, 减小咬入变形。

轧辊、顶头调整要求: 导板距、轧辊距微调范围为 1~3 mm, 顶头前伸量微调范围为 1~15 mm, 导板距、轧辊距、顶头前量按照调整微调上限进行控制。同时, 控制大型穿孔机(160 型)轧制辊速 ≤ 230 r/min, 电流 1 400~2 100 A; 中型穿孔机(89 型)轧制辊速 ≤ 270 r/min, 电流 600~800 A, 轧辊速度相对普通不锈钢材质较低。

通过以上工艺改进, N08811 铁镍基合金管穿孔质量得到明显改善, 内表面缺陷比例由改进前的平均 10.6% 降低至 1.6%, 与普通不锈钢材质穿孔缺陷率持平。

4 结论

本文分析了 N08811 铁镍基合金材料热加工性能, 仿真模拟热穿孔变形过程, 结合工艺试验, 优化加热制度, 改进工模具设计, 优化穿孔工艺参数, 显著降低了 N08811 铁镍基合金管热穿孔内壁横向微裂纹缺陷率, 通过生产实践, 检验效果较好。

1) 通过金相观察和能谱分析, 确定 UNS N08811 铁镍基合金穿孔管产生内壁横向微裂纹是穿孔过程中热应力作用的结果; 为减少此类缺陷产生, 应

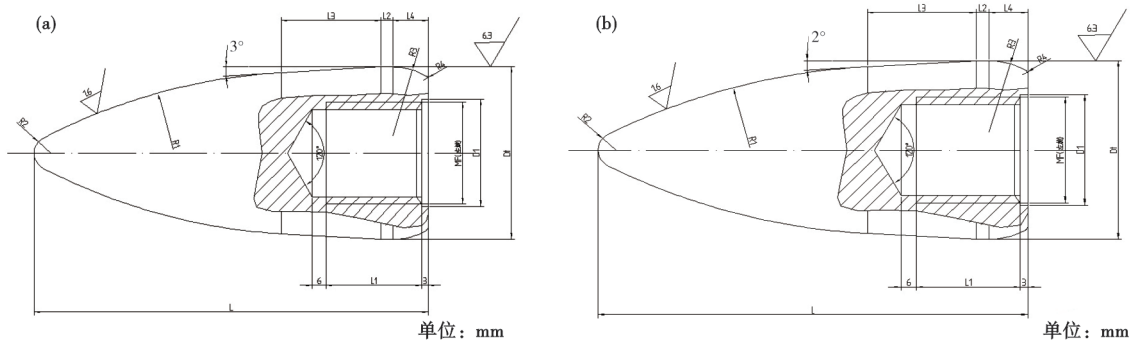


图 15 N08811 合金穿孔顶头设计改进: (a)改进前; (b)改进后

Fig. 15 N08811 alloy perforated head design improvement : (a) before improvement, (b) After improvement

表 2 N08811 合金顶头改进前后变形段尺寸变化

Table 2 N08811 alloy head before and after the improvement of deformation section size change

工艺	顶头直径 D/mm	顶头长度 L/mm	L2/mm	均整段 L3/mm	R2/mm	R1/mm	R3/mm	联结螺纹 MF(左旋)	螺纹 L1/ mm	D1/mm	锥角/(°)
改进前	94	196	20	50.0	10	200.00	15	M50×3	40	52	3
改进后	94	204	35	53.7	6	177.6	15	M50×3	40	52	2



图 16 N08811 合金 $\phi 94$ mm 穿孔顶头设计改进前后实物对比: (右)改进前, (左)改进后

Fig. 16 Comparison of N08811 alloy $\phi 94$ mm perforated head before and after design improvement : (right) before the improvement, (left) improved

表 3 N08811 铁镍基合金管穿孔加热工艺

Table 3 Heating process for piercing of N08811 iron-nickel-based alloy tube

类别	预热温度/ °C	加热温度/ °C	均热温度/ °C	加热时间/min
目标	550	1 090	1 150	60~120
波动范围	± 50	± 30	-20, +30	根据坯料尺寸动态调整

通过改进模具设计和优化过程参数,降低穿孔过程

中温升梯度和应力变化;

2) 结合软件模拟和工艺试验结果, 设定 UNS N08811 铁镍基合金管坯热穿孔出钢温度为 1 130~1 150 °C, 实践效果较好; 穿孔过程中需要调整出钢节奏, 控制终轧钢温不高于 1 220 °C; 660~850 °C 是 N08811 铁镍基合金析出相易大量产生的温度敏感区, 管坯加热和冷却时须快速通过 660~850 °C 温度区间, 避免有害相形成;

3) 采用 Simufact 软件对 N08811 铁镍基合金管坯热穿孔过程的温度、应力变化情况进行模拟分析, 可知管坯尺寸越大, 穿孔过程中温升梯度越大, 不同部位应力变化也更加剧烈; 管材的心部和表面所受应力变化最大, 导致这两个部位最容易出现缺陷。为降低穿孔过程中温升梯度和应力变化, 应延长从顶头接触管坯到穿孔完成的整个变形过程, 使温度曲线和应力曲线更为平缓;

4) 结合软件模拟和工艺试验结果, 对于 N08811 铁镍基合金管坯热穿孔过程, 通过减小顶头圆弧段弧度 (R200 mm→R177.6 mm), 增长顶头长度 (196 mm→204 mm), 减小平直段的角度 (3°→2°), 降低咬入椭圆系数 (1.08→1.03), 降低轧辊速度等措施, 可有效降低管内表面横向微裂纹缺陷率, 保证产品表面质量。

参考文献

[1] Dehmlaei R, Shamanian M, Kermanpur A. Microstructural

changes and mechanical properties of Incoloy 800 after 15 years

- service[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(3): 246-250.
- [2] 王宝森, 朱双春. NiCrFe耐蚀合金焊接性研究[J]. *焊接*, 2017(2): 28-30+70.
- [3] 赵欣, 马天军, 徐文亮, 等. Incoloy 800镍基合金加热管腐蚀性能研究[J]. *上海金属*, 2016, 38(3): 11-14.
- [4] 黎毅, 郭盈春, 杨帆, 等. 大口径UNS N08810无缝管冷扩内壁横裂原因分析及优化[C]. 第十四届中国钢铁年会论文集—6. 轧制与热处理. 重庆, 2023: 227-232.
- [5] 黎毅, 拓雷锋, 郭建邦, 等. 铁镍基合金UNS N08810无缝管材的冷扩变形工艺研究[J]. *钢管*, 2023, 52(4): 10-15.
- [6] Moss T E, Was G S. Dynamic strain aging of nickel-base alloys 800H and 690[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(10): 3428-3432.
- [7] 张北江, 赵光普, 胥国华, 等. GH742合金热变形行为与微观组织演化[J]. *金属学报*, 2005, 41(11): 1207-1214.
- [8] 陆世英. 超级不锈钢和高镍耐蚀合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [9] 曹宇, 邸洪双, 张洁岑, 等. 800H合金动态再结晶行为研究[J]. *金属学报*, 2012, 48(10): 1175-1185.
- [10] 贾维平, 雷丹, 才庆魁, 等. 热变形工艺对Incoloy800H合金微观组织的影响[J]. *辽宁科技大学学报*, 2012, 8, 35(4): 337-34.
- [11] Tan L, Rakotojaona L, Allen T R, et al. Microstructure optimization of austenitic alloy 800H (Fe-21Cr-32Ni)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(6): 2755-2761.
- [12] 苏婕, 王辅忠. 钢管穿孔过程的有限元模拟分析[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2015, 31(1): 24-27.
- [13] 张一帆, 宋德军, 张智超, 等. TiB95合金管材斜轧穿孔工艺的有限元模拟[J]. *塑性工程学报(自然科学版)*, 2022, 29(8), 110-116.
- [14] 曹宇, 邸洪双, 马天军, 等. 800H合金热变形行为研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(2): 213-217.
- [15] 丁祖荣. 流体力学-上册[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [16] Momeni A, Dehghani K, Keshmiri H, et al. Hot deformation behavior and microstructural evolution of a superaustenitic stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(6): 1605-1611.
- [17] 陈金童, 刘广华, 张明亚. 高Cr合金钢穿孔毛管内螺旋产生原因及其改善措施[J]. *钢管*, 2019, 48(5): 45-47.