

二辊斜轧延伸 9Cr-1Mo 钢厚壁管内表裂纹形成倾向性模拟研究

尹元德^{1,2} 李胜祇² 康永林¹ 王鹏展³ 王向东³ 李国涛³

(1 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2 安徽工业大学材料科学与工程学院, 马鞍山 243002;

3 扬州诚德钢管有限公司, 扬州 225200)

摘要 借助于商用有限元软件 MSC. SuperForm, 对 $\Phi 485 \text{ mm} \times 73 \text{ mm}$ 大口径厚壁 9Cr-1Mo 钢管二辊斜轧延伸过程进行了 3D 热力耦合模拟; 采用 Oyane 韧性断裂准则分析了轧件损伤场及钢管内表裂纹的倾向性, 发现钢管内表邻近芯棒接触区存在破裂高危带。研究了轧辊入口锥角对轧件损伤场的影响, 结果表明, 轧辊入口锥角由 3.0° 增至 5.0° 时, 轧件最大损伤特征由 0.5207 降至 0.3544, 发生内表裂纹的倾向性降低。

关键词 无缝钢管 大口径厚壁管 二辊斜轧延伸 内表裂纹 数值模拟

A Study of Simulation on Tendency of Inner Surface Crack of Steel 9Cr-1Mo Heavy Wall Pipe Elongated by Two-High Cross Piercing Process

Yin Yuande^{1,2}, Li Shengzhi², Kang Yonglin¹, Wang Pengzhan³, Wang Xiangdong³ and Li Guotao³

(1 College of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002;

3 Yangzhou Chengde Steel Pipe Co Ltd, Yangzhou 225200)

Abstract The 3D thermo-mechanical simulation on two-high cross piercing elongating process of steel 9Cr-1Mo $\Phi 485 \text{ mm} \times 73 \text{ mm}$ large size heavy wall pipe has been carried out by using commercial element software MSC. SuperForm. The damage field of rolling piece during elongation process and the tendency of inner surface crack of steel pipe are analyzed by using Oyane criterion for ductile fracture. It is found that there is a high dangerous crack band in internal surface of steel pipe adjoining contact zone with plug. The influence of roll entrance cone angle on damage field of rolling piece is studied. Results show that as the roll entrance cone angle increases from 3.0° to 5.0° the maximum damage characteristic value decreases from 0.5207 to 0.3544 and the tendency of inner surface crack reduces.

Material Index Seamless Steel Pipe, Large Size Heavy Wall Pipe, Two-High Cross Piercing Elongation, Inner Crack, Numerical Simulation

在大口径厚壁无缝钢管生产中, 用大型锥形辊斜轧穿孔机进行管坯穿孔, 发挥出延伸能力强、穿孔效率高、毛管壁厚均匀性高等优点, 但由于管坯直径大, 加热时间长, 且管坯温度难以均匀。改进的措施是在实心圆坯中心事先用机械的方法加工出一个小直径通孔(内孔), 一方面可以消除铸坯的中心疏松、缩孔以及中心偏析; 另一方面改善管坯加热时的传热条件, 缩短加热时间, 且利于防止加热引起的开裂。然而, 由于通孔的存在, 名义上的穿孔在本质上属空心坯斜轧延伸。

生产中发现, 采用上述工艺穿制大口径厚壁管时, 毛管内表易出现内裂, 继而产生内折叠缺陷, 如图 1 所示。出现内裂和内折叠固然与管坯材质有关, 但归

根到底开裂是在一定的应力-应变状态下发生的, 确切地说与应力应变状况有关, 因而与轧制工艺特性有着必然联系。主要研究工作有: (1) 用刚塑性有限元法对无缝钢管的斜轧穿孔过程进行了简化的三维模拟, 并对静水压力和等效应变进行了分析, 同时应用 Oyane 韧性断裂准则对 25# 钢斜轧穿孔过程中

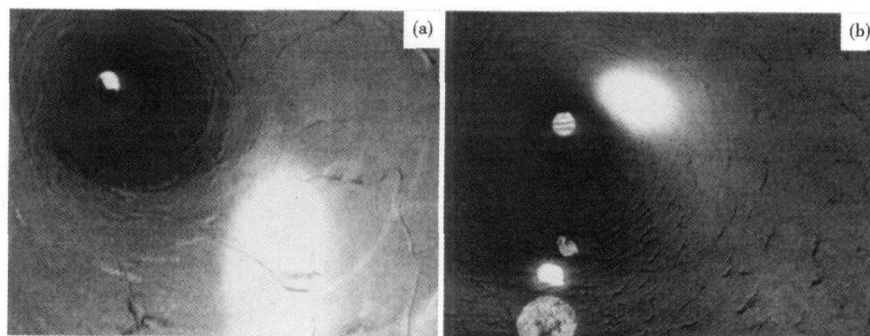


图 1 穿孔毛管内表裂纹(a)和内折叠(b)缺陷

Fig. 1 Inner surface crack (a) and inner overlap (b) of pierced shell

产生的中心孔腔及其位置进行了模拟分析^[1]; (2) 应用 Forge2005 对穿孔过程进行了三维有限元分析, 采用改进的 Lemaitre 断裂准则, 并应用生死单元技术对中心孔腔何时何地发生进行预测^[2]; (3) 通过 DEFORM-3D 软件, 应用 Brozzo 韧性断裂准则, 分析不同送进角条件下管坯中心裂纹萌生的位置和时间^[3]; (4) 对圆坯二辊斜轧过程进行了模拟, 并采用 Oyane 韧性断裂准则计算了损伤场, 据此分析了圆坯中心撕裂现象^[4]; (5) 借助于商用有限元软件 MSC. SuperForm, 对 T91 钢管连轧过程进行了仿真, 分析了内表裂纹产生的原因并提出了减轻内表裂纹的改进措施^[5]。

本文借助于 MSC. SuperForm, 对国内钢厂大型穿孔机穿制厚壁毛管过程进行模拟仿真, 分析空心坯二辊斜轧延伸时金属的流动行为及内表裂纹形成的倾向性。一并考察变形特性及轧制负荷等。

1 模型的建立

1.1 背景参数和单元划分

穿孔机型式为锥形辊穿孔, 工具和调整参数如下: 轧辊高点直径 $D_{HP} = 2140$ mm, 入口锥工作锥角 $\beta_1 = 4^\circ$, 出口锥工作锥角 $\beta_2 = 3.5^\circ$, 轧辊转速 9 r/min, 辗轧角 $\phi = 8^\circ$, 送进角 $\alpha = 7^\circ$, 辊距 $B_{HP} = 441$ mm, 导板距 $A = 480$ mm, 顶头直径 $D_p = 320$ mm, 锥角 $\beta_p = 3.7^\circ$, 管坯开穿温度 1200 °C, 并假定温度均匀。

管坯材质为 9Cr-1Mo, 流变应力由热模拟实验 (Gleeble3500) 获得, 其他热物性参数 (比热容、热传导系数、热膨胀系数、杨氏模量及泊松比等) 由 Jmatpro 计算得到。管坯直径 $D_B = 491$ mm, 通孔 (内孔) 直径 $d_B = 70$ mm, 穿出的毛管尺寸为 $\Phi 485$ mm \times 73 mm。模型中管坯长度取 1200 mm, 共 12800 个六面体单元 (图 2a)。

轧制过程中, 顶头是随动的, 即随轧件旋转, 并且顶头与轧件间存在热交换, 故将顶头定义为可变形体并用 5720 个单元离散之 (图 2b)。

延伸系数 (1.92 ~ 1.95) 虽然不大, 但金属接触

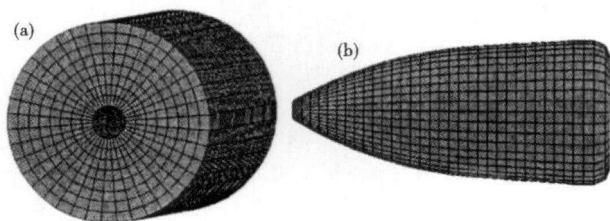


图2 轧件(a)和顶头(b)有限元网格

Fig.2 Finite mesh of rolling piece (a) and piercing point (b)

顶头后变形不均严重, 引起网格畸变, 故模拟过程中须对轧件进行多次网格重生。

1.2 边界和摩擦条件

采用热力耦合模拟, 轧件与外变形工具间的传热边界条件定义参考了文献[6], 外变形工具均视为恒温刚形体。顶头是传热体且内表设为恒温 100 °C。

假定轧件与变形工具界面摩擦遵循剪切摩擦定律, 且视工具表面状况设定不同的摩擦因子。因轧辊入口锥表面有刻槽, 故轧件与轧辊间的摩擦因子取 0.95, 而轧件与顶头以及轧件与导板间的摩擦因子均取 0.5^[7]。

2 模拟结果及分析

2.1 应变分布

稳态轧制时轧件在纵剖面上的等效塑性应变分布如图 3 所示。从图 3 可看出, 伴随着轧件外径的压缩, 其内孔直径增大, 这是因为空心体斜轧时的内孔自然扩径和顶头对轧件“楔劈”共同作用的结果。由于顶头穿孔锥直径的逐渐增大, 金属与顶头接触后必然产生径向位移, 导致轧件扩径。根据圣维南原理, 鉴于金属的整体性, 出现了渐进而较长的“空心体内孔扩径区”。在此区域内, 内变形工具顶头与轧件为非接触状态。金属的这种变形行为将引起内孔表面周向拉应力的产生, 不利于金属塑性, 易造成内表裂纹的发生。

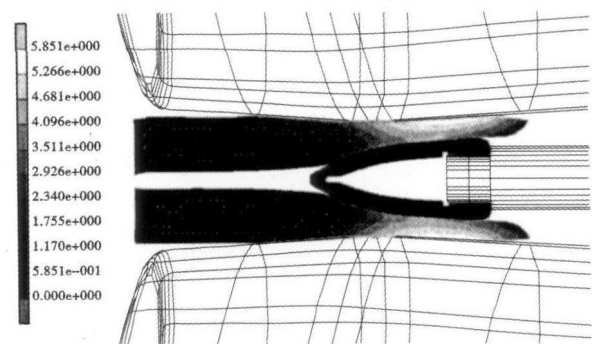


图3 轧件纵剖面上等效应变分布

Fig.3 Distribution of equivalent plastic strain on longitudinal section of rolling piece

在变形金属与顶头接触的前半区即减径区和减壁区内 (包括入口锥减壁区、辗轧段减壁区和出口锥减壁区), 等效塑性应变的分布呈“√”(勾形) 形态, 反映了变形的不均匀性。在穿孔段后段及辗轧段轧件的等效塑性应变呈“倒∩”形分布, 并且由轧件的外表到内表“倒∩”分布区域越来越大, 等效应变值由外表到内表逐渐减小, 具有明显的梯度。这

也说明了 9Cr-1Mo 钢种在轧制时变形难以深透。

2.2 应力分布

二辊斜轧穿孔时产生的内裂、内折叠不仅与变形有关,而且与应力状态有关。从图 4 中可看出,在顶头前轧件的内外表及皮下一定深度区域金属存在纵向和轴向拉应力;在变形金属与顶头接触的减壁区内,轧件和顶头接触的内表层与中间层之间的过渡层区域金属横向、纵向和轴向都为拉应力,即处于三向拉应力状态。毛管管壁内表面金属在顶头的作用下发生激烈变形,表层激烈变形的金属必然要向横向、纵向和轴向流动,并发生扭转。管壁内表层金属趋向周长增大和膨胀,在内表层和中间层之间的过渡层产生附加横向和轴向拉应力。经过一定的轧制过程,或向表层金属周长增大到一定程度发生金属堆积和皱曲时,金属发生破裂,导致内裂。在顶头与轧件接触的穿孔段,在轧件的内表层和中间层之间的过渡层静水压力 $\sigma_m > 0$,且局部区域的静水压力正值较大;在顶头前端,靠近内表的皮下一定深度区域金属静水压力 $\sigma_m > 0$,这不利于金属的塑性变形,即容易诱发裂纹。

2.3 温度分析

由于轧件与周围环境存在辐射、对流等热交换,与变形工具(轧辊、导板和顶头)间的热传导,接触面上的摩擦生热以及变形热效应,因此穿孔过程中金属的温度变化是复杂的。轧制过程达稳态时轧件纵剖面上温度分布如图 5(a)所示,由图 5(a)可见,最高温度出现在内表面的纵向出口处。显然,通过横向的各复合道次轧制,由变形程度的累积其温度由纵向入口处向出口处逐渐增加,且内表面散热条件较差,所以比外表面温度要高。当进入均整段后温度有所下降,轧件最大温升为 14 ℃。

2.4 钢管内表裂纹的倾向性

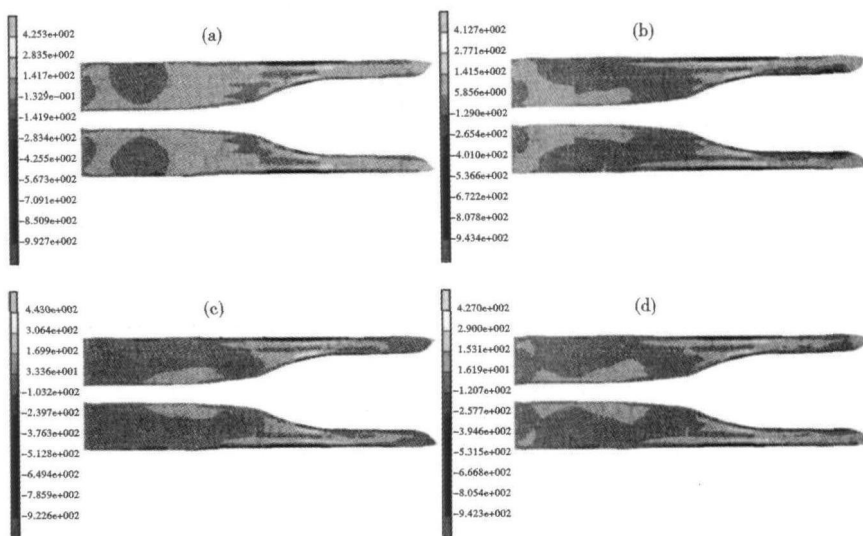


图 4 轧件在纵剖面上的应力分布:(a)横向应力;(b)纵向应力;(c)轴向应力;(d)平均正应力

Fig.4 Distribution of stress on longitudinal section of rolling piece; (a) lateral stress; (b) longitudinal stress; (c) axial stress; (d) mean normal stress

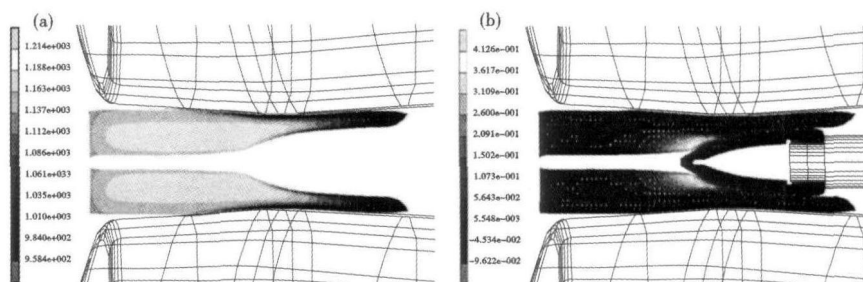


图 5 轧件纵剖面上温度(a)和韧性断裂特征值(b)的分布

Fig.5 Distribution of temperature (a) and characteristic value of ductile fracture (b) on longitudinal section of rolling piece

在进行穿孔过程数值模拟时,采用 Oyane 准则,计算了金属韧性断裂损伤场。图 5(b)为穿孔过程稳态时损伤特征值在轧件纵剖面上的分布。从图 5(b)中可看出,最大损伤特征值出现在与顶头接触前的内表面并深入到皮下 15 ~ 25 mm 处,这和生产现场穿孔出的毛管出现的内裂位置较吻合。

图 6(a)为轧件最大损伤特征值随轧辊入口锥角的变化曲线。当轧辊入口锥角为 3°时,最大损伤特征值为 0.520 7,随着入口锥角增大到 3.5°、4°、4.5°和 5°时,轧件的最大损伤特征值分别为 0.430 9、0.412 6、0.404 6和 0.354 4,轧件的最大损伤特征值随着轧辊入口锥角的增大而逐渐减小,表明轧件发生内裂的倾向性随轧辊入口锥角的增大而减小。

2.5 力参数分析

轧制力对于确定轧制负荷,进行设备强度和刚

度设计、校核轧辊强度、电机能力(发热和过载)、确定机架弹跳以便进行工艺调整参数预设(保证轧制精度)等都具有重要的意义。轧制力、顶头力和导板力随穿孔进程的变化如图6(b)所示。图6(b)曲线不仅表明了力参数的大小,同时也表明了轧件与轧辊、顶头和导板接触先后顺序。轧制力参数是由管坯材质(9Cr-1Mo)、热力学参数、管坯尺寸、调整参数及工具形状尺寸等因素决定的。从图6(b)中可看出,轧制力随穿孔

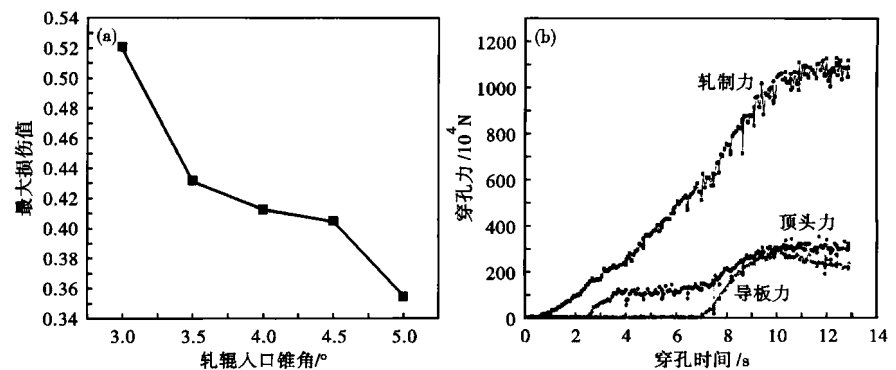


图6 (a) 轧辊入口锥角对轧件最大损伤特征值的影响;(b) 穿孔力参数随穿孔进程的变化曲线

Fig.6 (a) Influence of roll entrance cone angle on max damage characteristic value of rolling piece; (b) Variable curves of piecing force parameters during piercing process

过程的进行不断增大,到穿孔过程稳态时轧制力不再增大,趋于稳定,最大轧制力为 $1122 \times 10^4 \text{ N}$ 。顶头力在轧辊入口侧穿孔段随穿孔进程不断增大,在轧制段到和导板接触前顶头力也增加,但幅度较小;和导板接触后,由于有导板的作用,顶头力又不断增大,到穿孔过程稳态时其值趋于稳定,约为轧制力的1/3。导板力随穿孔进程不断增大,到穿孔稳态时其值略有下降,其值约为轧制力的1/4。

3 减轻轧件内裂的措施

(1) 对含9%Cr的Fe-Cr合金,奥氏体的区域较宽,从820℃到1200℃,但铁素体和奥氏体两相区只有一个很窄的温度范围^[8]。因此,为了防止轧件由于激烈变形温升过高而导致 δ -铁素体的析出,应严格控制管坯最高加热温度及穿孔温度。

(2) 可适当增大轧辊的入口工作锥角,以减轻轧件的激烈变形程度,改善轧件内表及皮下一定深度区域金属的受力状况,减少内裂的发生。

4 结论

(1) 在变形金属与顶头接触的前半区即减径区和减壁区内,轧件变形不均匀,等效塑性应变分布呈“√”(勾形)形态;在穿孔段后段及轧制段,轧件的等效应变分布呈“倒∩”形,且由轧件的外表到内表“倒∩”区域越来越大,等效应变值逐渐较小,具有明显的梯度。

(2) 在顶头前轧件的内表及皮下一定深度区域金属存在纵向和轴向拉应力;在变形金属与顶头接触的减壁区内,轧件和顶头接触的内表层与中间层之间的过渡层区域金属处于横向、纵向和轴向三向拉应力状态;两区域金属静水压力 $\sigma_m > 0$,且局部区

域的静水压力正值较大。

(3) 空心坯穿孔过程稳态时轧件最大损伤值发生在与顶头接触前的内表面并深入到皮下15~25mm处,和现场穿孔毛管出现的内裂位置较吻合。

(4) 轧件的最大损伤特征值随着轧辊入口锥角的增大而逐渐减小,轧件发生内裂的倾向性随轧辊入口锥角的增大而减小。

江苏省重大创新项目资助(BA2008084)

参考文献

- Mori K I, Yoshimura H, Osakada K. Simplified Three-dimensional Simulation of Rotary Piercing of Seamless Pipe by Rigid-plastic Finite-element Method. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998(80-81):700
- Chastel Y V, Diop A, Fanini S, et al. Finite Element Modeling of Tube Piercing and Creation of a Crack. *International Journal of Materials Form*, 2008, Suppl(1):355
- Lee H W, Lee G A, Kim E, et al. Prediction of Plug Tip Position in Rotary Tube Piercing Mill Using Simulation and Experiment. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22(31-32):5787
- Li S Z, Xu J, Yin Y D, et al. FE Simulation of Center Crack Occurrence in Tube Rounds during Two-Roll Rotary Rolling Process. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2007, 20(3):225
- Li Sheng-zhi, Xu Jie, Yin Yuan-de, et al. Mechanism of Internal Surface Crack Formation of Seamless Modified 9Cr-1Mo Tube Rolled by Mandrel Mill and Its Application. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14(5):273
- 李胜祗,段修刚,尹元德,等.导盘位置对斜轧穿孔力能参数和扩径量的影响. *安徽工业大学学报*, 2009, 26(1):27
- 李胜祗,李洪中,黄子阳,等.锥形辊穿孔过程顶头前伸量对力参数的影响. *安徽工业大学学报*, 2010, 27(2):131
- Ennis P J, Czyska-Filemonowicz A. Recent Advances in Creep-resistant Steels for Power Plant Applications. *Sādhanā*, 2003(28):709

尹元德(1970-),男,博士研究生,副教授,1991年北京航空航天大学毕业,管板成型工艺和数值模拟。

收稿日期:2012-01-13