

# 厚规格钢板差厚轧制数值模拟与工艺研究

武晓刚, 何纯玉, 矫志杰, 王 君  
(东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 基于 ABAQUS 有限元软件, 采用显式动力学算法对厚规格钢板三维常规轧制与差厚轧制热力耦合过程进行模拟仿真, 获得差厚轧制变形区金属流动与应力、应变分布规律, 研究常规轧制与差厚轧制在轧制过程中轧制力与轧制力矩的变化规律, 分析差厚轧制对于轧制过程钢板咬入条件的改善. 差厚轧制试验结果表明, 制定合理的差厚轧制工艺, 可以克服厚板坯轧制时的咬入限制, 减小头部冲击造成的力矩峰值的影响, 增加厚规格钢板心部变形的渗透, 在一定程度上可以改善变形均匀性和组织均匀性.

**关 键 词:** 差厚轧制; 轧制工艺; 数值模拟; 轧制负荷; 变形均匀性  
**中图分类号:** TG 335      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)02-0197-05

## Numerical Simulation and Processing Investigation on Differential Thickness Rolling of Thick Steel Plate

WU Xiao-gang, HE Chun-yu, JIAO Zhi-jie, WANG Jun  
(School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HE Chun-yu, E-mail: hecy@ral.neu.edu.cn)

**Abstract:** Based on ABAQUS finite element software, dynamic coupling process about three-dimensional conventional rolling and differential thickness rolling for thick steel plates were simulated by an explicit dynamic algorithm. The flow feature and the stress/strain distribution in the distorted region were obtained, the variation laws of rolling force and rolling moment during the process of conventional rolling and differential thickness rolling were studied and the improvement of the biting condition of steel plate during rolling process was analyzed. The results of the differential thickness rolling process show that the reasonable process for the differential rolling can overcome the bite limit of slab rolling, reduce the influence of peak torque caused by head impact and increase the penetration of the core deformation thickness of thick steel plate. Moreover, it can also improve the deformation uniformity and microstructure uniformity at a certain degree.

**Key words:** differential thickness rolling; rolling process; numerical simulation; rolling load; deformation uniformity

随着我国国民经济的高速发展以及超高层、大跨度钢结构建设项目的不断增加, 电力、建筑、军工、桥梁、海洋平台、模具制造与重型机械等行业的蓬勃发展, 国内机械和建筑用厚板市场对大单重、高强度、厚规格钢板的需求量越来越大, 对于中厚板的需求量也逐年增加, 中厚板也开始集中向高强度、高性能以及特厚化的方向发展<sup>[1]</sup>. 对厚规格钢板的性能与质量要求也越来越高. 如何克

服厚规格钢板内部组织疏松、晶粒粗大和偏析等问题, 保证产品的内在质量, 是一直困扰各中厚板生产企业的共性问题. 厚规格钢板轧制过程中, 受轧辊咬入角、咬入瞬间电流冲击和主电机扭矩等压下条件限制, 道次压下量不能太大, 使厚度方向上的变形渗透性差、变形不均匀, 难以压合中心缺陷, 钢板的质量难以保证<sup>[2-3]</sup>. 如何使用连铸坯在较小压缩比条件下生产高质量的厚规格钢板是轧

制工艺研究需要着力解决的一个重要问题. 目前通常解决途径有:增加道次压下率,其局限性在于咬入条件开口度受限,轧机负荷大,变形均匀性差<sup>[4-5]</sup>;异步轧制,其突出问题是钢板会发生翘曲,难以推广;差温轧制,其局限性是需要增加水冷设备,在轧制较厚坯料时,短时间内钢板内部难以产生较大温度梯度<sup>[6]</sup>.

通过对影响轧件变形及轧机轧制力、扭矩的要素分析,本文采用优化轧件变形和轧制扭矩的差厚轧制方法来改善厚规格钢板轧制条件,增加钢板单道次压下量,提高变形渗透性,以此消除心部缺陷,提高心部质量,进而提高产品性能,同时减小或消除因变形渗透性差导致钢板侧边产生双鼓形甚至边部折叠的缺陷,提高成材率,并在厚规格钢板品种上实现工程应用,突破轧机最大扭矩的限制、充分释放粗轧机轧制能力,提高轧机轧制

能力与钢板性能. 差厚轧制工艺是在厚规格钢板轧制过程中在前一道次咬入后逐渐加大压下量,轧制成楔形,下一道次薄端先咬入,再逐渐加大压下量,提高每道次的绝对压下量,最终将轧件轧平.

### 1 差厚轧制数值模拟

为了研究差厚轧制方法对于钢板变形的影响,采用有限元软件 ABAQUS 分别模拟常规轧制和差厚轧制在轧制咬钢阶段、轧制阶段和轧制结束阶段的金属流动情况,以及轧制力、力矩等轧制负荷的变化情况. 常规轧制和差厚轧制前 4 道次的轧制规程如表 1 所示. 在轧制过程中粗轧前两个道次为宽展道次,后两个道次为延伸道次,差厚轧制投入道次为第 3、第 4 道次.

表 1 轧制工艺规程  
Table 1 Schedules of rolling process

| 道次 | 常规轧制/mm | 差厚轧制/mm         | 说明                          |
|----|---------|-----------------|-----------------------------|
| 1  | 220→209 | 220→209         | 展宽道次                        |
| 2  | 209→196 | 209→196         | 展宽道次                        |
| 3  | 196→175 | 196→头 175,尾 165 | 投入 10 mm 楔形轧制,尾部厚度变为 165 mm |
| 4  | 175→155 | 头 165,尾 175→145 | 将上道次的楔形坯轧制为厚度均一的 145mm      |

在 ABAQUS 中建立轧件和轧辊三维模型,模拟表 1 中的第 3、第 4 道次,考虑到本文研究的对象是热轧变形过程,轧辊弹性变形较小,为加快计算速度,将轧辊设置为刚性辊,不考虑弹性变形. 上、下轧辊的辊径选用外径 1 000 mm,长度 3 500 mm,转速 20 r/min. 轧件参数选取长 2 680 mm,宽 2 000 mm,厚 196 mm. 在 ABAQUS 中建立轧辊速度、轧件接触条件,设定摩擦系数及温度边界条件,并按照实际生产条件建立轧辊旋转速度、轧件初始速度、温度等边界条件.

轧件材料采用 Q235 普通碳素结构钢,密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.3. 通过采用 Johnson - Cook 本构方程来描述材料的应力状态、加工硬化效应和温度软化效应<sup>[7-9]</sup>,其形式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) [1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] (1 - (T^*)^m).$$

(1)

式中: $\sigma$  为材料塑性应力; $\varepsilon_p$  为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$  为相对应变率,文中 $\dot{\varepsilon}_0$  取准静态压缩试验应变率,为 10<sup>-3</sup>/s; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ , $T_r$  为环境温度, $T_m$  为材料熔点.

传统的 Johnson - Cook 模型通过拟合曲线得出参数<sup>[10]</sup>. 在 ABAQUS 软件材料属性模块中选

择 Johnson - Cook 本构方程,指定材料塑性模型相应参数,材料的塑性等相关参数确定之后将轧件的材料参数指定到相应截面属性,最后将截面属性赋予轧件部件. 建立仿真过程的三维有限元模型并对轧件划分合适的单元;计算结束后,在后处理模块中提取轧件的应力、应变及接触压力、力矩等数据进行分析.

#### 1.1 轧制力与扭矩分析

通过对表 1 中第 3、第 4 道次的常规轧制与差厚轧制模拟计算,得到如图 1 所示的轧制力与轧制力矩变化曲线. 由图可知,轧件经过 2 道次的轧制,常规轧制与差厚轧制过程中的轧制力与力矩曲线变化趋势是不同的. 对于常规轧制,在咬钢瞬间,由于轧件的初始速度对轧辊具有一定的冲击作用,导致轧制力和轧制力矩在咬钢时产生局部最大值,当轧件完全咬入后,由于道次压下量一定,之后的轧制力和轧制力矩波动不大,基本保持稳定状态. 差厚轧制过程的头部压下量与常规轧制相同,轧件头部咬入时与常规轧制类似,产生了头部的轧制力和轧制力矩冲击;随着差厚轧制过程的进行,相比于头部,压下量逐渐增大,轧制力和轧制力矩也随着压下量的增大缓慢增加,在这

一过程中轧制力和轧制力矩变化平稳,没有产生局部突然增大的情况,这对于在减少主电机扭矩条件下,增加道次压下量具有实际意义.

进行比较的两个轧制道次中,差厚轧制比常

规轧制在尾部增加了压下量,通过仿真获得了轧制力与轧制力矩的变化结果. 通过改变仿真过程的参数,包括轧制温度、入口厚度、轧件宽度、头尾差厚量等参数,可以计算得到参数的变化对轧制

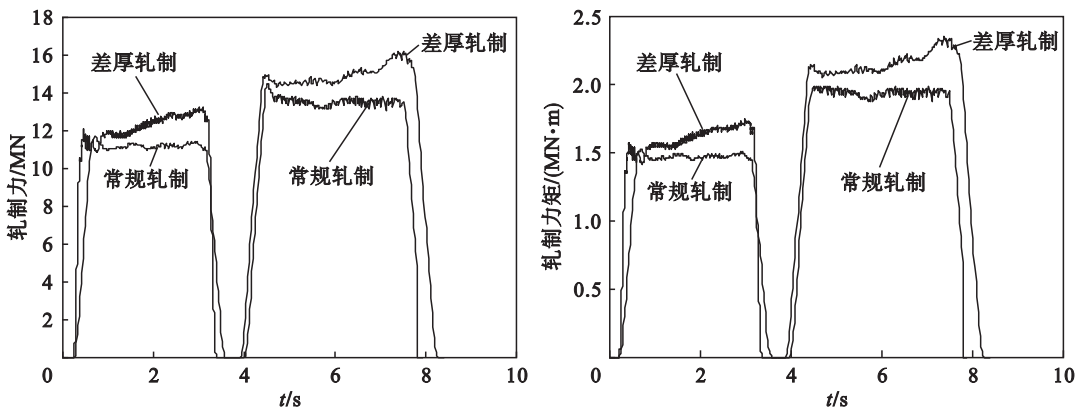


图 1 不同轧制方法下钢板轧制力和轧制力矩变化曲线  
Fig. 1 Variation of the rolling force and rolling torque with the time by different rolling methods

力、轧制力矩的影响值,仿真得到的轧制力、轧制力矩等参数值可为差厚轧制工艺的制定提供参考数据和优化参数.

### 1.2 厚度方向变形渗透分析

为了分析钢坯在轧制过程中厚度方向上的变

形规律与应变分布,比较表面与内部的变形差异,针对划分网格的钢坯,沿着厚度方向提取不同节点处的应变作为比较基准.

常规轧制与差厚轧制经过两道次轧制后其厚度方向上应变分布规律如图 2 所示.

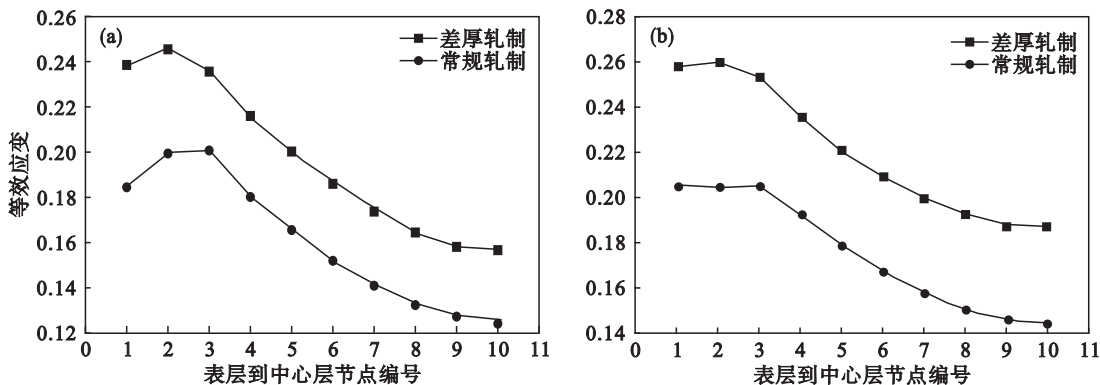


图 2 钢板厚度方向上的应变分布  
Fig. 2 Strain distribution along the thickness direction of the plate  
(a)—第 3 道次; (b)—第 4 道次.

从图 2 中可以看出厚钢板在轧制过程中,靠近表面节点的等效应变大于内部节点,从表面至中心等效应变分布的大体规律是由大到小变化,特别是在小压下量时,变形只在表面发生,很难渗透到中心. 经过两道次常规轧制与差厚轧制的钢坯,其厚度方向上的应变变化规律大致相同,但差厚轧制相比于常规轧制由于增加了道次压下量,表面和内部的等效应变同时变大.

由于差厚轧制可以减小轧件咬入时主电机的冲击,降低扭矩,所以采用合适的差厚轧制工艺能够减少轧制总道次数,即能够增加单道次的平均

压下量. 与常规轧制比较,差厚轧制整体变形由表层向心部渗透,改善了厚规格钢板厚度方向变形不均匀现象,增加钢板表面变形向心部的渗透,压合钢板的心部缺陷,从而得到晶粒细小的组织,改善厚规格钢板产品的性能.

## 2 差厚轧制生产试验

为了比较常规轧制和差厚轧制厚度方向上的变形差异,验证差厚轧制对于钢板厚度方向变形渗透性,以及对于轧机咬入条件与轧制负荷条件



的改善,基于某中厚板粗轧机进行一组钢板的常规轧制与差厚轧制的生产试验. 试验钢种为 Q235,坯料厚度为 220 mm,成品厚度为 70 mm,常规轧制为 10 道次. 作为对比,在展宽后的 4 个延伸道次采用差厚轧制,差厚量为 10 mm,采用差

厚轧制在未明显增大主电机扭矩的情况下缩减了 1 道次,总轧制道次为 9 道次. 差厚轧制过程的实际数据如图 3 所示. 从图中可以看出,差厚轧制过程中轧件头部在咬入过程中冲击较小,负荷随着差厚轧制的进行缓慢增加.

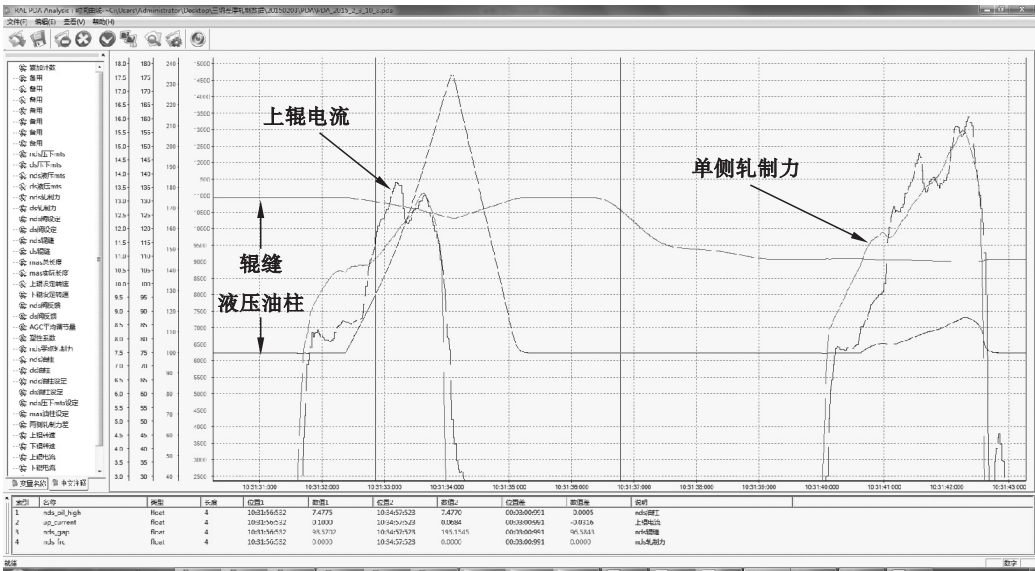


图 3 差厚轧制实际数据  
Fig. 3 Actual data of differential thickness rolling

将经过常规轧制与差厚轧制的钢板冷却到室温,取 2 块成品钢板进行对比,对钢板中心处取样,经 4% 硝酸酒精腐蚀,并进行高倍金相组织观

测,以对比两块钢板的心部的晶粒度. 图 4 是相同的钢板经过两种不同轧制工艺得到的中心处的金相组织.

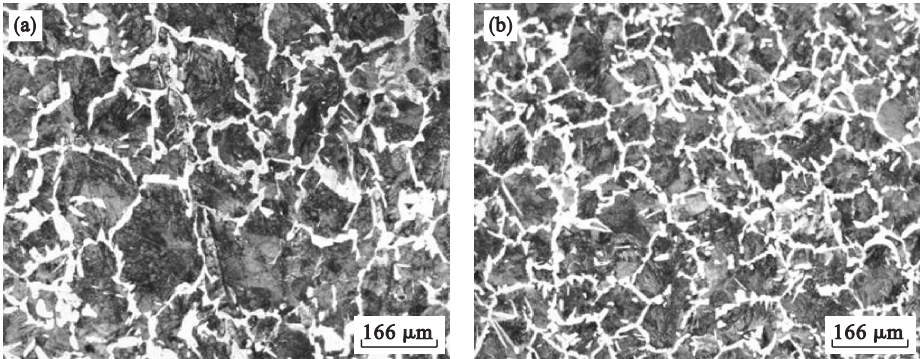


图 4 常规轧制和差厚轧制内部金相组织比较  
Fig. 4 Comparison of internal microstructure between conventional rolling and differential thickness rolling  
(a) — 常规轧制心部; (b) — 差厚轧制心部.

两种工艺得到的轧后的金相组织具有相似性,心部组织为珠光体加半网状的铁素体. 由于差厚轧制方法减少了轧制道次,增加了道次绝对压下量,使得变形向心部渗透. 差厚轧制有效地提高了铁素体形核的驱动力,增加铁素体的形核率,使晶粒均匀性比常规轧制有所改善,最终得到的心部晶粒相对较小. 金相组织观测表明,差厚轧制对改善厚规格钢板金相组织、提高厚度方向上变形渗透性与均匀性有积极意义.

### 3 结 论

1) 建立了差厚轧制的有限元三维仿真模型,通过对数值仿真结果的分析可知,差厚轧制方法可以减少轧件咬钢过程的负荷冲击;轧制过程中,随着载荷逐步压下,轧制力和轧制扭矩呈现缓慢上升趋势. 在钢坯粗轧阶段,轧制力矩是负荷受限的主要因素. 差厚轧制头部压下量小,尾部压下量

大,避免了头部轧制力矩峰值超限,因此可以适当提高单道次压下量,这对于改善咬入条件、提高轧机利用效率具有实际意义.

2) 通过现场试验,常规轧制与差厚轧制的对比结果表明,制定合理的差厚轧制工艺,可以克服厚板坯轧制时的咬入限制,减轻头部冲击造成的力矩峰值的影响,并增加厚规格钢板心部变形的渗透,在一定程度上可以提高钢板厚度方向上的变形渗透性与均匀性.

参考文献：

[ 1 ] Osamu T, Takeshi K, Keniti A. Development of high performance steel plates in terms of reliability and economy of steel structure[ J ]. *Kawasaki Steel Giho*,2000,32( 3 ): 198 – 204.

[ 2 ] Shi G,Hu F X,Shi Y J. Recent research advances of high strength steel structures and codification of design specification in China[ J ]. *International Journal of Steel Structures*,2014,14( 4 ):873 – 887.

[ 3 ] Moon C H, Lee Y. Approximate model for predicting roll force and torque in plate rolling with peening effect considered[ J ]. *ISIJ International*, 2008, 48 ( 10 ): 1409 – 1418.

[ 4 ] Zhu F W,Hu X L,Zhao Z,et al. Analysis of process control model of plate MAS rolling[ J ]. *Journal of Iron and Steel*

*Research,International*,2010,17( 4 ):31 – 33.

[ 5 ] 胡贤磊,曾庆亮,丁敬国. 厚板尾部大压下法的应用[ J ]. *钢铁*,2014,49( 12 ):54 – 58.  
( Hu Xian-lei, Zeng Qing-liang, Ding Jing-guo. End heavy-reduction method for plate rolling process [ J ]. *Iron and Steel*,2014,49( 12 ):54 – 58. )

[ 6 ] Jang Y C,Lee Y S, An G B, et al. Temperature dependent fracture model and its application to ultra-heavy thick steel plate used for ship building [ J ]. *International Journal of Modern Physics:B*,2008,22( 31/32 ):5483 – 5488.

[ 7 ] 李永池,谭福利,郭扬,等. 金属损伤演化方程和层裂准则的确定[ J ]. *宁波大学学报( 理工版)*,2003,16( 4 ):442 – 446.  
( Li Yong-chi, Tan Fu-li, Guo Yang, et al. Determination of the damage evolution equation and spallation criterion of metals[ J ]. *Journal of Ningbo University( Natural Science & Engineering Edition)*,2003,16( 4 ):442 – 446. )

[ 8 ] Martineau R L, Anderson C A, Smith F W. Expansion of cylindrical shells subjected to internal explosive detonations [ J ]. *Experimental Mechanics*,2000,40( 2 ):219 – 225.

[ 9 ] Kane A,Børvik T, Hopperstad O S, et al. Finite element analysis of plugging failure in steel plates struck by blunt projectiles[ J ]. *Journal of Applied Mechanics*,2009,76( 5 ): 911 – 914.

[ 10 ] 林莉,支旭东,范峰,等. Q235B 钢 Johnson – Cook 模型参数的确定[ J ]. *振动与冲击*,2014,33( 9 ):153 – 158.  
( Lin Li, Zhi Xu-dong, Fan Feng, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel [ J ]. *Journal of Vibration and Shock*,2014,33( 9 ):153 – 158. )