

文章编号 1004-924X(2017)04-0969-09

## 7075 铝合金厚板多道次蛇形热轧的分析与预测

秦国华\*, 杨 扬, 李 强, 林 锋

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:**研究了蛇形轧制工艺参数对铝合金厚板变形与残余应力分布的影响。基于蛇形轧制的咬入条件与本构模型以及边界条件等关键技术,构建了铝合金厚板的单道次蛇形轧制有限元模型,并与相关文献的仿真结果进行了比较,结果显示其相对误差不超过 10%。考虑最小、最大压下量均相等的条件下压下量分配对蛇形轧制的影响,建立了多道次蛇形轧制的有限元模型并进行了仿真实验。结果表明:铝厚板应变不是按板厚中心面呈对称分布,慢速辊一侧的应变明显小于快速辊一侧,而且压下量对称递增分配产生的应变最大,单向递增分配产生的应变最小,对称递增比单向递增分配压下量产生的应变平均要高出 20%左右。此外,压下量对称递减分配引起的剪切应变最大,单向递增分配引起的剪切应变最小,对称递减分配比单向递增分配压下量产生的剪切应变要高出 2 倍。

**关键词:**多道次蛇形轧制;铝合金厚板;压下量;等效应变;剪切应变

**中图分类号:**V252.22;TG335.11 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172504.0969

## Analysis and prediction of multi-pass snake hot rolling for 7075 aluminum alloy thick plate

QIN Guo-hua\*, YANG Yang, LI Qiang, LIN Feng

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

\* Corresponding author, E-mail: qghwzx@126.com

**Abstract:** The effects of process parameters in a snake hot rolling on the deformation and residual stress distribution of an aluminum alloy thick plate were explored. On the basis of the bite conditions of snake rolling, constitutive model, boundary conditions and other critical technologies, a finite element model of single-pass snake rolling for the aluminum alloy thick plate was established. The simulation results were compared with that of corresponding literatures, and it shows that the relative error is no more than 10%. In condition of the influence of pass reduction distribution on snake rolling at both minimum and maximum pass reductions being equal, the finite element model of multi-pass snake hot rolling was established and a simulation experiment was performed. The result shows that the equivalent strain of aluminum thick plate is not symmetrically distributed in accordance with the central surface; the equivalent strain near the slow roller is obviously smaller than that near the high-speed roller. Moreover, the maximum equivalent strain is generated from the symmetrical increasing distribution of pass reduction and the minimum equivalent strain is generated from one-way increasing distribution. The equivalent strain generated from symmetrical increasing distribution of pass reduc-

**收稿日期:**2016-09-21;**修订日期:**2016-12-27.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51465045, No. 51165039);江西省主要学科学术和技术带头人资助计划;航空科学基金资助项目(No. 2016ZE56011);江西省自然科学基金资助项目(No. 20161BAB206114);深圳市科技创新委员会基础研究项目(No. JCYJ2014050917410668)

tion is averagely 20% larger than that generated from one-way increasing distribution. Furthermore, the shear strain generated from symmetrical decreasing distribution is twice that from one-way decreasing distribution, in which the former is the maximum and the latter is the minimum.

**Key words:** multi-pass snake rolling; aluminum alloy thick plate; pass reduction; equivalent strain; shear strain

## 1 引言

铝合金具有比模量、比强度高,耐腐蚀性能好,成型和加工性能好且成本低廉等优点,即便面临来自钛合金、复合材料等新型材料强有力的竞争,其仍然被认为是航空航天领域中具有重要价值的材料而被广泛使用<sup>[1]</sup>。热轧是生产铝合金厚板的关键工艺之一,不仅能够使得铝合金板材发生较大的塑性变形,还可以破碎铸造状态下的粗大晶粒,减少或消除铸造缺陷。制备铝合金板材时,板材越厚,所要求的铸锭也越厚。然而,受轧机开口度的限制,同步轧制(即对称轧制)难以实现大厚度铸锭的轧制。因为轧制大厚度铸锭后,板材的中心部分变形较小而靠近表层部分变形较大,从而造成铝厚板沿厚度方向的变形不均匀,并且中心部分也会因轧辊挤压产生的变形没有充分渗透而导致晶粒粗大。

日本独辟蹊径地进行了异步热轧的研究,完成了异步热轧的工业试验,使异步热轧在工艺上取得了一定的进展<sup>[2]</sup>。异步热轧是指两个工作辊表面线速度不相等的一种热轧方法,属于非对称轧制。Chen S 等人<sup>[3]</sup>通过分析异步热轧和对称热轧对高强度低合金板材冲击韧度的影响,认为异步热轧能够引起轧件中心层发生更大的织构变化,而且能够细化晶粒。Zuo Y B 等人<sup>[4]</sup>利用异径异步轧制工艺制备了 5182 铝厚板,发现异步轧制对金属塑性流动具有重要影响,尽管在一定程度上能够细化微观组织,但却出现了明显的轧板弯曲现象。为此,荷兰于 2001 年提出了蛇形热轧这一具有抑制轧板弯曲的非对称轧制技术<sup>[5]</sup>。蛇形轧制咬入更加容易,还可以在轧件内引起较大的剪切应力,细化材料组织,使材料的冲击韧性和断裂韧性有所提高。郑细昭等人<sup>[6]</sup>运用有限元法

研究了蛇形轧制中上下轧辊位错量、异速比、摩擦系数和压下量对轧件心部剪切变形的影响,结果表明轧件心部的剪切变形随着轧辊位错量、异速比、摩擦系数和压下量的增大而增大。刘杰等人<sup>[7]</sup>以 7050 铝合金和 1060 铝合金为材料研究了蛇形轧制中错位量、异速比、压下率对轧件曲率的影响,发现当压下率和错位量一定时,随着异速比的增大,轧件曲率的绝对值呈现出先减小后增大的趋势,同时轧件的弯曲方向也会改变。付焱等人<sup>[8]</sup>建立了蛇形轧制的轧制力/力矩模型,研究了异速比、轧辊偏移距离、压下量和摩擦系数对轧制力/力矩的影响,发现搓轧区会随异速比的增大而增大,但随上下辊偏移距离、压下量和摩擦系数的增加而减小。蒋绍松等人<sup>[9]</sup>提出了温度场非对称性概念,利用有限元法研究了摩擦产热、变形产热、接触传热、空冷等因素对温度场非对称性的影响,认为轧板与轧辊间的摩擦产热和轧板的变形产热是导致温度场非对称性的主要原因。

然而,上述关于蛇形轧制的工作主要集中在研究单道次轧制工艺参数对轧件内部应力、应变的影响。因此,本文着重研究多道次蛇形热轧过程中总压下率一定时,各道次的压下量分配对轧件内等效应力、应变的影响。

## 2 蛇形轧制的咬入条件

咬入阶段是建立正常轧制的前提条件,因此评价蛇形轧制中轧板的咬入轧机的难易程度对保证轧制顺利进行具有重要意义。

在蛇形轧制中由于上下轧辊之间存在一定的位错量,下轧辊首先接触到轧件,在传送辊和下轧辊摩擦力的作用下轧板头部被抬高并继续向前运动,直到轧件同时接触到上、下轧辊轧件开始被咬入,如图 1 所示。

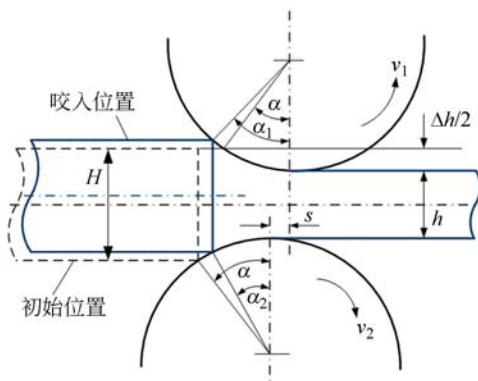


图1 蛇形轧制的几何关系

Fig. 1 Geometric relations of snake rolling

若记  $\lambda = \sqrt{\frac{2D \cdot \Delta h - \Delta h^2 - s^2}{D^2 - 2D \cdot \Delta h + \Delta h^2 + s^2}}$  为咬入系数,

则在轧辊半径、压下量及摩擦系数相等的条件下,蛇形轧制的咬入条件<sup>[10]</sup>为

$$\mu \geq \lambda, \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为轧辊与轧件间的摩擦系数;  $D$  为轧辊直径(mm);  $\Delta h$  为压下量厚度(mm);  $s$  为上下轧辊的水平位错量(mm)。

### 3 蛇形轧制的有限元方法

热轧是一个复杂的弹塑性非线性变形过程,既涉及到材料的物理、几何非线性,又有边界条件的非线性。所以,基于准确的材料模型,利用有限元技术进行热轧过程的模拟是研究热轧的先进手段和方法。

#### 3.1 本构模型

材料的流变应力反映材料在受到持续的塑形变形时的抗力值水平,流变应力主要受应变、温度、应变速率等因素影响。Sellars C M 等人<sup>[11]</sup>使用了双曲正弦函数来描述流变应力,即

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left\{-\frac{Q}{RT}\right\}, \quad (2)$$

式中,  $\dot{\epsilon}$  为应变速率;  $A$  为材料常数;  $Q$  为动态再结晶激活能( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $R$  为气体常数( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T$  为热力学温度(K);  $\sigma$  为流变应力;  $\alpha$  为应力水平参数( $\text{mm}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ );  $n$  为应力指数。

#### 3.2 摩擦边界条件

在铝合金厚板热轧时,轧辊对轧件挤压产生的法向应力非常巨大,因而轧件与轧辊之间的摩

擦不满足库伦摩擦模型,取而代之常用基于剪切应力的剪切摩擦模型<sup>[12]</sup>,即

$$\tau \leq -\mu \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

式中  $\tau$  为摩擦应力;  $\sigma_s$  为等效应力。

#### 3.3 热边界条件

铝厚板在热轧时,轧件的上下表面会和轧辊接触发生接触传热,而轧件的其他自由表面会和周围的空气以辐射和对流的形式进行热交换。为了实现对流换热和辐射换热同时加载于传热体的表面,其数学表达式为

$$q = (h_c + h_r) \cdot (T - T_e), \quad (4)$$

式中  $q$  表示热通量;  $h_c$  表示为对流换热系数;  $h_r$  为辐射换热系数;  $T$  为轧件温度;  $T_e$  为环境温度。

热轧中轧板和轧辊的接触传热是轧制过程中引起轧板温度变化的主要原因,接触传热系数可以衡量轧板与轧辊之间的传热效率。接触传热系数受轧辊和轧件材料各自的热传导率、表面形貌和轧制力等因数的影响。铝厚板与轧辊间的接触传热的数学表达式为

$$q' = h_{cd}(T - T_r), \quad (5)$$

式中  $q'$  为热通量;  $h_{cd}$  为轧辊与轧件之间的换热系数;  $T_r$  为轧辊温度。

### 4 蛇形轧制的仿真分析

在零部件的材料加工生产中,为了达到特定的技术指标要求,轧制规程的制定通常采用实验和纠错的方法,这种单凭重复试验的经验性试错法,不仅消耗大量的时间和财力,而且还无法获得工艺过程的变化规律。有限元技术的发展,对热轧过程的机理分析和工艺指导具有重要的应用价值和理论意义。这里,首先建立单道次蛇形轧制过程的有限元仿真模型,通过仿真结果与文献值之间较高的吻合度验证模型后,进一步研究多道次蛇形热轧工艺对板材性能的影响。

#### 4.1 材料属性

本文的蛇形热轧中,轧件的外廓尺寸为  $1000 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ <sup>[13]</sup>,材料为 7075 铝合金,而轧辊的直径  $D=1000 \text{ mm}$ ,材料为 5CrNiMo,轧件及轧辊的材料属性如表(1~2)所示。

表 1 轧件的材料属性

Tab. 1 Material attribution of rolled plate

温度 /°C	弹性模量 /MPa	比热容 /kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	导热系数 /W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	线膨胀系数 /10 <sup>-6</sup> ·K <sup>-1</sup>	泊松比	密度 /kg·m <sup>-3</sup>
25	72000	850	156	23.5	0.33	2790
50	71200	860	158.3	24.0	0.33	2780
100	69070	870	161	24.9	0.33	2780
200	61870	925	175	28.4	0.33	2750
300	53870	970	185	29.9	0.33	2730
400	48530	990	193	31.4	0.33	2700
500	44500	102	197	31.7	0.33	2680

表 2 轧辊的材料属性

Tab. 2 Material attribution of roller

温度 /°C	弹性模量 /×10 <sup>5</sup> MPa	比热容 /kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	导热系数 /W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	泊松比	密度 /kg·m <sup>-3</sup>
20	2.12	461	45.1	0.33	7850
100	2.07	496	45.1	0.33	7850
200	1.99	533	44.1	0.33	7850
300	1.92	568	41.9	0.33	7850
400	1.84	611	39.4	0.33	7850
500	1.75	677	37.9	0.33	7850

根据系列等温压缩试验,可获得铸态 7075 铝合金在一定温度范围内不同应变速率下的真应力-真应变曲线,还可通过求解双曲正弦模型获得材料本构模型参数<sup>[14]</sup>,如表 3 所示。

表 3 材料本构模型参数

Tab. 3 Parameters of material constitutive model

A	$\alpha$ /mm <sup>2</sup> ·N <sup>-1</sup>	n	Q /kJ·mol <sup>-1</sup>	R/J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
1.277 43×10 <sup>20</sup>	0.832 62	0.106 86	316.178×10 <sup>3</sup>	8.31

由于轧件的刚度远远小于轧辊的刚性,在轧制过程中可视轧件为变形体,而轧辊的变形小,可视为传热刚体,这样轧件与轧辊、轧件与空气等环境之间的接触摩擦等系数如表 4 所示。

表 4 边界系数

Tab. 4 Coefficients of boundary condition

边界条件系数	数值
初始温度(°C)	420
对轧辊的热传导系数 $h_{cl}$ /W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>	10000
对周围环境的热传导系数 $h_c + h_r$ /W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>	5
环境温度 $t_c$ /°C	20
辐射系数	0.7
摩擦系数 $\mu$	0.8

## 4.2 单道次轧制

### 4.2.1 单道次轧制仿真模型

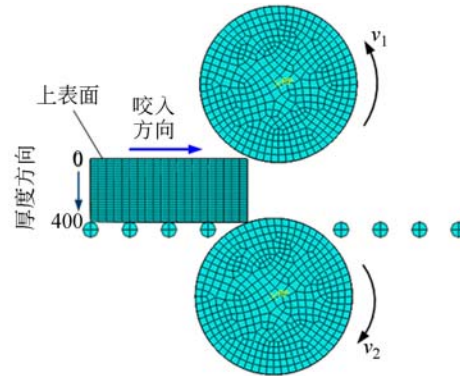
对 7075 铝合金厚板进行单道次轧制的工艺参数如表 5 所示。由于咬入系数  $\lambda \approx 0.31$ ,根据式(1)可知轧制过程满足咬入条件。

表 5 单道次轧制工艺参数

Tab. 5 Process parameters of single pass snake hot rolling

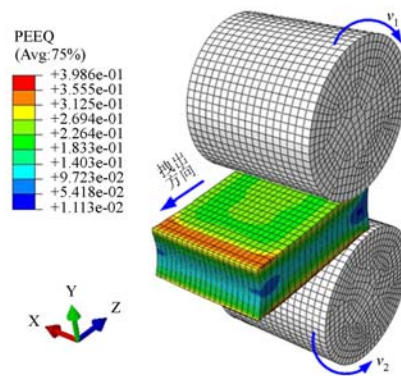
工艺参数	数值
上轧辊转速/mm·s <sup>-1</sup>	50
单道次的压下量 $\Delta h$ /mm	45
转速比(下轧辊 $v_2$ /上轧辊 $v_1$ )	1.2
上下轧辊的偏置距离 $s$ /mm	30

采用 C3D8RT 单元与 C3D8T 单元分别对轧件和轧辊进行网格划分,依据表(1~5)建立了 7075 铝合金厚板轧制的有限元模型,如图 2 所示。



(a) 有限元模型

(a) Finite element model



(b) 等效应变云图

(b) Simulated results of equivalent strains

图 2 单道次轧制的有限元仿真

Fig. 2 Finite element model of single pass snake hot rolling

利用 ABAQUS 有限元仿真软件对热轧过程进行计算后,获得了轧制后轧件的各项有限元仿真结果。

4.2.2 验证与分析

表 6 为轧件在厚度方向上变形与应力的仿真值,通过与文献[13]的结果(如图 3 所示)进行对比分析后,可知最大的等效应变误差与等效应力误差分别为 6.92%和 7.33%,由此验证了有限元模型的有效性。

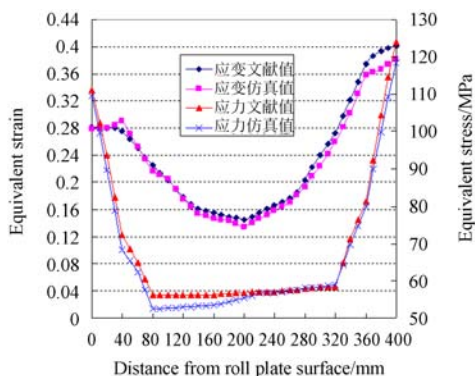


图 3 单道次轧制等效应变的比较分析

Fig. 3 Comparison of equivalent strains for single pass snake hot rolling

表 6 单道次轧制仿真结果

Tab. 6 Simulated results of single pass snake hot rolling

位置/mm	等效应变值			等效应力值		
	仿真值	文献值	相对误差	仿真值	文献值	相对误差
0	0.279	10.280	0.103%	109.530	111.67	2.00%
20	0.280	0.281	0.35%	89.570	94.18	4.89%
40	0.290	0.286	3.51%	68.330	72.51	5.90%
60	0.251	20.249	2.70%	62.461	65.85	5.14%
80	0.216	70.224	3.25%	52.540	55.845	5.91%
100	0.204	70.215	4.79%	52.570	55.845	5.86%
120	0.174	80.184	5.00%	52.831	56.003	5.66%
140	0.154	70.160	3.30%	53.271	56.835	6.27%
160	0.147	20.156	6.06%	53.451	57.682	7.33%
180	0.143	00.146	2.50%	54.211	58.350	7.10%
200	0.135	30.140	3.40%	55.320	58.650	5.68%
220	0.146	80.156	6.31%	56.780	58.751	3.35%
240	0.159	20.166	4.40%	56.793	58.852	3.51%
260	0.170	20.179	5.33%	57.232	58.960	2.93%
280	0.192	30.206	6.92%	58.070	59.062	1.68%
300	0.224	10.240	6.62%	58.342	59.165	1.39%
320	0.260	00.273	4.72%	58.970	59.541	0.95%
340	0.301	90.320	5.65%	69.750	70.835	1.53%
360	0.358	40.376	4.81%	79.803	80.835	1.27%
380	0.367	50.386	4.98%	99.750	104.180	4.25%
400	0.382	80.406	5.85%	118.520	125.010	5.19%

4.3 多道次轧制

4.3.1 多道次连轧仿真模型

为了考察多道次中各道次的压下量对 7075 铝合金厚板残余应力的影响,这里采用了 5 种轧制压下量分配方案,后一道次较前一道次均有一定的压下量,但总压下量均为 80 mm,同时根据式(1)计算获得各方案的咬入系数,如表 7 所示。

表 7 五道次蛇形热轧压下量分配方案

Tab. 7 Distribution scheme of pass reductions in five-pass snake hot rolling

分配方案 (mm)	道次 1	道次 2	道次 3	道次 4	道次 5
平均分配	压下量 $\Delta h$ 16	16	16	16	16
	咬入系数 $\lambda$ 0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
单向递增分配	压下量 $\Delta h$ 10	13	16	19	22
	咬入系数 $\lambda$ 0.14	0.16	0.18	0.20	0.21
单向递减分配	压下量 $\Delta h$ 22	19	16	13	10
	咬入系数 $\lambda$ 0.21	0.20	0.18	0.16	0.14
对称递增分配	压下量 $\Delta h$ 22	13	10	13	22
	咬入系数 $\lambda$ 0.21	0.16	0.14	0.16	0.21
对称递减分配	压下量 $\Delta h$ 10	19	22	19	10
	咬入系数 $\lambda$ 0.14	0.20	0.21	0.20	0.14

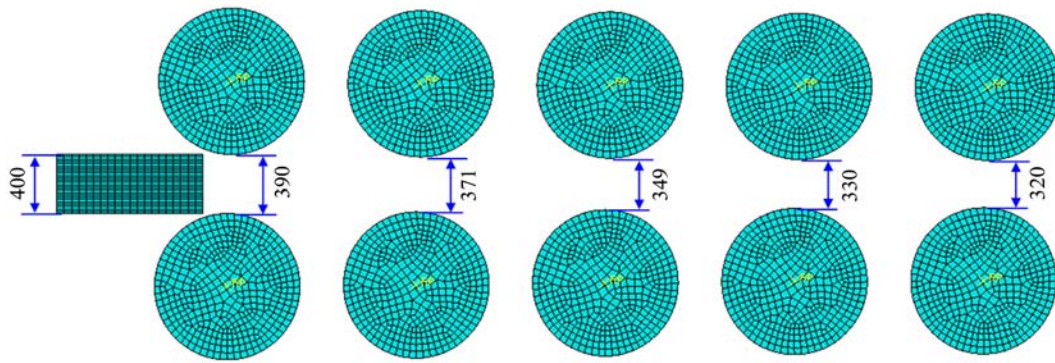
由表 7 中的咬入系数可知,5 种方案中各道次均满足咬入条件,故可在单道次轧制有限元模型的基础上,建立五道次(单向)的蛇形热轧有限元模型,如图 4(a)所示。进行计算时,隐去托板旨在减少一部分网格节点,以便提高运算效率,仿真结果如图 4(b)所示。

4.3.2 分析与讨论

(1)压下量分配对剪切应变的影响

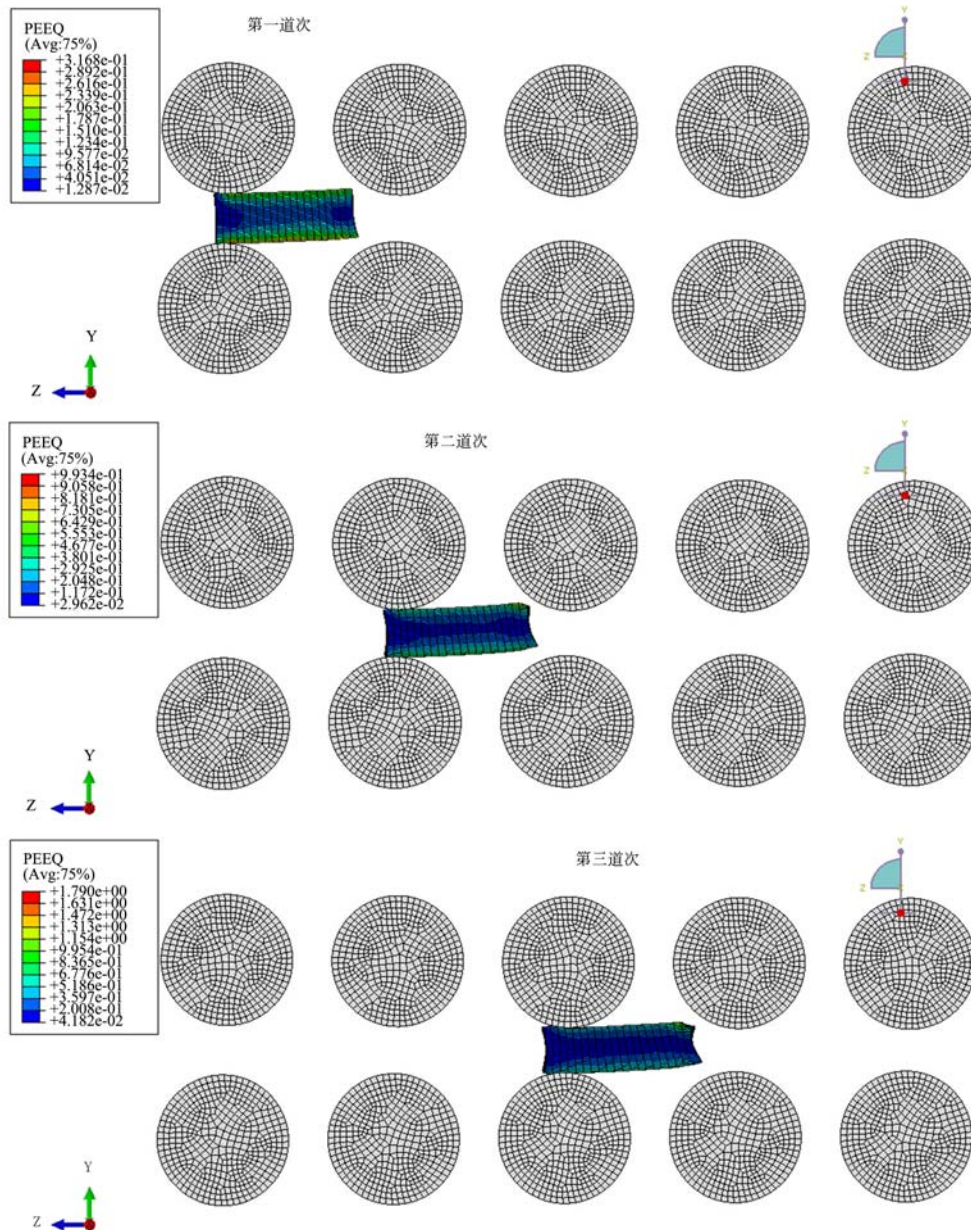
不同压下量分配方案亦对 7075 铝厚板中心点沿轧制方向的剪切应变具有重要影响,图 5 直观地显示了 5 种不同压下量分配方案对应的铝厚板中心点的剪切应变(绝对值)。

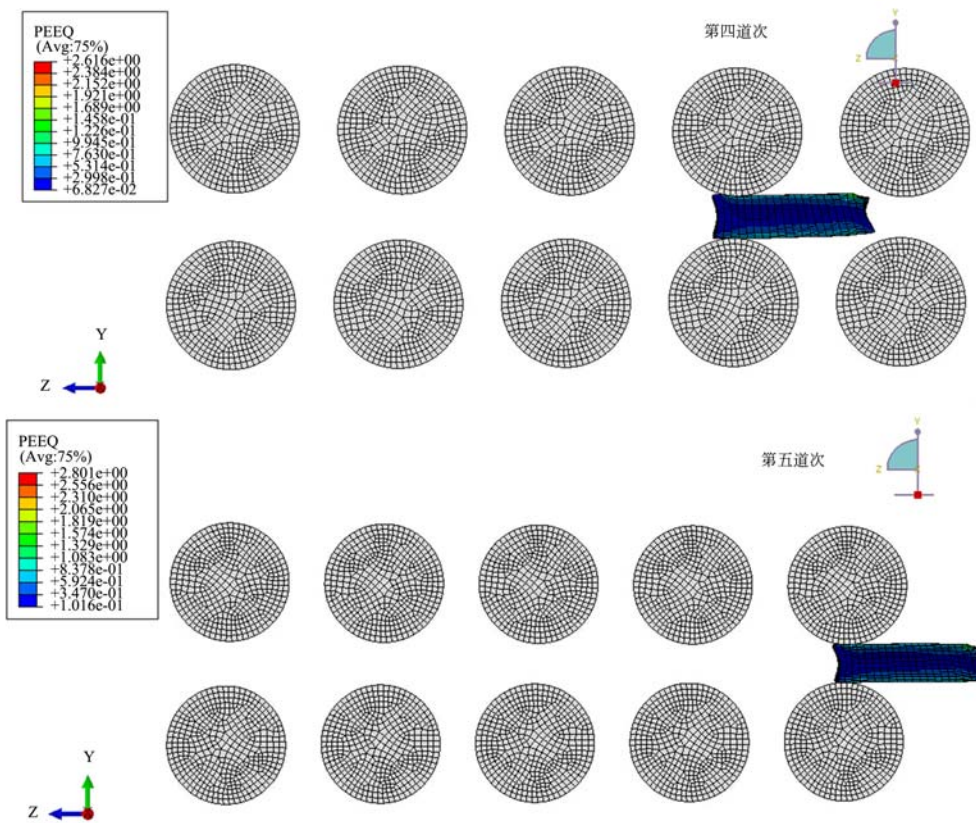
在 5 种压下量分配方案中,对称递减分配方案引起的铝厚板沿轧向产生的剪切应变最大,而单向递增分配方案引起的铝厚板沿轧向产生的剪切应变最小。另外,对比这 2 种分配方案产生的剪切应变,可进一步发现对称递减分配方案产生的剪切应变相对于单向递增分配方案产生的剪切应变要高出 2 倍。这意味着在多道次蛇形热轧中,如果对每个道次压下量采用不同的分配方案,



(a) 有限元模型

(a) Finite element model





(b) 等效应变云图

(b) Simulated results of equivalent strains

图 4 对称递增分配方案的五道次轧制有限元仿真

Fig. 4 Finite element simulation of five-pass snake hot rolling for symmetric increasing

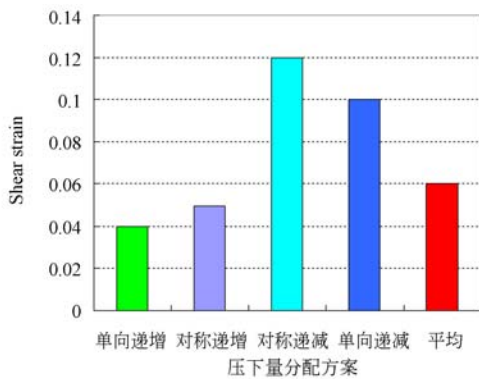


图 5 压下量分配方案对剪切应变的影响

Fig. 5 Effect of reduction distribution on shear strain

那么这些压下量分配差异会直接给轧件中心点的剪切应变带来差异,甚至这种差异可能会十分显著。

(2) 压下量分配对等效应变的影响

图 6 为沿板厚方向分布的等效应变。由此可见,蛇形热轧后的铝厚板沿厚度方向的应变分布

不是按板厚中心面对称的,慢速辊(即上轧辊)一侧的应变明显小于快速辊(即下轧辊)一侧,这和对称轧制产生的应变分布截然不同。对称轧制后的轧件沿厚度方向的应变分布是按厚度中心面对称的<sup>[13]</sup>,这是因为靠近于快速辊一侧的轧件受到摩擦力作用而被向前快速拉的速度要快于靠近慢速辊的一侧,所以轧件在靠近快速辊的一侧产生的应变要大于靠近慢速辊的一侧。

再者,压下量对称递增分配产生的应变最大,单向递增分配产生的应变最小,而且对称递增分配压下量产生的等效应变平均比单向递增分配压下量产生的等效应变要高 20%左右。这是因为,对称递增分配方案中首、尾道次的压下量较小,中间三个道次的压下量较大,尽管对称递增与单向递增的最大、最小压下量均相同,但对称递增的压下量安排可以使轧件受到充分的挤压产生较大变形;反观单向递增分配方案,前三个道次的压下量较小,最后一个道次的压下量较大,但是在最后一

个道次,热轧的温度已经降低了不少,此时材料的抗变形力升高,材料难以充分变形。

此外,从图中还可以看出按对称递减分配各道次压下量对应的等效应变曲线略低于按对称递增分配压下量对应的曲线。在对称递减压下量分配方案中,首尾两个道次安排的压下量很大,而中间三个道次的压下量较小。虽然在这种压下量的安排中轧件最后有较大的等效应变产生,但是从实际生产的角度来看是不够合理的,因为在后面的道次中温度下降而压下量却增加容易导致轧件开裂,无法保证轧制后材料的表面质量。

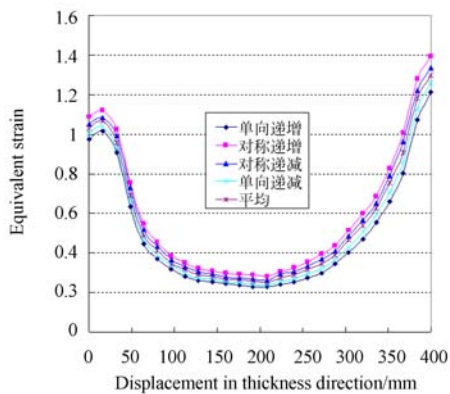


图 6 压下量分配方案对等效应变的影响

Fig. 6 Effect of reduction distribution on equivalent strain

### (3) 压下量分配对等效应力的影响

图 7 为厚度方向上蛇形热轧后轧件的等效应力分布。与蛇等效应变分布相似,轧件的等效应力分布也是非对称的,靠近快速辊的轧件等效应力明显大于靠近慢速辊的轧件等效应力。

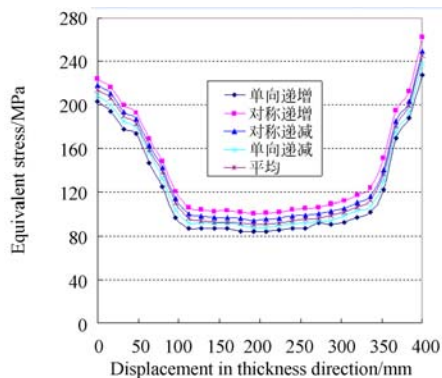


图 7 压下量分配方案对等效应力的影响

Fig. 7 Effect of reduction distribution on equivalent stress

另外,观察 5 种压下量分配方案对应的等效应力分布曲线可以发现不同的压下量分配方案会影响轧后铝厚板的等效应力大小。在这 5 种压下量分配方案中,对称递增分配方案引起的铝厚板沿厚度方向产生的等效应力最大,而单向递减压下量分配方案引起的铝厚板沿厚度方向产生的等效应力最小。

## 5 结 论

本文依据蛇形轧制的咬入条件与本构模型、边界条件等有限元仿真关键技术,构建了铝合金厚板的蛇形轧制有限元模型。与已有文献的仿真结果进行对比分析后可知,采用本文构建的有限元模型,所计算出的应力应变误差均不超过 10%。讨论了多道次蛇形轧制压下量对轧件中心点剪切变形的影响。结果显示:对称递减分配方案产生的剪切应变最大,而单向递增分配方案产生的剪切应变最小,但这 5 种分配方案均在板材中心引起了剪切变形,可见它们均能使得板材中心部分发生充分变形,使得晶粒变细,改善厚板性能。分析了多道次蛇形轧制压下量对轧件等效应力应变的影响。与对称轧制不同,轧件应力应变并不是按板厚中心面对称分布的,慢速辊一侧的应力应变明显小于快速辊一侧,且对称递增分配产生的应力应变最大,单向递增分配产生的应力应变最小。实验结果显示:等效应力应变是轧件塑性变形的一个度量,热变形时 7075 铝合金主要发生连续性动态再结晶,变形组织晶粒度会随应力应变值的增加而减小。因此,在这 5 种压下量分配方案均能使得中心部分产生剪切变形的条件下,应选择应力应变最大的对称递增分配作为多道次蛇形热轧的最优工艺方案。这也与文献[15]的定性指导原则(即“在工业的实际生产中,当制定多道次压下量的分配规程时,通常在开始轧制的头几个道次安排的压下量较小,避免把轧件轧碎裂;在中间道次,金属铸造组织已逐步转为加工组织,塑性较好,变形抗力不高,宜采用大压下量轧制;在最后几道次,轧件温度低,变形抗力高,为了获得平直与尺寸精确的轧件应安排较小的压下量”)相一致。

## 参考文献:

- [1] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9):1705-1715.  
LIU B, PENG CH Q, WANG R CH, *et al.*. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(9):1705-1715. (in Chinese)
- [2] 孙蓊泉, 戴辉, 唐荻. 异步轧制技术发展概况及其应用前景 [J]. 鞍钢技术, 2009, (5): 1-6.  
SUN J Q, DAI H, TANG D. Development survey and its application prospect of asynchronous rolling technology [J]. *Angang Technology*, 2009, (5): 1-6. (in Chinese)
- [3] CHEN S, AN Y G, LAHAIJE C. Toughness improvement in hot rolled HSLA steel plates through asymmetric rolling [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 625: 374-379.
- [4] ZUO Y B, FU X, CUI J Z, *et al.*. Shear deformation and plate shape control of hot-rolled aluminium alloy thick plate prepared by asymmetric rolling process [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 2220-2225.
- [5] 杨世德. 不对称铝锭热轧技术及轧机简介 [J]. 世界有色金属, 2010, (2): 47.  
YANG SH D. Introduction of asymmetric aluminum hot rolling and mill [J]. *World Nonferrous Metals*, 2010, (2): 47. (in Chinese)
- [6] 郑细昭, 吴运新, 张涛, 等. 龙形轧制工艺参数对铝合金厚板心部剪切变形的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(11): 89-93.  
ZHENG X ZH, WU Y X, ZHANG T, *et al.*. Effect of dragon rolling parameters on shear deformation in center of aluminum alloy thick plate [J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(11): 84-93. (in Chinese)
- [7] 刘杰. 蛇形轧制铝板曲率及组织和性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
LIU J. *Curvature microstructure and mechanical properties of aluminum sheets processed by snake rolling* [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [8] 付焱, 谢水生, 熊柏青, 等. 主应力法计算蛇形轧制的轧制力 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17(6): 103-109.  
FU Y, XIE SH SH, XIONG B Q, *et al.*. Calculation of rolling force in snake rolling by slab method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2010, 17(6): 103-109. (in Chinese)
- [9] 蒋绍松, 吴运新, 龚海, 等. 铝合金厚板蛇形轧制温度场非对称性研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 111-114.  
JIANG SH S, WU Y X, GONG H, *et al.*. Research on temperature asymmetry field of snake rolling of aluminum alloy thick plate [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(3): 111-114. (in Chinese)
- [10] 付焱. 高强高韧铝合金厚板的蛇形轧制研究 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2011.  
FU Y. *Research on snake rolling of thick plate of high strength and toughness aluminum alloy* [D]. Beijing: Beijing General Research Institute of Nonferrous Metals, 2011. (in Chinese)
- [11] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the mechanism of hot deformation [J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14: 1136-1138.
- [12] 张清泉, 刘勇谋, 姚进. 中厚板轧制过程的数值模拟分析 [J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(3):10-16.  
ZHANG Q Q, LIU Y M, YAO J. Numerical Simulation of Plate Rolling Process [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2004, 25(3): 10-16. (in Chinese)
- [13] ZHANG T, WU Y X, GONG H, *et al.*. Effects of rolling parameters of snake hot rolling on strain distribution of aluminum alloy 7075 [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 2150-2156.
- [14] 权国政, 张艳伟, 王凤标, 等. 7075 铝合金热塑性变形动态再结晶动力学模型 [J]. 机械工程材料, 2011, 35(12): 97-101.

QUAN G ZH, ZHANG Y W, WANG F B, *et al.*. Kinetics model for dynamic recrystallization of 7075 aluminum alloy in thermoplastic deformation [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2011, 35(12): 97-101. (in Chinese)

[15] 钟利, 马英义, 谢延翠. 铝合金中厚板生产技术

[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

ZHONG L, MA Y Y, XIE Y C. *Manufacturing Technology of Aluminum Alloy Plate* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009. (in Chinese)

#### 作者简介:



秦国华(1970—),男,江西南昌人,博士后,教授,2002年、2005年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位,2009年于西北工业大学力学博士后流动站出站,现为南昌航空大学教授,主要从事工件装夹分析与优化、加工过程建模与仿真、残余应力分析与预测、健康诊断与故障预测、刀具磨损检测与分析、制造业信息化技术等方面的研究。E-mail: qghwzx@126.com