

轧制

奥氏体不锈钢箔材冷轧变形的晶体塑性有限元分析

庞如法, 邱春林

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 超薄精密不锈钢箔材也称为极薄带材, 被广泛应用于电子、航空航天、汽车、化工等高端工程领域。基于微米级精密奥氏体不锈钢箔材冷轧过程中的尺寸效应和各向异性, 采用晶体塑性有限元法对其轧制过程进行了研究, 分析了不同厚度和初始晶粒取向对箔材轧制过程塑性变形的影响。结果表明, 轧制过程中应力集中多分布于晶粒之间的晶界处。随着箔材厚度的增加, 轧制力明显增加, 应力和应变分布逐渐趋于均匀, 单层晶的应力分布也较均匀; 箔材厚度越小, 晶粒内的应变梯度越显著, 轧后应变带趋于轧制方向。随机初始取向对轧制力和轧制稳定性的影响较小, 随机初始取向不同的单一晶粒在应力和应变分布上表现出很大差异, 最终晶粒形貌也不同, 但差异较小, 晶粒均沿轧制方向伸长。

关键词: 不锈钢箔材; 晶体塑性; 有限元; 厚度; 晶粒取向; 冷轧

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.022

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0180-08

Finite element analysis of crystal plasticity in cold rolled deformation for austenitic stainless steel foil

Pang Rufa, Qiu Chunlin

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Ultra-thin precision stainless steel foil, namely, ultra-thin strip, is widely used in high-end engineering fields such as electronics, aerospace, automotive and chemical industries. Therefore, based on the size effect and anisotropy of micrometer precision austenitic stainless steel foil in cold rolling, the rolling process was studied by using the crystal plastic finite element method, and the influences of different thicknesses and initial grain orientations on the plastic deformation of foil were analyzed. The results indicate that the stress concentration during the rolling process is mainly distributed at grain boundaries between the grains. With the increasing of foil thickness, the rolling force increases significantly, the stress and strain distributions gradually tend to be uniform, and the stress distribution of the single-layer crystal is also relatively uniform; the smaller the foil thickness, the more significant the strain gradient within the grain, and the strain band after rolling tends to the rolling direction. The influence of random initial orientation on the rolling force and rolling stability is relatively small. Single grains with different random initial orientations show great differences in stress and strain distribution, and their final grain morphologies are also different, although the differences are minor, and the grains are all elongated along the rolling direction.

Key words: stainless steel foil; crystal plasticity; finite element; thickness; grain orientation; cold rolling

超薄精密不锈钢箔材也称为极薄带材, 其厚度小于 0.05 mm, 由于具有优良的耐腐蚀性、耐热性、抗氧化性、轻量化、冲击韧性等特点, 被广泛应用于电子、航空航天、汽车、化工等各个高端工程领域, 因此, 对其尺寸精度、表面质量 (粗糙度、平整度等)、组织性能、使用可靠性等有严格的技术条件和个性化要求。近年来, 随着“中国制造”向

“中国精造”的转型, 精密不锈钢箔材因其产品附加值高、尺寸精密且性能优异, 逐渐成为高精尖领域不可缺少的材料。精密不锈钢箔材的厚度正逐渐减小, 截止到 2021 年, 中国宝武集团太钢公司研发的“手撕钢”的厚度已从 0.02 mm 减小至 0.015 mm, 技术位于精密不锈钢箔材领域世界前列^[1]。

在以往的研究中, 张希杰等^[2]研究了轧制工艺对金属薄带材的组织性能的影响, 但是无法直观地分析金属材料晶粒内部的微观结构的变化。近几年, 随着晶体塑性理论的发展, 可以通过数值模拟的手段分析晶粒内部的变化。晶体塑性有限元法^[3] (Crystal Plasticity Finite Element Method, CPFEM)

收稿日期: 2024-06-17; 修订日期: 2024-09-20

作者简介: 庞如法 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: pangrufa@163.com

通信作者: 邱春林 (1964-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: qiuc@ral.neu.edu.cn

是建立在微观(晶粒、位错、滑移)尺度上对材料的塑性变形过程进行分析,将晶体塑性理论和有限元方法融合,可以得到实验无法获取的微观信息。随着计算机和计算程序的发展,有限元计算逐渐突显出其在模拟晶体材料复杂工况下的宏观和微观的力学响应、组织演变等优势^[4]。晶体塑性理论可以追溯到20世纪早期的欧洲。1934年, Taylor G I^[5]对承受大塑性应变的面立方心(FCC)多晶体进行了晶体塑性方法的开创性工作,研究发现金属材料的塑性变形过程归结于位错运动引起的晶格切变,为阐述加工硬化现象奠定了理论基础。1935年, Schmid E^[6]发现晶体变形的滑移系开动需要满足一定条件,即滑移系的分切应力超过临界剪切应力。基于前人的研究, Hill R J 和 Rice J R^[7]使用数学公式推导和几何构建来描述晶体的塑性变形,可以研究率无关的单晶体塑性变形。Peirce D 等^[8-9]和 Rice J R^[10]陆续完善了一套率相关的晶体材料本构模型。目前为止,晶体塑性理论已经基本完善。东北大学的刘相华等^[11]使用晶体塑性有限元法模拟了 Cu^[12]、Al^[13]、Cu 极薄带材^[14]等的轧制过程,研究了尺度效应对力学性能和塑性变形的影响,使得晶体塑性有限元的理论应用更加广泛。在箔材领域,朱远志等^[15]通过高精度轧制,成功轧制出厚度为 100 μm 左右的不锈钢箔材,并通过轧制实验,研究了该种不锈钢在不同变形量条件下的变形和硬化特性。王天翔等^[16]利用 CPFEMFJ 进行了 304 不锈钢极薄带材在不同张力作用下的轧制变形模拟。刘秀等^[17]研究了不同应变速率对 304 不锈钢箔拉伸性能的影响。朱远志等^[18]和李明星^[19]研究了金属箔材在塑性变形过程中的尺度效应的影响。

由于奥氏体不锈钢箔材的厚度达到微米级,其厚度方向的晶粒只有几层,甚至只有单层晶粒,尺度效应显著,不锈钢箔材轧制过程的宏观塑性理论难以分析其微观塑性变形过程。近几年,晶体塑性有限元法成为研究微观特征的强有力手段,所以,本文使用晶体塑性有限元方法对奥氏体不锈钢箔材的冷轧变形过程进行分析,建立了 304 奥氏体不锈钢箔材的三维轧制模型,实现了在介观尺度上对轧制时塑性变形过程的精细分析,丰富了箔材轧制理论研究方法。

1 晶体塑性有限元理论

1.1 连续力学框架

Lee E H^[20]提出总的变形梯度 $F = \frac{dy}{dx}$, 可以进行乘法

分解,如式(1)所示,即 F 可以分为弹性部分 F_e 和塑性部分 F_p 两部分。

$$F = F_e F_p \quad (1)$$

式中: F_e 为变形梯度的弹性部分,描述了弹性变形和刚体旋转; F_p 为晶体滑移引起的总变形的塑性部分。

速度变形梯度 L 的表达式如式(2)所示。

$$L = \dot{F} F^{-1} = \dot{F}_e (F_e)^{-1} + F_e \dot{F}_p F_p (F_e)^{-1} = L_p + L_e \quad (2)$$

式中: L_p 为塑性速度变形梯度; L_e 为弹性速度变形梯度; \dot{F} 为总变形梯度速率; \dot{F}_p 为塑性变形梯度速率; \dot{F}_e 为弹性变形梯度速率。

在 CPFEM 中,塑性速度变形梯度 L_p 由滑移系 α 的剪切应变率 $\dot{\gamma}_\alpha$ 来决定,而 $\dot{\gamma}_\alpha$ 由所使用的本构模型确定,如式(3)所示。其中, L_p 为塑性部分变形率张量和旋转率张量相互作用的求和。

$$L_p = \dot{F}_p (F_p)^{-1} = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}_\alpha m_\alpha \otimes n_\alpha \quad (3)$$

式中: N 为塑性变形过程中滑移系开动的数目; m_α 为滑移方向; \otimes 为张量积; n_α 为滑移面的法向。

1.2 本构方程

本文使用率相关的硬化模型, Peirce D 等^[9]和 Rice J R^[10]在研究面心立方晶体时提出了滑移系统的动力学定律,该定律满足 Schmid 定律,如式(4)所示。

$$\dot{\gamma}_\alpha = \dot{\gamma}_{\alpha 0} \left| \frac{\tau_\alpha}{\tau_{ac}} \right|^n \text{sgn}(\tau_\alpha) \quad (4)$$

式中: τ_α 为滑移系 α 的分解剪切应力; τ_{ac} 为滑移系 α 的滑移阻力; n 和 $\dot{\gamma}_{\alpha 0}$ 分别为确定滑移速率敏感性和参考剪切应变率的材料参数。

为了便于计算,其硬化常数和硬化率由式(5)确定。

$$\dot{\tau}_{ac} = \sum_{\beta=1}^N h_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}_\beta| \quad (5)$$

式中: $\dot{\tau}_{ac}$ 为晶体强度硬化率; $\dot{\gamma}_\beta$ 为滑移系 β 的剪切应变率; $h_{\alpha\beta}$ 为硬化模量, MPa。

$h_{\alpha\beta}$ 决定了滑移系的剪切应变对滑移系 α 的硬化过程。当 $\alpha=\beta$ 时, $h_{\alpha\beta}$ 为自硬化模量; $\alpha \neq \beta$ 时, $h_{\alpha\beta}$ 为潜硬化模量。 $h_{\alpha\beta}$ 可表示为:

$$h_{\alpha\beta} = q h_{\alpha\alpha} \quad (6)$$

式中: $h_{\alpha\alpha}$ 为自硬化模量, MPa; q 为潜硬化和自硬化系数的比值。

$h_{\alpha\alpha}$ 由式(7)确定:

$$h_{\alpha\alpha} = -h_0 \text{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right| \quad (7)$$

式中： h_0 为初始硬化模量，MPa； τ_0 为初始临界剪切应力，MPa； τ_s 为塑性流动的第 1 阶段的临界应力，MPa； γ 为累计剪切应变。

将上述本构方程引入至 ABAQUS 软件中的 UMAT 中，利用晶体塑性有限元法进行奥氏体不锈钢轧制过程的微观分析。

2 参数标定及三维轧制模型建立

2.1 参数标定

本文通过建立代表性体积单元^[21]（Representative Volume Element, RVE）拉伸模型，将模拟拉伸和实验拉伸曲线进行参数拟合，如图 1 所示。标定了 304 奥氏体不锈钢箔材的晶体塑性参数（ h_0 、 τ_s 、 τ_0 、 n 、 q 和参考剪切应变率 $\dot{\gamma}$ ），如表 1 所示。奥氏

体相单晶体的弹性常数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{44} 由文献 [22] 获取。

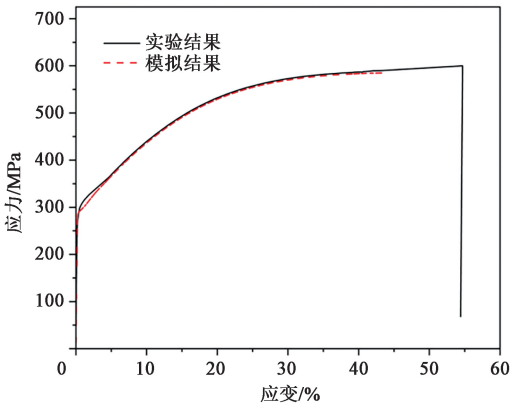


图 1 304 不锈钢箔材实验和模拟的拉伸曲线

Fig. 1 Experimental and simulated tensile curves of 304 stainless steel foil

表 1 304 不锈钢箔材晶体的塑性参数

Table 1 Plastic parameters of crystals for 304 stainless steel foil

参数	C_{11}/MPa	C_{12}/MPa	C_{44}/MPa	n	$\dot{\gamma}/\text{s}^{-1}$	h_0/MPa	τ_s/MPa	τ_0/MPa	q
数值	261200	112000	74600	50	0.0001	235	12	112	1.0

2.2 轧制模型的建立

304 不锈钢箔材的化学成分如表 2 所示，304 不锈钢箔材的物相单一，基本由奥氏体相组成，奥氏体是典型的面心立方（FCC）结构，其滑移系统是由 {111} 滑移面和<110>滑移方向组成的 12 个滑移系。实验室自研的四辊多功能微成形轧机（3M 轧机），工作辊直径为 $\Phi 40$ mm，辊身长度为 120 mm；支撑辊直径为 $\Phi 110$ mm，辊身长度为 110 mm。根据参考文献 [23] 和金相实验中的模型参数，基于 NEPER 软件中的 Voronoi 算法建立的三维轧制模型，建立了厚度为 0.02、0.03 和 0.04 mm，长度为 0.4 mm，宽度为 0.15 mm，平均晶粒尺寸为 18 μm 的轧制模型，晶粒尺寸由金相所得。由于奥氏体晶粒为等轴状的多边体，通过改变模型中的晶粒数量来确定所建模

型的平均晶粒尺寸。该模型的网格大小为 0.004 mm，使用六面体线性缩减积分单元（C3D8R）。设置轧制方向 RD、横向 TD、法向 ND 分别为 x 、 y 、 z 方向。

表 2 304 不锈钢化学成分（%，质量分数）

Table 2 Chemical compositions of 304 stainless steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.08	1	2	≤ 0.045	≤ 0.030	18~20	8~11	余量

将 NEPER 软件生成的 INP 文件导入 ABAQUS 中，设定轧辊直径为 $\Phi 40$ mm，建立三维轧制模型，如图 2 所示。将晶粒赋予随机取向，给轧辊（离散刚体）和箔材设定边界条件，前后张力均设置为

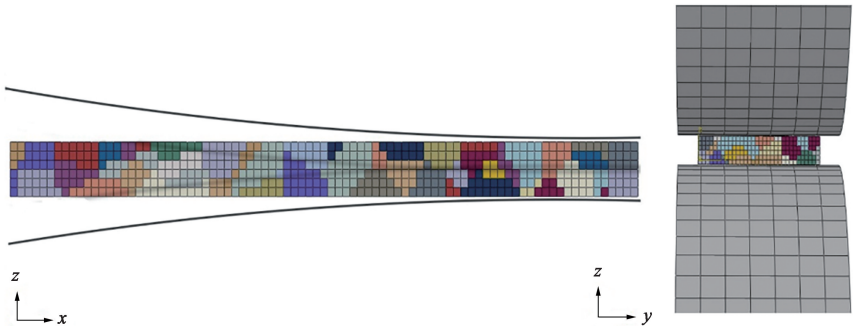


图 2 304 不锈钢箔材三维轧制模型

Fig. 2 3D rolling model of 304 stainless steel foil

30 MPa, 采用 ABAQUS 的“罚函数”摩擦, 摩擦因数设置为 0.07。由于隐式算法的限制, 只能将轧辊先给予一定的压下量, 再进行轧制过程。

3 结果与讨论

3.1 箔材厚度对轧制变形区的影响

构建的 3 种厚度的箔材均采用相同的平均晶粒尺寸 ($18\ \mu\text{m}$) 和压下率 (25%), 如图 3 所示, 得到的轧辊轧制力与轧制时间的曲线变化如图 4 所示。可以看出, 第 1 秒为轧辊下压过程, 轧制力迅速增加, 3 种不同厚度的箔材 (0.02、0.03 和 0.04 mm) 的轧制力分别达到最大值, 即 7.78、10.01 和

10.74 kN。当达到设定的压下量后, 轧制力迅速下降, 并逐渐趋于平稳, 轧制力平均在 4.46、5.95 和 6.69 kN。这是由于轧辊下压过程和轧制过程中晶粒所受的力不同, 在下压过程中箔材仅受压应力的作用, 故最大主应力为压应力, 而轧制阶段由于轧辊运动状态的改变, 导致箔材的受力状态改变, 使得轧制力下降。轧辊轧制过程中, 由于晶粒的形貌、相互作用、晶界和取向的不同, 轧制力在一定的范围内波动。随着箔材厚度的增加, 晶粒数量越多, 所需要的轧制力越大, 晶界周围的变形连续性就越好, 波动降低, 轧制过程会愈加平稳。厚度为 0.04 mm 的箔材的轧制力波动最小, 在 0.5 kN 范围内; 厚度为 0.02 mm 的箔材的轧制力波动最大, 在 1.2 kN 范围内。

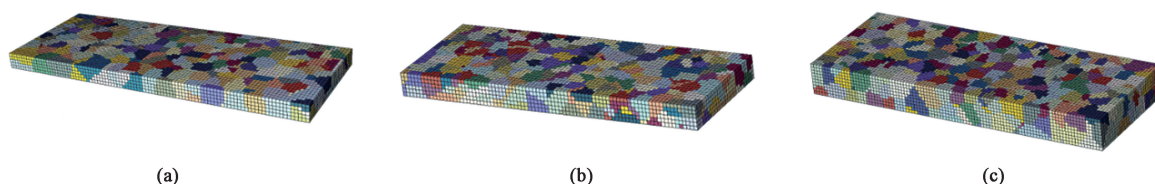


图 3 3 种厚度的箔材模型
(a) 0.02 mm (b) 0.03 mm (c) 0.04 mm

Fig. 3 Models of foils with three thicknesses

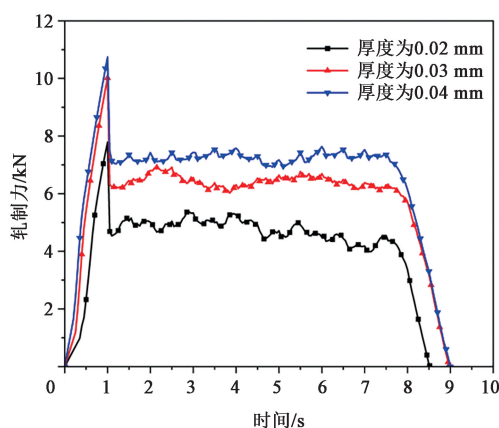


图 4 轧制过程中轧制力随时间的变化

Fig. 4 Changes of rolling force with time in rolling process

图 5 为不同厚度箔材的轧制变形区的应变分布, 整个变形区的应变分布不均匀, 其中, 厚度为 0.04 mm 的箔材的变形量最大, 最大应变为 33%。在同一晶粒内部的应变分布也不均匀, 图 5a 所示的箔材的厚度方向只有单层晶粒, 由于轧辊的作用较大, 应变集中主要发生在变形区的表面处, 其多为表层晶粒, 位错运动的阻力小, 变形易向晶内延伸, 进而易形成贯穿整个箔材厚度方向的应变带。箔材厚度越小, 晶粒内的应变梯度越显著, 轧后应变

带趋于轧制方向。

图 6 为不同厚度箔材的轧制变形区的应力分布, 变形区的应力分布不均匀, 随着厚度的增加, 最大应力逐渐增大, 最大应力分别为 969.59、1027.93 和 1043.92 MPa。在主要变形区的晶界处和晶粒内部均存在一定的应力集中, 如图 6a 所示, 厚度为 0.02 mm 的箔材的厚度方向只有单层晶粒, 在轧制过程中, 轧辊与全部单层晶粒表面直接接触, 晶界相对较少, 位错的阻碍作用减小, 应力在晶粒内部不易集中, 使得应力分布较为均匀, 容易沿着晶界形成贯穿整个箔材厚度方向的应力带。随着箔材厚度的增大, 轧制变形区的晶粒数量增多, 晶界增多, 阻碍了位错运动, 使得应力集中程度较大, 导致最大应力值增大。但是由于晶粒彼此之间的协调作用增强, 使得应力集中区域减小, 并向表面移动, 应力分布逐渐趋于均匀。

3.2 晶粒初始取向对轧制变形区的影响

选择厚度为 0.03 mm 的箔材研究晶粒初始取向对轧制变形区的影响。图 7 为 3 种不同晶粒随机初始取向对轧制力的影响, 随机取向由密勒指数输入。结果发现, 晶粒初始取向对轧制力的影响较小, 在轧辊下压阶段, 轧制力的增速大致相同, 但是最大轧制力有所不同, 随机取向 3 的最大轧

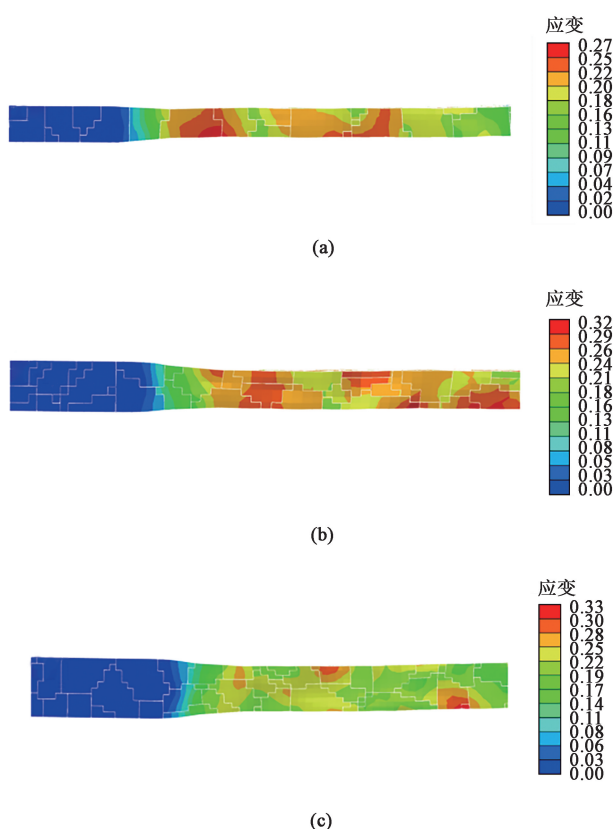


图 5 不同厚度的箔材轧制变形区的应变分布

(a) 0.02 mm (b) 0.03 mm (c) 0.04 mm

Fig. 5 Strain distributions in rolling deformation zone of foils with different thicknesses

制力最大, 为 10.20 kN, 这种初始取向使得不锈钢箔材不易发生塑性变形。随机取向 1 和随机取向 2 的最大轧制力基本相同, 分别为 10.01 和 9.87 kN, 这两种取向发生塑性变形的能力大体相同。在轧辊轧制阶段, 3 种随机取向的波动性相差很小, 在晶粒数量一定的情况下, 与晶粒间的相互协调作用相比, 晶粒初始取向的作用相对较小, 对轧制过程和轧制稳定性的影响也较小。

图 8 为不同晶粒初始取向箔材轧制变形区的应变分布, 整个变形区的应变分布不均匀, 最大应变分别为 0.32、0.32 和 0.34。随机取向 3 的内部晶粒应变分布较为均匀, 且相比其他两种随机取向, 其轧制变形区应变多发生在箔材表面处, 而随机取向 1 和随机取向 2 的模型均产生了贯穿整个箔材厚度方向的应变带。

图 9 为 3 种随机取向箔材轧制变形区的等效应力分布, 由于每个晶粒的初始取向具有随机性, 这种差异直接导致了变形区内的应力集中和分布不均匀性。从图 9 中可看出, 尽管每个变形区的最大应力略

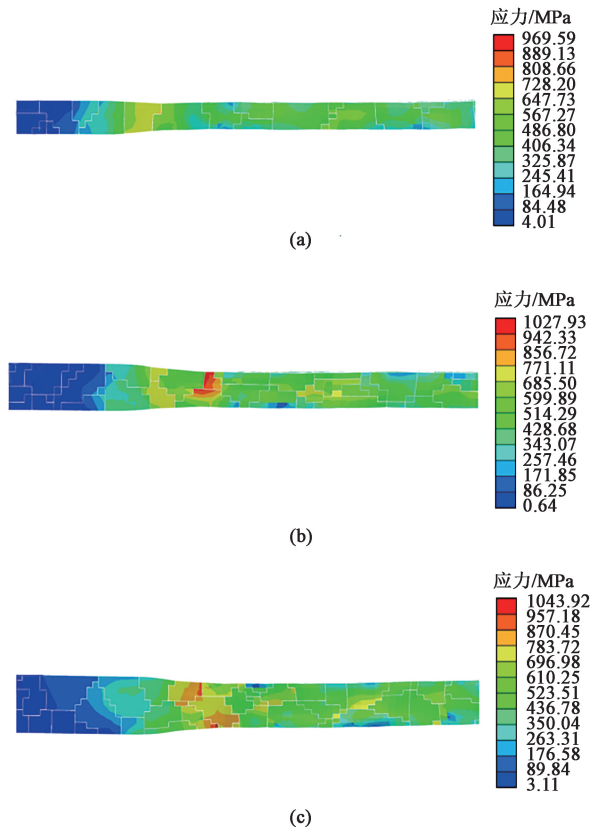


图 6 不同厚度的箔材轧制变形区的应力分布

(a) 0.02 mm (b) 0.03 mm (c) 0.04 mm

Fig. 6 Stress distributions in rolling deformation zone of foils with different thicknesses

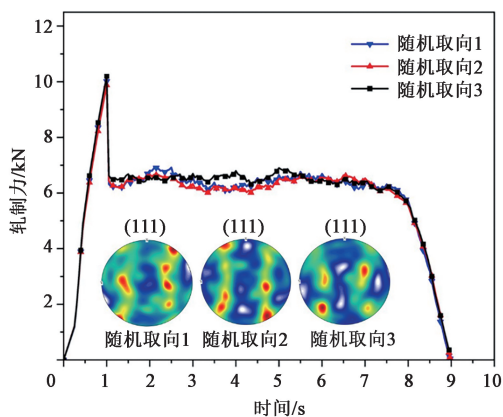


图 7 不同的晶粒初始取向对轧制力的影响

Fig. 7 Effect of different grain initial orientations on rolling force

有不同, 分别为 1027.93、1038.47 和 1042.34 MPa, 但共同点是应力集中基本均位于晶界处。进一步观察图 9c 发现, 随机取向 3 下轧制变形区内晶粒的形貌和位置与随机取向 1 和随机取向 2 下的晶粒相同, 但由于晶粒的初始取向差异, 随机取向 3 下的轧制变形区展现出了较大的最大应力值, 其应

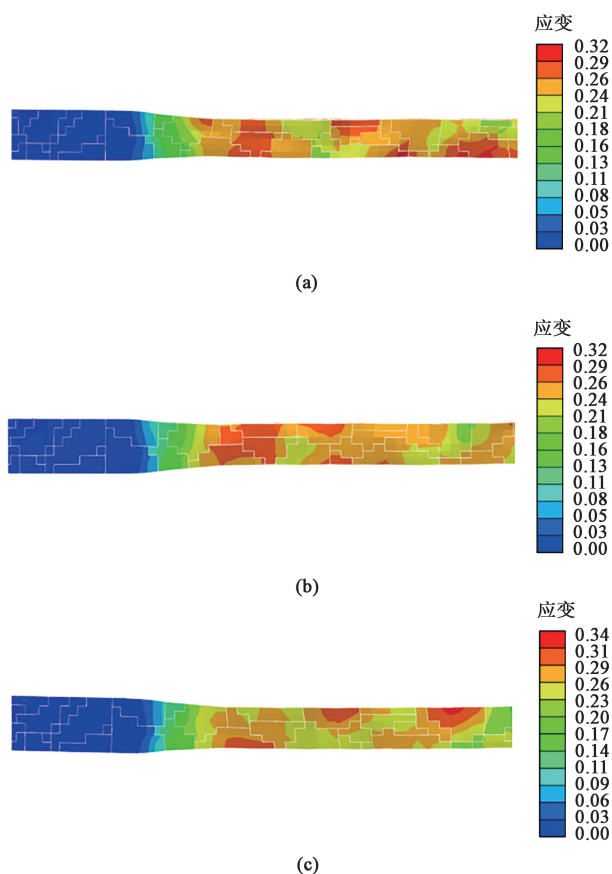


图8 不同晶粒初始取向箔材轧制变形区的应变分布
(a) 随机取向1 (b) 随机取向2 (c) 随机取向3

Fig. 8 Strain distributions in rolling deformation zone of foils under different grain initial orientations

(a) Random orientation 1 (b) Random orientation 2
(c) Random orientation 3

力集中区域也明显更大, 这表明在晶粒随机取向3的条件下, 轧制变形区的晶界和表面更容易产生应力集中。在轧制过程中, 随机取向3过高的应力集中可能导致材料在晶界处出现裂纹或断裂, 这是因为晶界处的强度往往低于晶粒内部。由于晶界处的结合力相对较弱, 在应力集中作用下, 晶界处更容易成为裂纹萌生的起点, 应力值在短距离内发生急剧变化会促使裂纹沿着晶界扩展, 更容易发生断裂, 从而影响材料的整体强度和使用寿命。

图10为上述3种随机取向模型中第342号晶粒的形貌、应力和应变分布图。此晶粒轧制开始前具有相同的形貌以及在模型中的位置, 由于不同的初始取向(表3), 晶粒间的相互协调作用存在差异, 使得轧制完成后, 晶粒的最终形貌也有所不同, 但是差异有限, 晶粒伸长率相差在5%内。不同取向的晶粒均会沿着轧制方向伸长, 使得材料沿轧制方

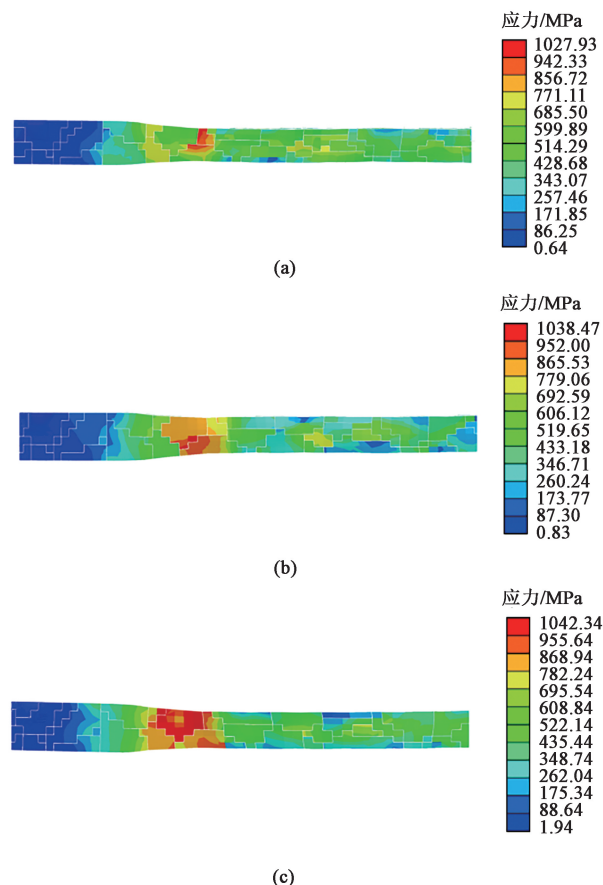


图9 不同晶粒初始取向箔材轧制变形区的应力分布
(a) 随机取向1 (b) 随机取向2 (c) 随机取向3

Fig. 9 Stress distributions in rolling deformation zone of foils under different grain initial orientations

(a) Random orientation 1 (b) Random orientation 2
(c) Random orientation 3

向表现出优异的力学性能。应力沿着轧制方向由晶界处逐渐向晶内扩展, 但由于初始取向不同, 晶粒内部的应力、应变分布均有所不同, 随机取向1的最大应力值最小(456.85 MPa), 随机取向3的最大应力值最大(645.69 MPa)。晶粒内部的最大、最小应变值的位置和差值也有所不同, 最大相差0.07, 最小相差0.03。但是最大应变值(0.28、0.29、0.28)基本相同, 且均发生在晶界的位置。

4 结论

(1) 304 不锈钢箔材厚度越大, 所需要的轧制力就越大(最大值为10.74 kN), 轧制过程越平稳(最大波动<0.5 kN), 越有利于不锈钢箔材的塑性变形过程。单层晶粒由于和轧辊的接触面积较大, 受轧辊的影响也较大, 晶界较少, 对位错运动的阻

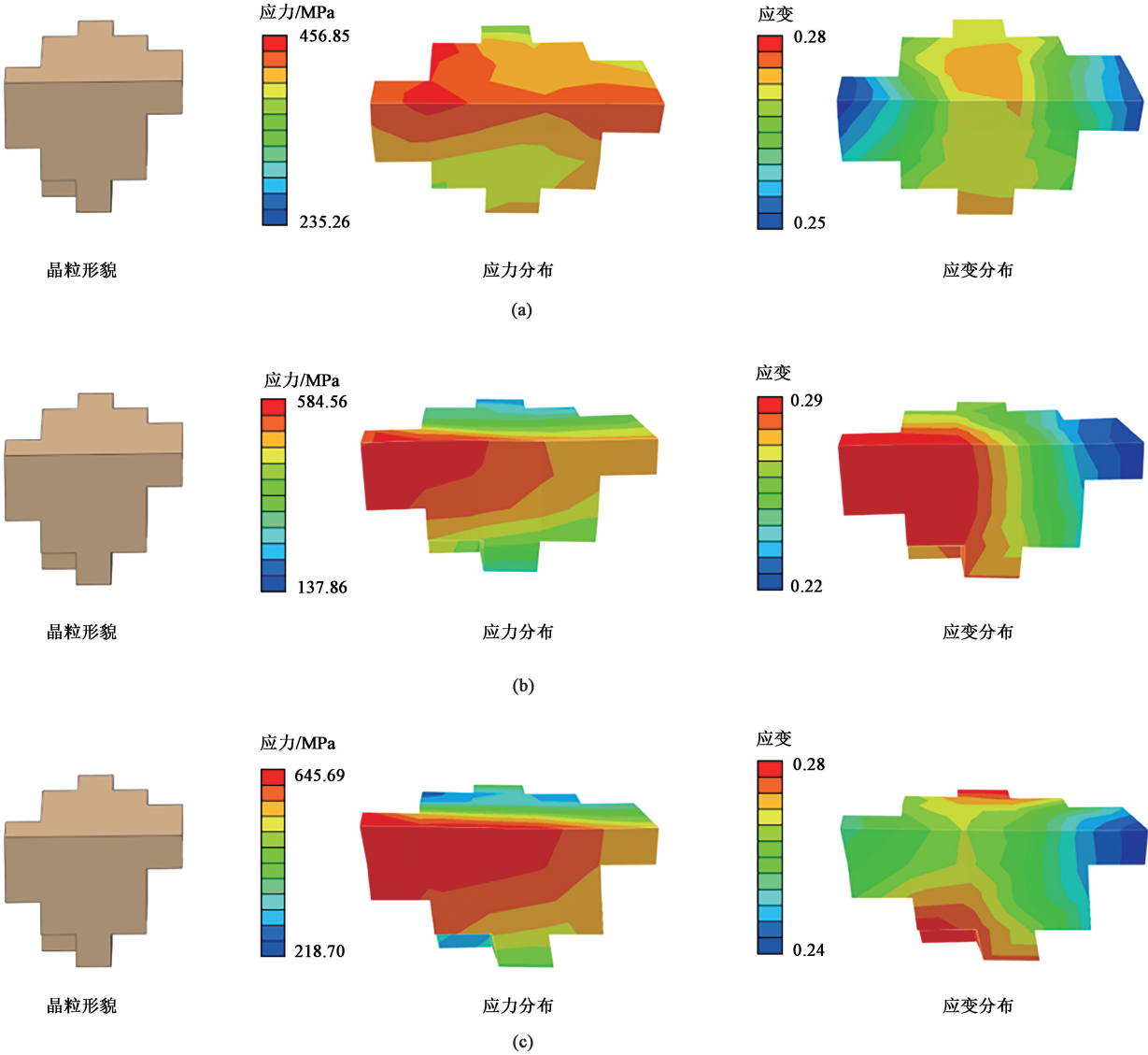


图 10 3 种随机取向第 342 号晶粒的形貌、应力和应变分布

(a) 随机取向 1 (b) 随机取向 2 (c) 随机取向 3

Fig. 10 Morphologies, stress and strain distributions of grain No. 342 under three random orientations

(a) Random orientation 1 (b) Random orientation 2 (c) Random orientation 3

表 3 第 342 号晶粒的 3 种不同初始取向
Table 3 Three different initial orientations of grain No. 342

初始取向	$(h\ k\ l)$	$[u\ v\ w]$
随机取向 1	$(13\ \bar{2}\ 3)$	$[1\ \bar{5}\ 7]$
随机取向 2	$(2\ 1\ 3)$	$[1\ \bar{2}\ 0]$
随机取向 3	$(\bar{3}\ 4\ 1)$	$[\bar{2}\ \bar{1}\ \bar{2}]$

碍较少，导致容易形成贯穿整个箔材厚度方向的应变带。

(2) 不同初始取向对轧制力和轧制平稳度影响较小 (3 种随机取向箔材的轧制平稳度波动差 $<1\text{ kN}$)，主要是因为晶粒间的相互协调作用占主导地位，使得初始取向的作用相对较小。

(3) 单个晶粒的不同取向使得其在微观角度表现出很大的差异，不同取向的单一晶粒的应力分布和应变变量均有所不同，不同的初始取向所发生塑性变形的难易度有所不同，但是最终晶粒形貌差异较小，均沿着轧制方向伸长。

(4) 不同厚度和初始取向的箔材，均存在应力集中区域，应力均优先在晶界处产生，然后向晶内扩展。

参考文献:

- [1] 张倩, 周红霞. 太钢“手撕钢”: 打造中国创造新标杆 [J]. 前进, 2022 (7): 40-42.
Zhang Q, Zhou H X. TISCO's "hand-torn steel": Creating a new benchmark for China's creativity [J]. Advance, 2022 (7): 40-42.
- [2] 张希杰, 余斌, 刘羽飞, 等. 轧制及退火工艺对 C5100 铜带材组织性能的影响 [J]. 铜业工程, 2023 (2): 114-121.
Zhang X J, Yu B, Liu Y F, et al. Microstructure and properties of C5100 copper strip with different rolling and annealing processes [J]. Copper Engineering, 2023 (2): 114-121.
- [3] Wojciech P. Crystal plasticity [J]. Crystals, 2021, 11 (1): 44.
- [4] 章海明, 徐帅, 李倩, 等. 晶体塑性理论及模拟研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (5): 12-32.
Zhang H M, Xu S, Li Q, et al. Progress of crystal plasticity theory and simulations [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (5): 12-32.
- [5] Taylor G I. The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I. Theoretical [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1934, 145 (855): 362-387.
- [6] Schmid E. Yield point of a crystals, critical shear stress law [A]. Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics [C]. Delft, 1924.
- [7] Hill R J, Rice J R. Constitutive analysis of elastic-plastic crystals at arbitrary strain [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1972, 20 (6): 401-413.
- [8] Peirce D, Asaro R J. An analysis of nonuniform and localized deformation in ductile single crystals [J]. Acta Metallurgica, 1982, 30 (6): 1087-1119.
- [9] Peirce D, Asaro R J, Needleman A. Material rate dependence and localized deformation in crystalline solids [J]. Acta Metallurgica, 1976, 31 (12): 1951-1976.
- [10] Rice J R. Inelastic constitutive relations for solids: An internal variable theory and its application to metal plasticity [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1971, 19 (6): 433-455.
- [11] 刘相华, 赵启林, 孙祥坤, 等. 极薄带微轧制技术研究与应用新进展 [J]. 轧钢, 2018, 35 (1): 1-5.
Liu X H, Zhao Q L, Sun X K, et al. Prospect of micro rolling technologies for foil products [J]. Steel Rolling, 2018, 35 (1): 1-5.
- [12] 陈守东. 基于晶体塑性有限元的铜极薄带轧制过程模拟研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
Chen S D. Simulation Study of Rolling Process of Copper Very Thin Strip Based on Crystal Plasticity Finite Element [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [13] Si L Y, Lu C, Liu X H, et al. Modeling of heterogeneous tensile deformation of polycrystalline aluminum [J]. Steel Research International, 2008, 79 (2): 677-683.
- [14] 刘相华, 赵启林, 陈守东. 极薄带轧制过程的晶体塑性有限元分析 [J]. 轧钢, 2018, 35 (5): 1-5.
Liu X H, Zhao Q L, Chen S D. Foil rolling process analyzed by crystal plasticity finite element method [J]. Steel Rolling, 2018, 35 (5): 1-5.
- [15] 朱远志, 张雅峰, 王适之, 等. 不锈钢箔材的轧制 [A]. 2014 年全国钢材深加工研讨会论文集 [C]. 北京, 2014.
Zhu Y Z, Zhang Y F, Wang S Z, et al. Rolling of stainless steel foils [A]. Proceedings of the 2014 National Symposium on Deep Steel Processing [C]. Beijing, 2014.
- [16] 王天翔, 高祥明, 赵永顺, 等. 张力作用下 304 不锈钢箔材的轧制变形模拟 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 164-170.
Wang T X, Gao X M, Zhao Y S, et al. Simulation on rolling deformation of 304 stainless steel foil under tension [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 164-170.
- [17] 刘秀, 金霞, 楼航飞, 等. 304 不锈钢箔材在不同应变速率下的拉伸性能研究 [J]. 材料科学与工艺, 2019, 27 (5): 59-65.
Liu X, Jin X, Lou H F, et al. Studies on the tensile properties of 304 stainless steel foil at different strain rates [J]. Materials Science and Technology, 2019, 27 (5): 59-65.
- [18] 朱远志, 范伟龙, 刘冉, 等. 金属箔材轧制过程中第二相颗粒的尺寸效应研究 [J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2017, 51 (6): 791-795.
Zhu Y Z, Fan W L, Liu R, et al. The size effect of different types of secondary particles in metallic foils during its foil rolling process [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2017, 51 (6): 791-795.
- [19] 李明星. SUS304 不锈钢箔微冲裁尺寸效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Li M X. Study of Dimensional Effects of Microblanking on SUS304 Stainless Steel Foils [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [20] Lee E H. Elastic-plastic deformation at finite strains [J]. Journal of Applied Mechanics, 1969, 36 (1): 1-6.
- [21] Lu J, Becker A, Sun W, et al. Simulation of cyclic plastic behavior of 304L steel using the crystal plasticity finite element method [J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 135-140.
- [22] Le Pêcheur A, Curtit F, Clavel M, et al. Polycrystal modelling of fatigue: Pre-hardening and surface roughness effects on damage initiation for 304L stainless steel [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 45: 48-60.
- [23] 范婉婉. 304 不锈钢极薄带轧制变形区细观力学行为研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
Fan W W. 304 Stainless Steel Very Thin Strip Rolling Deformation Zone Fine Mechanical Behavior Research [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.