

大尺寸纯钨板轧制数值模拟

王广达, 熊 宁, 钟 铭, 刘国辉

Numerical simulation of pure tungsten plate rolling in large size

WANG Guangda, XIONG Ning, ZHONG Ming, and LIU Guohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021030012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纯钼的多向锻造数值模拟及实验研究

Numerical simulation and experimental investigation on multi-directional forging of pure molybdenum

粉末冶金技术. 2021, 39(3): 216-222

钛粉粒度对轧制烧结多孔钛板力学性能的影响

Effect of powder sizes on the mechanical properties of porous titanium sheets prepared by rolling and sintering process

粉末冶金技术. 2020, 38(1): 30-35

大尺寸高相对密度钨管的制备

Fabrication of large size and high relative density tungsten tube

粉末冶金技术. 2021, 39(3): 263-268

基于Drucker-Prager/Cap模型的W-Cu20粉末轧制数值模拟

Study on numerical simulation of W-Cu20 powder rolling based on Drucker-Prager/Cap model

粉末冶金技术. 2017, 35(4): 249-254

粉末净成形压制工艺优化及三维复杂零件结构设计的数值模拟

Optimization of powder net-shape compacting technology and structural design of 3D complex parts by numerical simulation

粉末冶金技术. 2019, 37(4): 298-305

基于离散元法的颗粒高速压制模拟及动态力学分析

High velocity compaction simulation and dynamic mechanical analysis of particles based on discrete element method

粉末冶金技术. 2020, 38(5): 350-356, 362



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

大尺寸纯钨板轧制数值模拟

王广达^{1)✉}, 熊 宁¹⁾, 钟 铭²⁾, 刘国辉²⁾

1) 安泰科技股份有限公司, 北京 100081 2) 安泰天龙钨钼科技有限公司, 天津 301899

✉通信作者, E-mail: wangguangda@atmcn.com

摘 要 钨是核聚变示范堆、散裂中子源及半导体领域中非常重要的一种难熔金属材料, 通过对钨板进行轧制变形可以得到各项预期性能。本文通过 DEFORM 软件模拟大尺寸钨板坯料的轧制, 分析轧制方式对损伤因子(损伤值)和应变的影响。结果发现, 单向轧制的损伤严重区域主要分布在坯料侧面边缘处, 易发生裂纹; 交叉轧制对的损伤严重区域比较均匀地分布在坯料四周, 由损伤累积产生韧性裂纹的倾向性小。交叉轧制板材在轧制方向的应变曲线在到达一次“最高值”后会下降到上一道次的横向应变, 形成“最小值”, 两次应变最大值的差值比单向轧制的小。

关键词 钨板; 轧制; 数值模拟; 大尺寸板坯

分类号 TG142.71

Numerical simulation of pure tungsten plate rolling in large size

WANG Guangda^{1)✉}, XIONG Ning¹⁾, ZHONG Ming²⁾, LIU Guohui²⁾

1) Advanced Technology & Materials Co., Ltd, Beijing 100081, China

2) ATTL Advanced Materials Co., Ltd. Tianjin 301899, China

✉Corresponding author, E-mail: wangguangda@atmcn.com

ABSTRACT Tungsten is a very important refractory metal in the fields of nuclear fusion demonstration reactor, spallation neutron source, and semiconductor. The expected properties of tungsten plates can be obtained by rolling and deforming. The DEFORM software was used to simulate the rolling of tungsten plates in large size in this paper, and the influence of rolling mode on damage factor (damage value) and strain was analyzed. The results show that, the serious damage area for one-way rolling is mainly distributed at the side edge of the billets, which is easy to produce cracks; the serious damage area for cross rolling is uniformly distributed around the billets. The strain curves of cross rolling in the rolling direction may reach a “maximum value” and then descend to a “minimum value”, and the difference of strain between the two maximum value is smaller in cross rolling than that in one-way rolling.

KEY WORDS tungsten plates; rolling; numerical simulation; large size billets

钨是熔点和密度都很高的一种难熔金属, 具有高中子产率、高热导率、低物理溅射产率等特性, 是聚变反应堆系统中用作偏滤器最有吸引力的材料

之一^[1-2]。变形钨板可以通过调整变形量和热处理制度得到预期要求的各项性能, 在散裂中子源和半导体行业受到越来越多的重视^[3-5]。纯钨板一般通

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划专项资助项目 (2017YFB305600)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021030012; <http://pmt.ustb.edu.cn>

过粉末冶金方法进行制备^[5-11], 使用加热轧制的方法制备出不同厚度、尺寸和性能的钨板轧坯^[12-14]。未来钨板的发展方向是大尺寸、高品质、低成本, 可通过制备大单重、大尺寸钨板坯, 进行热轧变形并配合热处理工艺^[15-16], 达到更好的质量和性能。

目前钨板坯的单重一般低于 100 kg, 厚度大都小于 50 mm, 对于更大重量和(或)厚度的钨板坯的热轧研究还不充分。本文采用 DEFORM 软件对大尺寸钨板坯进行热轧模拟, 为大尺寸钨板坯热轧技术的优化和综合性能的提高提供基础理论指导

1 实验材料及方法

1.1 钨板热轧实验路线

实验原料为市售纯度 $\geq 99.95\%$ 的钨粉, 平均费氏粒度为 3.0 μm , 在 230 MPa 冷等静压 25 min 压制成型, 在氢气气氛中进行高温烧结, 最高烧结温度为 2200 $^{\circ}\text{C}$ 。采用阿基米德排水法检测样品的烧结密度。

1.2 钨板热轧模拟模型

材料在外力作用下的变形过程可以用某种经验型本构方程来表示, 从材料加工和温度等方面描述材料的变形特征^[17]。静态加载时, 应变率很低, 材料在载荷下表现出的抗力与材料的晶体结构、颗粒尺寸及组分等密切相关。Zerilli 和 Armstrong 提出了一种体心立方金属在滑动控制流动应力下的本构方程, 如式(1)^[19]所示。

$$\sigma = \sigma_0 + C_1 \exp[-(C_3 + C_4 \ln \dot{\varepsilon})T] + C_5 \varepsilon^n \quad (1)$$

式中: σ 是应力, σ_0 是屈服应力, ε 是应变, $\dot{\varepsilon}$ 是应变率, T 是温度, n 是加工硬化指数, C_1 、 C_3 、 C_4 、 C_5 是经验参数。其中 σ_0 是无热参数, 与 Hall-Petch 硬化函数有关, 为简化计算, 将其作为常量。数据文献^[16,18-19]以及实际轧制经验, $\sigma_0 = 49.908 \text{ MPa}$, $C_1 = 1293.5 \text{ MPa}$, $C_3 = 2.7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $C_4 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $C_5 = 194.49 \text{ MPa}$, $n = 0.050513$ 。

根据轧制变形特点及钨板在变形过程中与轧辊的几何位置关系, 为减少计算量, 将分析体设计为原始钨板坯尺寸的 1/4, 即厚度的一半(32 mm)和长度的一半(330 mm), 模具只设置主动辊, 在厚度与长度的中心平面分别施加相应方向的零位移约束。

在 DEFORM 软件中, 损伤因子默认是按 Normalized Cockcroft & Latham 准则进行运算的, 该准则认为断裂主要与拉伸主应力有关, 即对于给定的材料, 在一定温度和应变速率下, 当最大拉应

力-应变达到材料临界破坏值时, 材料产生断裂。综合空隙生长理论, 材料的破坏与变形及变形时的等效应力有关, 其损伤值^[20-21]如式(2)所示。

$$C = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: C 是损伤值, σ_m 是平均应力, $\bar{\sigma}$ 是等效应力, $\bar{\varepsilon}$ 等效应变。该式是目前最为常用的韧性断裂判据之一。

钨板轧制模拟使用 DEFORM 软件进行, 分析了单向轧制和交叉轧制的损伤分布和应变曲线, 板坯模拟体设为尺寸几何规则形状, 尺寸为 64 mm $\times$ 530 mm $\times$ 660 mm, 轧辊直径 $\phi 500 \text{ mm}$, 轧机转速设为 1 m/s。

2 结果与分析

2.1 单向轧制模拟

单向轧制各道次的变形参数如表 1 所示。每道次轧制前都要对钨板坯加热, 消除加工应力, 但应变及缺陷会产生累积, 因此在模拟参数设置中, 可以将上一道次变形后的应力重置为零, 温度场重置为该道次工况预定的初始温度, 其余场量保持上一道次结果。

表 1 单向轧制各道次变形参数

Table 1 Deformation parameters of each pass for one-way rolling

道次	厚度 / mm	压下量 / mm	变形率 / %
1	23.5	8.5	26.6
2	17.5	6.0	25.5
3	13.0	4.5	25.7
4	9.5	3.5	26.9
5	7.0	2.5	25.9

道次轧制损伤分布如图 1 所示。由图可知, 各道次损伤值最大值依次为 0.361、0.525、0.726 和 0.892, 其中 0.892 为去掉畸变后的修订值, 随着累积压下量增大, 损伤值也增大。损伤值并不是简单的累加, 而是经过运算后得到的数值。

第 5 道次的行程载荷曲线和密度分布如图 2 所示。由图可知, 经过五个道次的轧制压, 孔隙被压得紧实, 相对密度为 0.998~1.000, 且在边缘靠近内部中心处密度较低, 此处对应损伤值较大。由图 2(b) 密度分布和图 1(e) 损伤分布可见, 对于单向多道次轧制, 坯料沿轧制方向的侧表面中心处损伤值较大且密度也较低, 容易产生裂纹。

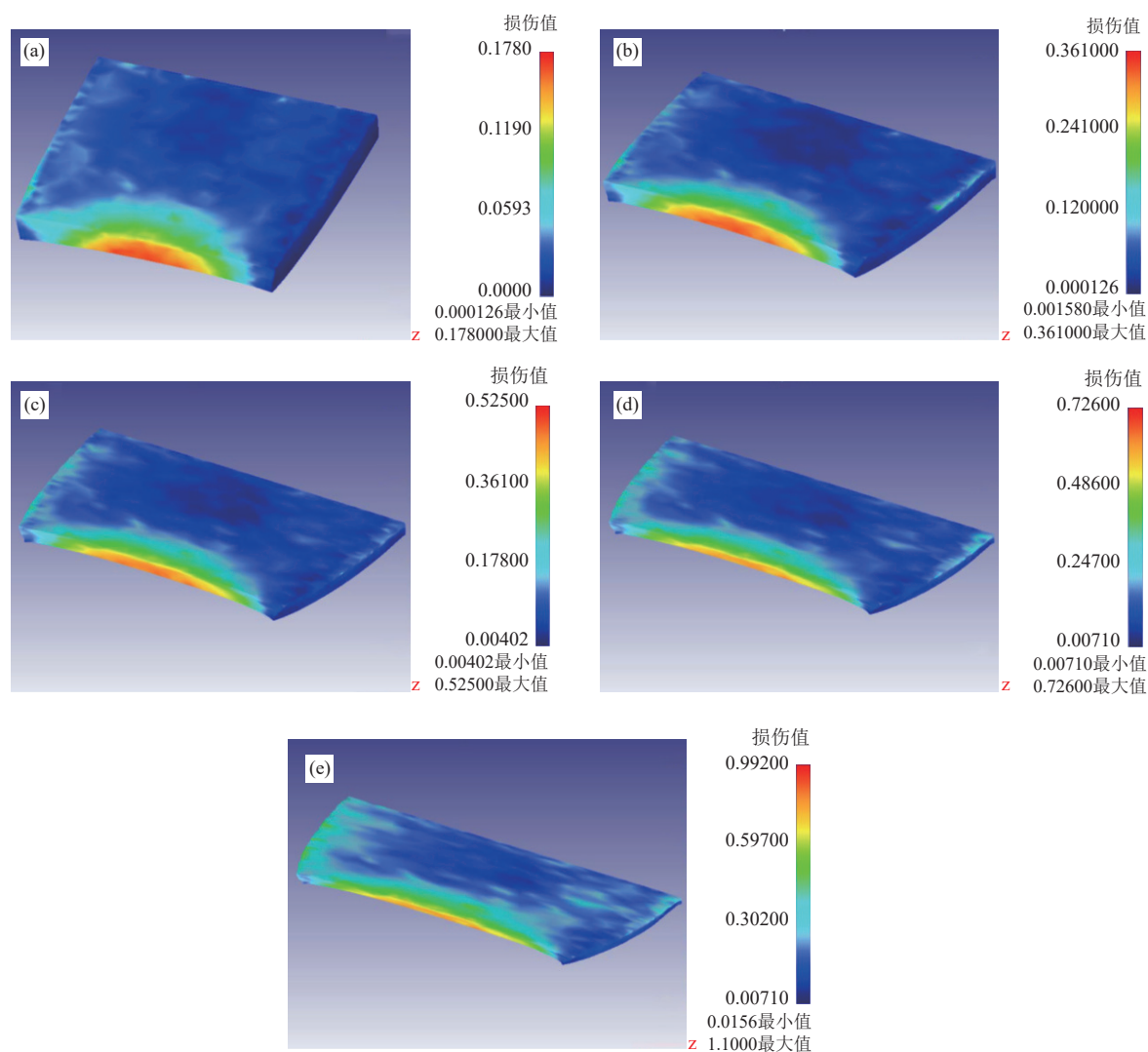


图 1 单向轧制各道次损伤分布: (a) 第 1 道次; (b) 第 2 道次; (c) 第 3 道次; (d) 第 4 道次; (e) 第 5 道次

Fig.1 Damage distribution of each pass in one-way rolling: (a) first pass; (b) second pass; (c) third pass; (d) fourth pass; (e) fifth pass

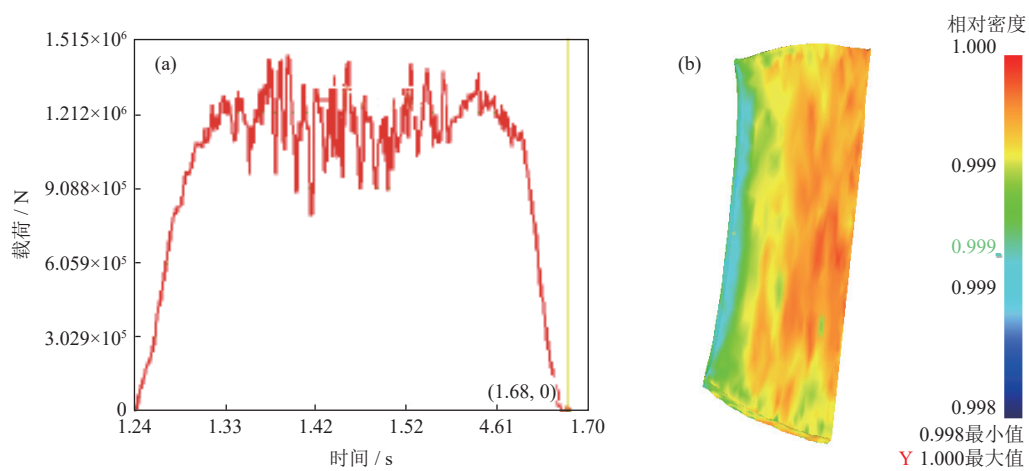


图 2 第 5 道次行程载荷曲线 (a) 及密度分布 (b)

Fig.2 Load curve (a) and density distribution (b) of the fifth pass

2.2 交叉轧制模拟

采用单方向轧制工艺, 钨板材变形后会产生各向异性。可采用交叉轧制以提高变形均匀性, 降低变形不均及各向异性, 改善板材的性能^[13-14,16]。对钨板材的交叉轧制进行有限元模拟, 与单向轧制损伤值进行比较和分析, 通过分析轧制过程中板材上任意一点的塑性应变来研究轧制方向对材料各向异性的影响。考虑到要变换轧制方向, 为更符合实际情况, 采用 1/2 坯料进行模拟, 即仅在厚度方向取一半 (32 mm), 水平方向尺寸选取初始坯料原始尺寸。各道次加工参数如表 2 所示, 其他模拟参数同前文单向轧制模拟。

交叉轧制各道次损伤值分布如图 3 所示。从图中损伤值及分布可以看出, 每道次加工后损伤最严重处为垂直于轧制方向的两侧。随着轧制方向的变换, 损伤值较大区域在坯料四周侧面中心处轮换,

表 2 交叉轧制各道次模拟参数

Table 2 Simulation parameters of each pass for the cross rolling

道次	厚度 / mm	加热温度 / °C	轧制方向
1	23.5	1600	横向
2	17.5	1550	换向
3	13.0	1500	换向
4	9.5	1450	换向
5	7.0	1400	换向

但在四周处的分布较单向轧制均匀许多。各道次加工后损伤值最大值分别为 0.212、0.412、0.471、0.623 和 0.709。

2.3 交叉轧制塑性应变分析

从上述钨板单向和交叉轧制的模拟过程可以看到, 轧制过程中板材各部位应变分布不相同, 但变

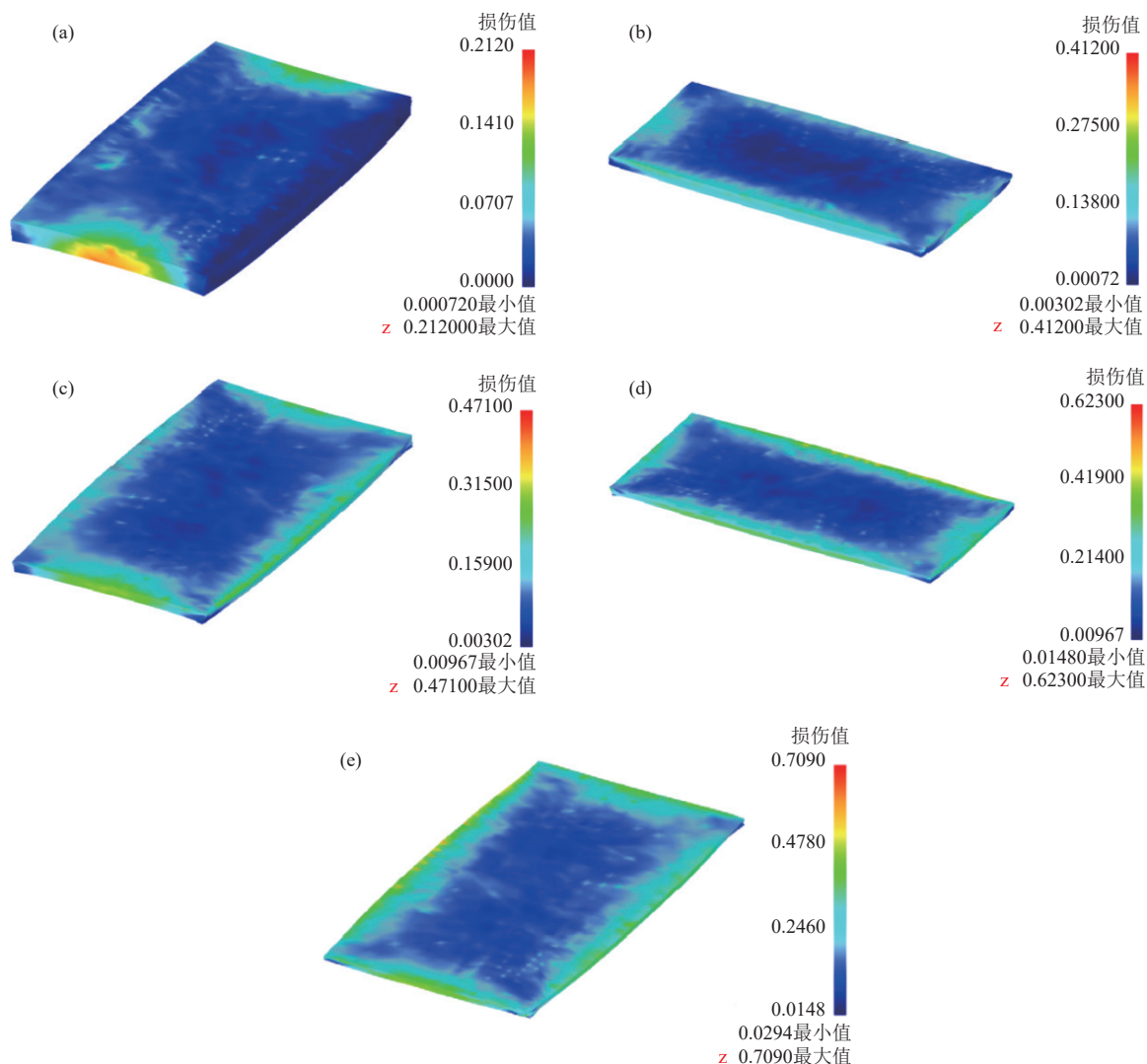


图 3 交叉轧制各道次损伤分布: (a) 第 1 道次; (b) 第 2 道次; (c) 第 3 道次; (d) 第 4 道次; (e) 第 5 道次

Fig.3 Damage distribution of each pass in cross rolling: (a) first pass; (b) second pass; (c) third pass; (d) fourth pass; (e) fifth pass

化规律是相似的,因此在板面内任取一点进行应变的研究。图4为板材内某一点处的塑性应变曲线。交叉轧制过程中,板材每道次转换90°的轧制方向,这样轧制方向上没有累积上一道次的塑性应变,而

是保留了上一道次横向上的应变。交叉轧制板材的应变曲线在达到一个“最大值”后会下降到上一道次横向应变,形成“最小值”,两个“最大值”越接近就可以认为板材各向性能差异越小^[16]。

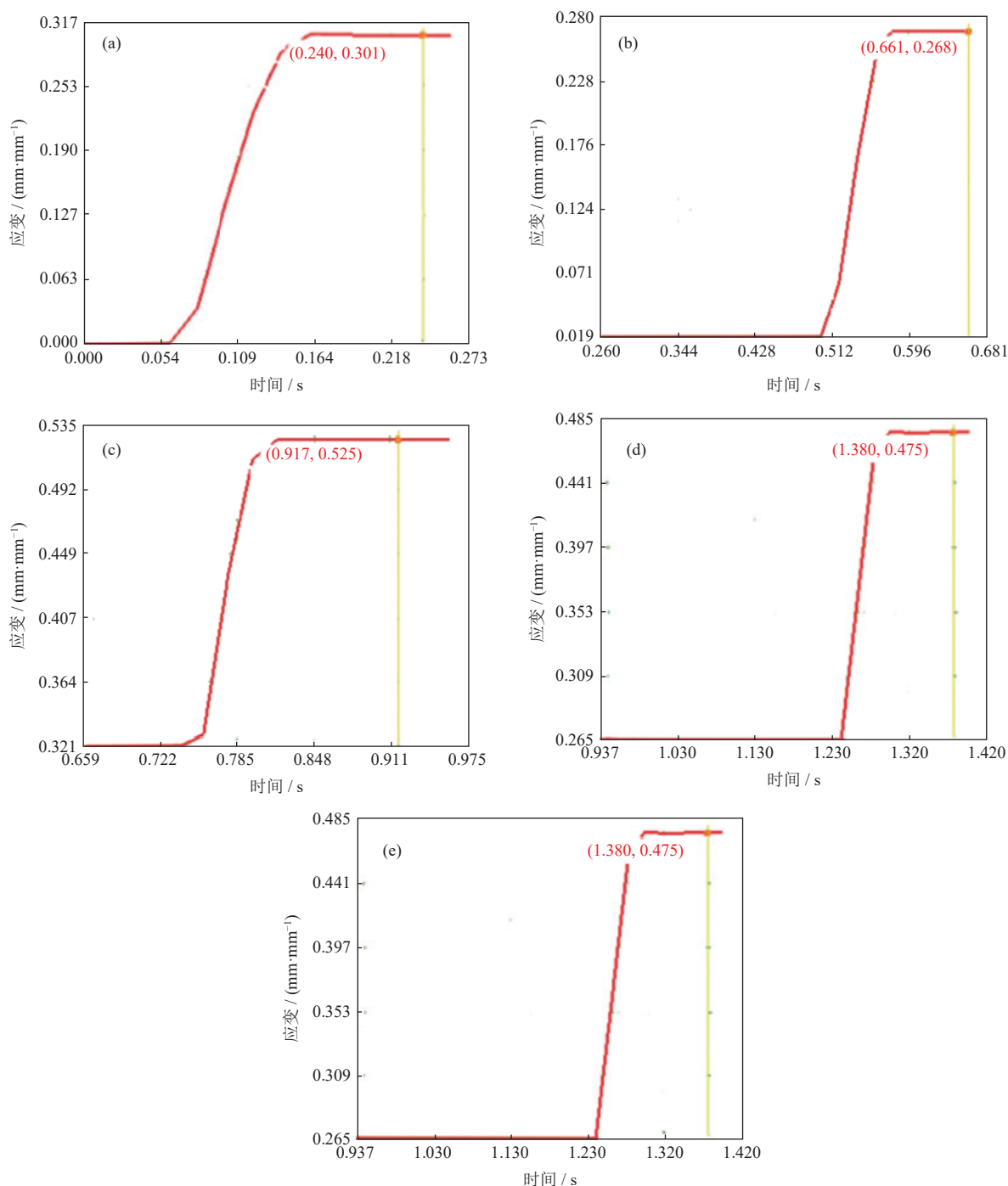


图4 某点在各道次沿轧制方向塑性应变曲线: (a) 第1道次; (b) 第2道次; (c) 第3道次; (d) 第4道次; (e) 第5道次
Fig.4 Plastic strain curves of one point along the rolling direction at each pass: (a) first pass; (b) second pass; (c) third pass; (d) fourth pass; (e) fifth pass

2.4 两种模拟轧制方式比较

由于最后道次的轧制变形及损伤都是前几道次

的累积,因此将交叉轧制与单向轧制最后道次的结果进行对比,分析两种轧制方式对变形的影响。

图5给出了两种轧制方式最后坯料损伤分布的对比。由图可知,单向轧制损伤随着每道次累积,且集中在坯料两侧边缘,累积损伤值最大达到1.100。

交叉轧制损伤的较大值均匀分布在坯料四周,最大损伤值为0.709。虽然损伤值较大区域的分布范围大了,但平均损伤值比单向轧制小很多。

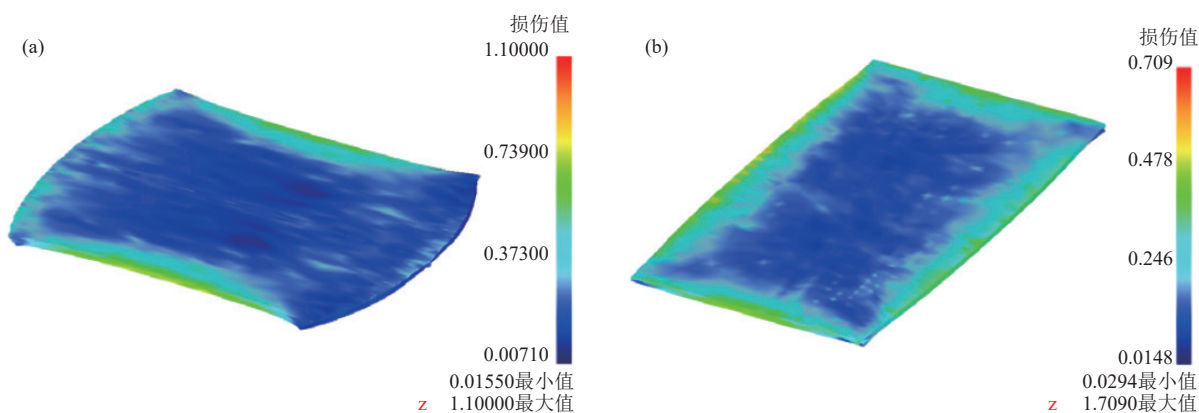


图5 不同轧制方式的损伤分布比较: (a) 单向轧制; (b) 交叉轧制

Fig.5 Damage distribution in different rolling modes: (a) one-way rolling; (b) cross rolling

材料的损伤值越大,越容易发生韧性断裂,越容易产生微裂纹^[17]。因此,从两种轧制方式累积损伤值及其分布来看,交叉轧制比单向轧制发生裂纹

的倾向性小。图6为两种轧制方式的各道次累积应变曲线。从图中可以看出,单向轧制过程中,板材的塑性应变随道次增加得到累积,应变曲线图呈上升趋势;对于交叉轧制,换道次时有明显下降,然后再上升。

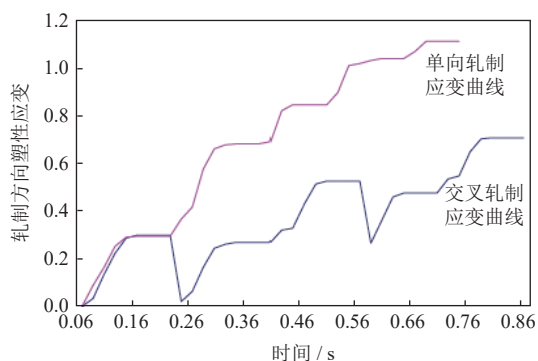


图6 两种不同轧制方式沿轧制方向应变曲线

Fig.6 Strain curves along rolling direction for two different rolling modes

2.5 实际应用

在实际生产中,烧结制备出了尺寸为 $64\text{ mm}\times 660\text{ mm}\times 530\text{ mm}$ 、单重 414 kg 的钨板,烧结相对密度达96%,平均晶粒度 $\leq 40\text{ }\mu\text{m}$ 。以表2中热轧模拟的数据和轧制方式为指导,采用每道次换向进行交叉轧制,轧制5道次,平均道次变形量26%,成功轧制出有效尺寸为 $14.1\text{ mm}\times 1190\text{ mm}\times 1235\text{ mm}$ 的钨板轧坯,总变形率78%,宏观形貌如图7所示。为后续单重大于 800 kg 、厚度大于 80 mm 的大尺寸钨板坯料的轧制提供较好的技术准备。

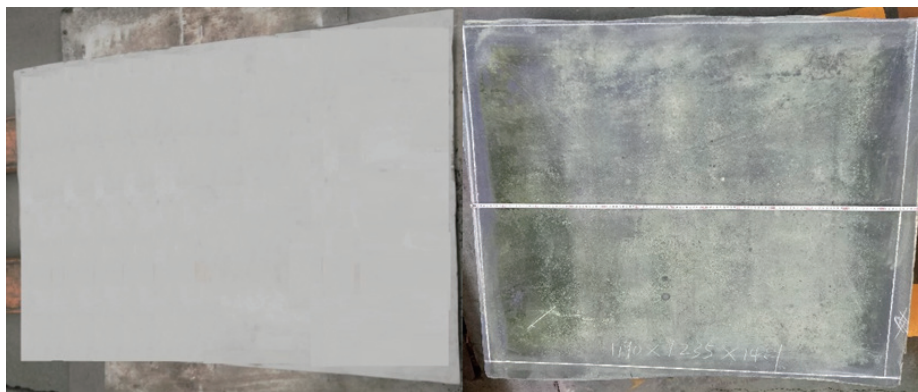


图7 大尺寸钨板坯宏观形貌

Fig.7 Macro appearance of tungsten plates in large size

3 结论

(1) 单向轧制的损伤严重区域主要分布在坯料侧面边缘处, 且中心厚度处较高。坯料侧面边缘靠近中心处密度较低, 同时该处具有较大的损伤值, 易发生裂纹。

(2) 交叉轧制时损伤严重区域比较均匀分布在坯料四周, 平均损伤值比单向轧制小, 由损伤累积而产生韧性裂纹的倾向性小。

(3) 在交叉轧制过程中, 板材在轧制方向上保留了上一道次板材在横向的应变。板材轧制方向的应变曲线到达一个“最高值”后会下降到上一道次横向应变, 形成“最小值”, 交叉轧制时两个应变最大值的差值比单向轧制的小。

参考文献

- [1] Dubinko A, Terentyev D, Bakaeva A, et al. Evolution of plastic deformation in heavily deformed and recrystallized tungsten of ITER specification studied by TEM. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2017, 66: 105
- [2] Chao Y, Dmitry T, Thomas P, et al. Tensile properties of baseline and advanced tungsten grades for fusion applications. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2018, 75: 153
- [3] Aldazabala J, Garcia R C, Meizoso M A, et al. A comparison of the structure and mechanical properties of commercially pure tungsten rolled plates for the target of the European spallation source. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2018, 70: 45
- [4] Krsjak V, Wei S H, Antusch S, et al. Mechanical properties of tungsten in the transition temperature range. *J Nucl Mater*, 2014, 450: 81
- [5] Kohei T, Takeshi M, Akira H, et al. Recrystallization behavior of hot-rolled pure tungsten and its alloy plates during high-temperature annealing. *Nucl Mater Energy*, 2018, 15: 158
- [6] Liu W S, Long L P, Ma Y Z. Research and preparation methods for high-purity tungsten. *Powder Metall Technol*, 2012, 30(3): 223
(刘文胜, 龙路平, 马运柱. 高纯钨研究现状及制备工艺方法综述. *粉末冶金技术*, 2012, 30(3): 223)
- [7] Li X C, Yi M Z, Luo C L, et al. Preparation of uniform fine size tungsten powder by boat-less continuous belt reduction furnace. *Powder Metall Technol*, 2008, 26(3): 163
(李新春, 易茂中, 罗崇玲, 等. 带式无舟皿连续还原炉制备粒度均匀的细颗粒钨粉. *粉末冶金技术*, 2008, 26(3): 163)
- [8] Lin G A. Effect of morphology and particle size distribution of tungsten powder on compacting performance and green compact strength. *Mater Sci Eng Powder Metall*, 2009, 14(4): 260
(林高安. 钨粉形貌与粒度分布对成形性和压坯强度的影响. *粉末冶金材料科学与工程*, 2009, 14(4): 260)
- [9] Shi J, Liu N, Liu A J, et al. Effect of pressing on microstructure and mechanical property of pure tungsten. *Heat Treat*, 2015, 30(4): 31
(石俊, 刘宁, 刘爱军, 等. 压制压力对纯钨显微组织和力学性能的影响. *热处理*, 2015, 30(4): 31)
- [10] Li P, Hua R, Xue K M, et al. Research progress in tungsten and its alloys by plastic processing. *Rare Met Mater Eng*, 2016, 45(2): 529
(李萍, 华睿, 薛克敏, 等. 钨及其合金塑性加工的研究进展. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(2): 529)
- [11] Huang P Y. *Principle of Powder Metallurgy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008
(黄培云. *粉末冶金原理*. 北京: 冶金工业出版社, 2008)
- [12] Shen T L, Dai Y, Lee Y J. Microstructure and tensile properties of tungsten at elevated temperatures. *J Nucl Mater*, 2016, 468: 348
- [13] Brady G B, James D P, Jonathan P L, et al. Mechanisms of deformation and ductility in tungsten—A review. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2018, 75: 248
- [14] Chai R, Fang Z Z, Mark K, et al. Methods for improving ductility of tungsten—A review. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2018, 75: 170
- [15] Zhang X X, Yan Q Z, Yang C T, et al. Recrystallization temperature of tungsten with different deformation degrees. *Rare Met*, 2016, 35(7): 566
- [16] Liu N P, Dan X G, Zhang Y G, et al. Effects of the rolling pass on the microstructure and characteristics of hot rolled tungsten plates. *Rare Met Lett*, 2008, 27(8): 34
(刘宁平, 谈新国, 张永刚, 等. 轧制工艺对热轧钨板材组织和性能的影响. *稀有金属快报*, 2008, 27(8): 34)
- [17] Lennon A M, Ramesh K T. The thermoviscoplastic response of polycrystalline tungsten in compression. *Mater Sci Eng A*, 2000, 276: 9
- [18] Wang J, Zhao G Q, Li M J. Establishment of processing map and analysis of microstructure on multi-crystalline tungsten plastic deformation process at elevated temperature. *Mater Des*, 2016, 103: 268
- [19] Wang J, Zhao G Q, Chen L A, et al. A comparative study of constitutive models for powder metallurgy tungsten at elevated temperature. *Mater Des*, 2016, 90: 91
- [20] Freudenthal A M. *The Inelastic Behavior of Engineering Materials and Structures*. New York: John Wiley and Sons, 1950
- [21] Oyane M, Sato T, Okimoto K, et al. Criteria for ductile fracture and their applications. *J Mech Working Technol*, 1980, 4(1): 65