

大型弯刀板锻件热锻成形仿真及工艺分析

冯超, 王荣奇, 高轲, 韩昊忱

(吉林大学机械与航空航天工程学院 数控装备可靠性教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对大型弯刀板类锻件的高温自由锻工艺进行了研究分析, 通过 Deform-3D 软件模拟了预制不等厚板坯成形弯刀板锻件的锻造过程, 分析了成形过程中不同工艺参数对弯刀板锻件成形曲率的影响。同时, 将再结晶模型和损伤累积模型集成到模拟过程中, 预测了锻件内部的晶粒组织演化和损伤行为。结果表明: 弯刀板锻件成形后的曲率半径/板宽比会随着预制坯内外侧厚度比和终锻进砧/板厚比的增大而增大, 随着终锻料宽/板厚比的增大而减小。根据模拟结果, 建立了各工艺参数与成形后弯刀板锻件曲率半径之间的预估关系。该工艺有利于提高材料利用率, 改善锻件内部晶粒组织, 并控制损伤开裂的发生。

关键词: 大锻件; 弯刀板; 成形曲率; 自由锻; 高温变形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.004

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0026-09

Simulation and process analysis on hot forging for large machete plate forgings

Feng Chao, Wang Rongqi, Gao Ke, Han Haochen

(Key Laboratory of CNC Equipment Reliability, Ministry of Education, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: For the large machete plate forgings, the high-temperature free forging process was studied and analyzed. Then, the forging process of pre-fabricated unequal thickness billet to form machete plate forgings was simulated by Deform-3D software, and the influences of different process parameters on forming curvature of machete plate forgings in forming process were analyzed. Meanwhile, the grain recrystallization model and damage accumulation model were integrated into the simulation process to predict the grain structure evolution and cracking behavior inside the forgings. The results show that the ratio of curvature radius to plate width for machete plate of forgings after forming increases with increasing of thickness ratio of inner and outer sides for the preform and the ratio of final forging feed-length to plate thickness, and decreases with increasing of the ratio of plate width to plate thickness in final forging. Based on the simulation results, the estimated relationship between each process parameter and the curvature radius of machete plate forgings after forming is established. Meanwhile, the process is beneficial to increase the utilization rate of materials, improves the grain structure inside the forgings and controls the occurrence of damage and cracking.

Key words: large forgings; machete plate; forming curvature; free forging; high-temperature deformation

大型弯刀形板类锻件是大型关键装备中的重要部件(图1)^[1-2], 其成形是大锻件生产制造中的难题, 特别是数十吨甚至上百吨的大型弯刀板锻件, 由于其重量大、形状复杂, 锻造过程中难以有效控制其成形尺寸和材料内部性能。此外, 大型板环类锻件的锻造操作难度高、时间长、工步多, 变形区域的温度不易控制, 给实际生产带来困难^[3]。数值模拟仿真方法是预测锻造工件变形和组织演化的有

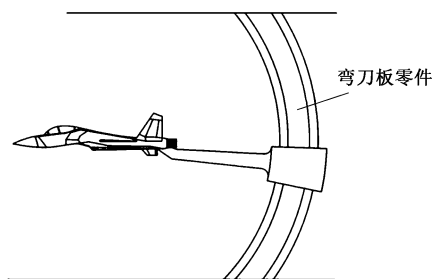


图1 某迎角调节装置中的弯刀板零件

Fig. 1 Machete plate part in an for angle of attack adjusting device

效手段, 在高温锻造成形加工中得到广泛应用^[4-6]。

本文针对大型弯刀板类锻件的成形过程进行分析和有限元模拟, 结果表明, 采用预制不等厚板坯进行自由锻成形, 能够提高材料利用率, 有利于改

收稿日期: 2021-05-11;; 修订日期: 2021-08-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51805204);
吉林省教育厅“十三五”科技项目(JJKH20200976KJ)

作者简介: 冯超(1987-), 男, 博士, 讲师

E-mail: fengchao@jlu.edu.cn

善锻件内部的组织性能、提高产品质量。根据数值模拟结果分析了不同工艺参数对成形效果的影响，并确定了弯刀板锻件成形后的曲率半径与锻造工艺参数之间的关系。

1 大型弯刀板锻件工艺分析

为了实现大型弯刀板锻件的弯曲变形，采用了不等厚的预制坯进行自由锻成形。一般自由锻拔长工艺得到的坯料通常为平板坯，为了节省材料、提高工艺性，采用一模两件方法预制不等厚坯料^[7]。弯刀板锻件的自由锻工艺方案流程如图2所示，主要的工艺方案包括以下两步。

(1) 预制坯：以大型长方钢坯为初始坯料，将其加热至始锻温度并保温均热，使用上下对称的凸面型砧进行预制坯锻造，得到截面为哑铃形的长条坯料。将哑铃形截面的长条坯料沿中心线切割，得到两块不等厚的预制坯。

(2) 终锻拔长：将预制坯加热至始锻温度并保温均热，然后将其送进终锻模具中。使用上、下砧带有导流槽和两侧带有非对称挡板的终锻模具进行逐步锻造拔长，每次送进压下后仅上、下砧之间的材料区域发生变形。由于预制坯内外侧的厚度不同，模具压下时预制坯厚侧区域减薄并迫使材料向弯曲内侧流动，经过多个压下工步的变形累积后，预制坯逐步向内侧弯曲，实现弯刀板类锻件的锻造成形。

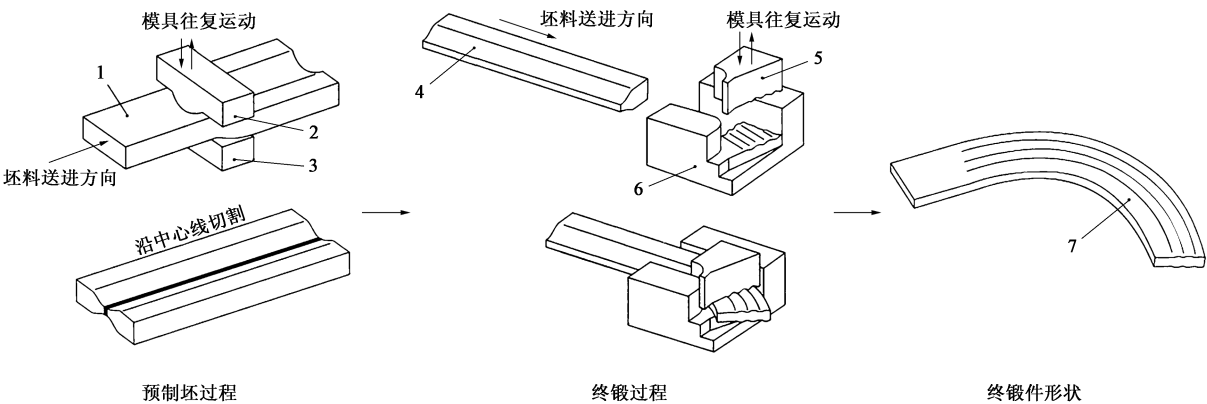


图2 大型弯刀板锻件成形工艺流程示意图
1. 长方坯 2. 预制坯上模 3. 预制坯下模 4. 预制坯 5. 终锻上模 6. 终锻下模 7. 弯刀板锻件
Fig. 2 Schematic diagram of forming process flow for large machete plate forgings

2 高温自由锻模拟及工艺参数分析

预制坯过程模拟如图3所示，成形过程相对简单，经过预制坯步骤后，得到两侧不等厚的预制坯，其薄侧与厚侧的厚度分别为 T_i 与 T_o ，宽度为 W ，长

度为 L ，得到的预制坯将用于弯刀板锻件的终锻过程。对大型弯刀板锻件的终锻拔长过程进行数值模拟分析，对比不同工艺条件下的成形效果。有限元模拟计算中，弯刀板锻件采用05Cr17Ni4Cu4Nb马氏体不锈钢进行高温锻造成形，材料的高温本构模型通过热模拟实验获得^[8-9]。

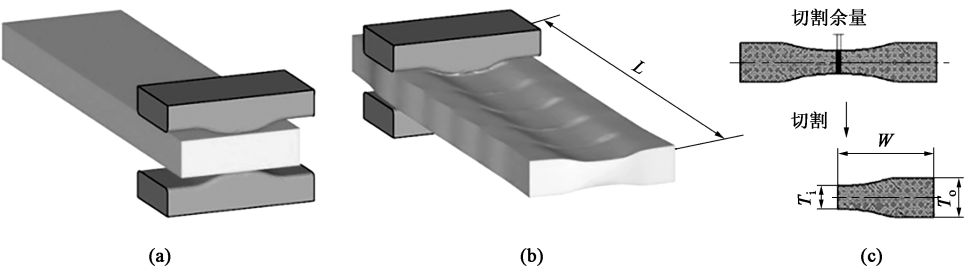


图3 预制坯过程
(a) 工序初始 (b) 工序结束 (c) 预制坯截面形状
Fig. 3 Preform process
(a) Beginning of process (b) End of process (c) Section shape of preformed billet

终锻过程中, 将不等厚预制坯加热至始锻温度并保温均热, 然后将其送入自由锻终锻拔长模具中进行多工步锻造拔长。由于 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢在高温下的塑韧性对温度较敏感, 采用 1150 °C 为终锻起始温度, 且终锻结束温度不低于 1000 °C, 以获得较好的微观组织和成形能力^[10-11]。终锻上模的压下速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 预制坯的未变形端由操作机夹持并按照终锻上模压下速度的 0.5 倍向下运动, 以减少

和避免引起预制坯上、下非对称变形而导致锻件产生翘曲缺陷; 终锻拔长模具的上、下砧导流槽方向与坯料送进方向之间的夹角为 25° 。由于终锻拔长每次压下的工艺参数一致, 因此, 采用了 Deform-3D 文本运行模式实现了多工步的重复压下拔长, 简化了模拟设置步骤, 提高了分析效率^[12-13]。终锻成形过程的有限元模拟结果如图 4 所示, 随着预制坯的送进和上模的往复压下, 坯料逐步弯曲并最终成形得到弯刀板锻件。

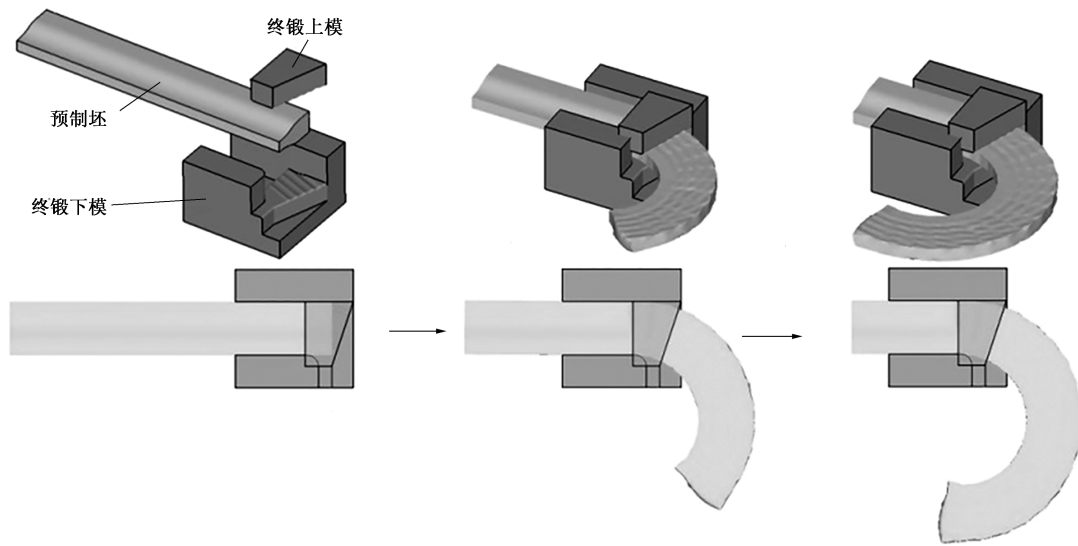


图 4 终锻变形过程数值模拟

Fig. 4 Numerical simulation of deformation process in final forging

在模具结构和预制坯形式基本不变的情况下, 预制坯内外两侧的厚度比、终锻每工步的进砧量和料宽/板厚比参数是影响弯刀板锻件成形效果的重要因素。图 3 中, 预制坯内外侧厚度比 t 定义为薄侧 (弯曲内侧) 与厚侧 (弯曲外侧) 的厚度比值, 即 $t = T_i/T_o$ 。进砧/板厚比 θ 定义为 $\theta = \Delta L/T_i$, 其中 ΔL 为终锻每道次送进的进给量。料宽/板厚比 λ 定义

为预制坯宽度与其薄侧厚度的比值, 即 $\lambda = W/T_i$ 。本文建立了不同预制坯内外侧厚度比、进砧/板厚比和料宽/板厚比参数的终锻成形有限元模型, t 选择为 0.50、0.60 和 0.75, λ 选择为 2.50、4.17 和 5.83, θ 选择为 0.83、1.25、1.67 和 2.08。不同参数下预制坯的截面轮廓如图 5 所示, 采用完全正交进行模拟, 分析不同工艺条件对弯刀板锻件成形的

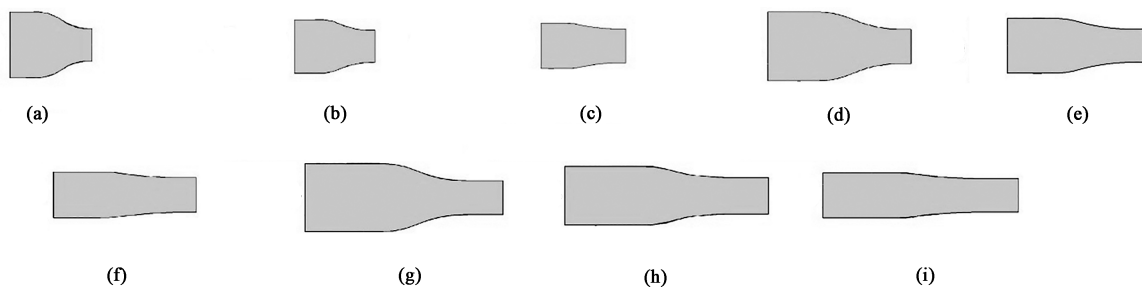


图 5 不同参数下预制坯的截面轮廓

(a) $\lambda = 2.50, t = 0.50$ (b) $\lambda = 2.50, t = 0.60$ (c) $\lambda = 2.50, t = 0.75$ (d) $\lambda = 4.17, t = 0.50$
(e) $\lambda = 4.17, t = 0.60$ (f) $\lambda = 4.17, t = 0.75$ (g) $\lambda = 5.83, t = 0.50$ (h) $\lambda = 5.83, t = 0.60$ (i) $\lambda = 5.83, t = 0.75$

Fig. 5 Section profiles of preforms with different parameters preformed billets

影响规律。

2.1 预制坯内外侧厚度比 t 的影响

对比了 $\lambda=4.17$ 、 $\theta=1.67$ 条件下不同厚度比 t 的预制坯的终锻拔长数值模拟结果。预制坯内外侧厚度比 t 选择为 0.50、0.60 和 0.75, 终锻前预制坯的截面轮廓如图 5 所示, 得到终锻模拟结果如图 6 所示。对比可见, 由于 t 越大, 预制坯薄侧与厚侧的尺寸越接近, 即每砧的压下率越小, 因此, 坯料变形区域的应变也越小, 成形后弯刀板锻件外侧中

线位置的等效应变分布结果如图 7a 所示, 其中, ε_e 为等效应变, 可见等效应变受预制坯内外侧厚度比的影响显著。同时, 如图 6 所示, 随着预制坯内外侧厚度比 t 增大, 材料变形减小, 预制坯向内侧弯曲的程度逐渐减小, 预制坯内外侧厚度比 t 对弯刀板锻件的弯曲程度有很大影响。提取成形后的弯刀板锻件中心线曲率半径 R 与预制坯宽度 W 的比值作为描述弯刀板锻件弯曲程度的参数, 根据模拟结果可得到 R/W 随 t 的变化趋势如图 7b 所示。

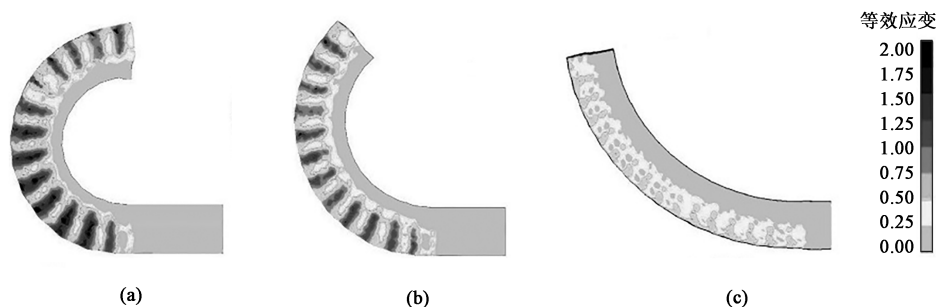


图6 不同预制坯内外侧厚度比时的终锻成形结果

(a) $t=0.50$ (b) $t=0.60$ (c) $t=0.75$

Fig. 6 Final forging results under different thickness ratios of inner and outer sides for preformed billets

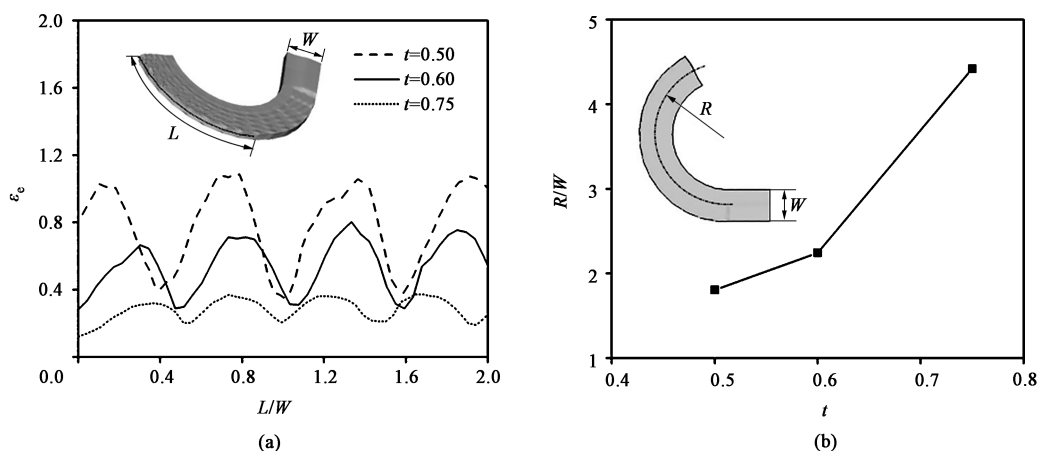


图7 不同预制坯内外侧厚度比时的终锻模拟结果

(a) 锻件外侧中线位置的等效应变分布 (b) R/W 随 t 的变化

Fig. 7 Final forging simulation results under different inside thickness ratios of inner and outer sides for preformed billets

(a) Distribution of equivalent strain at central line position outside forgings (b) Change of R/W with t

2.2 进砧/板厚比 θ 的影响

针对不同进砧/板厚比 θ 的终锻拔长过程进行数值模拟, 设定预制坯的料宽/板厚比 λ 为 4.17, 预制坯内外侧厚度比 t 为 0.60, 预制坯的截面轮廓如图 5 所示。进砧/板厚比 θ 选择为 0.83、1.25、1.67 和 2.08, 分别进行终锻拔长的数值模拟, 得到的计算结果如图 8 所示。可见: 进砧/板厚比 θ 越大, 每砧的坯料送进量越大, 因此, 相邻砧之间的等效应变分布越不均匀; θ 越小, 相邻砧之间的等效应变分布

越均匀, 成形后弯刀板锻件外侧中线位置的等效应变分布如图 9a 所示。但 θ 过小会导致进给量减少, 成形时间会明显延长, 不利于提高加工效率。根据模拟结果测量得到 R/W 随 θ 的变化趋势如图 9b 所示, 可见 θ 越大, 成形后弯刀板锻件的弯曲程度逐渐减小。

2.3 料宽/板厚比 λ 的影响

针对不同料宽/板厚比 λ 的预制坯的终锻拔长过程进行数值模拟, 设定预制坯进砧宽/板厚比 θ 为 1.25, 预制坯内外侧厚度比 t 为 0.50, 料宽/板厚比

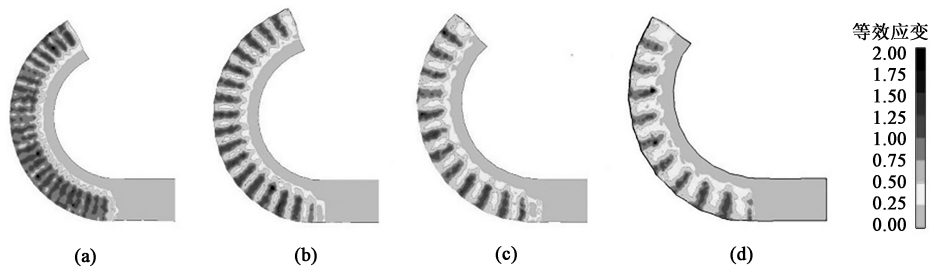


图 8 不同砧宽/板厚比下的终锻成形结果

(a) $\theta=0.83$ (b) $\theta=1.25$ (c) $\theta=1.67$ (d) $\theta=2.08$

Fig. 8 Final forging results under different anvil width/plate thickness ratios

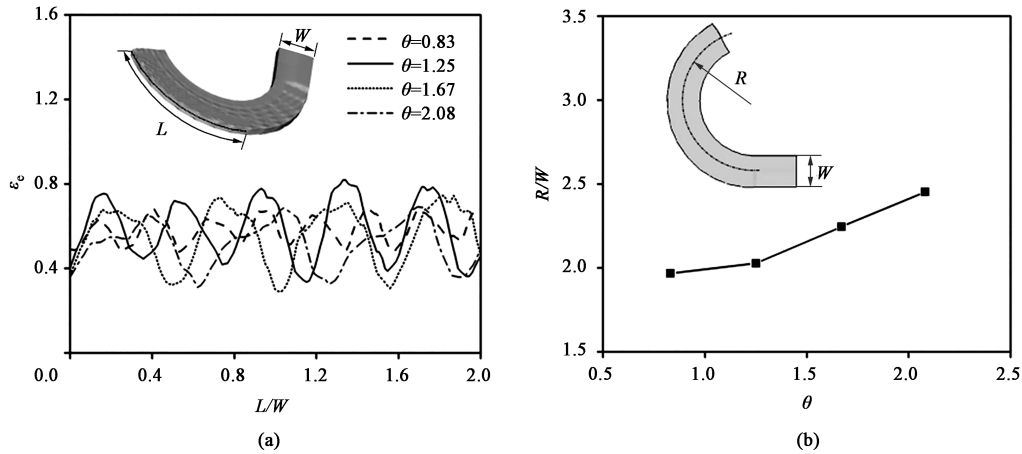


图 9 不同砧宽/板厚比下的终锻模拟结果

(a) 锻件外侧中线位置的等效应变分布 (b) R/W 随 θ 的变化

Fig. 9 Simulation results of final forging under different anvil width/plate thickness ratios

(a) Distribution of equivalent strain at center line position outside forgings (b) Change of R/W with θ

λ 选择为 2.50、4.17 和 5.83，预制坯截面轮廓见图 5。进行终锻拔长过程的数值模拟，得到计算结果如图 10 所示。对比可见，随着料宽/板厚比 λ 的增大，预制坯表面接砧位置的等效应变越均匀，这主要是由于预制坯的宽度增加，承载面积增大，接砧位置坯料表层的变形集中现象越不明显。对比预制坯外侧中线的等效应变分布（图 11a），可见等效应变均值随 λ 增大而提高，但等效应变的波动幅度有所降低。根据模拟

结果可知， R/W 随 λ 的增大逐步减小，如图 11b 所示。

2.4 弯刀板锻件曲率半径预估模型

由上述分析可见，弯刀板锻件成形过程中各工艺参数对最终成形锻件的弯曲半径均有影响，为了便于制定工艺方案并确定工艺参数，可以根据大量的数值模拟结果建立弯刀板锻件的曲率半径预测模型。将不同工艺参数下的数值模拟结果进行汇总，成形后的弯刀板锻件形状如图 12 所示，并测量成形

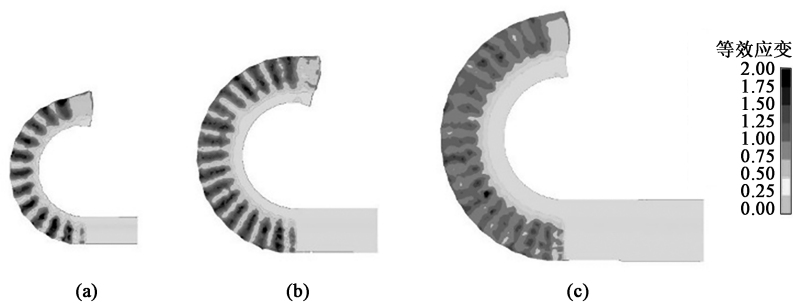


图 10 不同料宽/板厚比下的终锻成形结果

(a) $\lambda=2.50$ (b) $\lambda=4.17$ (c) $\lambda=5.83$

Fig. 10 Final forging results under different material width/plate thickness ratios

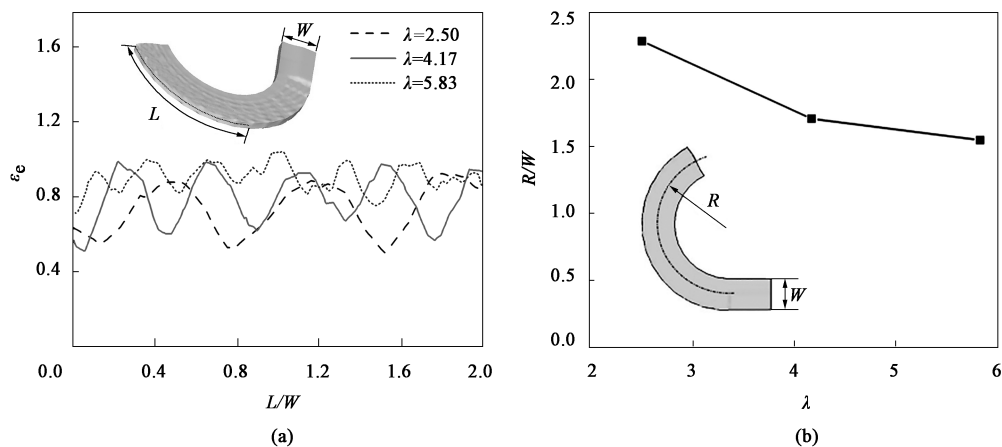


图 11 不同料宽/板厚比下的终锻模拟结果

(a) 锻件外侧中线位置的等效应变分布 (b) R/W 随 λ 的变化

Fig. 11 Simulation results of final forging under different width/thickness ratios

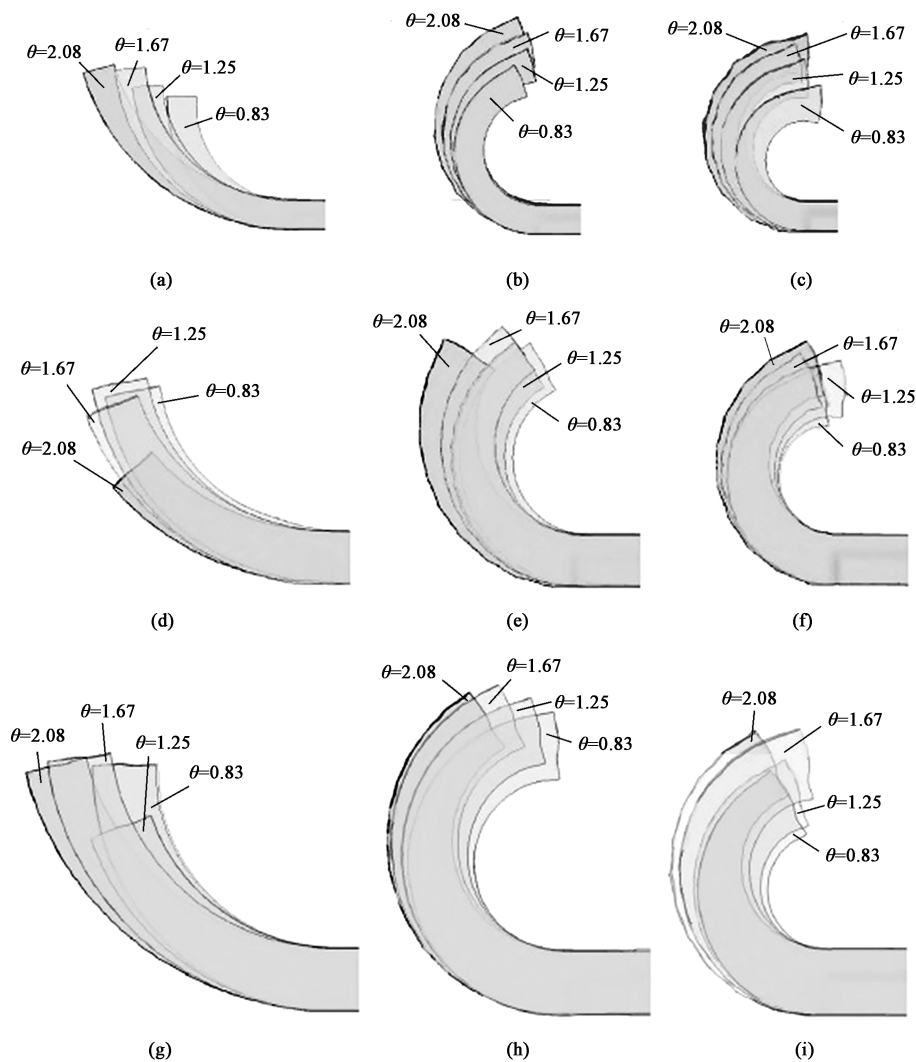
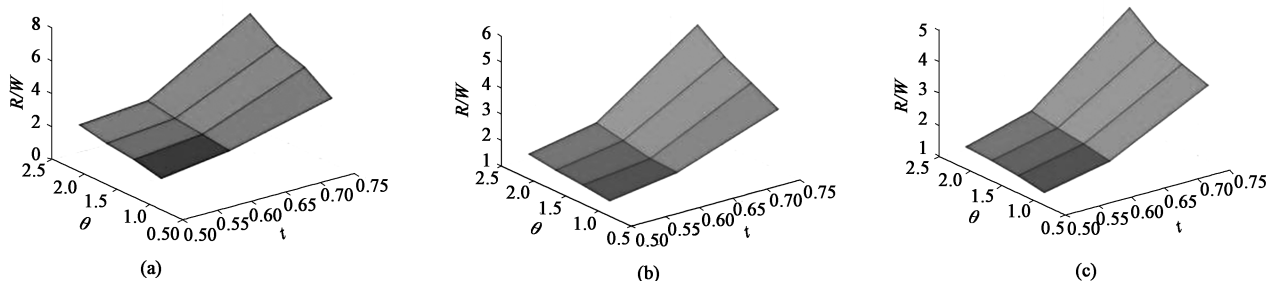
(a) Distribution of equivalent strain at center line position outside forgings (b) Change of R/W with λ 

图 12 不同工艺参数下的弯刀板终锻成形模拟结果

(a) $\lambda=2.50, t=0.50$ (b) $\lambda=2.50, t=0.60$ (c) $\lambda=2.50, t=0.75$ (d) $\lambda=4.17, t=0.50$ (e) $\lambda=4.17, t=0.60$ (f) $\lambda=4.17, t=0.75$ (g) $\lambda=5.83, t=0.50$ (h) $\lambda=5.83, t=0.60$ (i) $\lambda=5.83, t=0.75$

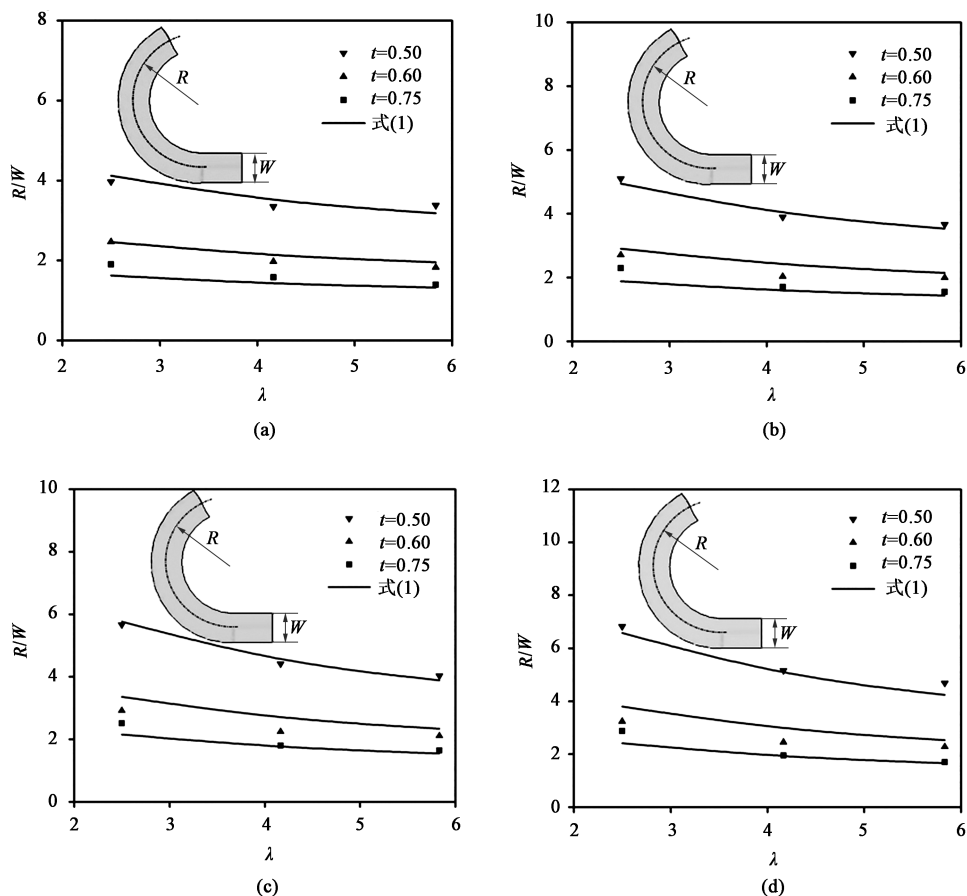
Fig. 12 Simulation results of final forging for machete plate under different process parameters

图 13 有限元模拟得到的不同工艺参数下弯刀板终锻成形后的 R/W 值(a) $\lambda = 2.50$ (b) $\lambda = 4.17$ (c) $\lambda = 5.83$ Fig. 13 Values of R/W for machete plate after final forging under different process parameters obtained by finite element simulation

后弯刀板锻件中心线曲率半径与板宽的比值 R/W ，如图 13 所示。将 θ 、 t 、 λ 与 R/W 之间的关系进行拟合，得到在一定工艺范围内弯刀板锻件的曲率半径预估表达式为：

$$R/W = [\exp(2.597t) - 2.08]\theta/\lambda + \exp(1.791t) - 1.352 \quad (1)$$

不同工艺参数下有限元计算的 R/W 结果与式 (1) 的计算结果对比如图 14 所示，可见二者吻合良好。

图 14 不同工艺参数下模拟得到的 R/W 值与式 (1) 计算结果的对比(a) $\theta = 0.83$ (b) $\theta = 1.25$ (c) $\theta = 1.67$ (d) $\theta = 2.08$ Fig. 14 Comparison of R/W values between simulation result and calculation result by formula (1) under different process parameters

3 锻件内部组织演化与断裂预测

根据热模拟实验建立 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢的再结

晶模型和损伤累积模型，如式 (2) 和式 (3) 所示，并集成到 Deform-3D 软件计算中，针对大型弯刀板锻件的热锻加工过程进行数值模拟。有限元模型中设置弯刀板锻件坯料的初始晶粒尺寸为 $200 \mu\text{m}$ ，对预制

坯和终锻过程中的晶粒演化和损伤开裂进行预测。

$$\begin{cases} D_{\text{drx}} = 6.946 \times 10^4 \times \left[\dot{\varepsilon}_e \exp\left(\frac{426822.1}{R_n T}\right) \right]^{-0.2419} \\ \bar{D} = D_0(1 - X_{\text{drx}}) + D_{\text{drx}} X_{\text{drx}} \\ X_{\text{drx}} = 1 - \exp\left[-1.2406\left(\frac{\varepsilon_e - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^{0.4698}\right], \quad \varepsilon_e \geq \varepsilon_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{drx} 为动态再结晶晶粒尺寸; D_0 为初始晶粒尺寸; \bar{D} 为再结晶后的晶粒平均尺寸; X_{drx} 为再结晶分数; ε_e 和 $\dot{\varepsilon}_e$ 为等效应变与等效应变速率; T 为变形时的温度; R_n 为气体常数, 为 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; ε_c 为再结晶临界应变, $\varepsilon_c = 0.002648Z^{0.12154}$; ε_p 为峰值应变, $\varepsilon_p = 0.002973Z^{0.12154}$; Z 为 Zener-Hollomon 参数, $Z = \dot{\varepsilon}_e \exp[426822.1/(R_n T)]$ 。

$$D_m = \sum_{i=1}^M \frac{\left(1 + \frac{3\sigma_m}{\sigma_e}\right) \Delta\varepsilon_e^i}{12.677\varepsilon_e^{0.09526} \exp\left(-9.9611 \times 10^3 \times \left|\frac{1}{T} - \frac{1}{1430}\right|\right)} \quad (3)$$

式中: D_m 为损伤累积因子, 当 D_m 达到 1 时, 发生断裂失效; i 为变形增量步, $i = 1, 2, 3, \dots, M$; M 为总的增量步数; σ_m 为平均应力; σ_e 为等效应力; $\Delta\varepsilon_e^i$ 为第 i 步中的等效应变增量。

模拟得到的预制坯变形后的再结晶分数和晶粒尺寸分布结果如图 15 所示, 其中, t 为 0.50、 θ 为 1.25、 λ 为 4.17。可见, 在预制坯过程中, 预制坯的薄侧区域材料有较大的变形量, 再结晶完成度高, 晶粒得到明显细化。根据预测结果, 薄侧区域的再结晶与预制坯两侧厚度的比值有关, 厚度相差越大, 变形量越大, 再结晶越充分。同时, 进砧量对薄侧再结晶区域的均匀程度有影响, 进砧量越大, 砧下中心区域与接砧区域的变形量的差距越大, 变形分布越不均匀, 导致晶粒尺寸的均匀性降低。

终锻过程中组织演化预测结果如图 16 所示, 终锻过程中坯料厚侧区域材料的变形量增大, 再结晶充分, 晶粒完全细化。根据该工艺模拟结果, 在 1000°C 以上、应变速率约为 0.05 s^{-1} 的条件下进行锻造, 压下率达到 40% 时锻件心部可以获得较充分的再结晶效果, 平均晶粒尺寸约为 $50 \mu\text{m}$ 。

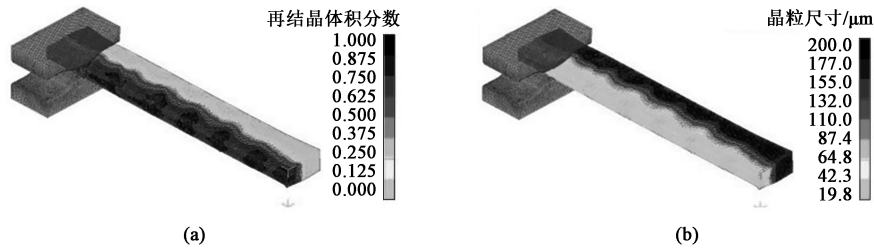


图 15 预制坯过程坯料再结晶体积分数 (a) 与晶粒尺寸分布 (b) 预测结果 (1/2 坯料模型)

Fig. 15 Prediction results of recrystallization fraction (a) and grain size distribution (b) for billet during preforming process (1/2 billet model)

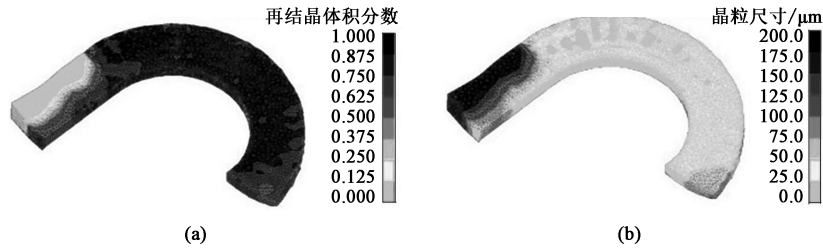


图 16 终锻过程坯料再结晶体积分数 (a) 与晶粒尺寸分布 (b) 预测结果

Fig. 16 Prediction results of recrystallization fraction (a) and grain size distribution (b) for billet during final forging

预制坯和终锻过程的损伤累积预测结果如图 17 所示。在预制坯时, 坯料厚侧区域存在拉应力状态, 损伤累积增大。在终锻过程中, 弯刀板锻件曲率外侧的区域材料受到一定的拉应力, 损伤累积继续增大, 该工艺中的损伤累积峰值出现在弯刀锻件外侧棱边处, 但尚未达到开裂阈值。考虑到 05Cr17Ni4 Cu4Nb

钢的锻造温度区间较窄, 为防止棱角开裂, 可对坯料预倒棱, 或增设模前加热炉对坯料进行温度控制。

4 结语

提出了采用不等厚预制坯成形大型弯刀板锻件

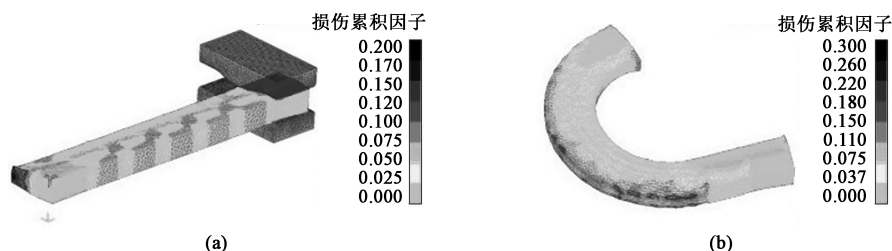


图 17 预制坯 (a) 与终锻 (b) 过程坯料损伤分布预测结果

Fig. 17 Prediction results of damage distribution for billet during preforming (a) and final forging (b) processes

的自由锻工艺方法, 并使用 Deform-3D 软件对变形工艺过程进行了仿真模拟。结果表明, 预制坯内外侧厚度比 t 、进砧/板厚比 θ 、料宽/板厚比 λ 参数对弯刀板锻件成形后的弯曲程度有显著影响, 且锻件曲率半径/板宽比 R/W 会随着 t 与 θ 的增加而增大, 随着 λ 的增加而减小。根据模拟结果建立了各工艺参数与成形后弯刀板锻件曲率半径之间的预估关系, 同时将再结晶演化模型和损伤累积模型集成到 Deform-3D 软件中, 对弯刀板锻件成形过程中的组织演化 and 高温损伤开裂进行预测。结果表明, 经过预制坯与终锻拔长后弯刀板锻件内部的组织分布均匀, 且损伤累积在阈值之内, 不会发生热开裂缺陷, 得到的模拟分析结果能够指导实际加工工艺方案的制定。

参考文献:

- [1] 卢章树, 高春鹏. DFD-03 风洞大弯刀尾撑装置设计 [J]. 航空精密制造技术, 2016, 52 (2): 40-43.
Lu Z S, Gao C P. Design of DFD-03 wind tunnel large machetes tail device [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52 (2): 40-43.
- [2] 陈德华, 唐良锐, 许新, 等. 跨声速风洞试验支撑装置 [P]. 中国: CN105527069A, 2016-04-27.
Chen D H, Tang L R, Xu X, et al. Support device for transonic wind tunnel test [P]. China: CN105527069A, 2016-04-27.
- [3] 任秀凤, 牛余刚, 银伟, 等. 大型冲孔类自由锻环锻造工艺方法 [J]. 金属加工: 热加工, 2017, (13): 14-15.
Ren X F, Niu Y G, Yin W, et al. Free forging process of large punching ring [J]. MW Metal Forming, 2017, (13): 14-15.
- [4] 张梓煜, 曾攀, 雷丽萍. 基于机器学习的大锻件拔长变形预测 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 209-216.
Zhang Z Y, Zeng P, Lei L P. Prediction of drawing deformation for heavy forgings based on machine learning [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 209-216.
- [5] 骆俊廷, 赵静启, 杨哲懿, 等. 基于 Deform 软件二次开发和 BP 神经网络的 TA15 多向锻造微观组织预报 [J]. 航空学报, 2021, 42 (12): 327-344.
Luo J T, Zhao J Q, Yang Z Y, et al. Microstructure prediction of multi-directional forging for TA15 alloy by the secondary [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42 (12): 327-344.
- [6] 何利东, 李海荣. 物理模拟及 DEFORM 仿真技术在大型锻件镦粗工艺中的应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55 (6): 100-104.
He L D, Li H R. Application of physical simulation and DEFORM simulation technology in upsetting process improvement of large forgings [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2020, 55 (6): 100-104.
- [7] 高文成. 扇形板的双弧形板材锻造 [J]. 一重技术, 2019, (6): 63-64, 71.
Gao W C. Segments forged with double-curve plate [J]. CFHI Technology, 2019, (6): 63-64, 71.
- [8] Mirzadeh H, Najafizadeh A. Hot deformation and dynamic recrystallization of 17-4PH stainless steel [J]. ISIJ International, 2013, 53 (4): 680-689.
- [9] Feng C, Zhang L, Wu J, et al. Ductile fracture behavior and flow stress modeling of 17-4PH martensitic stainless steel in tensile deformation at high temperature [J]. Materials Research Express, 2020, 7 (4): 046503.
- [10] 陈波. 17-4PH 钢热变形特性与高温铁素体析出条件研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
Chen B. Study on the Thermal Deformation Characteristics of 17-4PH Steel and the Precipitation Conditions of δ -ferrite [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [11] 胡伟星, 刘耀华, 孙贤熙, 等. 改善 17-4PH 不锈钢热塑性和机械性能的途径 [J]. 上海金属, 1993, 15 (6): 39-41.
Hu W X, Liu Y H, Sun X X, et al. Technical ways of improving the hot ductility and mechanical properties of stainless steel 17-4PH [J]. Shanghai Metals, 1993, 15 (6): 39-41.
- [12] 孙曙宇, 傅建. 文本模式下的 DEFORM 应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2008, 43 (1): 99-102.
Sun S Y, Fu J. Application of DEFORM based on text-only mode [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2008, 43 (1): 99-102.
- [13] 李馨家. 基于 DEFORM-3D 的热锻成形多尺度模拟软件的开发与应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
Li X J. Development and Application of Multi-scale Simulation Software Based on Deform-3D for Hot Forging [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.