

基于流变行为和热加工图的全地形车履带板锻造工艺

刘 辉¹, 江 莉², 何欢欢¹

(1. 新疆应用职业技术学院 机电工程系, 新疆 奎屯 833200; 2. 新疆职业大学 机械电子工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830013)

摘要: 为得到组织均匀、晶粒度符合要求且无锻造缺陷的某履带板高性能锻件, 首先, 通过热压缩实验获取了 42CrMo 钢的流变数据, 并构建了 Arrhenius 本构方程。结果表明: 当应变速率为 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 、温度高于 $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 材料的真实应力-真实应变曲线存在明显的峰值, 软化效应明显, 其动态再结晶软化效应显著大于加工硬化效应; 当应变速率较高时, 材料的应力峰值不明显, 软化效果不显著, 这说明在高应变速率下, 材料来不及完全发生再结晶, 其软化机制为动态回复。其次, 构建了 42CrMo 钢在不同变形量下的热加工图, 发现 42CrMo 钢的失稳高风险区主要位于低温、高应变速率区域, 也有少量位于高温、低应变速率区域; 当对数应变速率小于 -2.5 、温度为 $850 \sim 1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 材料在热加工时具有较高的热加工稳定性。再次, 使用数值仿真分析了某履带板的锻造成形过程, 得到了成形效果良好, 无折叠、欠填充等锻造缺陷的锻件, 各方面指标均达到了设计要求。最后, 通过生产试制验证了锻造工艺的可行性, 通过微观组织分析验证了推荐的锻造温度和应变速率能够得到细小、均匀的组织。

关键词: 热压缩; Arrhenius 本构方程; 流变行为; 热加工图; 履带板

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.003

中图分类号: TG316; TG146.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 08-0017-08

Forging process on all-terrain vehicle track shoe based on rheological behavior and thermal processing map

Liu Hui¹, Jiang Li², He Huanhuan¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Career Technical College, Kuitun 833200, China;

2. Mechanical and Electronic Engineering Institute, Xinjiang Vocational University, Urumqi 830013, China)

Abstract: In order to obtain the high-performance forgings of a certain track shoe with uniform structure, grain size meeting the requirements and no forging defects, firstly, the rheological datas of 42CrMo steel were obtained by thermal compression experiments, and the Arrhenius constitutive equation was constructed. The results show that when the strain rate is $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ and the temperature is higher than $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, there is a significant peak in the true stress-true strain curve of material, and the softening effect is obvious. The dynamic recrystallization softening effect is significantly greater than the work hardening effect. When the strain rate is higher, the peak stress of material is not obvious, and the softening effect is not significant, which indicates that under the high strain rate, the material cannot fully recrystallize in time, and its softening mechanism is dynamic recovery. Secondly, the thermal processing maps of 42CrMo steel under different deformation amounts were constructed, and it is found that the high-risk areas of instability for 42CrMo steel are mainly located in the low temperature and high strain rate areas, and a few are located in the high temperature and low strain rate areas. When the logarithmic strain rate is less than -2.5 and the temperature is $850 \sim 1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$, the material has high thermal processing stability during the thermal processing. Furthermore, the forging process of a certain track shoe was analyzed by numerical simulation, the forgings with good forming effect and no forging defects such as folding and insufficient filling was obtained, and all indicators meet the design requirements. Finally, the feasibility of the forging process was verified by trial production, and the microstructure analysis verifies that the recommended forging temperature and strain rate can obtain fine and uniform microstructure.

Key words: thermal compression; Arrhenius constitutive equation; rheological behavior; thermal processing map; track shoe

随着我国工程机械的快速发展, 对全地形车的

需求日益上涨。履带板作为全地形车的核心部件之一, 是全地形车能够正常运行的重要保障。由于履带板服役时受到高压、冲击载荷的影响, 极易发生磨损、断裂失效^[1]。传统铸造履带板难以在高压、冲击载荷工况下长期服役^[2], 因此, 近年来高性能锻造履带板获得了广泛的关注和研究^[3]。在国外, 俄罗斯、德国、美国等较早地研制出了履带板的锻

收稿日期: 2022-11-22; 修订日期: 2023-02-26

基金项目: 新疆应用职业技术学院重点教改项目 (XYZY2021 KYB001)

作者简介: 刘 辉 (1977-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 76721819@qq.com

造成形工艺并替代了老旧的铸造工艺,显著提升了履带零件的质量和服役寿命,且大幅降低了履带板的重量^[3-4]。国内对于履带的锻造工艺研究起步较晚,但近年来也取得了可观的成果。陈利华等^[5]为了实现履带的轻量化,使用精密成形技术,设计了履带板的复合锻造工艺。张敏等^[6]利用数值模拟技术设计了某双齿履带板的锻造工艺,得到了强度、硬度优异的回火马氏体加铁素体组织的履带板锻件。孙兴辰^[7]结合有限元和正交实验对推土机履带板的锻造工艺进行了优化,得到了最佳飞边槽设计和最佳变形温度。李科锋等^[8]应用 DEFORM 软件,对下板体的加强筋成形和锻造成形进行了模拟分析,依据分析结果进行了方案设计与改进,最终确定了薄壁深长筋履带下板体成形的最佳工艺方案。徐磊^[9]提出了湿地履带板的锻造新工艺,替代了原来的铸造工艺,从而提高了湿地履带板的质量和可靠性。目前,针对履带板锻造成形工艺的研究主要集中于提升材料利用率、降低成形载荷、消除欠填充及消除折叠缺陷等方面,对于履带板锻造后微观组织控制方面的研究还较少。本文旨在保证无成形缺陷的前提下,获得微观组织均匀的某履带板锻件。

首先,基于热压缩实验数据构建材料的本构方程及热加工图,用于指导某履带板的锻造工艺设计;然后,使用数值仿真技术分析某履带板的成形过程,得到无锻造缺陷的锻造工艺;最后,进行生产试制和微观组织分析,验证热加工工艺窗口的合理性,得到组织均匀的某履带板锻件,为提升锻造履带板的力学性能提供了参考。

1 实验材料及方案

1.1 材料成分

由于 42CrMo 钢具有较好的强度、韧性和耐磨性,被广泛应用于需要具备承载、耐磨能力的结构件中^[10-11],如汽车曲轴、冲压件、转轴等。某履带板也选用 42CrMo 钢进行制造,其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 42CrMo 钢的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 42CrMo steel
(%, mass fraction)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Fe
0.41	0.70	0.23	0.001	0.012	0.008	0.97	0.18	0.004	余量

1.2 热压缩实验

由于各厂家相同牌号的材料在成分和性能上均存在差异,因此,为了在数值仿真中能够准确地模拟材料的流动状态,在某厂直径为 $\Phi 120$ mm 的 42CrMo 钢棒上取样,并加工成尺寸为 $\Phi 10$ mm \times 15 mm 的热模拟试样。在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行等温热压缩实验,其压缩温度设置为 850、950 和 1050 $^{\circ}\text{C}$,应变速率设置为 0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} ,压缩量为 60%。42CrMo 钢的流变曲线如图 1 所示,其中 $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率。

由图 1 可知,42CrMo 钢对应变速率和温度均比较敏感。应变速率为 0.01 ~ 0.1 s^{-1} 、温度高于 850 $^{\circ}\text{C}$ 时,材料的真实应力-真实应变曲线存在明显的峰值,软化效应明显,其动态再结晶软化效应显著大于加工硬化效应。当应变速率较高时,材料的软化效果不显著,42CrMo 钢的应力峰值不明显,这说明在高应变速率下,材料来不及完全发生再结晶,其软化机制为动态回复。

2 本构方程及热加工图

2.1 本构方程

某 42CrMo 钢的本构关系可用 Arrhenius 方程进行描述^[11],其方程如下:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: A 、 α 、 n 为材料常数,为真实应变 ε 的未知函数,与温度、应变速率无关; Q 为激活能, ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$),为真实应变 ε 的函数; R 为气体常数,其值为 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$; T 为热力学温度, K。

式 (1) 两边取对数得到如下方程:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - \frac{Q}{RT} \quad (2)$$

为求解式 (2) 中的参数,将真实应变在 0.04 ~ 0.80 范围内等分为 20 份。当真实应变固定时,通过插值获得 12 (4×3) 组 $\ln \dot{\varepsilon}$ 、 σ 、 T 一一对应的数据,并且 $\ln \dot{\varepsilon}$ 为 σ 和 T 的二元非线性函数, $\ln A$ 、 α 、 n 、 Q 为非线性函数的待定系数。根据 12 组数据求解二元非线性函数中的 4 个待定系数是一个典型的二元非线性回归问题,使用 MATLAB 中的 nlinfit 函数能够简单、快速地解决该问题。对 20 组真实应变进行相同的多元非线性回归即可得到 20 组真实应变 ε 、 $\ln A$ 、 α 、 n 、 Q 数据,并将 ε 和 $\ln A$ 、

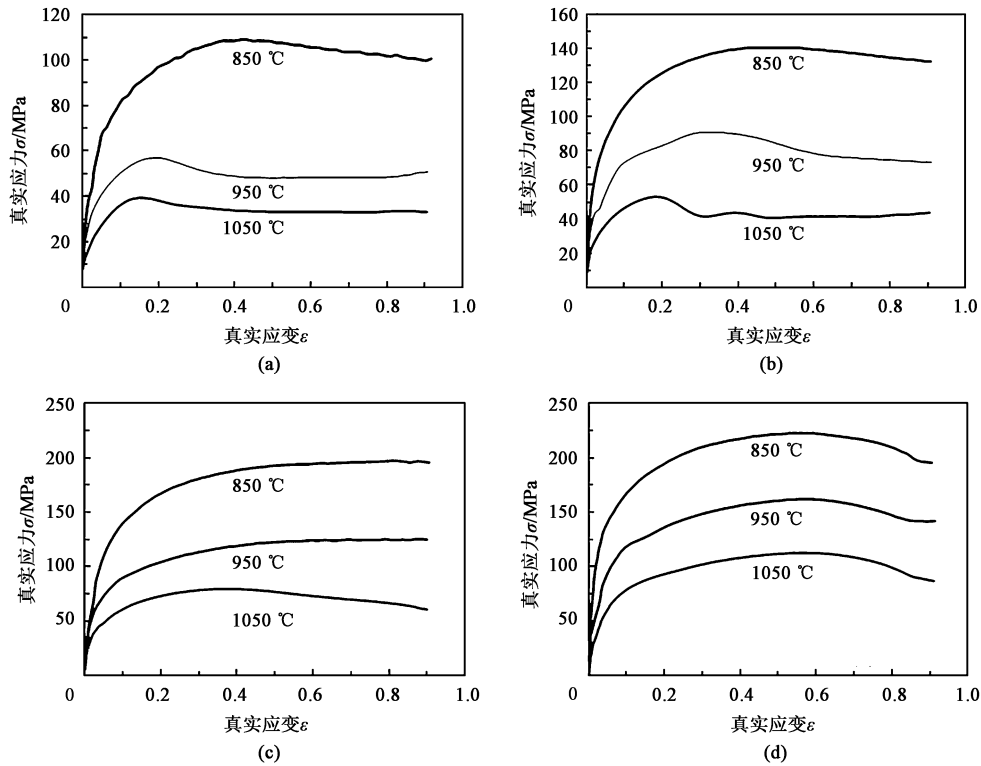


图1 不同应变速率下 42CrMo 钢的流变曲线

(a) $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 1 Flow curves of 42CrMo steel under different strain rates

α 、 n 、 Q 分别作图, 得到如图 2 所示的点数据。将 20 组数据采用 6 次多项式拟合后, 4 个材料参数与真实应变之间的拟合曲线如图 2 所示。

图 2 中的 4 个材料参数与真实应变之间的 6 次多项式如表 2 所示。将表 2 中拟合的多项式带入式 (1) 中, 得到 Arrhenius 模型预测的真实应力、真实应变数据, 并和压缩数据作图, 得到图 3。图 3 中不同形状的点表示使用 Arrhenius 模型预测得到的数据, 实线表示实验数据, 总体而言, 预测数据和实验数据的吻合度比较高。

2.2 热加工图

建立某 42CrMo 钢的热加工图可以为该材料的稳定热加工工艺制定提供依据, 从而实现材料在热加工过程中的微观组织演变^[12]。金属变形时吸收的总能量 E 由塑性变形消耗的能量 $\int_0^{\sigma} \sigma d\varepsilon$ 和微观组织演变消耗的能量 $\int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma$ 组成, 表达式为:

$$E = \int_0^{\sigma} \sigma d\varepsilon + \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \quad (3)$$

塑性变形消耗的能量和微观组织演变消耗的能量比值定义为应变速率敏感系数 m , 表达式为:

$$m = \frac{d \int_0^{\sigma} \sigma d\varepsilon}{d \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma} = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varepsilon}} \quad (4)$$

当系统产生熵的速率与外加熵的速率不匹配时, 即失稳判据 $\xi \leq 0$ (式 (5)), 系统将发生流动失稳^[13-14]。此时材料发生失稳流变, 进而可能会导致金属内部产生绝热剪切带、局部流动、裂纹、扭折、机械孪晶等缺陷。

$$\xi = \frac{\partial \ln \left(\frac{m}{m+1} \right)}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m \quad (5)$$

如图 4 所示, 将式 (2) 代入式 (5) 并进行数值计算, 可以得到该材料在真实应变为 0.04、0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 时的 ξ 等高线图。

由图 4 可以看出, 真实应变不同, 危险区域的分布有所差异, 但不同变形量下材料的失稳高风险区主要位于低温、高应变速率区域, 也有少量位于高温、低应变速率区域。当对数应变速率小于 -2.5、温度为 850~1050 °C 时, 材料不发生失稳, 热加工稳定性较高, 能够发生比较完全的动态回复和再结晶。考虑到锻件各区域的应变速率有所差异,

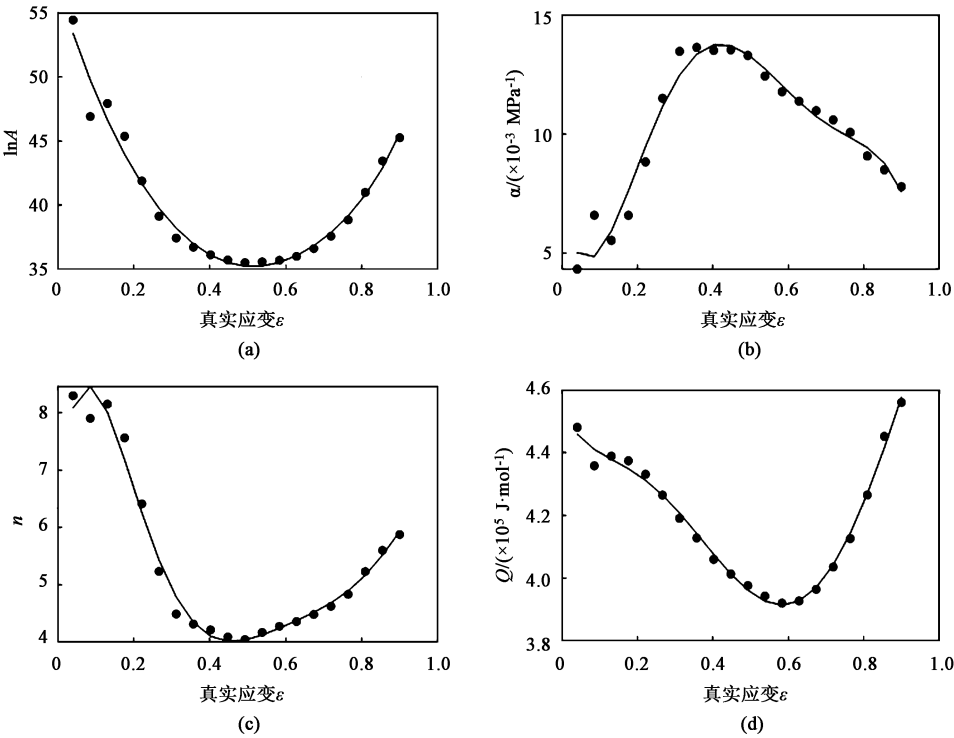


图 2 $\ln A$ 、 α 、 n 、 Q 拟合效果
(a) $\ln A$ - ϵ (b) α - ϵ (c) n - ϵ (d) Q - ϵ
Fig. 2 Fitting effects of $\ln A$, α , n and Q

表 2 4 个材料参数的拟合多项式
Table 2 Fitting polynomials of four material parameters

参数	拟合多项式	相关系数
$\ln A$	$236.94-586.68\epsilon+577.25\epsilon^2-313.04\epsilon^3+183.54\epsilon^4-100.30\epsilon^5+57.16\epsilon^6$	0.965
α	$0.05-0.95\epsilon+2.21\epsilon^2-1.96\epsilon^3+0.71\epsilon^4-0.07\epsilon^5+0.0068\epsilon^6$	0.987
n	$-535.44+1861.26\epsilon-2527.36\epsilon^2+1670.41\epsilon^3-524.87\epsilon^4-65.08\epsilon^5+6.58\epsilon^6$	0.979
Q	$1591374-6833977\epsilon+1021300\epsilon^2-6293526\epsilon^3+1594783\epsilon^4-240011\epsilon^5+453301\epsilon^6$	0.968

为了使得锻件在锻造时所有区域均处于安全区域内，将锻造温度设置为 1050 ℃、平均应变速率设置为 0.0821 s⁻¹。

3 成形工艺

3.1 模锻工艺

某履带板锻件图如图 5 所示，锻件质量为 42.39 kg，最大包络尺寸为 570 mm×230 mm×80 mm，坯料下料尺寸设计为 Φ120 mm×580 mm（质量为 51.47 kg）。锻件左右对称且存在高筋薄壁结构。在锻造工艺中，这些高筋薄壁位置需要重点考虑填充问题。为了尽可能使用一套模具成形，需

要合理设计飞边槽并严格控制坯料尺寸。由于锻件形状相对比较复杂，飞边槽结构选用对称型结构。某厂该履带板的原始制造工序为：下料→加热→预锻→终锻→切边→热处理→检验。为了节省锻造工序、提高生产效率，锻造厂要求取消预锻，将原工序调整为：下料→加热→终锻→切边→热处理→检验。

图 6 为设计的锻造模具，中间分布的孔洞为顶杆孔，锻造结束后，顶杆可将锻件顶出。

3.2 数值仿真

为了研究该工艺的可行性以及对成形工艺进行分析和优化，首先在 FORGE 软件中构建该履带板锻造成形的有限元模型，有限元仿真参数如表 3 所示，材料流变数据使用第 2 节构建的 Arrhenius 本构方程。

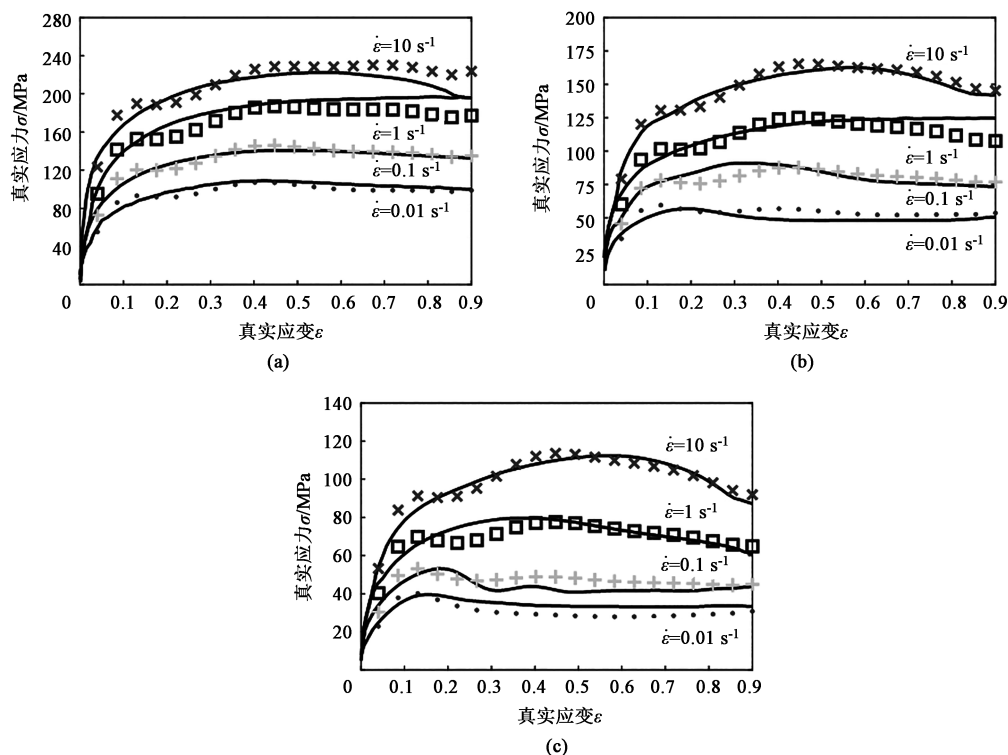
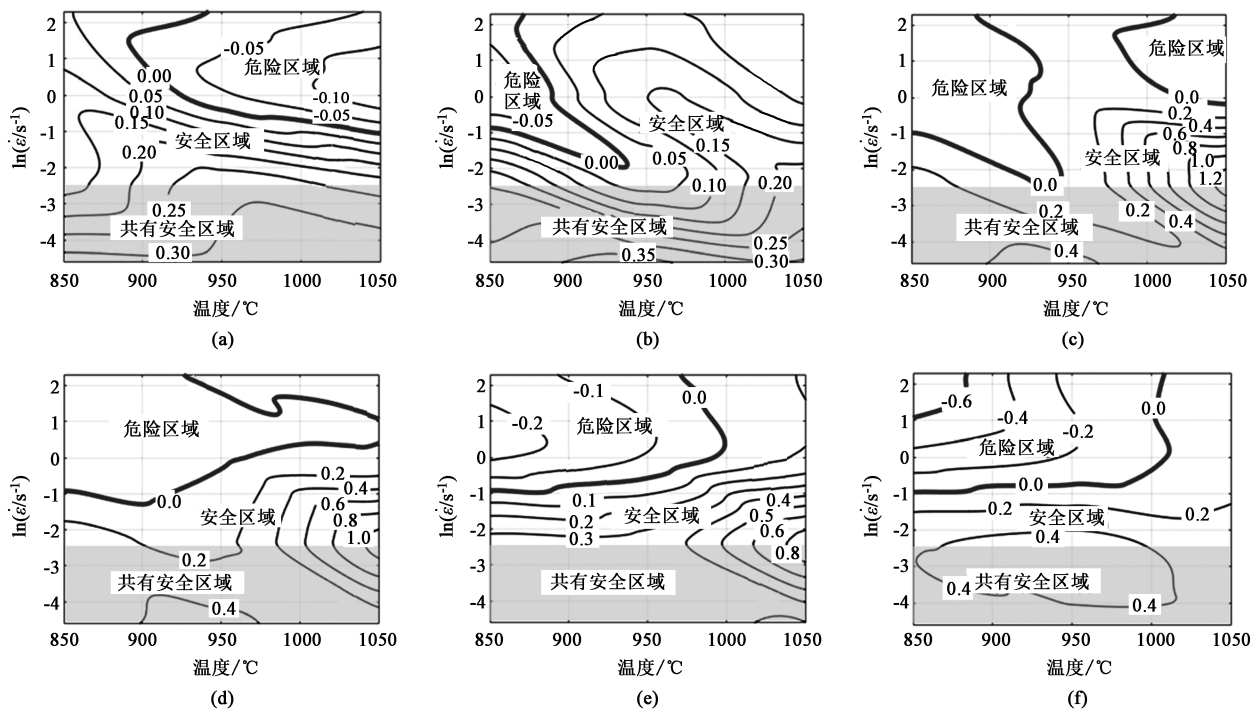


图3 Arrhenius 模型预测和实验曲线

(a) 变形温度为 850 °C (b) 变形温度为 950 °C (c) 变形温度为 1050 °C

Fig. 3 Curves of Arrhenius model prediction and test

(a) Deformation temperature of 850 °C (b) Deformation temperature of 950 °C (c) Deformation temperature of 1050 °C

图4 不同真实应变时 42CrMo 钢的 ξ 等高线(a) $\varepsilon=0.04$ (b) $\varepsilon=0.1$ (c) $\varepsilon=0.3$ (d) $\varepsilon=0.5$ (e) $\varepsilon=0.7$ (f) $\varepsilon=0.9$ Fig. 4 Contour lines of ξ for 42CrMo steel at different true strains

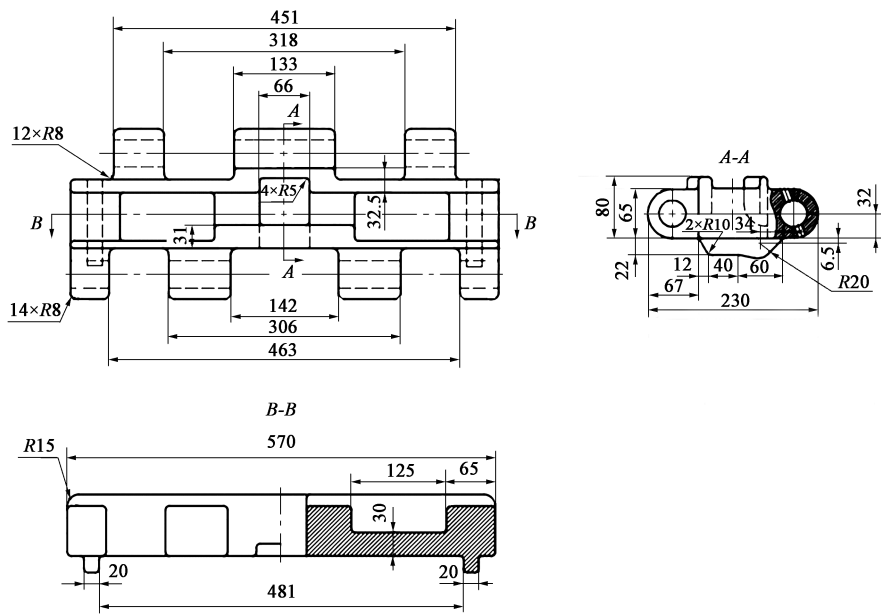


图 5 某履带板锻件图（部分尺寸）
Fig. 5 Forgings drawing of a track shoe（Part of dimensions）

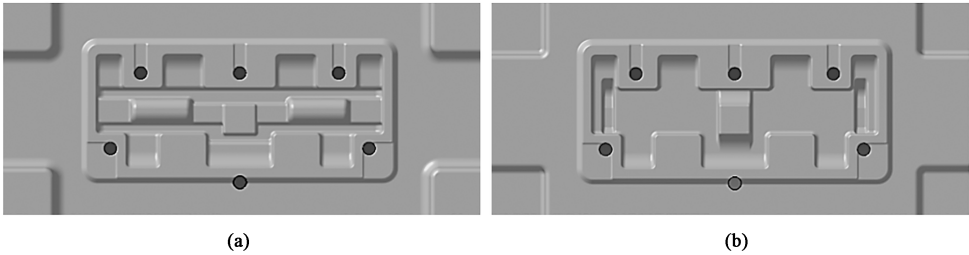


图 6 锻造成形模具
(a) 上模 (b) 下模
Fig. 6 Forging forming die
(a) Upper die (b) Lower die

表 3 有限元模拟参数
Table 3 Finite element simulation parameters

参数	初始温度/℃		下压速度/ (mm·min ⁻¹)	网格数目			摩擦因数		接触界面传热系数/ (W·(m ² ·K) ⁻¹)
	坯料	模具		坯料	上模	下模	库伦摩擦模型	剪切摩擦模型	
数值	1050	350	300	100000	20000	20000	0.15	0.30	20000

图 7 中深色阴影区域表示与模具接触，从图 7 中可知：首先，上模下压时坯料与模具内侧飞边桥部接触；随后，随着上模的继续下压，坯料被压扁并且被逐步压入型腔，与此同时内侧飞边将棒坯边缘多余的金属压出型腔外；最终，得到飞边较小且比较均匀的锻件。

3.3 生产试制

为了验证设计锻造工艺的合理性，某厂对该锻件进行了生产试制，生产试制结果如图 8 所示。生产试制的主要工序为：下料→加热→终锻→切边→

热处理→检验。

试制结果表明，该锻造工艺成形效果良好，未出现锻造缺陷，锻件各项指标满足设计要求，调整后的锻造工艺具有较高的可行性；此外，数值模拟技术能够对履带锻造成形工艺的制定提供指导。采用原始工艺的材料利用率为 82.35%；若增加预锻工序，其材料的利用率可以提高。

图 9 为图 8a 中的 3 个区域的微观组织，由图 9 可知，I、II、III 区域的晶粒尺寸较小且均比较均匀，晶粒度大约为 8~9 级，能够满足精度 8 级的要求。3

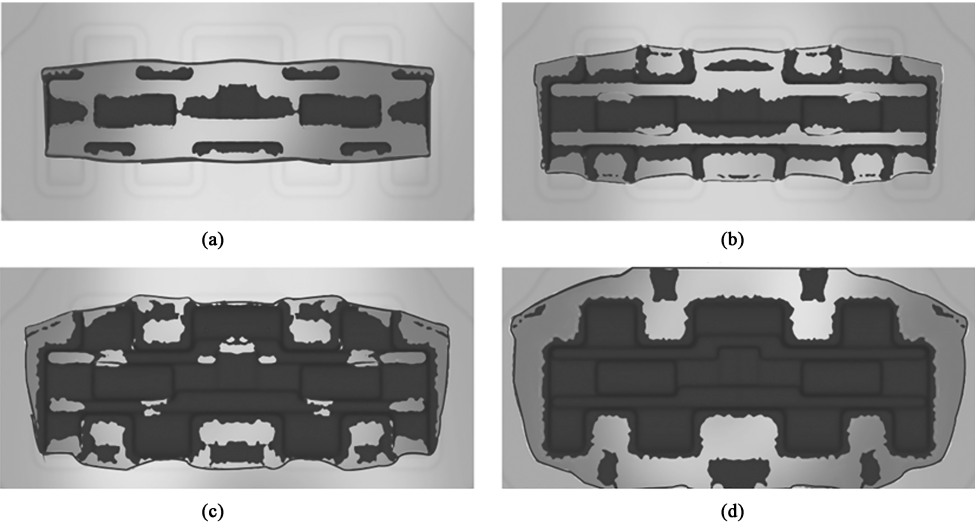


图 7 某履带板成形仿真结果
(a) 成形开始 (b) 成形前期 (c) 成形中期 (d) 成形结束

Fig. 7 Forming simulation results of a track shoe
(a) Beginning of forming (b) Early stage of forming (c) Middle stage of forming (d) End of forming

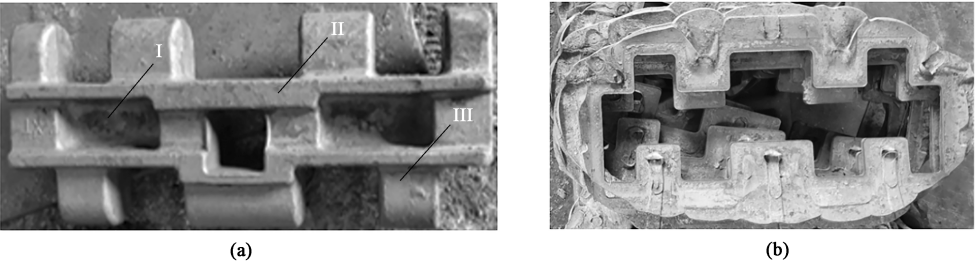


图 8 生产试制结果
(a) 锻件 (b) 飞边

Fig. 8 Trial production results
(a) Forgings (b) Flash

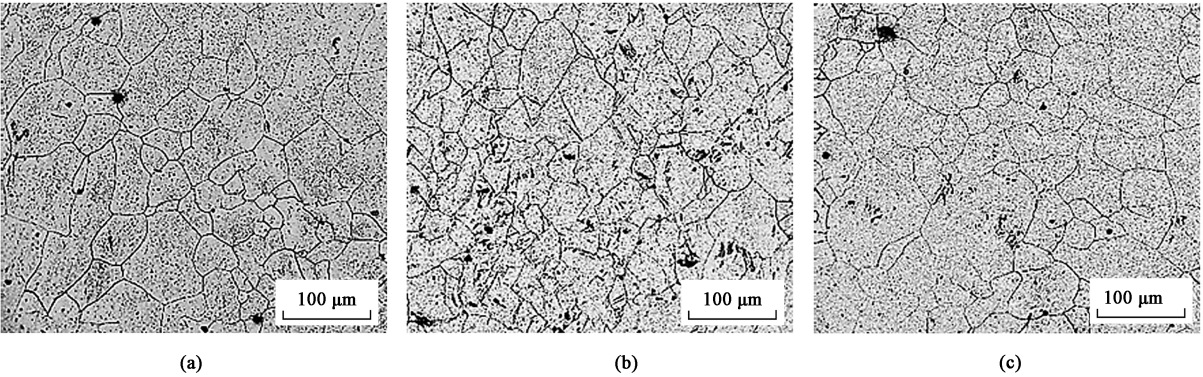


图 9 不同区域的微观组织
(a) 区域 I (b) 区域 II (c) 区域 III

Fig. 9 Microstructures of different regions
(a) Region I (b) Region II (c) Region III

个区域的微观组织图表明，热加工图能够在一定程度 上指导确定锻造温度和锻造速度等工艺参数。

4 结论

(1) 42CrMo 钢对应变速率和温度均比较敏感。应变速率为 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 、温度高于 $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 材料的真实应力-真实应变曲线存在明显的峰值, 软化效应明显, 其动态再结晶软化效应显著大于加工硬化效应。当应变速率较高时, 材料的应力峰值不明显, 软化效果不显著, 这说明在高应变速率下, 材料来不及完全发生再结晶, 其软化机制为动态回复。

(2) Arrhenius 本构方程能够较好地拟合 42CrMo 钢的高温本构关系。热加工图表明: 在不同变形量下 42CrMo 钢的失稳高风险区主要位于低温、高应变速率区域, 也有少量位于高温、低应变速率区域。当对数应变速率小于 -2.5 、温度为 $850 \sim 1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 材料具有较高的热加工稳定性, 能够较大程度地发生动态回复和再结晶, 能够得到细小且均匀的显微组织。考虑到锻件各区域的应变速率有所差异, 为了使得锻件在锻造时所有区域均处于安全区域内, 将锻造温度设置为 $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均应变速率设置为 0.0821 s^{-1} 。

(3) 通过有限元仿真技术, 分析了某履带板锻造成形过程, 分析表明, 该锻造工艺得到了成形效果良好的锻件, 欠填充、无折叠等锻造缺陷, 各项指标均达到了设计要求。生产试制结果验证了锻造成形工艺的可行性。此外, 微观组织分析也验证了根据热加工图推荐的锻造温度和应变速率能够得到细小、均匀的组织。

参考文献:

- [1] 范莉, 于志生, 徐斌, 等. 履带板成形工艺研究进展 [J]. 江西建材, 2016, (8): 2.
Fan L, Yu Z S, Xu B, et al. Research progress in forming technology of track shoe [J]. Jiangxi Building Materials, 2016, (8): 2.
- [2] 张宏志, 武玉平, 周建军, 等. 车用高锰钢履带板静压造型工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (10): 1036-1038, 1041.
Zhang H Z, Wu Y P, Zhou J J, et al. Process development of static molding of high-manganese steel track used for special vehicle [J]. Foundry, 2015, 64 (10): 1036-1038, 1041.
- [3] Du Z M, Qi Y S, Wang C S, et al. Research on forging process for 42CrMo dual-grouser track shoe used in special vehicle [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 314-317.
- [4] Park W Y, Chang Y C, Lee S S, et al. Prediction of the tractive performance of a flexible tracked vehicle [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 45 (1-2): 13-23.
- [5] 陈利华, 李顺, 李宏伟, 等. 高性能铝合金履带板成形技术研究 [J]. 新技术新工艺, 2020, (1): 14-19.
Chen L H, Li S, Li H W, et al. Research on forming technology of high-performance aluminum alloy soleplate [J]. New Technology & New Process, 2020, (1): 14-19.
- [6] 张敏, 张新东, 张开举, 等. 大节距双齿履带板的锻造生产 [J]. 锻造与冲压, 2013, (23): 62-63.
Zhang M, Zhang X D, Zhang K J, et al. Forging production of large pitch double tooth track shoes [J]. Forging & Metalforming, 2013, (23): 62-63.
- [7] 孙兴辰. 推土机履带板锻造全过程工艺设计及质量控制的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
Sun X C. Research on Forging Process Design and Quality Control of Bulldozer Crawler Plate [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [8] 李科锋, 孙晓东, 陈波, 等. 薄壁深长筋履带下板板体成形工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2016, (9): 86-88.
Li K F, Sun X D, Chen B, et al. Research on thin-walled deep muscle tracks the lower body forming technology [J]. New Technology & New Process, 2016, (9): 86-88.
- [9] 徐磊. 湿地履带板锻造工艺设计及成形过程数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
Xu L. Forging Process and Die Design and the Numerical Simulation of Wetland Creeper Tread [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [10] 陈园园, 齐会萍, 李永堂, 等. 锻态 42CrMo 钢高温变形过程中本构模型修正及激活能演化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 260-269.
Chen Y Y, Qi H P, Li Y T, et al. Modification of constitutive model and evolution of activation energy for forged 42CrMo steel during high temperature deformation process [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 260-269.
- [11] 陈园园, 李永堂, 庞晓龙, 等. 考虑应变补偿的铸态 42CrMo 钢本构模型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 246-252.
Chen Y Y, Li Y T, Pang X L, et al. Constitutive model of as-cast 42CrMo steel based on strain compensation [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 246-252.
- [12] Prasad Y V R K, Geggel H L, Doraivelu S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15 (10): 1883-1892.
- [13] 段海龙. 42CrMo 结合齿热锻成形机理及微观组织演变规律研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
Duan H L. Study on the Mechanism and Microstructure Evolution of 42CrMo Conjunction Gear During Forging Process [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2021.
- [14] 周琳, 刘运玺, 陈玮, 等. Ti-4Al-5Mo-6Cr-5V-1Nb 合金的热变形行为及热加工图 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (1): 27-35.
Zhou L, Liu Y X, Chen W, et al. Thermal deformation behavior and processing map of Ti-4Al-5Mo-6Cr-5V-1Nb alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (1): 27-35.