

不同温度和压下速率下 Fe-Ni-Al 马氏体时效钢模锻过程数值模拟

朱桂霖^{1, 2}, 刘百栓^{1, 2}, 薛春江^{1, 3}, 张人匀¹, 王海燕^{1, 2}

(1. 内蒙古科技大学材料科学与工程学院, 内蒙古包头 014000; 2. 内蒙古自治区新金属材料重点实验室, 内蒙古包头 014000; 3. 内蒙古科技大学工程训练中心, 内蒙古包头 014000)

摘要: 马氏体时效钢因具有高硬度、高耐磨性以及良好的耐热性, 而广泛应用于工业、航空航天和国防等领域。其强韧性受模锻工艺的控制, 坯料温度和模具压下速率是制约锻件质量的关键因素。本研究利用Deform-3D软件, 通过改变坯料温度和模具的压下速率, 对马氏体时效钢模锻过程的温度场、动态再结晶、应力-应变场和损伤进行数值模拟, 并根据模拟结果拟定模锻工艺。结果表明: 当温度由900 °C升高至1 100 °C, 且压下速率为100 mm/s时, 动态再结晶体积分数升高7.0%, 等效应变增加0.019, 等效应力降低121 MPa。综合考虑, 温度为1 100 °C、压下速率为100 mm/s时更适合进行模锻。

关键词: Fe-Ni-Al马氏体时效钢; 模锻; 数值模拟; 温度; 压下速率; 动态再结晶

中图分类号: TG316.3; TG142.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0762-09

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0097

Numerical Simulation of Die Forging Process for Fe-Ni-Al Maraging Steel Under Different Temperatures and Press Speeds

ZHU Gui-lin^{1, 2}, LIU Bai-shuan^{1, 2}, XUE Chun-jiang^{1, 3}, ZHANG Ren-yun¹, WANG Hai-yan^{1, 2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014000, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of New Metal Materials, Baotou 014000, Inner Mongolia, China; 3. Engineering Training Center, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Maraging steel is widely used in industries, aerospace, national defense, and other fields due to its high hardness, excellent wear resistance, and good heat resistance. Its strength and toughness are governed by the die forging process, while the blank temperature and the die press speed are critical factors constraining the quality of the forgings. In this study, the Deform-3D software was used to numerically simulate the temperature field, the dynamic recrystallization, the stress-strain field, and the damage during the die forging process of maraging steel by changing the billet temperature and the reduction rate of the die. Based on the simulation results, the die forging process was formulated. The results indicate that when the temperature increases from 900 °C to 1 100 °C, and at a press speed of 100 mm/s, the volume fraction of dynamic recrystallization rises by 7.0%, the equivalent strain increases by 0.019, and the equivalent stress decreases by 121 MPa. Considering all factors, a temperature of 1 100 °C and a press speed of 100 mm/s are more suitable for the die forging.

Key words: Fe-Ni-Al maraging steel; die forging; numerical simulation; temperature; press speed; dynamic recrystallization

马氏体时效钢由于其高硬度、高耐磨性以及良好的耐热性, 在航空航天、国防和高端模具制造中发挥着重要作用^[1]。模锻作为金属塑性加工的核心工艺, 在工业制造中占据着不可替代的战略地位, 尤其在高

强度、高精度和高性能零部件的生产中具有关键作用。马氏体时效钢在模锻过程中, 会因温度和压下速率等参数产生不同程度的缺陷, 因此优化模锻的工艺参数至关重要^[2-3]。在金属成形过程中, 会施加影响金

基金项目: 国家自然科学基金 (52361012、52161008); 中央引导地方科技发展资金 (2022ZY0072); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目 (2023QNJS006); 阳江市合金材料与五金刀剪重点产业人才振兴计划专项基金 (RCZX2022020)。

收稿日期: 2025-10-31 收到初稿, 2026-03-06 收到修订稿。

作者简介: 朱桂霖 (2002-), 男, 硕士生, 主要研究方向为马氏体不锈钢强韧性改善。E-mail: 13792413586@163.com

通信作者: 王海燕, 女, 教授。E-mail: windflower126@163.com

引用格式: 朱桂霖, 刘百栓, 薛春江, 等. 不同温度和压下速率下 Fe-Ni-Al 马氏体时效钢模锻过程数值模拟 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 762-770.

Zhu Guilin, Liu Baishuan, Xue Chunjiang, et al. Numerical simulation of die forging process for Fe-Ni-Al maraging steel under different temperatures and press speeds [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 762-770.

属流动的复杂应力。锻造速度会显著影响锻造零件的温度和相,进而直接影响最终的力学性能^[4]。Reyes等^[5]研究了锻造温度、模头速度和工具加热等不同工艺参数对微观结构的影响;Luo等^[6]研究发现,锻造速度会显著影响钛锻造零件的温度和相,进而直接影响最终的力学性能;He等^[7]研究了不同的锻造温度对合金组织和力学性能的影响。影响锻造的因素多种多样,为了满足批量生产要求,实现高稳定、高质量、高效率、低成本的生产目标,本研究利用数值模拟方法对模锻过程进行数值模拟^[8-9]。

Deform-3D作为一款专业的大变形有限元数值模拟软件,可显著减少对传统车间试验的依赖,有效降低开发成本、缩短工作周期^[8]。通过该软件能够构建完整的3D锻造工艺模型并进行数值模拟分析,从而系统地获取锻件成形过程中的温度场、动态再结晶、应力应变及损伤分布等关键数据,为工艺优化提供可靠依据^[10-11]。如何平衡模具温度和压下速率,使得马氏体时效钢在模锻过程中获得良好力学性能,是如今金属锻造中的重要问题^[12]。

本课题通过研究马氏体时效钢在不同压下速率和锻造条件下的温度场、动态再结晶体积分数、应力应变场及损伤演变规律,以优化工艺参数,从而在实际锻造中实现更低的成本与更优异的力学性能^[13]。通过模拟不同参数对锻造的影响,为实际生产过程中马氏体时效钢锻造工艺的制定和优化提供理论依据。

1 数值模拟与试验方法

初始坯料为圆柱形,直径为600 mm,高度为300 mm,上下模具为锥形凸台,如图1所示。材料化学成分如表1所示。变形温度分别设置为900 ℃、

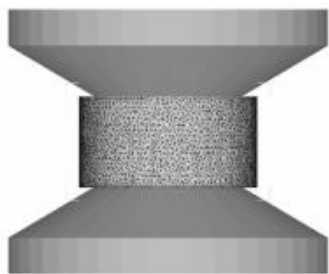


图1 锻压模型
Fig. 1 Forging model

表1 试验钢的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the experimental steel

No.	$w_B/\%$						
	C	Ni	Al	Mo	Nb	B	Fe
1 [#]	0.07	19.16	2.34	3.89	0.66	0.02	余量

1 100 ℃、1 200 ℃,上下模温度设为400 ℃,网格划分为50 000,上模压下速率分别为100 mm/s、200 mm/s,摩擦因数为0.7。通过调控锻造温度与压下速率,优化动态再结晶含量,以协同提升马氏体时效钢的强度与韧性。

根据每个零件的变形程度,将工件在热压缩过程中的变形分为三个区域。区域划分如图2所示。这些区域被确定为困难变形区Ⅱ(位于工件与模具之间的界面)、大变形区Ⅰ(位于工件的中心区域)和自由变形区Ⅲ(位于工件的外围)。由于工件的端面与模具压头和砧座之间部分接触,Ⅱ区的摩擦力相对较高,金属流动缓慢。相比之下,位于工件核心的Ⅰ区受到的摩擦较小,金属流动更快,散热更少。

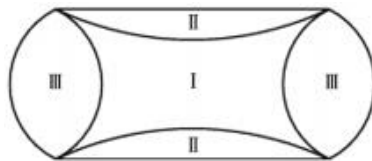


图2 锻压过程中变形区分布

Fig. 2 Distribution of the deformation zones during the forging processes

根据表1试验钢的化学成分,利用JMatPro计算试验钢的体积模量(Bulk modulus)、泊松比(Poisson's ratio)和杨氏模量(Young's modulus)等物理性能数据,如图3所示,虚线分别为900 ℃和1 100 ℃下的参数。

试验采用25 kg真空感应炉进行熔炼,浇注成75 mm×100 mm×230 mm钢锭。将铸坯加热至1 200 ℃,保温4 h进行均匀化处理后空冷。锻造起始温度为1 150 ℃,终止温度为950 ℃。从锻坯上切取 $\Phi 8$ mm×12 mm的圆柱试样,之后在Gleeble3500上进行压缩试验,试验参数分别为900 ℃和1 100 ℃,压下速率分别为100 mm/s和200 mm/s。压缩变形后切开试样,对截面进行磨抛和腐蚀,观察组织。

2 数值模拟结果与讨论

2.1 不同模具温度和压下速率的温度场变化规律

不同温度与压下速率对锻造过程温度场的影响如图4所示,纵坐标为不同温度大小所占体积分数(%),横坐标为温度变化,图中右上角给出试样温度的最小值、最大值、平均值和标准差(℃)。图4(a)、(b)和(c)的压下速率为200 mm/s,温度分别为900 ℃、1 100 ℃和1 200 ℃;图4(d)、(e)和(f)的压下速率为100 mm/s。由图4可知,变形Ⅰ区温度最高,Ⅱ区存在温度最小值和最大值。温度最小值

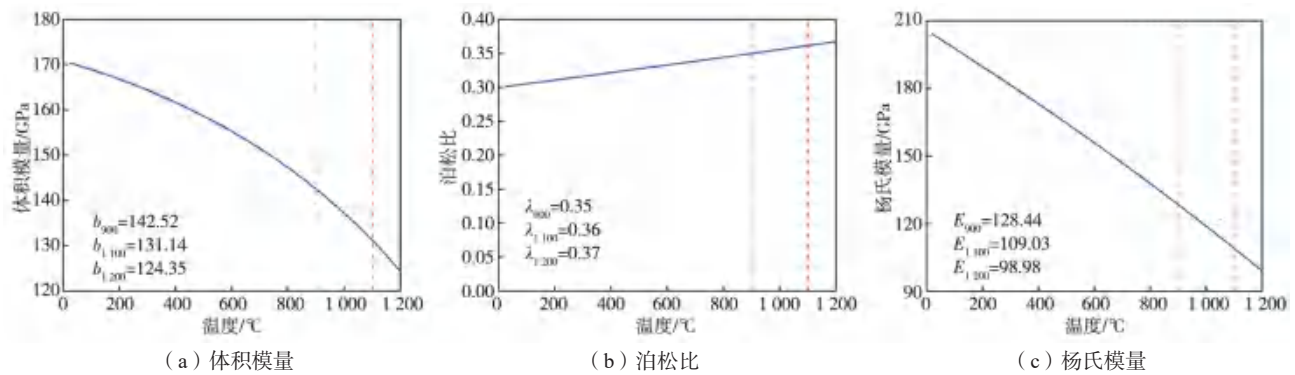


图3 试验钢物性参数

Fig. 3 Physical property parameters of the experimental steel

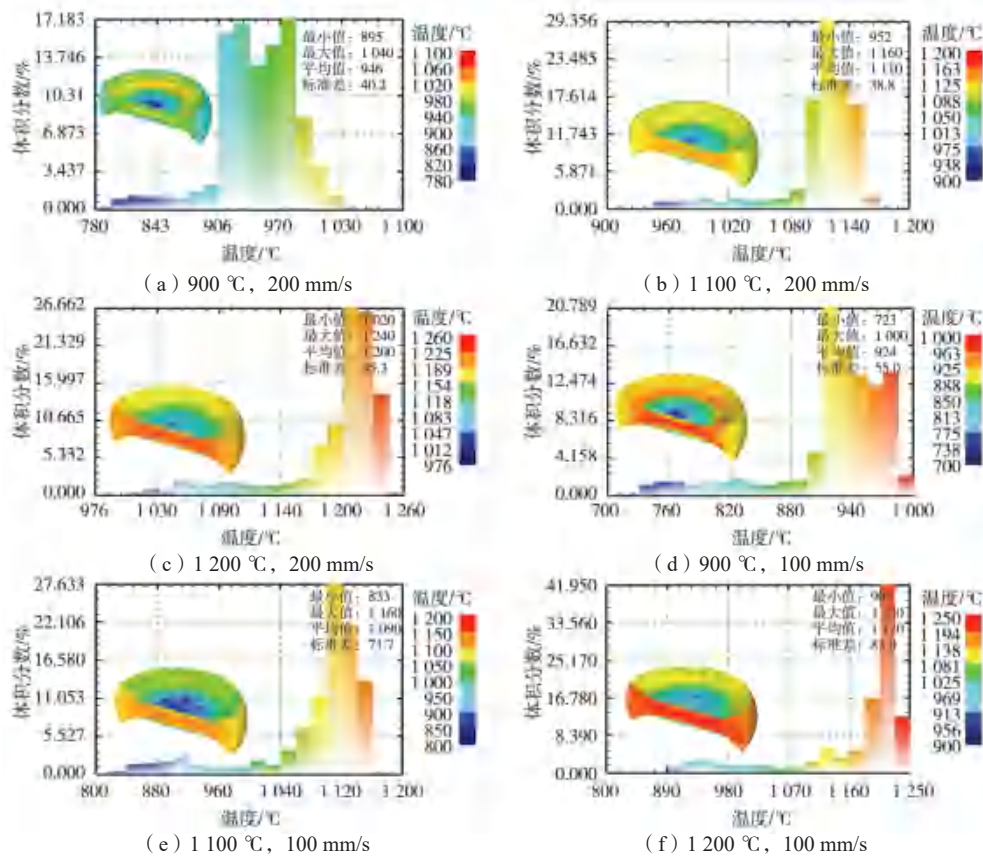


图4 不同温度和压下速率下的温度场分布

Fig. 4 Temperature field distributions under different temperatures and press speeds

主要集中在与上下模具中心相接触的位置，与模具边缘接触的部分温度存在最大值。随着压下速率从200 mm/s降至100 mm/s，材料的平均温度相应由946 °C降至924 °C，其峰值温度则由1 040 °C降至1 000 °C，如图4 (a) 与 (d) 所示。有研究表明^[14]，当压下速率降低时，锻压过程中坯料与模具的接触时间增加。由于接触时间延长，坯料与模具之间的热量传递效率提高。根据傅里叶热传导定律，热量由高温区域流向低温区域^[15]，导致坯料内部的热量向模具表面扩散，从而加剧了热量的散失。这种热传导效应使得坯料的温度下降幅度增大。

陈婕等^[16]研究表明，锻造过程中的温度变化主要受模具与环境的热传导影响。坯料侧表面因散热快、温度较低和压下速率大，可以减少接触时间，从而降低散热效应，使得温度较高。而压下速率小通常伴随较低的应变速率，唐海燕等^[17]研究表明，随着温度升高，材料的加工硬化与动态回复/再结晶软化之间的竞争关系会改变，较低的应变速率会减少塑性变形产生的热量。

2.2 不同模具温度和压下速率下动态再结晶变化规律

工件在压缩变形后，各个变形区的动态再结晶

(Dynamic Recrystallization, DRX) 体积分布存在差异。这种现象归因于在压缩过程中, 高应变区域发生动态再结晶的可能性增加, 这一趋势与Shi等^[18]的研究结果一致。基于Deform-3D软件获得的动态再结晶体积分数分布如图5所示。在压下速率恒定为200 mm/s的情况下, 900 ℃时, 动态再结晶区域主要集中在I区。随着温度升高至1 100 ℃, 工件的再结晶体积分数显著增加, DRX在0.7 s前呈现快速上升趋势, 0.7 s时体积分数

约为76.4%。当温度升至1 200 ℃时, 再结晶体积分数在0.4 s左右达到峰值(约100%), 随后逐渐下降并趋于稳定。结果表明, 在同一压下速率下, 工件的动态再结晶体积分数随温度升高而逐渐升高, 该过程是由中心向边缘逐渐扩散。升高温度促进了原子扩散和位错运动, 显著降低了位错运动所需的临界剪切应力, 加速了动态再结晶形核与晶界迁移, 有利于变形。

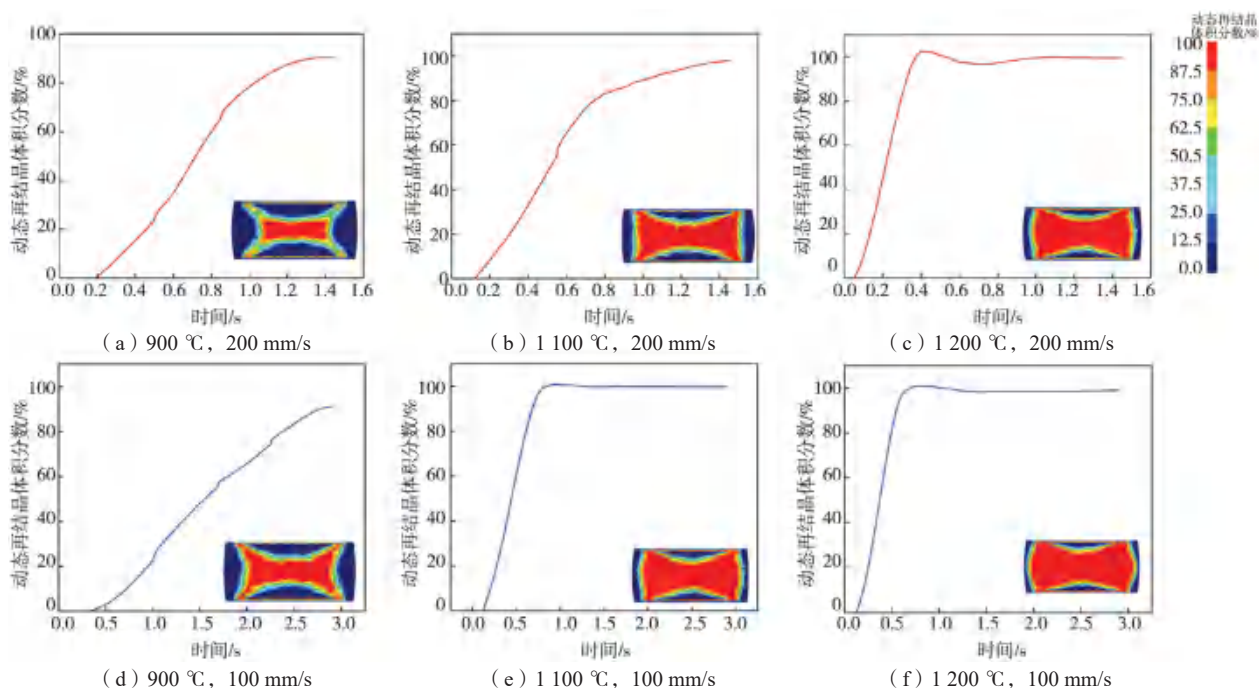


图5 不同温度和压下速率下的动态再结晶体积分数分布

Fig. 5 The dynamic recrystallization volume fraction distributions under different temperatures and press speeds

如图5所示, 当温度为900 ℃, 压下速率由200 mm/s降低至100 mm/s时, DRX结束后, 由图5 (a) 和图5 (d) 可以看出, 动态再结晶体积分数由90.42%上升到92.8%。当温度为1 100 ℃时, DRX结束后, 动态再结晶体积分数由97.9%上升到99.8% (相对900 ℃提高7%)。当温度为1 200 ℃时, 动态再结晶体积分数由99.1%上升到99.2%。在同一温度下, 再结晶体积分数随着压下速率的降低而增高。较低的压下速率延长了热变形时间, 为位错的动态回复与再结晶提供了充足的时间, 使其得以充分释放应变能。这不仅促进了动态再结晶过程, 也为后续的晶粒生长创造了条件。因此, 较低的压下速率有利于DRX的形核和长大, 增加了钢中DRX的比例, 这一数值模拟结果与Shi等^[18]人的研究结果类似。

为进一步验证数值模拟的再结晶行为, 按照表1成分制备马氏体时效钢, 采用Gleeble热模拟机进行了压缩试验。图6为试验钢在不同条件下热变形后的显微组

织。对比图6 (a) 和 (b), 当温度为900 ℃时, 压下速率降低到100 mm/s后, 变形晶粒之间出现少量等轴状的再结晶晶粒, 同时变形晶粒的变形程度降低。对比图6 (c) 和 (d), 温度升高到1 100 ℃, 压下速率降低到100 mm/s后, 经DRX形成的等轴状晶粒尺寸较大。由此可见, 在锻造时, 在保证工作周期的同时, 应选择较慢的压下速率, 以延长DRX的时间, 促进再结晶晶粒生成; 同时, 压下速率不宜过小, 防止DRX晶粒过大, 导致硬度和韧性等力学性能降低。

由此可见, 在Fe-Ni-Al马氏体时效钢锻造过程中, 当温度为900 ℃、压下速率为200 mm/s时, 由于温度较低、压下速率过快, 会导致晶粒变形过大, 应力集中加剧, 从而出现裂纹和绝热剪切带等缺陷。因此, 模锻时应采取1 100 ℃的温度、100 mm/s的压下速率, 这样可以在保持较高的DRX体积分数的同时, 避免因DRX晶粒尺寸过大而引起的力学性能不足的问题。

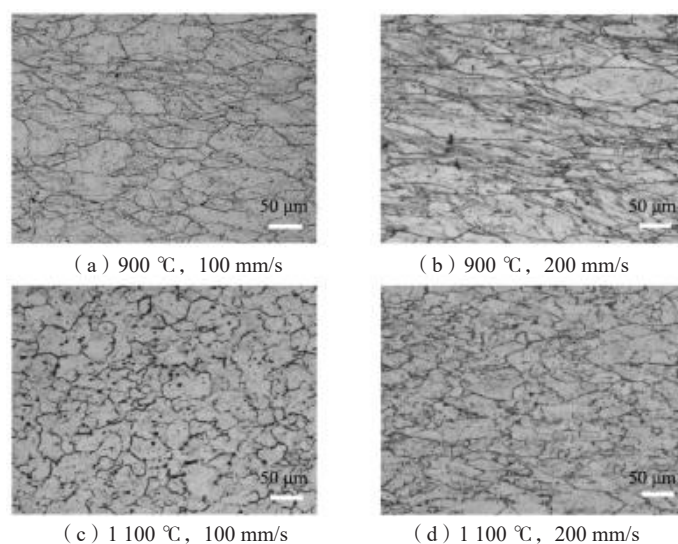


图6 不同温度和压下速率下的金相组织图

Fig. 6 The metallographic images obtained under different temperatures and press speeds

2.3 不同模具温度和压下速率下应力应变变化规律

2.3.1 温度对应力应变的影响

不同温度和压下速率的等效应变变化如图7所示, 纵坐标为不同应变程度所占体积分数(%), 横坐标为不同变形区的应变变化, 图中右上角给出试样应变的最小值、最大值、平均值和标准差。工件的等效应变

从大变形区开始, 逐渐向四周发展。并且随着变形量的增大, 整体应变逐渐增大, 大变形区等效应变增长最快, 困难变形区增长速度最慢。压下速率为200 mm/s不变, 平均等效应变由图7(a)的0.711增长到图7(c)的0.727。变形刚开始时, 等效应力主要集中在大变形区, 随着变形量的增加, 应力逐渐扩散至

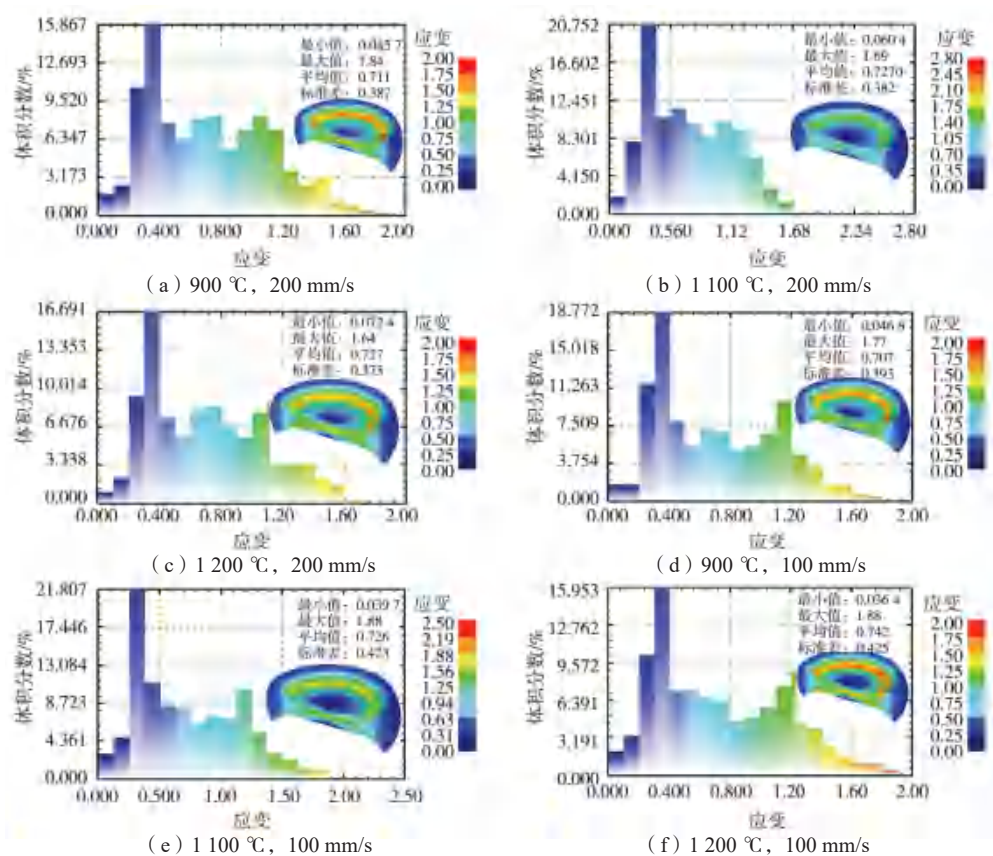


图7 不同温度和压下速率下的等效应变分布变化

Fig. 7 Changes of the equivalent strain distributions under different temperatures and press speeds

其余几个变形区。然而,困难变形区与上下模直接接触,导致存在的摩擦力与等效应力抵消,使得等效应力降低。随着变形量的增加,上下模的正压力逐渐增加,使得摩擦力增大,从而导致困难变形区的等效应力减小。

当温度为1 200 ℃,压下速率为200 mm/s时,随着变形量增加,等效应变开始由大变形区扩散到四周。对比图7(a)和(c)可知,当温度由900 ℃增加至1 200 ℃时,工件等效应变由0.711上升到0.727。陈英杰等^[19]研究表明,随着温度的升高,材料的原子扩散能力增强,晶界迁移能力增加,这使得材料更容易发生动态回复和再结晶,从而抵消由位错产生的加工硬化,提高材料的塑性。这种塑性增强使得材料在变形过程中更容易发生塑性变形,从而导致等效应变的增加。Hristov等^[20]研究发现,随着温度的升高,材料的应力-应变关系会发生变化。在较低温度下,材料的变形抗力较大,导致等效应变较小;在较高温度下,材料的变形抗力降低,从而允许更多的塑性变形,导致等效应变增加。同时,温度的升高会导致材料的微观结构发生变化,如前文所述,压下速率不变,温度升高会导致DRX体积分数升高,使得晶粒细化,从而改善了材料的变形能力,这种微观结构的变化也会导致

等效应变的增加。

如图8(a)所示,当温度上升至1 200 ℃时,等效应力由图8(a)的266 MPa降低到图8(c)的102 MPa。温度升高促进了动态再结晶(DRX),使得加工硬化效果减弱。这种塑性增强,使得材料在相同的外加载荷下,能够更好地吸收变形能量,降低等效应力^[21]。Kan等人^[22]研究发现,温度升高会改善材料的流动性,使其更容易发生塑性变形。这表明温度不仅影响材料的强度,还影响其变形行为。

2.3.2 压下速率对应力应变的影响

当温度为900 ℃,压下速率降低至100 mm/s时,整体等效应变的变化规律与压下速率为200 mm/s时一致,如图7所示,均由大变形区开始,并逐渐扩散至周围。不同温度与压下速率下的工件等效应力分布如图8所示,图中纵坐标为不同应力大小所占体积分数(%),横坐标为不同变形区的应力变化,图中右上角给出试样应力的最小值、最大值、平均值和标准差(MPa)。结果表明,随着压下速率的提高,等效应力值相较于初始状态显著降低,如图8(a)所示。同时,高应力区域主要集中在困难变形区与上下模接触区域。周礼菊等^[23]研究表明,在压下速率较低的情况下,材料的流动速度较慢,可能导致局部区域应力集中。在挤压

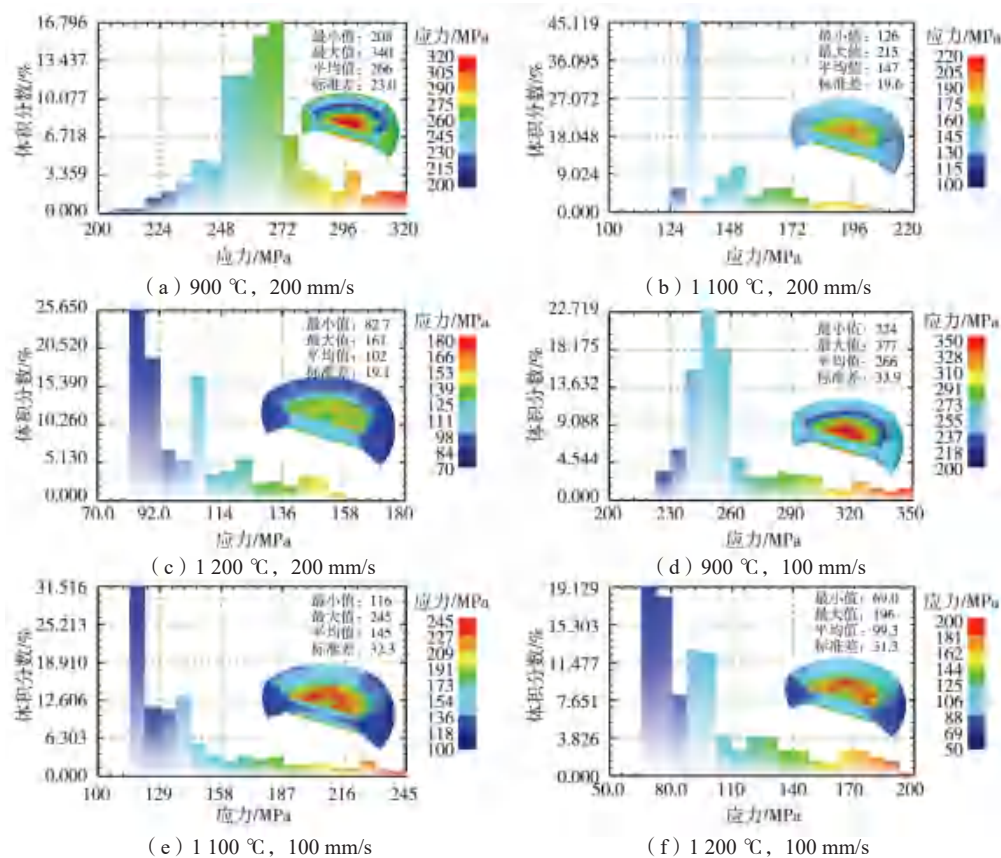


图8 不同温度和压下速率下的等效应力分布变化

Fig. 8 Changes of the equivalent stress distributions under different temperatures and press speeds

过程中,当挤压速度较慢时,材料在某些区域(如桥部)的流动阻力更大,导致等效应力增加。

如图7(b)所示,当温度为1 100 ℃,压下速率为200 mm/s时,随着变形量的增加,整体的等效应变逐渐由大变形区向周围发展,并呈逐渐扩大的趋势。对比图7(b)和图7(e),当压下速率降低至100 mm/s时,等效应变由0.721升高至0.726。Pan等^[24]研究表明,较低的压下速率延长了材料在高温下的承载时间,蠕变效应更为显著。在金属材料中,低速下的持续应力作用会促进晶界滑移等蠕变机制发挥作用,进而增加等效应变。

随着压下速率的降低,当温度为1 200 ℃,压下速率降低至100 mm/s时,如图8(c)和(f)所示,等效应力由102 MPa降低到99.3 MPa。王兵等^[25]研究表明,当压下速率减小时,金属材料的变形抗力会显著降低。例如,在TC4合金的等温成形过程中,随着上模速度由2 mm/s减低至0.125 mm/s时,最大等效应力由157 MPa降低为89.1 MPa。这表明材料的变形抗力具有非常显著的正应变速率依赖特性,即随着应变速率的降低,其变形抗力迅速下降。Lazaro等^[26]研究表明,在高速压下过程中,金属材料的流动速度较快,容易产生应力集中现象,导致等效应力增加。例如,在挤压

成形过程中,随着挤压速度的增大,等效应力显著增加,应力集中更为明显,成形质量下降。而当压下速度降低时,金属材料的流动速度减慢,应力集中现象减少,从而降低了等效应力。

2.4 不同温度和压下速率下损伤规律

为了研究不同温度及压下速率下的损伤,设置坯料温度分别为900 ℃、1 100 ℃和1 200 ℃,模具压下速率分别为200 mm/s和100 mm/s,纵坐标为不同损伤所占体积分数(%),横坐标为不同变形区的损伤变化,图中右上角给出试样温度的最小值、最大值、平均值和标准差,如图9所示。当压下速率为200 mm/s时,随着温度的升高,损伤逐渐降低,但是幅度较小,由0.106%降低到0.103%。但是当压下速率为100 mm/s时,呈现较大幅度的降低,由0.107%降低到0.0982%。损伤主要存在于坯料的周围,心部区域能量较低,原因是随着压下过程进行,坯料温度不断升高,加工硬化现象逐渐增强,在这种情况下要达到预定的锻造厚度,则需要更大的能量值。同时,坯料中心能量值较小,有向边部扩散的趋势。随着变形量的增加,损伤随之增加,边部有可能出现撕裂等质量缺陷^[27]。

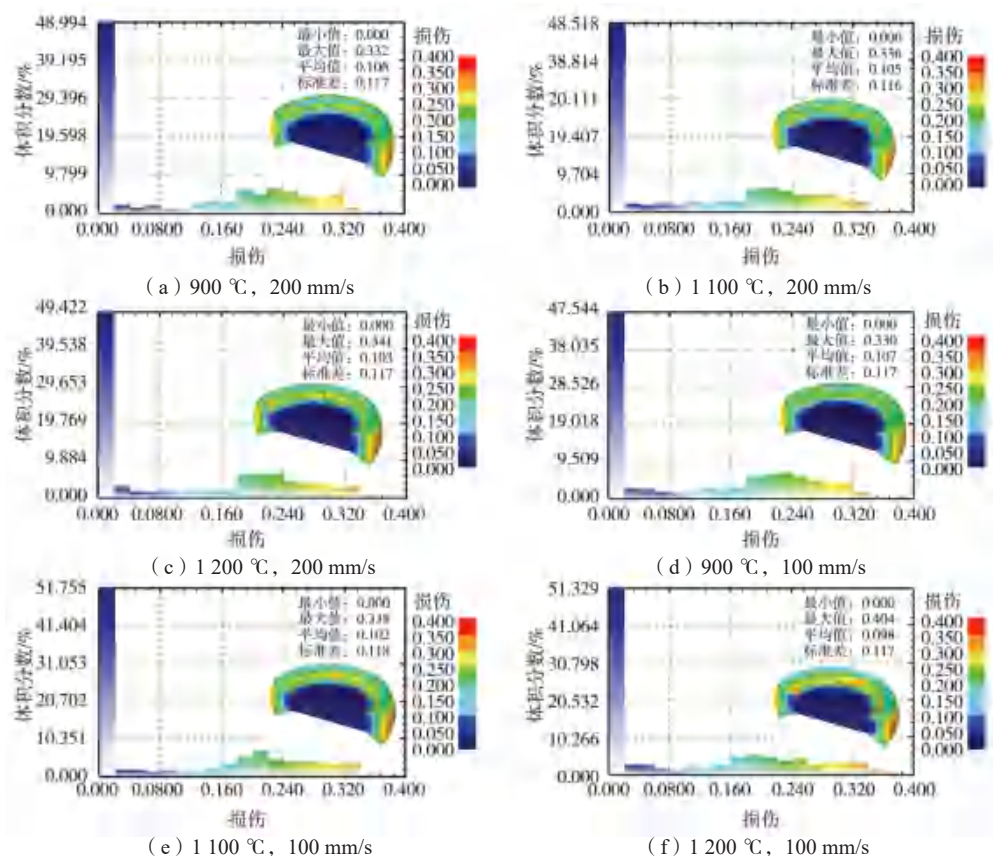


图9 不同温度及压下速率下的损伤分析

Fig. 9 The damage analysis under different temperatures and press speeds

随着温度升高,原子热运动加剧,金属晶格滑移阻力减小,位错运动更活跃,这提升了材料的塑性变形能力,使应力集中更容易通过塑性流动释放,减少微孔洞和裂纹的萌生^[28]。多种研究表明^[17, 29],对于马氏体时效钢在1 000~1 140 °C的范围,动态再结晶可以细化晶粒并修复微裂纹。当温度高于1 140 °C时,促进DRX,抑制损伤积累,温度低于950 °C时,再结晶不足引发流变失稳和微裂纹。高应变速率会加剧损伤风险,赵长忠等^[30]研究表明,钢在低锻造速率下强度更高,但对温度变化敏感,导致内部性能不均和损伤;而高锻造速率虽降低强度,但因内部加热可减少性能波动。

根据前文所述,当温度不变,提高压下速率时会令坯料温度升高,I区温度要明显高于II区和III区,如图4所示。同时更高的压下速率使得DRX体积分数降低,如图5所示,并且等效应力减小,如图7所示。I区的DRX体积分数最多,而III区的DRX体积分数最小,DRX体积分数降低,导致对损伤的修复能力降低,从而使得I区的损伤最低,而III区的损伤最大,最容易损伤,如图8所示。

参考文献:

- [1] Han S, Li X, Liu Y, et al. Effect of aging treatment on the microstructure and properties of 2.2 GPa tungsten-containing maraging steel [J]. *Materials*, 2023, 16 (14): 4918.
- [2] Dourandish S, Champlaud H, Morin J B, et al. Microstructure-based finite element modeling of a martensitic stainless steel during hot forging [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123: 2833-2851.
- [3] 刘孝山, 宋皎, 夏圣旭, 等. 数值模拟技术在高温合金中的应用 [J]. *铸造*, 2025, 74 (7): 880-894.
- [4] Liu T Y, Liu B L, Cheng J, et al. Role of processing parameters on relative density, microstructure and mechanical properties of selective laser melted titanium alloy [J]. *China Foundry*, 2024, 21 (6): 676-684.
- [5] Reyes L A, Paramo P, Salas Zamarripa A, et al. Influence of processing parameters on grain size evolution of a forged superalloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 25: 179-187.
- [6] Luo S, Yao J, Li J, et al. Influence of forging velocity on temperature and phases of forged Ti-6Al-4V turbine blade [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9 (6): 12043-12051.
- [7] He H, Chen K, Yi Y, et al. Influence of forging temperature on the microstructures and mechanical properties of a multi-directionally forged Al-Cu-Li alloy [J]. *Metals and Materials International*, 2021, 28: 433-447.
- [8] Li Q, Li H, Chai Z, et al. Regional differences in mechanical properties of high-pressure vacuum casting AlSi10MnMg

3 结论

(1) 模锻过程中,高温区集中于I区。II区由于接触模具,散热较快;III区暴露于空气中,所以温度较低。压下速率增大也会使整体温度升高,但分布规律不变。

(2) 温度升高能够促进原子扩散与位错运动,降低再结晶临界应力,使得DRX体积分数增大。DRX起始于I区,并逐渐扩展,稳定时I区的比例最高。压下速率降低会延长变形时间,有利于位错释放与再结晶的进行,进而提高DRX体积分数。

(3) 温度升高可增强材料的流动性,降低应力应变。III区因摩擦应力较小,而模具边缘由于流动速度快,出现应力集中现象。应变速率增加会使应力应变增大,高值区分布于I、II区及模具边缘。

(4) 温度升高能促进DRX细化晶粒、修复微裂纹,同时材料流动性增强可缓解应力集中,从而降低损伤。压下速率降低同样可通过提高DRX比例和降低应力应变来减少损伤。在保证低成本的情况下,1 100 °C和压下速率100 mm/s更适合马氏体时效钢的模锻。

- automotive rear longitudinal beam [J/OL]. *China Foundry*, 1-11.
- [9] 吴明琦, 杨慕尧, 杨军, 等. 耐压铝合金套筒低压铸造数值模拟分析与工艺设计 [J]. *铸造*, 2025, 74 (12): 1597-1605.
- [10] Rajesh K V D, Buddi T. Finite element analysis of chromium and nickel alloyed steel billets forged under warm forming process using Deform-3D [J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2021, 979: 81-92.
- [11] 邓高生, 刘勇, 牟宜华, 等. 数值模拟辅助设计小型外壳体铸造工艺 [J]. *铸造*, 2024, 73 (12): 1761-1765.
- [12] Zhao J, Deng Y, Zhang J, et al. Effect of temperature and strain rate on the grain structure during the multi-directional forging of the AlZnMgCu alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 756: 119-128.
- [13] 荣川, 杨劫人, 杜新, 等. TiAl合金形变热处理及超细晶制备技术进展 [J]. *材料热处理学报*, 2025, 46 (2): 28-43.
- [14] Atia M K S, Jain M K. A parametric study of FE modeling of die-less clinching of AA7075 aluminum sheets [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 132: 717-728.
- [15] Najibi A, Shojaeefard M H. Fourier and time-phase-lag heat conduction analysis of the functionally graded porosity media [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 136: 106183.
- [16] 陈婕, 邱春林, 李长生, 等. 两种模型对锻造成形数值模拟结果的影响 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51 (11): 82-86.
- [17] 唐海燕, 杨卯生, 孟文佳, 等. Cr-Co-Mo-Ni齿轮钢的热变形行为及模锻工艺的有限元模拟 [J]. *工程科学学报*, 2016, 38 (1): 77-86.

- [18] Shi J, Shuai M, Chen X, et al. Dynamic recrystallization behavior and numerical simulation of 2209 duplex stainless steel [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110892.
- [19] 陈英杰, 李全安, 陈晓亚, 等. 镁合金动态再结晶模拟研究现状及展望 [J]. *材料热处理学报*, 2024, 45 (9): 12–26.
- [20] Hristov D H, Tomov B I, Kolev D K. Stresses and strains in a die for closed-die forging of cylindrical spur gears [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1990, 23 (1): 55–63.
- [21] Zhang H, Lin B, Wang L, et al. Deformation behavior and microstructure evolution of AZ31 Mg alloy during gradient thermal compression [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 28: 1215–1226.
- [22] Kan Q, Zhao J, Xu X, et al. Temperature-dependent cyclic plastic deformation of U75VG rail steel: experiments and simulations [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 140: 106527.
- [23] 周礼菊, 孙如梦, 高振伟, 等. 基于CAE的汽车铝合金控制臂锻造成形工艺 [J]. *锻压技术*, 2024, 49 (3): 1–7.
- [24] Pan Z, Li Y, Song Y, et al. Effects of strain rate on the tensile and creep-fatigue properties of 316H stainless steel [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 200: 104774.
- [25] 王兵, 刘飞, 常永甫, 等. TC4叶栅环等温成形规律研究 [J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48 (5): 91–94.
- [26] Lazaro A F, Tavares S S M, Perez G, et al. Evaluation of post weld heat treatments and susceptibility to sulfide stress corrosion cracking of simulated HAZ in forged supermartensitic stainless steel UNS S31427 [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 152: 107494.
- [27] Pommier H, Busso E P, Morgeneyer T F, et al. Local approach to stress relaxation cracking in a AISI 316L-type austenitic stainless steel: tomography damage quantification and FE simulations [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 183: 170–179.
- [28] Yin J, Hu R, Shu X. Closed-die forging process of copper alloy valve body: finite element simulation and experiments [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 10: 1339–1347.
- [29] 毛闯. 复杂构件局部锻造过程晶粒尺寸预报与工艺优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [30] Switzner N T, Van Tyne C J, Mataya M C. Effect of forging strain rate and deformation temperature on the mechanical properties of warm-worked 304L stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210 (8): 998–1007.