

大规格气阀电锻成形参数加载模式设计及应用

权国政¹, 余炎泽¹, 赵 江¹, 许东晓², 戴魏魏²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 南京中远海运船舶设备配件有限公司 江苏省船舶动力系统零件
先进制造工程技术研究中心, 江苏 南京 211121)

摘要: 大规格气阀电锻过程是一个超长程、超长时塑性变形过程, 如何通过设计电锻加载路径以实现变形和晶粒尺寸的协调控制是一个困难且重要的问题。针对此问题, 基于电-热-力多场耦合分析理论和晶粒尺寸演变模型, 建立了大规格气阀电锻成形过程有限元模型; 设计了电流和锻粗力的多级加载路径, 研究了不同加载模式对电锻成形件的形状、温度和晶粒尺寸的影响规律。结果表明, 增大电流可使温度显著升高, 进而导致晶粒粗化, 而较大的锻粗力可使温度降低, 从而起到细化晶粒的作用。通过协调电流和锻粗力的峰值位置和水平可获得形状圆滑、晶粒细小的电锻件。此外, 基于 BP 神经网络模型和案例推理方法, 开发了大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统, 实现了电锻工艺参数加载模式的智能化设计。

关键词: 气阀; 电锻; 组织演化; 参数加载路径; 多场多尺度耦合

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.07.017

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 07-0160-08

Design and application of loading mode for electric upsetting parameters of large-scale valves

Quan Guozheng¹, Yu Yanze¹, Zhao Jiang¹, Xu Xiaodong², Dai Weiwei²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Advanced Manufacturing of Ship Power System Components, Cosco Shipping Marine Equipment & Spares (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 211121, China)

Abstract: The electric upsetting process of large-scale valves is an ultra-long and ultra-time plastic deformation process, it is difficult and important to design the loading path of electric upsetting to achieve coordinated control of deformation and grain size. Therefore, based on the above problem, a finite element model for the electric upsetting process of large-scale valves was constructed based on the electrical-thermal-mechanical multi field coupling analysis theory and the grain size evolution models. Then, the multistage loading paths involving current and upsetting force were designed, and the influence laws of different loading modes on the shape, temperature and grain size of formed parts during electric upsetting were studied. The results show that increasing current significantly increases the temperature and leads to grain coarsening, while larger upsetting force decreases the temperature, thereby refining the grain size. By coordinating the positions and levels of peak values for current and upsetting force, the electric upsetting parts with smooth shape and fine grain can be obtained. In addition, based on the BP neural network model and case-based reasoning method, a design system for the loading mode of electric upsetting process in large-scale valves is developed, and the intelligent design of loading mode for the electric upsetting process parameters is achieved.

Key words: valve; electric upsetting; microstructure evolution; loading path of parameter; multi-field and multi-scale coupling

Ni80A 高温合金是一种典型的奥氏体耐热合金, 因其具有优异的高温性能, 如强度、蠕变强度和抗晶间腐蚀性, 已被广泛应用于制造船用柴油机气阀^[1-2]。气阀作为柴油机的关键热端部件, 与阀座

配合形成密闭空腔压燃柴油, 对柴油机的可靠性起着至关重要的作用。气阀是一种典型的盘杆类构件, 具有高达 36% 的截面变化率, 该独特的形状特点决定了其特殊的制造方法, 即电锻预成形结合模锻净成形工艺^[3-5]。在大规格气阀电锻成形过程中, 坯料的成形形状和晶粒尺寸是决定电锻成形质量的重要指标^[6]。一方面, 气阀坯料变形段很长, 电锻成形时间超长, 坯料变形时极易出现凹陷、波浪、失稳等形状缺陷, 导致后续模锻过程产生折叠缺陷;

收稿日期: 2024-05-29; **修订日期:** 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52175287); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2022NSCQ-MSX0593)

作者简介: 权国政 (1980-), 男, 博士, 教授

E-mail: quanzg3000@sina.com

另一方面,工件受到长时间的高温作用,导致晶粒粗化甚至异常长大,且电锻留存的粗晶在后续模锻过程中很难被细化。为了实现超长程、超长时电锻成形过程中成形形状和晶粒尺寸的协同控制,需要精确设计高阶次动态变化电锻参数加载路径。然而,电锻参数变量多、组合复杂,难以获得理想的电锻件形状和晶粒尺寸对应的参数加载模式。因此,研究大规格气阀超长程、超长时电锻成形过程中参数加载模式对成形形状和晶粒尺寸的影响,对提高气阀的综合力学性能具有重要意义。

电锻过程是坯料在电-热-力多场耦合作用下发生塑性变形并连续累积的过程,其中,影响电锻成形的关键变量繁多,如锻粗力、电流、夹持电极和锻粗缸后退速度等,采用传统的试错法来设计这些可变参数以实现成形形状和晶粒尺寸的协调控制耗时且成本高,而有限元分析方法为其提供了一种有效的解决方案。目前的研究主要集中于通过有限元模拟,揭示关键参数变量对电锻成形过程中温度场演变、成形缺陷和晶粒尺寸的影响。Jeong H S 等^[7]和 Nuasri P 等^[8]研究了多种恒定参数(电流、锻粗力和砧子速度)对坯料电锻成形的影响。Nuasri P 等^[9]基于有限元模拟表明了坯料倒角及其尺寸对电锻过程表面凹坑缺陷有着决定性的影响。Quan G Z 等^[10]研究了二次锻粗缺陷的形成过程,并通过设计三阶段的电流加载路径消除了该缺陷。盛雪^[11]以电锻坯料凹陷深度与晶粒不均匀度因子为评价指标,优化了电流和锻粗力的加载路径。权国政等^[12]以镍基合金气阀为研究对象,提出了一套电锻成形晶粒均匀化控制方法,并进行了中等规格气阀的电锻工艺验证。然而,针对大规格气阀超长程、超长时电锻过程,如何设计电锻加载路径并实现智能优化仍是一个难点。

本文以大规格气阀电锻成形形状和晶粒尺寸的协同控制为目标,基于电-热-力多场耦合分析理论和晶粒尺寸演变模型,建立了 Ni80A 高温合金大规格气阀电锻成形有限元模型,设计并研究了不同电流和锻粗力的多级加载路径及其组合对电锻成形形状和晶粒尺寸的影响。以不同模式下的电锻有限元模拟结果作为底层数据,进一步开发了大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统,实现了大规格气阀电锻过程中电流和锻粗力变加载路径的自动化设计与优化。

1 电锻多场多尺度耦合有限元模型

电锻过程是一个在电-热-力多场交互作用下,

金属发生塑性变形并连续累积的过程,在有限元模拟时,需要考虑材料塑性变形行为、电-热-力多场交互作用和显微组织演化机制。对于超长程、超长时的电锻变形过程,采用大塑性变形方法进行分析^[13-17]。同时,电锻成形是一个电-热-力多场交互作用过程,一方面需要考虑电场、热场和结构场之间的交互作用^[18-19],如图1所示;另一方面,需要考虑动态再结晶机制和晶粒生长机制对晶粒尺寸的耦合影响。本文采用的镍基高温合金的动态再结晶体积分数和晶粒尺寸模型参考文献[20]和文献[21]。

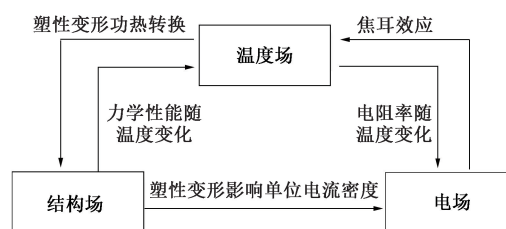


图1 电-热-力多场交互作用

Fig. 1 Interaction of electrical-thermal-mechanical coupling

基于电-热-力多场耦合分析理论,本文在非线性有限元软件 MSC. Marc 中建立了电锻有限元分析模型,并将晶粒尺寸演变模型程序化植入电锻有限元分析模型中。值得注意的是,电锻坯料及其成形模具具有轴对称特征,故将电锻有限元模型简化为二维轴对称,如图2所示。在电锻有限元模型中,将坯料设置为刚塑性体,砧子电极和夹持电极设置为刚体,采用四边形网格划分方法对坯料和电极划分网格。在坯料右侧施加锻粗力边界条件;砧子电极左侧施加零电势和速度边界条件;夹持电极外侧施加电流和夹持力边界条件。砧子电极和夹持电极材料选择 TZM 高温合金,电锻坯料材料为 Ni80A 高温合金,电阻率、热导率、屈服强度等具体材料参数参考文献[20]、文献[22]和文献[23]。

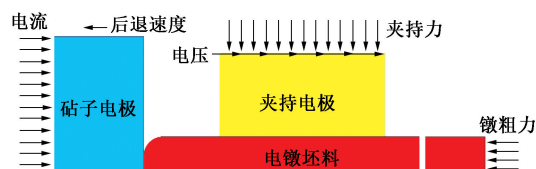


图2 电锻有限元模型

Fig. 2 Finite element model for electric upsetting

2 结果与讨论

2.1 电锻非线性加载模式设计

大型电锻过程需要变形的坯料长度和锻粗时间

相当长,若工件在持续高温下长时间变形,会促使晶粒粗化。此外,镦粗力在大型电镦成形过程中也起着重要作用,它不仅影响坯料的温度分布,而且直接决定工件的形状变化。更重要的是,电流与镦粗力的配合在很大程度上决定了坯料能否稳定变形。因此,为了实现了大型电镦成形过程中成形形状和晶粒尺寸的控制,在进行变加载路径设计时,主要考虑电流和镦粗力两个关键参数^[5,24],而这两个变量的加载路径均与镦粗缸位移密切相关。因此,本文根据镦粗缸的总位移,将电流和镦粗力细分为多个阶段,且电流和镦粗力在每一阶段对应的镦粗缸位移均相同。设计的电流和镦粗力的加载路径及组合后的加载模式列于表 1 (为下文表述方便,加载模式 1 与 4 内容设置相同),详细的电流和镦粗力的

表 1 设计的电流和镦粗力加载路径
Table 1 Designed loading paths for current and upsetting force

加载模式	电流加载路径	镦粗力加载路径
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	1
5	2	1
6	3	1

加载路径如图 3 所示。图 3a 展示了镦粗力加载路径 1 分别与电流加载路径 1~3 的配合,其中,电流的增加梯度和下降梯度不同,电流峰值位置保持一致。图 3b 展示了电流加载路径 1 分别与镦粗力加载路径 1~3 的配合,其中镦粗力峰值及其位置不同。

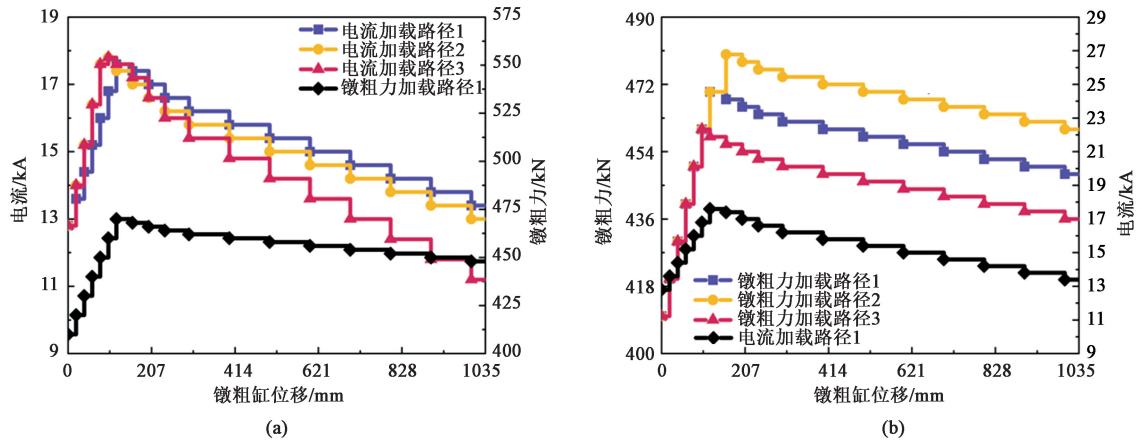


图 3 不同的电流 (a) 和镦粗力 (b) 的加载方式

Fig. 3 Loading patterns of different currents (a) and upsetting forces (b)

2.2 电镦成形过程温度和晶粒尺寸演化

图 4 展示了加载模式 1 下镦粗缸位移分别为 93.5、319.3、557.8 和 1033.4 mm 时的坯料温度和形状分布。当镦粗缸位移从 0 mm 增加至 93.5 mm 时,坯料在接触电阻和自身电阻的焦耳热作用下,温度快速升高并逐渐聚料形成“蒜头”,如图 4a 所示。可以注意到,此时形成的“蒜头”体积小,温度分布均匀。当镦粗缸位移从 93.5 mm 增加至 319.3 mm 时,随着电流和镦粗力增加至峰值,坯料“蒜头”直径逐渐增大,如图 4b 所示。此时,坯料“颈部入口”处的截面积显著小于“蒜头”位置的截面积,使得坯料“颈部入口”处的电流密度最大,因此“颈部入口”处的温度较高。当镦粗缸位移从 319.3 mm 增加至 1033.4 mm 时,在高温和镦粗力的共同作用下,材料不断地向砧子电极和夹持电极之间的部位聚集,期间保持稳定的镦粗过程。

而后,随着电流和镦粗力的逐步降低,坯料“蒜头”的温度也随之降低,此时“蒜头”的直径开始慢慢减小,直至电镦完成,如图 4c 和图 4d 所示。

图 5 展示了加载模式 1 下镦粗缸位移分别为 93.5、319.3、557.8 和 1033.4 mm 时的坯料晶粒尺寸变化。当镦粗缸位移从 0 mm 增加到 93.5 mm 时,“蒜头”中心位置的晶粒快速生长至 38.6 μm,如图 5a 所示。这是因为“蒜头”中心处的温度较高,晶粒生长显著。当镦粗缸位移从 93.5 mm 增加至 319.3 mm 时,在“蒜头”中部靠近“颈部入口”的区域,晶粒快速生长至 65.7 μm,如图 5b 所示。主要原因是长时间高温导致该区域晶粒粗化。当镦粗缸位移从 319.3 mm 增加至 557.8 mm 时,粗晶区逐渐由向“蒜头”中心区域收缩;当镦粗缸位移增加至 1033.4 mm 时,坯料的粗晶区位于“蒜头”心部,如图 5c 和图 5d 所示。这是因为在稳定镦粗过

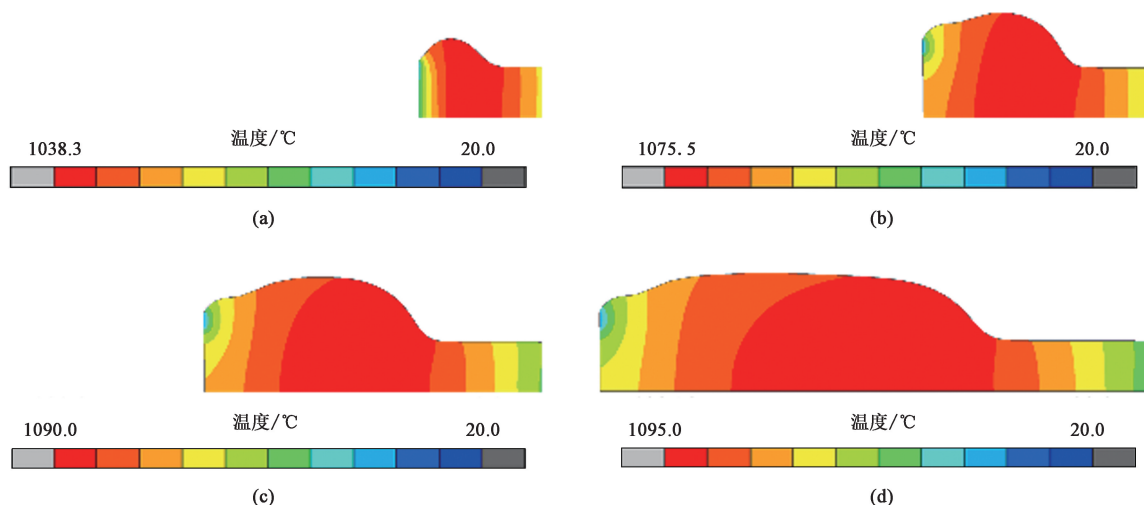


图4 加载模式1时不同镦粗缸位移下坯料的温度分布和形状变化

(a) 93.5 mm (b) 319.3 mm (c) 557.8 mm (d) 1033.4 mm

Fig. 4 Temperature distributions and shape variations of blank for loading mode 1 under different upsetting cylinder displacements

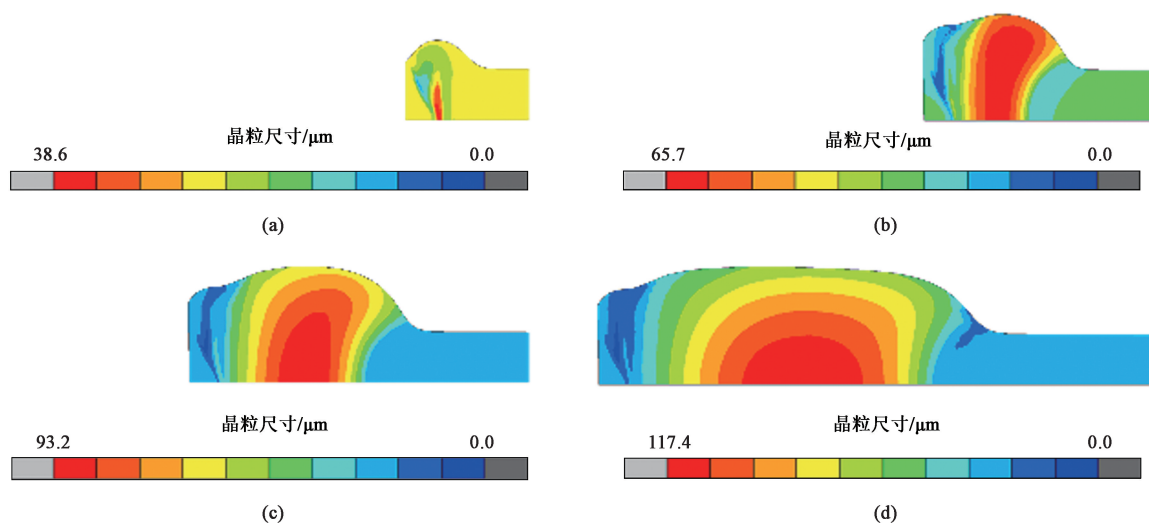


图5 加载模式1时不同镦粗缸位移下坯料的晶粒尺寸分布

(a) 93.5 mm (b) 319.3 mm (c) 557.8 mm (d) 1033.4 mm

Fig. 5 Grain size distributions of blank for loading mode 1 under different upsetting cylinder displacements

程中,“蒜头”心部长时间处于高温状态,使该区域晶粒生长作用更为显著。

2.3 镦粗力加载路径对温度和晶粒尺寸分布的影响

为分析不同镦粗力加载路径对坯料的温度和晶粒尺寸分布的影响,图6展示了加载模式1~3下镦粗缸位移为1033.4 mm时的坯料温度和晶粒尺寸分布云图。由图6可知,在不同镦粗力加载路径下,坯料的温度分布和晶粒尺寸分布相似,坯料的高温区和粗晶区主要位于“蒜头”心部,温度和晶粒尺寸均沿着径向和轴向逐渐降低。这是因为“蒜头”心部温度较高,该位置晶粒生长作用发挥主导作用。

此外,图6也说明了镦粗力加载路径对电锻件形状和晶粒尺寸的分布有着重要影响。加载模式3下的粗晶区域更大。这是因为加载模式3的镦粗力更小,使坯料的应变速率更小,进而使晶粒生长机制发生时间更长,对晶粒产生了粗化作用。

为了进一步揭示不同镦粗力加载路径对电锻坯料的温度和晶粒尺寸演变的影响,绘制了加载模式1~3时坯料的最高温度和最大晶粒尺寸随镦粗缸位移的演化曲线,如图7所示。根据图7可以观察到,不同镦粗力加载路径下最高温度的变化规律相似,最高温度随着镦粗缸位移的增加先急剧上升,而后

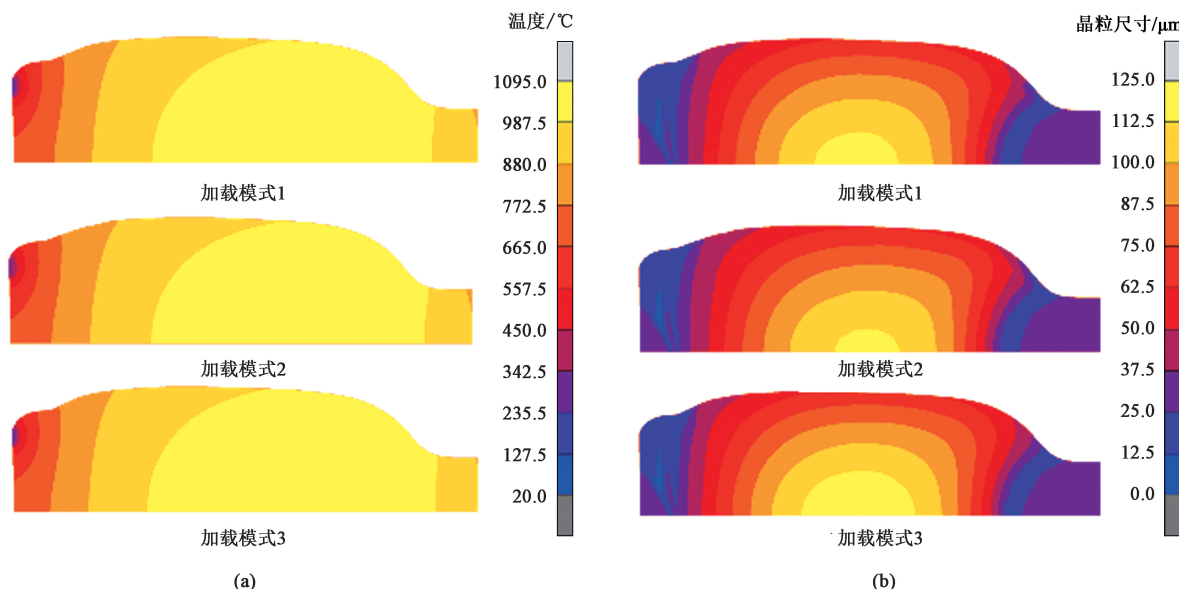


图 6 不同镦粗力加载路径下温度 (a) 和晶粒尺寸 (b) 的最终分布

Fig. 6 Final distributions of temperature (a) and grain size (b) under different upsetting force loading paths

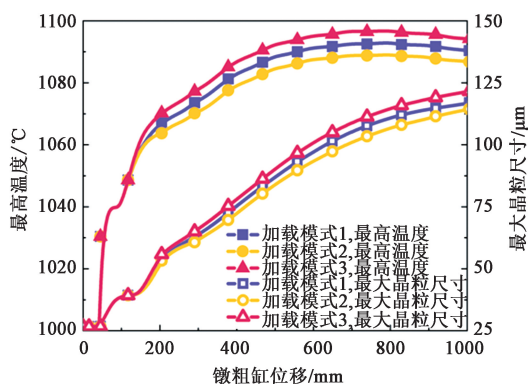


图 7 不同镦粗力加载路径下最高温度和最大晶粒尺寸随镦粗缸位移的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of maximum temperature and maximum grain size with upsetting cylinder displacement under different upsetting force loading paths

上升梯度变缓并逐渐趋于稳定。不同镦粗力加载路径下最大晶粒尺寸均随镦粗缸位移的增加而增加。对比不同镦粗力加载路径下坯料的最高温度和最大晶粒尺寸随镦粗缸位移的演化曲线可以发现, 最大晶粒尺寸迟于最高温度到达峰值。这主要是因为, 在镦粗开始前, 坯料需要预热至较高的温度。此时晶粒尺寸基本保持恒定。而后随着温度的快速升高, 晶粒在晶粒生长的作用下长大。当温度达到峰值并开始下降时, 由于时间较长且温度仍相对较高, 晶粒尺寸持续增大至峰值。由图 7 中可以发现, 当镦粗缸位移为 1000.0 mm 时, 加载模式 1~3 的最大晶粒尺寸达到峰值, 分别为 117.4、115.2 和 122.1 μm , 其中加载路径 3 时的最大晶粒尺寸最大。

2.4 电流加载路径对温度和晶粒尺寸分布的影响

在镦粗力加载路径相同的情况下, 电流是影响变形温度的主要因素, 直接决定了电锻过程中坯料的晶粒尺寸演变。图 8 展示了镦粗缸位移为 1033.4 mm 时, 加载模式 4~6 时的坯料温度和晶粒尺寸分布云图。对比图 6 和图 8 可以发现, 不同加载模式下坯料的温度分布和晶粒尺寸分布相似, 高温区和粗晶区均位于“蒜头”心部。值得注意的是, 在加载模式 5 和加载模式 6 时, “蒜头”区域出现了一个较为明显的平台 (图 8 圈示部分), 而加载模式 4 时获得的坯料形状则更为光滑和饱满。这主要是因为当加载模式 5 和加载模式 6 下的加载电流达到峰值时, 镦粗力还未达到峰值, 即使在较高的温度下, 材料聚料较少, 使得呈台阶状。此外, 电流加载路径对电锻过程中晶粒尺寸的分布有着重要影响, 加载模式 4~6 的粗晶区域如图 8b 中的中心区域所示, 其中加载模式 4 时形成的粗晶区范围小。另一方面, 加载模式 4~6 下形成的粗晶区晶粒尺寸分别为 112.5~125.0 μm 、100.0~112.5 μm 、87.5~100.0 μm , 加载模式 4 时的粗晶区的晶粒尺寸更大。

为了进一步阐明不同电流加载路径对电锻坯料的温度和晶粒尺寸演变的影响, 绘制了在加载模式 4~6 的情况下坯料的最高温度和最大晶粒尺寸随镦粗缸位移的演化曲线, 如图 9 所示。根据图 9 可以观察到, 不同电流加载路径下的最高温度和最大晶粒尺寸均随着镦粗缸位移的增加先迅速上升, 而后缓慢上升至稳定。当镦粗缸位移为 1000.0 mm 时,

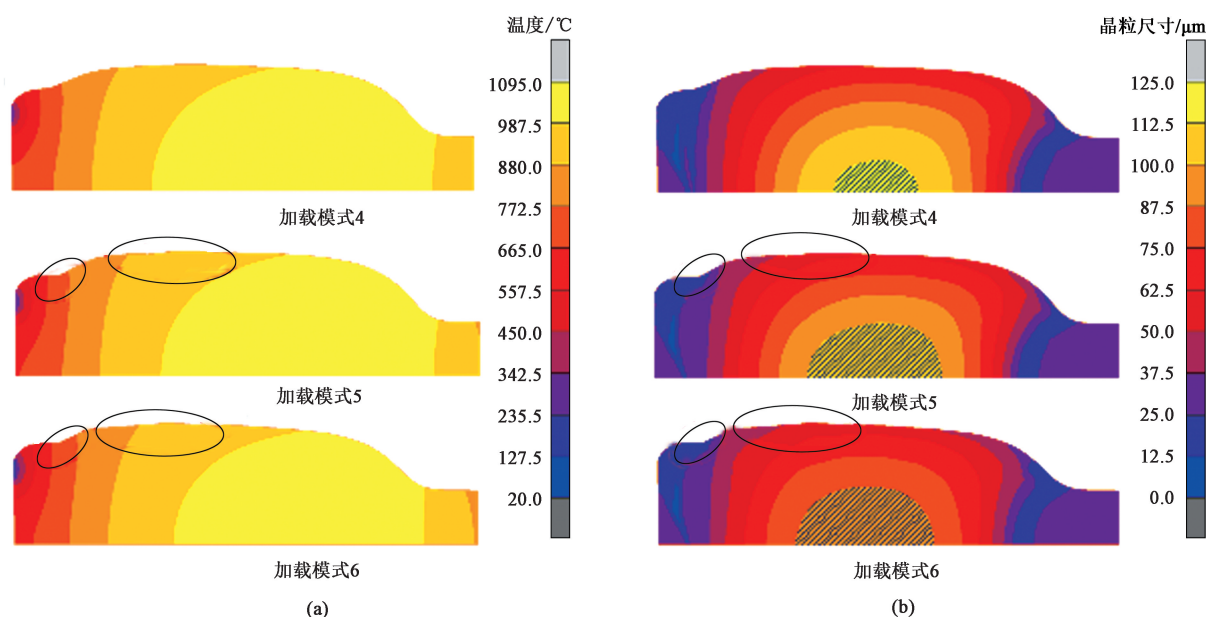


图8 不同电流加载路径下温度 (a) 和晶粒尺寸 (b) 的最终分布

Fig. 8 Final distributions of temperature (a) and grain size (b) under different current loading paths

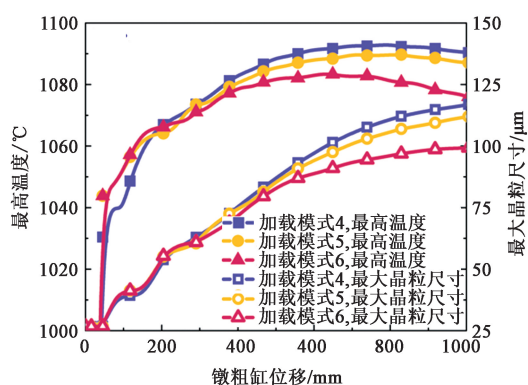


图9 不同电流加载路径下最高温度和最大晶粒尺寸随镦粗缸位移变化曲线

Fig. 9 Variation curves of maximum temperature and maximum grain size with upsetting cylinder displacement under different current loading paths

加载模式4~6的最大晶粒尺寸达到峰值,分别为117.4、112.3和99.3 μm ,表明加载模式4下获得的最大晶粒尺寸相对更大。这证实了较高的电流可以获得更光滑且饱满的电锻件形状,但同时也会导致晶粒粗化。

3 电锻非线性加载模式应用

以上分析明确了不同的电流和镦粗力加载路径对大规格气阀电锻成形过程中的形状变化、温度变化和晶粒尺寸演化的影响。为了获得形状光滑且晶粒细小的大规格电锻件,本文基于非线性加载模式

案例对大规格气阀电锻件形状和晶粒尺寸的影响规律,开发了大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统,实现了大规格气阀电锻加载模式的智能化设计。系统设计的逻辑流程如图10a所示。在进行大规格气阀电锻工艺加载模式设计时,首先,对以往的电锻加载模式进行分析,通过构建BP神经网络模型,预测电锻初始工艺参数。然后,整理不同规格下的电锻工艺加载模式,建立电锻工艺加载模式案例库,运用案例推理方法设计电锻工艺参数加载路径。结合电锻初始工艺参数,智能设计了电锻工艺加载模式。基于大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统逻辑流程,本文开发了大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统,如图10b所示。大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统包括3个模块:下料长度计算(1)、电锻初始工艺参数设计(2)和电锻加载模式设计(3)。首先,在下料长度计算模块中,输入气阀的关键尺寸参数,计算或自定义电锻坯料的下料长度。然后,在电锻初始工艺参数设计模块中,基于气阀的关键尺寸参数和设计的坯料下料长度,设计或自定义电锻工艺的初始参数。最后,通过电锻加载模式设计模块,设计出形状光滑且晶粒最细小的电流加载路径和镦粗力加载路径。

4 结论

(1) 本文介绍了电锻多场多尺度耦合有限元模

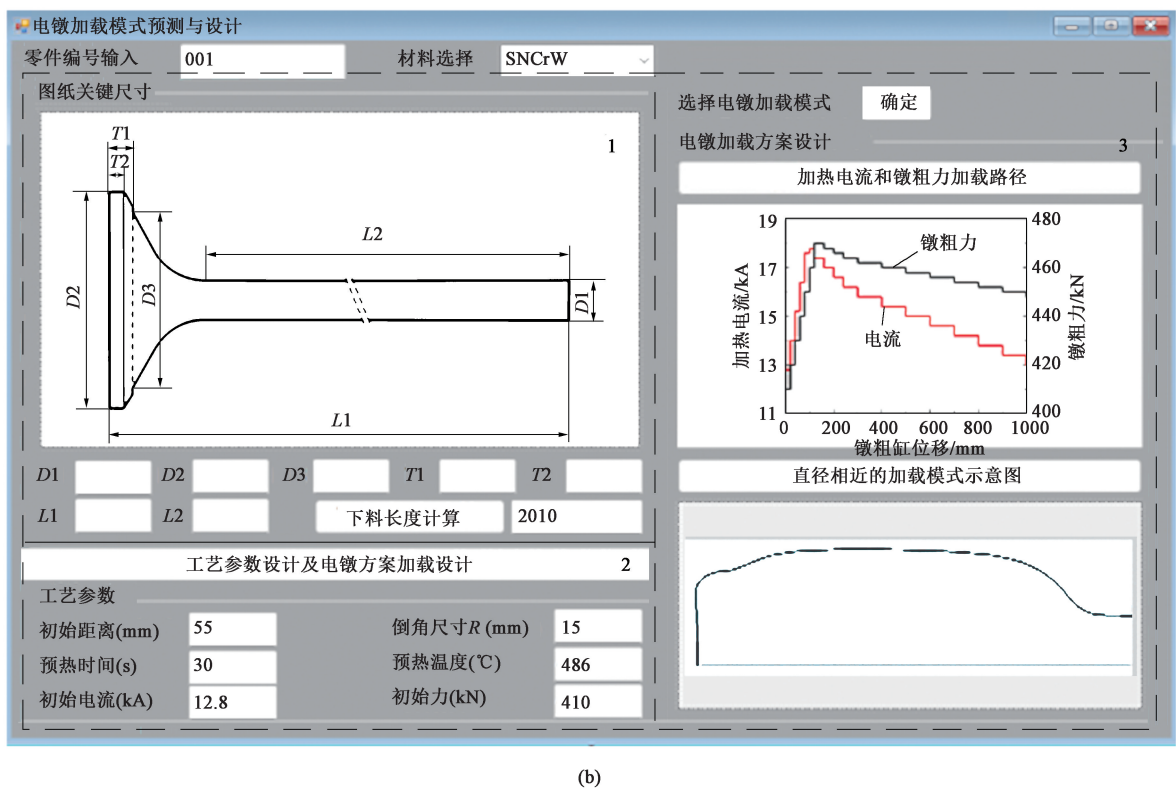
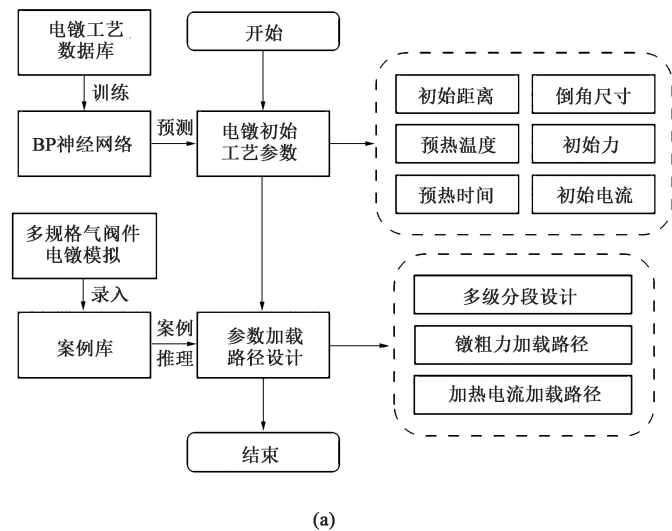


图 10 大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统逻辑流程 (a) 和界面 (b)

Fig. 10 Logic process (a) and interface (b) of loading mode design system for electric upsetting process of large-scale valves

型的基本理论, 包括电-热-力多场耦合分析理论和晶粒尺寸演变模型; 建立了大规格气阀超长程、超长时电锻成形多场多尺度耦合有限元模型。

(2) 设计了电流和镦粗力的多阶加载模式, 研究了不同加载模式对工件变形形状、温度分布和晶粒尺寸分布的影响。结果表明, 较大的电流可使温度显著升高, 甚至导致晶粒粗化, 而较大的镦粗力和较慢的镦粗速度可使温度降低, 从而使得细化晶粒。

(3) 基于 BP 神经网络模型和案例推理方法,

开发了大规格气阀电锻工艺加载模式设计系统, 实现了形状光滑且晶粒细小的电流加载路径和镦粗力加载路径智能化设计。

参考文献:

[1] Quan G Z, Mao A, Luo G C, et al. Constitutive modeling for the dynamic recrystallization kinetics of as-extruded 3Cr20Ni10W2 heat-resistant alloy based on stress-strain data [J]. Mater. & Des., 2013, 52: 98-107.

- [2] Farahat A I Z, El-Bitar T A. Effect of Nb, Ti and cold deformation on microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steels [J]. Mater. Sci. Eng., A, 2010, 527: 3662–3669.
- [3] Kommel L. Microstructure and properties characterization of polycrystalline Ni-Fe-Cr-Based Superalloy EP-718E after electric upsetting [J]. Key Eng. Mater., 2017, 721: 467–472.
- [4] Elaiyaraja K, Periyasamy P. Inprocess quality control through proportionate valve in electrical upsetting of engine valves [J]. Appl. Mech. Mater., 2014, 592: 2665–2670.
- [5] Quan G Z, Luo G C, Wen H R. Influence of electric upsetting process variables on temperature field evolution by multifield coupling finite element analysis [J]. Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2015, 16 (7): 1525–1531.
- [6] 权国政, 潘佳. 大规格电锻技术研究方法及研究目标的新突破及进展 [J]. 精密成形工程, 2014 (5): 18–24.
Quan G Z, Pan J. New breakthrough and progress of research methods and objectives about large size electric upsetting technology [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014 (5): 18–24.
- [7] Jeong H S, Cho J R, Lee N K, et al. Simulation of electric upsetting and forging process for large marine diesel engine exhaust valves [J]. Mater. Sci. Forum., 2006, 510: 142–145.
- [8] Nuasri P, Aue-U-Lan Y. Influence of process parameters on electric upsetting process by using finite element modeling [J]. Key Eng. Mater., 2017, 728: 42–47.
- [9] Nuasri P, Aue-U-Lan Y. Investigation of the surface dimple defect occurring during the production of an electric upsetting process by viscoplastic finite element modeling [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2018, 98: 1047–1057.
- [10] Quan G Z, Zou Z Y, Zhang Z H, et al. A study on formation process of secondary upsetting defect in electric upsetting and optimization of processing parameters based on multi-field coupling FEM [J]. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, 2016, 19: 856–864.
- [11] 盛雪. 大规格电锻坯料与电极接触部位凹陷的形成机理及控制 [D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
Sheng X. Formation Mechanism and Control of Basin-like Depression Defect in Contact Area of Billet and Anvil in Large-scale Electrical Upsetting Process [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.
- [12] 权国政, 张钰清, 赵江, 等. 大规格气阀电锻成形晶粒细化控制研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (16): 121–133.
Quan G Z, Zhang Y Q, Zhao J, et al. Study at controlling grain refinement and distribution uniformity in electric upsetting process of large-scale valve [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (16): 121–133.
- [13] 谢水生, 王祖唐. 金属塑性成形工步的有限元数值模拟 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
Xie S S, Wang Z T. Finite Element Numerical Simulation of Metal Plastic Forming Process Steps [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [14] 肖景容, 李尚健. 塑性成形模拟理论 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
Xiao J R, Li S J. Simulation Theory of Plastic Forming [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1994.
- [15] 邝卫华. 气阀电锻成形过程的数值模拟与实验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2002.
Kuang W H. Numerical Simulation and Experimental Research on the Process of Valve Electric Upsetting [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2002.
- [16] 李尚健. 金属塑性成形过程模拟 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
Li S J. Simulation of Metal Plastic Forming Process [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [17] 宋少云. 多场耦合问题的协同求解方法研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Song S Y. Research and Application of Collaborative Solution Methods for Multi Field Coupling Problems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [18] 董湘怀. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Dong X H. Principles of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [19] 刘劲松. MSC. MARC 在材料加工工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
Liu J S. Application of MSC. MARC in Material Processing Engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [20] 邱慧敏. 大规格气阀坯电锻-锻几何缺陷的形成机理及控制 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Qiu H M. Formation Mechanism and Control of Geometric Defects in Electric Upsetting-forging of Large Size Valve Billets [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [21] 詹宗杨. 镍基超合金动态再结晶与晶粒生长模型构建及其应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Zhan Z Y. Formation Construction of Dynamic Recrystallization and Grain Growth Models for Ni-based Superalloy as well as Its Application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [22] 姚志浩, 董建新, 张麦仓, 等. H738 高温合金热加工行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (6): 1199–1204.
Yao Z H, Dong J X, Zhang M C, et al. Hot deformation behaviour of superalloy GH738 [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42 (6): 1199–1204.
- [23] 门正兴. 电阻连续加热成形电-热-力耦合试验及模拟 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Men Z X. Simulation Analysis and Experimental Research of the Forming Process by Continuous Resistance Heating [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [24] Quan G Z, Liu Q, Zhao J, et al. Determination of dynamic recrystallization parameter domains of Ni80A superalloy by enhanced processing maps [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2019, 29 (7): 1449–1464.