

# 高强钢船用零部件精密锻造变形规律及应用

宫兆岩, 黄建波, 宫兆森\*

(青岛布林瑞特机械有限公司, 山东 即墨 266200)

**摘要** 高强钢船用零部件在海洋工程装备中占据着重要地位。精密锻造技术能够显著提升零部件的综合性能。通过系统研究高强钢材料在高温条件下的变形特性, 深入分析精密锻造过程中金属的具体流动行为, 建立温度、变形速度、模具摩擦等工艺参数对变形均匀性的影响规律模型。采用物理实验和数值模拟相结合的方法, 展示多因素耦合作用下材料变形的实际演化过程。基于上述一系列研究成果开展工程应用实践, 优化了船用典型零部件的锻造具体工艺参数, 显著改善了产品在实际生产中的变形均匀性, 有效提升了零部件最终呈现的成形质量, 旨在为高强钢船用零部件的精密锻造生产提供理论参考。

**关键词** 高强钢; 船用零部件; 精密锻造; 变形规律

**中图分类号**: U668; TG26

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.004

## 0 引言

船舶工业朝着大型化以及高性能化的方向发展, 对船用零部件提出了更高的要求。高强钢材料凭借其优异的强度与韧性, 成为关键结构件的首选材料。传统锻造工艺存在变形不均匀和组织性能不稳定等问题, 难以满足高端船用零部件的性能需求。精密锻造技术通过精确控制成形过程实现材料的高效利用, 成为船用零部件制造的重要发展方向。当前对于高强钢精密锻造变形规律的研究相对分散, 缺乏系统性的理论指导。

## 1 高强钢精密锻造变形行为基础研究

### 1.1 高强钢材料高温变形特性

高强钢在高温环境中的变形行为有着显著的温度敏感性和应变速率依赖性特点, 它的流动应力会随着温度不断升高而逐渐降低。在 950 ~ 1 150 °C 这个温度区间, 高强钢的奥氏体组织会逐步出现软化情况, 晶界迁移速度会随着温度升高而不断加快, 启动动态再结晶过程。材料于热变形过程当中会引发动态回复以及动态再结晶这两种主要软化机制, 通过位错重排以及新晶粒的形核和长大过程来实现组织的完全更新<sup>[1]</sup>。

### 1.2 船用零部件精密锻造变形过程分析

船用零部件在精密锻造时会经历复杂的三维塑性流动过程, 金属材料从坯料中心朝着模具型腔各个方向进行充填, 其流动路径会受到零件形状的约束。变

形初期阶段坯料与模具接触区域率先产生塑性变形。例如: 筋板交接处以及深腔部位这类难以充填的区域往往需要较大成形力才能完成充填, 这些位置容易出现充填不足或者折叠等工艺缺陷, 模具与坯料之间的摩擦作用对金属流动的阻碍效应十分显著<sup>[2]</sup>。

## 2 精密锻造关键工艺参数对变形规律的影响

### 2.1 锻造温度对变形均匀性的影响规律

锻造温度是影响高强钢变形均匀性的关键工艺参数, 温度过低会致使材料塑性不足进而产生开裂倾向, 温度过高则容易引发晶粒粗化以及氧化脱碳等现象<sup>[3]</sup>。在 900 ~ 1 000 °C 这个温度范围内, 材料的变形抗力比较大且金属流动困难, 容易在薄壁区域形成应变集中现象, 从而导致局部变形过度或不足问题。当温度提升到 1 050 ~ 1 100 °C 这个区间的时候, 材料流动性会显著改善且各区域应变分布趋于均匀化, 锻件内部组织会变得更加均匀细密, 温度场分布会受到模具预热温度、坯料初始温度以及变形过程中热量传递等多重因素影响<sup>[4]</sup>。

### 2.2 变形速度对金属流动的影响规律

变形速度直接对金属流动动力学条件及微观组织演变路径起到决定性作用。低速变形条件下(应变速率小于 0.01 s<sup>-1</sup>), 材料有充足的时间来进行动态再结晶过程, 金属流动处于平稳有序的状态。当变形速度提高到中等水平(应变速率 0.01 ~ 1 s<sup>-1</sup>), 变形热效

**作者简介**: 宫兆岩(1980-), 男, 专科, 研究方向: 船舶与海洋工程装备配套技术。

**\*通信作者**: 宫兆森(1981-), 男, 专科, 副高级工程师, 研究方向: 船舶与海洋工程装备配套技术。E-mail: KXT\_1231@163.com

应会逐渐显现, 试样内部的温度会有所升高, 此时动态再结晶与变形的竞争关系能达到最佳平衡状态。在高速变形时 (应变速率大于  $1 \text{ s}^{-1}$ ), 变形热积累会导

致局部温度急剧上升, 如图 1 所示, 不同变形速度下的等效应力分布存在显著差异, 并且应力峰值位置发生明显偏移<sup>[5]</sup>。

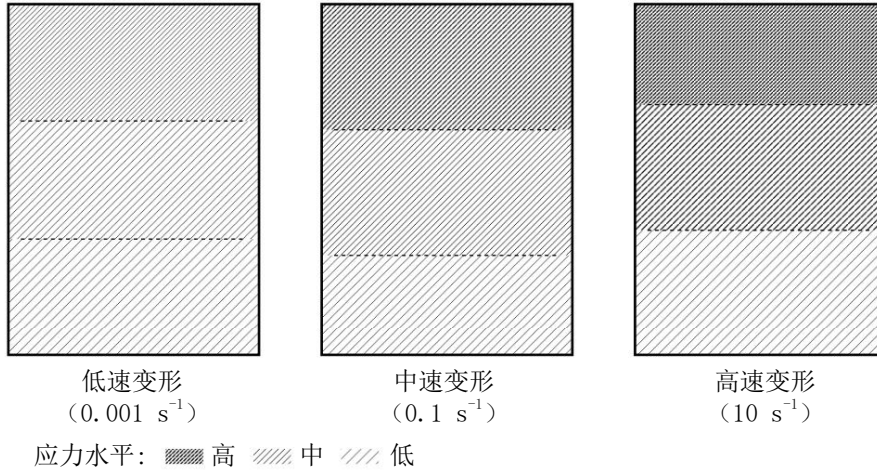


图 1 不同变形速度下锻件等效应力分布云图

### 2.3 模具摩擦对变形分布的影响规律

模具和坯料接触界面的摩擦状态对金属流动路径以及应力应变分布发挥着重要调控作用。摩擦力使接触区域金属流动受到阻碍进而形成难变形区, 这会对锻件的质量产生影响。在高摩擦条件下 (摩擦系数大于 0.3), 坯料表层金属跟模具会发生粘着现象, 该区域金属几乎不会流动而变形, 主要集中在心部区域, 表层与心部的应变差异十分明显。中等摩擦条件 (摩擦系数 0.15 ~ 0.25) 下, 金属能够沿着模具表面产生一定程度的滑移, 变形分布相对来说比较合理, 既可以保证充型, 又能避免过大的应变梯度。摩擦条件的控制通常是借助润滑剂的选择以及模具表面处理工艺来实现, 其中石墨润滑剂的应用是最为广泛的。

### 2.4 多因素耦合作用下的变形演化规律

锻造的时候温度、变形速度以及摩擦条件同时作用于金属变形过程, 这三者之间存在着复杂的相互影响与耦合关系, 单因素优化很难获得最佳效果。温度升高会降低材料对变形速度的敏感性, 同时改变摩擦界面的润滑状态, 高温条件下润滑剂有效性下降, 摩擦系数会相应增大。为综合评价多因素影响, 引入变形均匀性系数进行定量分析:

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \quad (1)$$

式 (2) 中,  $\eta$  为变形均匀性系数 (无量纲),  $n$  为测量点总数,  $\varepsilon_i$  为第  $i$  个测量点的等效应变,  $\bar{\varepsilon}$  为所有测量点等效应变的平均值。该系数值越接近 1 表示变

形分布越均匀、锻件质量越好, 通过对不同工艺参数组合下的均匀性系数进行计算与比较, 能够确定最优的工艺参数匹配方案。

## 3 变形规律在船用零部件精密锻造中的应用

### 3.1 变形规律指导下的工艺参数优化

根据前面研究得出的变形规律成果, 为典型船用高强度钢零部件制定系统工艺参数优化方案, 采用数值模拟和试验验证相结合的方法确定最佳工艺窗口。在优化过程中运用正交试验设计方法, 研究温度、速度以及润滑条件之间的交互作用效应, 得到各因素的显著性排序, 明确主次影响关系。优化前后工艺参数的对比情况如表 1 所示, 优化后零件的抗拉强度提高了 8%, 延伸率提升了 12%, 变形均匀性系数从 0.73 提高到 0.89, 综合性能有了显著改善。

表 1 工艺参数优化前后对比

工艺参数	优化前	优化后	性能指标	优化前	优化后
锻造温度 / °C	1 050	1 100	抗拉强度 / MPa	850	918
变形速度 / (mm · s <sup>-1</sup> )	12	6	延伸率 / %	15	16.8
摩擦系数	0.30	0.20	均匀性系数	0.73	0.89

### 3.2 变形均匀性控制技术应用

变形均匀性控制技术的核心是通过合理工艺设计与过程调控, 以此减小锻件内部应变梯度, 实现组织

性能均匀分布。采用预锻—终锻两步成形工艺可有效改善金属流动状况，预锻阶段用较大变形量打破铸态组织，终锻阶段在较小压下量条件下完成锻件精确成形。变形过程监测系统能够实时采集压力机载荷曲线，及时发现异常变形情况并开展工艺调整工作，以此保证批量生产过程中产品质量的稳定性。局部加热技术对难变形区域进行补充加热，配合模具局部冷却技术对易过热区域作降温处理，实现温度场主动调控。

### 3.3 船用典型零部件锻造工艺应用案例

以某船用高强钢法兰类零件为研究对象来开展精密锻造工艺应用实践，此零件外径为450 mm且内径是

200 mm，高度达120 mm，其材料属于屈服强度690 MPa级别的高强度船用结构钢。采用优化之后的工艺参数将坯料加热温度控制在1 100 ℃，把模具预热到380 ℃并将变形速度设定为6 mm/s，图2所示为该零件锻造过程金属流线分布模拟结果，金属流线沿着零件轮廓呈现平滑流动状态，且法兰盘面区域与筒体连接部位应变分布均匀。实际生产结果显示锻件力学性能达到船用钢材技术规范要求。

### 3.4 基于变形规律的产品质量提升方法

产品质量的提升是建立在对变形规律深刻理解且精确控制基础之上的，通过构建工艺参数、变形行为

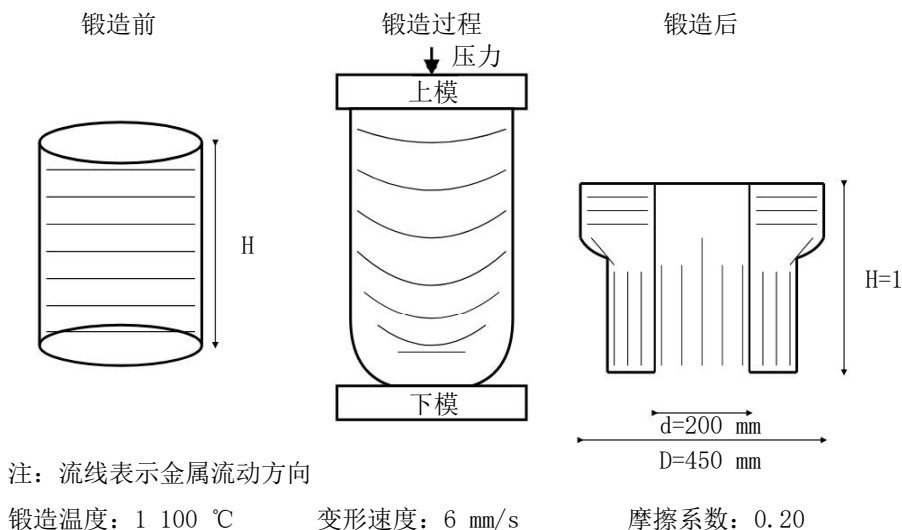


图2 船用法兰零件锻造金属流线分布图

与组织性能之间的关联模型来实现质量的预测与控制。开发基于有限元模拟的工艺设计平台，在实际投入生产之前对新产品的锻造过程开展虚拟试验，以此预测可能出现的缺陷类型以及具体位置。建立锻造过程数据库系统，记录不同产品在各种工艺条件下的变形特征以及质量指标，借助数据挖掘技术提取工艺知识，最终实现了产品合格率从85%提升至96%的显著改善效果。

## 4 结束语

高强钢船用零部件精密锻造变形规律研究获得系统性成果，建立了材料高温变形特性与锻造金属流动机制，明确了温度、变形速度、摩擦条件等工艺参数和变形均匀性定量关系。通过系统研究揭示了多因素耦合变形演化规律。工程应用实践表明，基于变形规律开发控制技术可有效改善零部件成形质量。后续研究应拓展到复杂形状零部件变形预测领域，开发智能

化工艺优化系统，推动高强钢船用零部件精密锻造技术数字化发展，为船舶工业提供有力的技术保障。

## 参考文献：

- [1] 曹睿,刘梓中. 高强钢焊缝金属强韧性研究进展[J]. 金属学报,2026,62(01):64-80.
- [2] 周雨婷,栾道成,樊华,等. 汽车用高强钢及其焊接研究进展[J]. 焊接技术,2025,54(10):1-6,145.
- [3] 梅晓雄. 锻造温度对25Cr2Ni4MoVCe 高强钢机械转子组织与性能的影响[J]. 锻压技术,2025,50(11):45-52.
- [4] 王作帅,左超,肖涵琛,等. 外部加压的某型船用钢铁磁腔体力磁耦合实验研究[J]. 测试技术学报,2025,39(03):284-290.
- [5] 张鹏,吴迪,翁羽,等. 高强度船用钢抗活性破片毁伤装甲防护试验[J]. 中国舰船研究,2024,19(S2):134-140.