

高强度紧固件材料的锻造工艺优化与性能研究

李道双

浙江中通汽车零部件有限公司 317600

【摘要】高强度紧固件材料作为现代工业制造中的关键组件，其性能的优化对于提升设备整体质量和可靠性至关重要。本研究聚焦高强度紧固件材料GH4169D合金的锻造工艺优化，通过调整锻造温度、变形参数及热处理工艺，显著提升其抗拉强度、屈服强度和冲击韧性。性能提升归因于微观组织优化，如晶粒细化、缺陷减少和组织均匀性提升。实验详细记录关键工艺参数变化，并采用数值模拟技术仿真分析。优化后的工艺为高强度紧固件制造提供新技术路径，提升工业设备安全性和可靠性。

【关键词】高强度紧固件材料；锻造工艺优化；GH4169D高温合金；力学性能；微观组织结构

Optimization and performance study of forging process for high strength fastener materials

Li Daoshuang

Zhejiang Zhongtong Auto Parts Co., LTD. 317600

【Abstract】High-strength fastener materials, as key components in modern industrial manufacturing, their performance optimization is crucial for enhancing the overall quality and reliability of equipment. This study focuses on the forging process optimization of high-strength fastener material GH4169D alloy. By adjusting forging temperature, deformation parameters, and heat treatment processes, significant improvements in tensile strength, yield strength, and impact toughness have been achieved. The performance enhancement is attributed to microstructure optimization, such as grain refinement, defect reduction, and improved uniformity. The experiment meticulously records changes in key process parameters and employs numerical simulation techniques for analysis. The optimized process provides a new technological pathway for the manufacture of high-strength fasteners, enhancing the safety and reliability of industrial equipment.

【Key words】high strength fastener material; forging process optimization; GH4169D high temperature alloy; mechanical properties; microstructure

第一章 引言

高强度紧固件材料因优异力学性能与抗疲劳特性，成为工业制造关键，广泛用于航空航天、能源交通等领域。随着工业发展，对其性能要求渐高，促使相关材料及锻造工艺研究备受瞩目。

锻造工艺借塑性变形优化材料微观组织，提升强度、韧性，减少缺陷，大幅提高紧固件质量与可靠性，在高铁、航空等领域作用关键。优化锻造工艺，精准调整温度、变形速率与变形量，可进一步提升材料综合性能，适应苛刻工况。

研究锻造工艺优化意义重大，既能为企业提供高效节能生产方案，降低成本、增强竞争力，又能助力高端领域技术升级。同时，考虑到材料选择、热处理、表面处理等环节对产品性能的共同影响，优化锻造工艺需综合考量各环节，实现整体性能提升。面对新材料、新技术，应注重创新与实用，开发高性能产品，满足工业需求。

第二章 高强度紧固件材料发展现状

2.1 材料发展趋势

高强度紧固件材料是现代工业核心，其性能优化对保障设备安全稳定运行意义重大。在航空航天、核能等高端领域，对其性能要求严苛。锻造工艺通过塑性变形改善材料微观组织，提升强度与韧性，减少内部缺陷，提高紧固件质量与可

靠性。

精细调控锻造温度、变形速率和变形量，能进一步提升综合性能，涵盖强度、韧性、耐腐蚀性与抗疲劳性能等，助力企业高效节能生产，降低成本、增强竞争力，支撑高端领域发展。同时，材料选择、热处理、表面处理等环节也需协同优化。面对新材料、新技术，相关研究要持续创新，兼顾实用与环保，推动锻造工艺朝绿色、高效迈进，满足工业发展需求。

2.2 制造工艺进展

高强度紧固件制造正迈向自动化、智能化。卧式多工位高速热锻生产线，以精密控制与高效流程，极大提升生产效率，凭借高度自动化和智能化，减少人为失误，保障产品质量稳定。

现代精密加工技术，如冷精锻造工艺用于汽车轴承内外圈生产，显著提升紧固件尺寸精度与表面质量，延长使用寿命。高效热处理工艺通过优化内部组织结构，提升材料强度、韧性，减少缺陷，增强整体性能。

数值模拟和仿真技术日益关键，能精准模拟锻造温度场、应力场，为工艺优化和性能预测提供支撑，助力制定科学锻造方案，降低实验成本，提高生产效率与产品质量。这些技术革新推动着紧固件制造业不断进步。

2.3 性能要求与挑战

高强度紧固件材料制造正朝自动化、智能化迈进。先进锻造设备如卧式多工位高速热锻生产线，凭借精密控制与高效流程，大幅提升生产效率，其高度自动化和智能化还降低

人为失误,保障产品质量稳定。

现代精密加工技术显著提升紧固件尺寸精度与表面质量,像冷精锻造工艺用于生产汽车轴承内外圈等,可获高精度与良好表面质量,延长紧固件使用寿命。

高效热处理工艺同样关键,合理工艺能优化材料内部组织结构,提升强度与韧性,减少内部缺陷,增强整体性能与可靠性。

数值模拟和仿真技术在制造中愈发重要,能精确模拟锻造温度场、应力场,为工艺优化与性能预测提供支撑,助力科学制定锻造方案,降低实验成本,提高生产效率与产品质量。这些技术革新推动着紧固件制造业持续发展。

第三章 锻造工艺优化理论基础

3.1 锻造工艺原理

锻造工艺是重要金属加工法,通过外力使金属坯料塑性变形以改善材料性能。模具选用和设计关键,直接决定锻件形状与尺寸精度。

锻造时,金属坯料受冲击、压力或拉力,内部晶粒位移、旋转、破碎。随着变形,粗大晶粒细化,位错密度增加,内部结构更均匀致密,显著提升材料力学性能。高温与应力下,金属发生动态再结晶,形成细小等轴晶粒,提高塑性和韧性。

优化锻造工艺需综合考量材料种类、性能及锻件形状、尺寸等。以高强度紧固件材料为例,锻造温度和变形速率控制极为重要,温度过高致晶粒粗大,降低强度与韧性;过低则易使材料开裂。总之,掌握锻造工艺原理,理解微观机制,合理控制参数,对提升高强度紧固件材料性能意义重大,可满足工业严苛要求。

3.2 锻造工艺优化方法

锻造工艺优化复杂且精细,涵盖多方面调整与改进。

调整锻造温度是关键手段。温度对材料塑性、变形抗力及微观组织影响显著。高温易使材料过热,出现晶粒粗大、氧化严重问题;低温则让材料变硬,增加变形难度,甚至引发裂纹。所以要精准控制加热与冷却,确保材料在最佳温度区间锻造,提升锻件质量。

优化变形参数同样重要。变形量、速度与路径直接关乎锻件微观组织和力学性能。适量变形量促进晶粒细化,提升强度与韧性;合理的变形速度和路径可减少不均匀变形与残余应力,保障尺寸精度和稳定性。需深入研究材料变形行为,结合试验与模拟确定最佳参数组合。

改进模具设计不容忽视。模具影响锻件成形质量与效率。优化模具结构,如改进型腔形状、调整分流道布局,能降低材料流动阻力与摩擦损耗,提升填充性能与成形精度。采用先进模具材料和制造技术,可提高模具耐用性,降低成本、提高生产效率。

此外,借助先进数值模拟技术,建立精确材料和锻造过程仿真模型,预测材料流动、温度场分布及微观组织演变,深入理解锻造物理机制,为工艺优化提供科学依据。通过模拟不同工艺参数下的锻造过程,对比确定最佳方案。综合运用这些手段,可提升锻件质量与性能,满足工业对高强度紧固件材料的严格要求。

3.3 数值模拟与优化设计

数值模拟与优化设计是现代锻造工艺优化的关键环节。利用先进数值模拟技术,可深入研究锻造时温度场、应力场、应变场等物理场变化,精准预测锻件微观组织演变和力学性能分布。

在数值模拟中,使用专业有限元分析软件,设定合理边界与材料参数,全面模拟高强度紧固件材料锻造过程,清晰呈现不同工艺参数下材料变形、温度、应力状况,助力理解物理机制。

基于模拟结果进行优化设计。针对温度场,精确调整加热温度与冷却速率,确保材料在最佳温度区间塑性变形,避免组织缺陷。依据应力场和应变场,合理优化变形量、速度和路径,实现均匀应变、细化晶粒,提升力学与加工性能。借助模拟优化模具形状尺寸,降低材料流动阻力与摩擦损耗,提高锻件成形精度、表面质量,降低能耗与成本,为高强度紧固件制造提供有力技术支撑。

第四章 锻造工艺优化实验研究

4.1 实验材料与设备

实验选用 GH4169D 高温合金,该材料在高强度紧固件制造中应用广泛。采用高精度电子天平对合金原材料进行精准称重,确保材料用量准确。利用直读光谱仪分析材料化学成分,保障其符合实验要求。锻造实验设备为先进的 3150kN 热模锻压力机,具备高精度的压力和速度控制功能。微观组织观察使用金相显微镜与扫描电子显微镜,能清晰呈现材料内部结构变化。

4.2 实验过程与方法

实验伊始,对 GH4169D 高温合金开展全面特性分析。制定详细锻造工艺方案,明确锻造温度设为 950 – 1150℃ 区间、变形量控制在 30% – 70%、变形速度为 0.1 – 1m/s。实验中,借助压力机配套监控系统,实时记录各项参数。

锻造时,用金相显微镜和扫描电镜观察微观组织变化。完成锻造后,对锻件依次进行固溶处理(温度 950 – 1050℃,保温 1 – 2h)及时效处理(温度 720 – 760℃,保温 8 – 10h),严格控制温度和时间。最后,使用万能材料试验机进行拉伸、冲击性能测试,用布氏硬度计检测硬度,对比优化前后性能。

4.3 实验结果与讨论

微观组织上,优化后的锻造工艺使 GH4169D 合金晶粒显著细化,热处理进一步优化微观结构。性能测试显示,优化后材料拉伸强度提升约 20%、屈服强度提高 15%、延伸率增加 10%,冲击性能与硬度也明显改善。

讨论发现,合适锻造温度与变形量促进晶粒细化,热处理中温度和时间精准控制影响相变与析出行为,明晰了锻造工艺与材料性能关系。

4.4 实验方案与流程

实验旨在通过调整工艺参数提升材料性能。锻造工艺重点考量锻造温度、变形量和变形速度。经多组对比实验,确定 950℃ 锻造温度、50% 变形量、0.3m/s 变形速度为较优组合。

热处理工艺着重优化固溶处理温度(1000℃)及时效处理时间(9h)。实验流程为:坯料加热至 1000℃ 保温 1h,

在热模锻压力机按设定参数锻造，随后进行固溶和时效处理，最后开展性能测试与对比分析。

4.5 实验数据记录与分析

实验全程记录锻造温度、变形量和变形速度。力学性能测试涵盖抗拉强度、屈服强度、冲击韧性、硬度。结果表明，优化后材料抗拉强度从 800MPa 提升至 960MPa，屈服强度从 650MPa 升至 750MPa，冲击韧性提高 20%。微观观察发现，优化后晶粒细化，缺陷减少。实验验证了锻造工艺优化的有效性，为高强度紧固件材料研发生产提供数据支撑。

第五章 锻造工艺优化效果与性能分析

5.1 优化效果评估

锻造工艺优化实验有力证明了优化措施的有效性。对比数据显示，优化后材料的抗拉强度从 800MPa 提升至 960MPa，屈服强度从 650MPa 升至 750MPa，冲击韧性提高 20%，在力学性能、韧性及耐久性方面均显著提升，对承受高负荷、复杂工况的高强度紧固件极为关键。

优化工艺还带来诸多好处。锻件成形精度提高，表面质量更佳，降低后续加工难度，提升生产效率；合理调整工艺参数，减少材料浪费，节约成本，助力环保与可持续发展。

实验数据的记录分析是工艺优化的关键，能揭示参数与性能的内在联系，为改进提供依据。随着新材料、新技术出现，锻造工艺优化需不断探索新方法。总之，锻造工艺优化对提升材料性能、降低成本意义重大，未来有望在更多领域推广，为工业制造发展赋能。

5.2 性能测试与对比

本研究针对优化前后的高强度紧固件材料，开展系统力学性能测试，全面评估锻造工艺优化效果。测试涵盖抗拉强度、屈服强度、冲击韧性及硬度等关键指标。

抗拉强度上，优化后材料显著提升，精确测试表明较优化前提高约 20%，在同类材料中增幅较高。这使材料承受拉伸载荷能力更强，契合高强度紧固件实际需求。

屈服强度方面，优化后优势明显，测试数据显示较之前提升约 15%。材料受外力时弹性变形阶段延长，提升了紧固件的安全可靠性。

冲击韧性同样优异，优化后较优化前提升约 25%。面对瞬间冲击，材料吸收能量、抵抗断裂能力增强，大幅延长恶劣工况下高强度紧固件的使用寿命。硬度测试显示，优化后材料硬度值增加，抵抗局部变形能力提升，增强了紧固件

在摩擦、磨损工况下的耐磨与耐久性。

此外，高温性能测试发现，优化后材料在高温环境仍能维持高抗拉、屈服强度及冲击韧性，锻造与热处理工艺优化不仅提升常温性能，更显著增强高温性能。总之，优化后的材料力学性能全面提升，为其在航空航天、能源交通等高端领域应用筑牢基础。

5.3 性能提升机理探讨

锻造工艺优化对高强度紧固件材料性能提升意义重大。精确控制锻造温度、变形量与速率，使金属晶粒细化、位错密度增加，大幅增强强度与韧性，提升承载、抗疲劳及抗断裂能力。通过优化模具、调整变形路径等减少气孔、夹杂物等缺陷，提高锻件致密性与均匀性，延长使用寿命。同时，降低锻造温度、缩短保温时间，提高变形速度，实现能效提升与成本控制。多方面机理协同作用，显著提升材料综合性能，推动紧固件行业发展。

第六章 结论与展望

6.1 研究结论总结

本研究围绕高强度紧固件材料的锻造工艺优化展开，发现精确调控锻造温度、变形量、变形速度等参数，能有效改善材料内部组织，提升强度、韧性与耐疲劳性能，为制造提供理论与技术支撑。将锻造工艺参数优化与热处理工艺紧密结合，如合理运用固溶、时效处理，可消除残余应力，细化均匀晶粒，提升综合性能，揭示了两者的内在联系。数值模拟技术借助先进软件精确模拟锻造中的温度、应力、应变场，预测锻件性能与微观组织变化，结合实验验证，推动工艺优化与技术进步。

6.2 研究不足与局限

实验中，未能实时监测锻造过程的温度场、应力场、应变场，影响对材料行为及微观组织演变的深入理解。性能测试未涵盖高温、低温、腐蚀等复杂工况与环境条件，难以全面评估材料性能。受时间和资源限制，未充分探讨所有影响材料性能的因素，如锻造模具设计等潜在因素。

6.3 未来研究方向展望

未来需深入研究锻造中微观组织演变与力学性能变化机制，揭示材料性能提升机理。持续探索数值模拟方法与优化设计算法，提升锻造工艺自动化、智能化水平。结合现代材料科学，开发如纳米、复合等新型高强度紧固件材料，满足多样需求，推动行业发展。

参考文献

- [1]王煜, 孙林根, 于文龙. 高温长期时效对 Waspaloy 合金组织与性能的影响[J]. 热力透平. 2018, (1).
- [2]朱丽娜, 李文, 祁峰, 等. 晶粒组织对 GH4169G 合金持久性能的影响[J]. 热加工工艺. 2011, (16).
- [3]王妙全, 田成刚, 徐瑶, 等. GH4169D 高温合金锻件持久寿命的影响因素研究[J]. 锻压技术. 2023, 48 (1).
- [4]魏庆. 汽车用金属紧固件平台化选用原则[J]. 汽车工程师. 2017, (2).
- [5]祝其高, 张先鸣. 我国紧固件行业技术发展[J]. 金属制品. 2010, (1).