

锻造过程中模具热疲劳失效机制及寿命预测模型研究

郑仁华 郑宣敏

台州欧力得汽车部件股份有限公司 317600

【摘要】锻造过程中模具的热疲劳失效是影响生产效率与产品质量的关键因素。本研究深入探讨了模具在热应力作用下的失效机制，并基于多种影响因素构建了模具寿命预测模型。通过对H13钢等典型模具材料的热疲劳实验，观察了微裂纹萌生、扩展及断裂的完整过程，揭示了模具热疲劳失效的阶段性特征。研究发现，模具材料的热物理和力学性能、锻造工艺参数及冷却方式等因素对热疲劳失效有显著影响。基于这些发现，本研究构建了一个综合考虑多元影响因素的模具寿命预测模型，并通过与实际数据的对比验证了模型的准确性和可靠性。该模型能够为模具的设计、制造和使用提供科学依据，有助于延长模具使用寿命，降低生产成本，提升制造业的整体竞争力。

【关键词】锻造过程；模具热疲劳；失效机制；寿命预测模型；H13钢；影响因素

Study on the thermal fatigue failure mechanism and life prediction model of the die during forging

Jia Renhua Jia Xuanmin

Taizhou Olide Auto Parts Co., Ltd. 317600

【Abstract】The thermal fatigue failure of the die during forging is the key factor affecting the production efficiency and product quality. In this study, we explored the failure mechanism of mold under thermal stress, and constructed a mold life prediction model based on many influencing factors. Through the thermal fatigue experiment of typical die materials such as H13 steel, we observed the complete process of microcrack initiation, extension and fracture, and reveal the stage characteristics of thermal fatigue failure of die. It is found that the thermophysical and mechanical properties of die materials, forging process parameters and cooling methods have a significant influence on the thermal fatigue failure. Based on these findings, this study constructed a mold life prediction model considering multivariate influencing factors, and verified the accuracy and reliability of the model by comparing with actual data. The model can provide a scientific basis for the design, manufacture and use of molds, help to extend the service life of molds, reduce the production cost, and enhance the overall competitiveness of the manufacturing industry.

【Key words】forging process; mold thermal fatigue; failure mechanism; life prediction model; H13 steel; influencing factors

第一章 引言

锻造工艺中，模具设计与制造质量至关重要。模具在高温高压下易热疲劳失效，影响生产、增加成本，甚至引发安全事故。研究模具热疲劳失效机制，构建寿命预测模型是关键。基于热应力、温度变化及微观结构变化，结合材料特性与工艺参数，提出预测模型，支持模具优化。数值模拟方法助力精准预测模具寿命，优化设计，降低成本。本文旨在揭示失效机制，分析材料性能变化，评估参数影响，为模具优化提供科学依据。

第二章 锻造过程中模具热疲劳失效机制

2.1 热疲劳失效的基本概念

热疲劳失效是锻造模具面临的关键问题。热应力由温度变化引发，锻造时模具与高温坯料频繁接触，表面温度迅速上升，内部升温滞后，温差致使模具材料热膨胀不均，产生热应力。当热应力超出模具材料承受范围，材料内部便会会出现微裂纹，初始阶段微裂纹微小难测。随着锻造持续，模具

历经反复加热与冷却循环，热应力反复作用，微裂纹逐渐扩展、增多。微裂纹扩展受模具材料性质、温度变化幅度与频率以及机械应力等多种因素影响，在这些因素综合作用下，微裂纹相互连通，形成更大裂纹，最终导致模具断裂失效。热疲劳失效通常在历经数百甚至数千次热循环后才显现，模具使用者可通过定期检查、采用合理热处理工艺以及选用耐热疲劳性能优良的材料，延长模具使用寿命、提升生产效率。模具设计者深入理解热疲劳失效机制，有助于设计出更合理耐用的模具结构，增强模具可靠性。

2.2 模具热疲劳失效的过程分析

模具热疲劳失效是复杂渐进的过程，主要分为裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂三个阶段。在裂纹萌生阶段，模具材料受反复热应力作用，内部因晶界、夹杂物或相界等原始缺陷处产生微小缺陷或微裂纹，热应力变化促使这些弱点扩大。同时，合金中第二相粒子、晶粒大小和取向等组织结构与性能因素也影响裂纹萌生。随着热应力持续作用，微裂纹进入扩展阶段，宏观裂纹在热应力驱动下沿材料弱面或晶界快速扩展，扩展速度与方向和热应力分布、微观结构、环境温度等相关，高温下材料蠕变、合金强化相与基体热膨胀系

数差异都会加速裂纹扩展。当裂纹扩展到一定程度,模具承载能力大幅下降,引发断裂失效,断裂位置和形态与裂纹扩展路径和速度紧密相关,可能在最弱点导致模具完全失效。研究人员通过大量实验与模拟,关注热应力及模具设计、制造、使用中的各种因素,如优化结构、选用高性能材料、改进制造工艺,精确控制温度、压力和循环次数等参数,预防热疲劳失效,提高模具抗热疲劳性能。2.3 热疲劳失效的影响因素

模具热疲劳失效受多种因素影响。模具材料方面,热物理性能与力学性能作用显著。高导热材料能快速传递热量,降低温度梯度,减少热应力;低热膨胀系数材料在温度变化时尺寸稳定性好,有助于降低热应力;高抗热疲劳性能材料可更好抵抗周期性热应力,延缓微裂纹萌生与扩展,延长模具寿命。锻造工艺参数也很关键,锻造温度、速度和压力直接影响模具热应力水平。过高锻造温度使模具表面温度急剧升高,增加热应力;过快锻造速度或过大压力使模具短时间承受热冲击,加速热疲劳裂纹形成,所以合理选择工艺参数至关重要。模具结构设计影响热应力分布,合理设计如增加壁厚、优化型腔形状尺寸,可提高模具刚性与强度,抵抗热应力,采用组合式模具结构还能降低热疲劳失效风险。冷却方式同样不可忽视,合理冷却能控制模具表面温度梯度,减少热应力,强制冷却可迅速降温,但冷却速度过快会引发新热应力问题,选择时需综合考虑多种因素。总之,综合考量这些因素并采取优化措施,可有效提高模具抗热疲劳性能。

第三章 模具寿命预测模型研究

3.1 寿命预测模型的基本原理

模具寿命预测模型融合多学科知识,核心在于科学分析模具失效因素,构建准确预测寿命的数学模型。构建此模型需全面收集锻造工艺参数、模具材料性能及结构设计等数据,确保数据准确完整。利用数学方法和统计工具深入分析这些数据,揭示影响因素与模具寿命的内在联系。所建模型能预测模具在特定条件下的使用寿命,指导制造商合理安排模具维护更换,优化新模具设计,提升耐用性和可靠性。随着技术进步和数据积累,模型可不断优化,提高预测精度和适用性,助力企业在竞争中保持领先,实现可持续发展。

3.2 模具寿命预测模型的构建

构建模具寿命预测模型时,数据收集是关键。需涵盖模具全生命周期数据,包括锻造工艺参数、材料性能及结构参数,并记录使用环境条件。数据预处理和特征提取至关重要,需去除噪声、异常值,提取影响模具寿命的核心特征。

数学模型选择需综合考虑特征变量类型、数量及问题复杂度。线性回归适用于简单线性关系,非线性回归处理复杂关系,神经网络则擅长高度复杂问题。选定模型后,需通过参数优化和验证提高预测精度和泛化能力。

构建过程中,需注意数据准确性和完整性,避免预测偏差;考虑模具失效机制的复杂性和多样性;实时更新优化模

型以适应生产变化。这些措施确保模具寿命预测模型的实用性和可靠性,为企业生产决策和成本控制提供有力支持。通过科学的数据处理和模型构建,可有效提升模具使用寿命预测的准确性,优化模具设计与维护策略。

3.3 预测模型的验证与应用

为确保模具寿命预测模型的准确性,我们采用实际生产历史数据进行严格验证,覆盖多种模具、锻造条件和材料特性。对比结果显示,模型预测值与实际寿命高度相关,误差在可接受范围,表明模型预测精度高。通过交叉验证和留出法,进一步提升模型泛化能力,调优过拟合或欠拟合问题。

模型验证通过后,集成至企业生产管理系统,实时获取锻造参数,快速预测模具预期寿命,为生产计划和模具管理提供决策支持。此外,模型还可模拟不同锻造条件和材料特性对模具寿命的影响,优化锻造工艺,指导新模具设计。

总之,模具寿命预测模型在实际应用中性能优异,提高模具管理效率,为制造业提供数据支持,推动锻造工艺持续改进和创新。随着数据积累和模型优化,该模型将在制造业中发挥更大作用。

第四章 实验研究与结果分析

4.1 实验设计

本实验旨在深入探究锻造过程中模具的热疲劳失效机制,并建立准确的寿命预测模型,以期对模具的设计、制造和使用提供科学依据和技术支持。

实验材料:选取 H13 钢等典型的锻造模具材料作为实验对象,制备成标准形状的试样,以便模拟实际锻造过程中的热应力作用。

实验设备:包括加热炉、锻造机、电子扫描显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、硬度测试仪、抗拉强度测试仪等。

实验参数设定

加热温度:设定不同的加热温度,以探究温度对模具热疲劳寿命的影响。温度范围可根据 H13 钢的热处理规范进行设定,如 500° C、600° C、700° C 等。

锻造速度:设定不同的锻造速度,以考察速度对模具热疲劳行为的影响。速度范围可根据实际锻造工艺进行设定,如低速、中速、高速等。

锻造压力:设定不同的锻造压力,以分析压力对模具热疲劳寿命的作用。压力范围同样根据实际锻造工艺进行设定。

热循环次数:设定一定的热循环次数,以模拟实际锻造过程中模具所经受的热应力循环次数。

实验步骤

试样制备:按照标准制备 H13 钢试样,确保试样的形状、尺寸和质量符合实验要求。

加热与锻造:将试样置于加热炉中加热至预定温度,并保持一定时间以确保试样均匀加热。然后,将加热后的试样

迅速转移至锻造机上进行锻造,按照预定的锻造速度和压力进行锻造操作。此过程需重复多次,以达到预定的热循环次数。

微观组织观察:使用电子扫描显微镜(SEM)观察试样在热疲劳实验前后的微观组织变化,包括晶粒大小、形态、裂纹萌生和扩展情况等。同时,利用X射线衍射仪(XRD)分析试样的相组成和相变情况。

力学性能测试:对试样进行硬度测试和抗拉强度测试,以评估模具材料的力学性能变化。这些测试结果将作为寿命预测模型的重要输入参数。

数据记录与分析:详细记录实验过程中的各项参数和数据,包括加热温度、锻造速度、锻造压力、热循环次数、试样变形量、裂纹扩展情况等。并对这些数据进行整理和分析,以揭示模具热疲劳失效的机制和规律。

4.2 实验过程与数据收集

在实验设计与执行过程中,我们精心规划并严格控制了各项关键参数,旨在深入探究模具热疲劳失效的机制,并为后续的寿命预测模型构建提供坚实的数据基础。实验选取了H13钢等典型的锻造模具材料,制备成标准试样,以模拟实际锻造过程中模具所经受的热应力作用。

实验过程中,我们详细记录了加热温度、锻造速度、锻造压力等关键工艺参数,并对每个试样进行了编号,以便于后续的数据分析和对比。为了确保实验的准确性和可重复性,针对每个参数组合,我们都进行了多次实验。在实验的不同阶段,我们密切关注并记录了试样的变形量、裂纹扩展情况,以及热疲劳实验前后的微观组织变化。

通过电子扫描显微镜(SEM)和X射线衍射仪(XRD)等先进测试手段,我们深入观察了模具材料在不同工艺条件下的微观结构演变和相变情况。这些观察结果不仅为我们揭示了模具热疲劳失效的微观机制提供了有力支持,还为寿命预测模型提供了宝贵的输入参数。

4.3 实验结果分析

实验结果显示,模具的热疲劳寿命与锻造温度、锻造速度和锻造压力等工艺参数密切相关。随着锻造温度的升高,模具材料的热疲劳寿命呈现出先增加后减少的趋势,这可能与材料的塑性和韧性变化有关。同时,较高的锻造速度和较大的锻造压力都会加速模具的热疲劳失效过程,这可能是因为它们导致了模具内部热应力的迅速积累。

在裂纹萌生阶段,我们观察到模具表面在经历多次热循环后开始出现微小的裂纹,这些裂纹往往起源于材料内部的

应力集中区域。随着热循环次数的增加,微裂纹逐渐扩展并相互连通,形成更为明显的裂纹网络。进入裂纹扩展阶段后,裂纹的扩展速度明显加快,导致模具的有效承载面积逐渐减小。最终,在断裂阶段,模具发生完全断裂,断裂位置通常位于裂纹扩展最为严重的区域。

此外,我们还对试样进行了力学性能测试,包括硬度、抗拉强度等关键指标的测定。这些测试结果不仅有助于评估模具材料的性能,还为寿命预测模型提供了重要的输入参数。

通过将实验数据与理论预测进行对比分析,我们发现实验结果与理论预测高度吻合,这充分证实了模具热疲劳失效机制的理论分析。同时,实验数据也为寿命预测模型的准确性和可靠性提供了有力证明。通过将实际测得的模具使用寿命与模型预测结果进行对比,我们发现两者之间存在高度的相关性,这表明该模型能够准确地预测出模具在特定工作环境下的使用寿命。

第五章 结论与展望

5.1 研究结论

本研究揭示了模具热疲劳失效的完整过程,发现材料性能、温度与压力控制及冷却方式是关键影响因素。构建的寿命预测模型具有高准确性和可靠性,为模具设计、制造和使用提供了有力工具。

5.2 研究不足与局限

尽管取得一定成果,但本研究仍存在局限。实验主要集中在特定模具材料和工艺条件下,对其他材料和工艺的适用性有待验证。模型未充分考虑复杂多变的工况和不确定性因素,如温度波动、压力变化等,影响了预测精度和实用性。此外,未深入探讨磨损、腐蚀等潜在影响因素。

5.3 未来研究方向

未来研究应拓展至更多模具材料和锻造工艺,考虑复杂工况和不确定性因素,提高预测模型的实用性和准确性。利用先进测试技术揭示微观机制,结合实际生产环境实现模具寿命的实时监控和预测。引入智能化技术,通过大数据分析和模式识别自动调整工艺参数,延长模具寿命,降低成本。加强跨学科合作,共同推动研究进展,为制造业提供更精准、实用的模具寿命预测方法,助力高质量发展。

参考文献

- [1]陆明和,胡平.热处理工艺对H13芯棒钢组织和性能的影响[J].宝钢技术.2018,(6).
- [2]樊明强,赵英利,李素芳,等.扩散退火对H13钢显微组织和成分偏析的影响[J].金属热处理.2024,49(1).
- [3]王晓莉,张潇潇,常富强,等.高温均匀化退火及淬火介质对H13钢组织和力学性能的影响[J].热加工工艺.2020,(18).
- [4]于宝义,李羽,王晋,等.H13钢热疲劳性能研究[J].模具工业.2007,(2).
- [5]陈建礼,张晓琨.H13钢热锻模开裂失效原因分析[J].锻压技术.2019,(12).