



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

喷丸金属力学性能模拟分析
Simulation Analysis Of Mechanical Properties Of Shot
Peening Metals

姓 名 任则明

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 宋宗贤

职 称 讲师

完成时间 2022年6月3日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

喷丸金属力学性能模拟分析

Simulation Analysis Of Mechanical Properties Of Shot
Peening Metals

姓 名 任则明

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 宋宗贤

职 称 讲师

完成时间 2022年6月3日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院		申 报 人	姓 名	宋宗贤		
专 业	飞行器制造工程			技术职务	正高	副高	中级 √
题目名称	喷丸金属力学性能模拟分析						
题目类型	自拟	题目来源	生产实际				
课题来源、 背景及意义	<p>航空发动机叶片长期处于复杂恶劣的工作环境中,极易出现各类损伤缺陷。涡轮及风扇/压气机转子叶片由于长期处于离心载荷、热应力及腐蚀等恶劣环境下,使用性能要求极高,被列为航空发动机制造中最核心的部件之一,它的制造占据了整个发动机制造 30%以上的工作量。近几十年来,为满足航空发动机高推重比的要求,发动机涡轮进口温度越来越高,从而对发动机用热端材料的高温力学性能提出了更高的要求。而镍基合金由于其优异的热阻特性,高温下的高强度,良好的耐腐蚀特性以及优异的抗蠕变疲劳特性而广泛应用于发动机的热端部件中。受疲劳试验设备的影响,传统的观点认为,材料会存在一个疲劳极限,当承受应力低于疲劳极限时,材料不会发生疲劳断裂。但超高周疲劳阶段的试验结果证实,不存在传统意义的疲劳极限,使疲劳极限的概念受到质疑。该领域的创始人 Bathias 教授发现超高周疲劳阶段大部分疲劳寿命是在裂纹萌生阶段而不是在扩展阶段。喷丸强化技术是材料表面改性的有效手段之一,通过在材料表层引入残余压应力并改善其微观结构从而提高材料的力学性能。因此本课题对喷丸后镍基合金进行性能的研究意义重大。</p>						
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 制订研究方案。 2. 准备实验材料,对试验设备和试验方法进行学习和深入了解。 3. 进行试验,对实验所得数据进行详细记录。 4. 结合相关参考文献,分析实验数据及机理。 5. 撰写论文。 						



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计（论文）任务书

题 目：喷丸金属力学性能模拟分析

学 院：航空航天大学

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：任则明

学 号：18414030110

起止日期：2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师：宋宗贤

任务书下达日期：2021年12月3日

任务书填写要求

1. 毕业设计（论文）任务书由指导教师根据各课题的具体情况填写，经专业负责人审查签字后生效。此任务书应在毕业设计（论文）开始前一周内填好并发给学生；
2. 任务书内填写的内容，必须和学生毕业设计（论文）完成的情况相一致；
3. 任务书内有关“学院”、“专业”等名称的填写，应写中文全称，不能写数字代码。学生的“学号”要写全号（如：16014010101）；
4. 有关年月日等日期的填写，应当按照国标 GB/T 7408—94《数据元和交换格式、信息交换、日期和时间表示法》规定的要求，一律用阿拉伯数字书写。如“2004年3月21日”或“2004-03-21”。
5. 本毕业设计（论文）课题成果的要求，内容要具体化和数量化。如“毕业设计（论文）一套；A0号装配图纸1张；A2号电气控制原理图纸2张；实物样机1台；产品2件”等。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

航空发动机叶片长期处于复杂恶劣的工作环境中，极易出现各类损伤缺陷。涡轮及风扇/压气机转子叶片由于长期处于离心载荷、热应力及腐蚀等恶劣环境下，使用性能要求极高，被列为航空发动机制造中最核心的部件之一，它的制造占据了整个发动机制造 30%以上的工作量。近几十年来，为满足航空发动机高推重比的要求，发动机涡轮进口温度越来越高，从而对发动机用热端材料的高温力学性能提出了更高的要求。而镍基合金由于其优异的热阻特性，高温下的高强度，良好的耐腐蚀特性以及优异的抗蠕变疲劳特性而广泛应用于发动机的热端部件中。受疲劳试验设备的影响，传统的观点认为，材料会存在一个疲劳极限，当承受应力低于疲劳极限时，材料不会发生疲劳断裂。但超高周疲劳阶段的试验结果证实，不存在传统意义的疲劳极限，使疲劳极限的概念受到质疑。该领域的创始人 Bathias 教授发现超高周疲劳阶段大部分疲劳寿命是在裂纹萌生阶段而不是在扩展阶段。喷丸强化技术是材料表面改性的有效手段之一，通过在材料表层引入残余压应力并改善其微观结构从而提高材料的力学性能。因此本课题对喷丸后镍基合金进行疲劳性能的研究意义重大。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

（1）制订研究方案。

在对超声喷丸的原理和现有设备的基础上，制定可行性方案。

（2）进行建模及模拟分析，对所得数据进行详细记录。

（3）结合相关参考文献，分析实验数据及机理。

大量阅读文献，从中吸取经验，合理的分析数据。

（4）撰写论文。

对前期工作，中期实验分析数据进行整合，最后撰写论文。

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

(1) 毕业论文一套

4. 推荐参考资料：

- [1] 王海璞.变形高温合金 INCONEL718 疲劳性能的研究进展[J].上海金属, 2008, (01):44-47.
- [2] 袁晓玲.中国航空材料手册第二卷:镍基变形高温合金[M].北京: 北京中国标准出版社, 2001.
- [3] D. X. Wen, Y. C. Lin, H. B. Li, et al. Hot deformation behavior and processing map of a typical Ni-based superalloy[J]. Materials Science & Engineering, 2014, 591(2):183-192.
- [4] 李亚江,夏春智,石磊.国内镍基高温合金的焊接研究现状[J].现代焊接,2010,(7):1-4.
- [5] 姚进军,高联科,邓斌.镍基高温合金的技术进展[J].新材料产业, 2015, (12):43-46.
- [6] 王会阳,安云岐,李承宇,等.镍基高温合金材料的研究进展[J].材料导报,2011, 25(S2):482-486.
- [7] K. Matsugi, Y. Murata, M. Morinaga, et al. Realistic Advancement for Nickel-Based Single Crystal Superalloys by the d-Electrons Concept[C]. Matsugi K. Superalloys. Japan. 1992: 307-316.
- [8] Y. Murata, S. Miyazaki, M. Morinaga, et al. Hot Corrosion Resistant and High Strength Nickel-Based Single Crystal and Directionally Solidified Superalloys Developed by the d-Electrons Concept[C]. Murata Y. Superalloys. Japan. 1996: 61-70
- [9] P. D. Nezhadfar, A. S. Johnson, N. Shamsaei. Fatigue Behavior and Microstructural Evolution of Additively Manufactured Inconel 718 under Cyclic Loading at Elevated Temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2020,136:105-598.
- [10] 燕怒,韩晓琪,余泳华,等.GH4169 镍基高温合金的超高周疲劳性能[J].机械工程材料,2016,40(04):9-12.
- [11] 王磊,刘颜铭,陈刚,等.GH4169 镍基高温合金的高温低周疲劳损伤机理[J].机械工程材料,2019,43(01):45-49. [12] 姚亮亮,张显程,刘峰,等.GH4169 镍基高温合金的高温低周疲劳性能[J].机械工程材料, 2016,40(04):25-29+64.

所在专业审查意见:

负责人: _____

年 月 日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目： 喷丸金属力学性能模拟分析

学 院： 航空航天大学

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 任则明

学 号： 18414030110

起止日期： 2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师： 宋宗贤

开题日期： 2022年12月3日

一、 开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

（一）课题的目的意义

航空发动机叶片长期处于复杂恶劣的工作环境中，极易出现各类损伤缺陷。涡轮及风扇/压气机转子叶片由于长期处于离心载荷、热应力及腐蚀等恶劣环境下，使用性能要求极高，被列为航空发动机制造中最核心的部件之一，它的制造占据了整个发动机制造 30%以上的工作量。近几十年来，为满足航空发动机高推重比的要求，发动机涡轮进口温度越来越高，从而对发动机用热端材料的高温力学性能提出了更高的要求。而镍基合金由于其优异的热阻特性，高温下的高强性，良好的耐腐蚀特性以及优异的抗蠕变疲劳特性而广泛应用于发动机的热端部件中。受疲劳试验设备的影响，传统的观点认为，材料会存在一个疲劳极限，当承受应力低于疲劳极限时，材料不会发生疲劳断裂。但超高周疲劳阶段的试验结果证实，不存在传统意义的疲劳极限，使疲劳极限的概念受到质疑。该领域的创始人 Bathias 教授发现超高周疲劳阶段大部分疲劳寿命是在裂纹萌生阶段而不是在扩展阶段。喷丸强化技术是材料表面改性的有效手段之一，通过在材料表层引入残余压应力并改善其微观结构从而提高材料的力学性能。因此本课题对喷丸后镍基合金进行疲劳性能的研究意义重大。

（二）国内外研究情况

我国喷丸技术发展较早，20 世纪中叶在航空领域首先引入了喷丸技术，主要应用于提高军用飞机材料的疲劳失效。在航空发动机和燃气轮机的制造中，钛合金和高温合金叶片、转鼓端面及键槽等部件均需进行喷丸强化处理。经过多年发展，国内外专家对喷丸强化机制做了大量的研究工作，北京航空材料研究院最早提出残余应力强化和组织结构强化是喷丸强化的两个基本因素。西安交通大学强度实验室通过对喷丸层疲劳裂纹萌生和扩展的研究，得出喷丸层残余应力场可有效提高材料疲劳极限，这些研究深化了人们对喷丸强化机制的认识。

超声喷丸利用超声波使弹丸产生振动，使弹丸的速度大幅增加，可强化喷丸效果，弹丸的速度可达到 100~300m/s。更高速度的弹丸撞击使材料表面产生更剧烈的塑性变形，喷丸层形成的残余压应力更大并且残余压应力影响深度更深，超声处理后喷丸层表面粗糙度变化不大，能够有效地提高零件的疲劳寿命。法国 SONATS 公司于 1996 年开始研究并开发出超声喷丸技术，因其良好的喷丸效果而被大量应用于民用工业制造和航空航天相关领域。采用超声喷丸强化技术还可以使材料表面形成 20nm 左右的纳米晶层，同时引入高密度位错，有利于材料的机械和疲劳性能的提高。

（三）课题重要研究内容

1. 搜集疲劳模拟相关文献；
2. 喷丸金属试样建模；
3. 对喷丸金属施加载荷；
4. 对模拟结果进行分析；

5. 优化模拟结果。

(四) 参考文献

- [1] 王海瑛. 变形高温合金 INCONEL718 疲劳性能的研究进展[J]. 上海金属, 2008,(01):44-47.
- [2] 袁晓玲. 中国航空材料手册第二卷: 镍基变形高温合金[M]. 北京: 北京中国标准出版社, 2001.
- [3] D. X. Wen, Y. C. Lin, H. B. Li, et al. Hot deformation behavior and processing map of a typical Ni-based superalloy[J]. Materials Science & Engineering, 2014, 591(2):183-192.
- [4] 李亚江, 夏春智, 石磊. 国内镍基高温合金的焊接研究现状[J]. 现代焊接, 2010,(7):1-4.
- [5] 姚进军, 高联科, 邓斌. 镍基高温合金的技术进展[J]. 新材料产业, 2015,(12):43-46.
- [6] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011,25(S2):482-486.
- [7] K. Matsugi , Y. Murata , M. Morinaga, et al. Realistic Advancement for Nickel-Based Single Crystal Superalloys by the d-Electrons Concept[C]. Matsugi K. Superalloys. Japan.1992: 307-316.
- [8] Y. Murata, S. Miyazaki, M. Morinaga, et al. Hot Corrosion Resistant and High Strength Nickel-Based Single Crystal and Directionally Solidified Superalloys Developed by the d-Electrons Concept[C]. Murata Y . Superalloys. Japan. 1996: 61-70
- [9] P. D. Nezhadfar, A. S. Johnson, N. Shamsaei. Fatigue Behavior and Microstructural Evolution of Additively Manufactured Inconel 718 under Cyclic Loading at Elevated Temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2020,136:105-598.
- [10] 燕怒, 韩晓琪, 余泳华, 等. GH4169 镍基高温合金的超高周疲劳性能[J]. 机械工程材料, 2016,40(04):9-12.
- [11] 王磊, 刘颜铭, 陈刚, 等. GH4169 镍基高温合金的高温低周疲劳损伤机理[J]. 机械工程材料, 2019,43(01):45-49
- [12] 李航航. 我国大飞机发展途径构想及关键技术研巧 [C]. 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会, 中国广东深圳, 2007.
- [13] 专家解析制造大飞机技术难点需突破 10 项技术 [N]. 北京日报, 2007 年 4 月 5 日.
- [14] 陈文豪. 镍基高温合金涡轮盘成形工艺的数值模拟分析[D]. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2014.
- [15] K. Hussain, D. S. Wilkinson, J. D. Embury. Effect of surface finish on high temperature fatigue of a nickel based super alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 31(4): 102-119.
- [16] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 (第 2 卷) [M]. 第 2 版, 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [17] Donachie M J, Donachie S J. Superalloys: a technical guide[M]. ASM international, 2002.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.3-2021.12.30	(1) 搜集资料, 明确选题方向, 并提交任务。	(1) 了解相关知识, 开始作开题报告。
2022.1.1-2022.1.31	(2) 构思并撰写开题报告, 了解镍基合金的国内外现状, 超声冲击的原理及作用。	(2) 掌握超声冲击的方法, 为后期实验做准备。
2022.2.1-2022.2.28	(3) 查找文献, 寻找实验的可行性方案。	(3) 找到完成论文所需的实验方案。
2022.3.1-2022.3.31	(4) 继续完善自己的论文, 分析实验的可能结果。	(4) 初步定稿。
2022.4.1-2022.4.30	(5) 补充、修改并提交论文	(5) 完善毕业论文
完成课题的 现有条件	(1) 高频疲劳试验机及超声疲劳试验机, 金相显微镜。 (2) GH4169 镍基合金。 (3) 掌握有限元分析软件。 (4) 实事求是, 善于学习的能力。	
指导教师 意见	指导教师: _____ 年__月__日	
开题答辩 小组意见	组 长: _____ 年__月__日	

天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名： 任则明

年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

摘 要

超声喷丸技术是由大量高速弹丸或撞针射到工件表面，金属的延伸超过材料的屈服极限，产生塑性变形，形成压坑。但表层材料的延伸又为内部材料所牵制，因而在工件内部产生内应力。超声喷丸技术利用高频振针，均匀的喷丸在材料表面，经喷丸的材料晶粒细化，残余应力消除，缺陷减少。本文将超声喷丸模拟于镍基高温合金，分析超声喷丸的作用与规律。

本文通过 Abaqus 建模，模拟超声强化设备对材料进行喷丸，通过改变载荷形式，速度载荷和位移载荷分别对材料进行强化。对比实验可行性，最终采用速度载荷对试件进行力学模拟。通过释放残余应力后对模拟试件进行拉、压、扭转、弯曲等力学试验。利用软件模拟不同环境温度下 20°C 和 760°C 下对材料进行力学性能的模拟。最后通过 fe-safe 软件对超声喷丸前后的疲劳寿命进行分析。通过拉伸、压缩模拟相同的喷丸残余应力下，温度高，应力松弛幅度增加，随着温度的上升剪应力下降 184.8Mpa。在 20°C 情况下，微观原子由于超声喷丸产生较大的内应力，当外部加载拉应力时，内应力抵消一部分拉应力。而在 760°C 时，材料内部残余压应力由于高温，原子获得能量，使得残余压应力松弛。通过 760°C 弯曲、扭转模拟微观原子吸收能量变得活跃，喷丸冲击产生的残余应力降低，强化效果减弱。超声强化后的疲劳寿命 3.83×10^5 次，高于未喷丸试件疲劳寿命 2.32×10^5 次，疲劳寿命较未喷丸试件提升了 65.09%。未喷丸试件由于机加工表面存在大量微小的裂纹，通过超声喷丸强化，表面存在压应力层，晶粒细化较未喷完试件疲劳寿命提升，再次验证了超声喷丸的强化理论。

关键词：超声喷丸；高温镍基合金；残余应力；

ABSTRACT

Ultrasonic shot peening technology is by a large number of high-speed projectiles or the impact needle shot to the workpiece surface, metal extension exceeds the yield limit of the material, plastic deformation, forming crater. However, the extension of the surface material is restricted by the internal material, which produces internal stress in the workpiece. Ultrasonic shot peening technology uses high-frequency vibration needle, uniform shot peening on the surface of the material, after the shot peening material grain refinement, residual stress elimination, defect reduction. In this paper, ultrasonic shot peening was simulated on nickel base superalloy to analyze the action and law of ultrasonic shot peening.

In this paper, Abaqus modeling is used to simulate ultrasonic strengthening equipment to carry out shot peening on the material, and the material is strengthened by changing the load form, velocity load and displacement load respectively. Comparing the feasibility of the experiment, the velocity load was used to simulate the mechanics of the specimen. After releasing the residual stress, the tensile, compressive, torsion and bending tests were carried out on the simulated specimens. Software was used to simulate the mechanical properties of materials at different ambient temperatures of 20°C and 760°C. Finally, fe-Safe software was used to analyze the fatigue life before and after ultrasonic shot peening. Under the same residual stress of shot peening simulated by tensile and compression, the stress relaxation amplitude increased at high temperature, and the shear stress decreased by 184.8mpa with the increase of temperature. At 20°C, a large internal stress is produced by ultrasonic shot peening for microscopic atoms. When the external tensile stress is loaded, the internal stress offsets part of the tensile stress. At 760°C, the residual compressive stress inside the material relaxes due to the energy gained by the atoms at high temperature. By bending and torsional simulation at 760°C, the atomic absorption energy becomes active, the residual stress caused by shot peening impact decreases, and the strengthening effect weakens. The fatigue life after ultrasonic strengthening was 3.83×10^5 , which was higher than that of the non-shot peening specimen (2.32×10^5) and 65.09% higher than that of the non-shot peening specimen. Due to the large number of tiny cracks on the machined surface of the unshot peening specimen, the compressive stress layer exists on the surface of the unshot peening specimen through ultrasonic shot peening, and the grain refinement improves the fatigue life of the unshot peening specimen, which verifies the strengthening theory of ultrasonic shot peening again.

Key words: Ultrasonic impact,;high temperature nickel base alloy; residual stress;

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.2 喷丸强化的研究现状	2
1.3 本课题的研究内容	2
第二章 试件材料及软件的介绍	4
2.1 模拟准备过程及研究目的	4
2.1.1 模拟准备过程	4
2.1.2 研究目的	4
2.2GH4169 合金的化学成分及材料性能	4
2.3Abaqus 软件介绍	5
2.4 本章小结	5
第三章 超声喷丸过程的数值模拟	6
3.1 材料参数的定义	6
3.2 位移载荷的模型建立	6
3.3 速度载荷的模型建立	11
3.4 模型确定	11
第四章 力学实验模拟	12
4.1 力学性能模拟	12
4.2 疲劳分析	15
4.3 总结	18
第五章 总结	20

参考文献.....	21
致谢.....	22

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

2012 年，国务院设立关于航空发动机研发的国家级科技专项，这是推动我国成为创新型大国，进一步增强我国的创新能力，提升我国核心竞争力的重大战略决策。^[1]虽然我国对于大飞机的总体设计属于国际先进水平，但是发动机材料一直阻碍我们的继续发展，因为发动机运转始终处于高温高压、高负载和高转速的环境下，材料内部的缺陷将加速暴露，结构的破坏将很快导致整体发动机的损坏，造成飞机出现重大事故。例如，中国民用航空局自 1996 到 2006 年 10 年间的飞机故障进行统计，机械故障引起的重大事故占总故障数的 25%，而在机械故障中，航空发动机机械故障所占比例近 60%。^[2]由此可知，发动机材料的研发与工艺是在发动机整体制造过程中非常重要的环节。

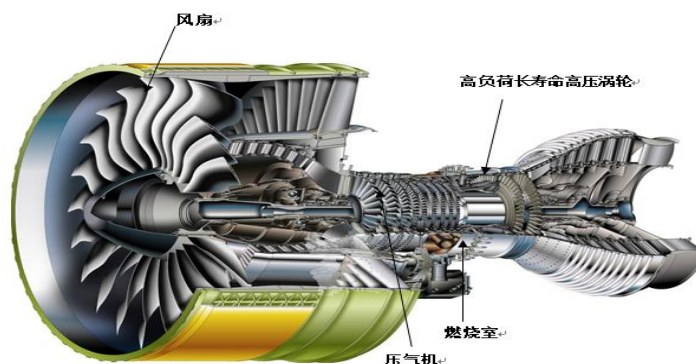


图 1-1 航空发动机内部图

航空发动机的关键部件是涡轮盘，需要承受来自发动机运转产生的高温、高压和极高的离心载荷，同时还要克服叶片的拉力及扭曲应力。^[3]由于涡轮盘的工作环境，对涡轮盘的性能提出了很高的要求。GH4169 镍基高温合金是一种沉淀强化型的高温合金，表现出优异的抗氧化性、耐腐蚀性和抗疲劳性及力学性能^[4]，是目前涡轮盘使用最多的合金。GH4169 合金中的强化相分别为体心四方结构的 γ' -Ni₃Nb 和面心立方结构的 γ' -Ni₃ (Al、Ti、Nb)， γ'' -Ni₃Nb 为主要强化项，而 γ' -Ni₃ (Al、Ti、Nb) 为辅助强化项^[5-6]。发动机在高速运转中，每个叶片都会承受往复载荷，高频震动，这些频繁的加载、卸载容易导致叶片的疲劳，近而造成损坏，最终导致发动机报废。

超声喷丸强化技术是一种通过撞针在零件表面高速撞击，使零件发生塑性变形，进而达到强化零件表面的技术。超声喷丸设备可便携操作，强化的效果明显，被广泛的应用在残余应力的消除，晶粒细化，进而减少缺陷提高性能。目前，超声喷丸强化技术在美国、加拿大、法国、德国等国得到广泛应用，主要涉及领域包括航空工业、海洋工程、机械设备、汽车工业等。我国也有相关应用，如众所周知的重庆长江大桥钢结构等^[7]。

超声喷丸设备主要由四大部分组成：超声发生器、换能器、变幅杆和喷丸撞针组成。超声波发生器就是将交流电转化为超声频率电振荡信号，提供整个设备最初始的能量。换能器是将超声电振荡信号转化为机械能，但是实际输出的振幅很小，只有几微米，需要变幅器进行放大，最终产生 10~150um 的振幅，最后通过撞针作用在试件上形成完整的超声喷丸过程。

超声喷丸的特点：（1）设备体积小、灵活性高、效率高、能耗少；（2）超声喷丸对处理的零件材料、结构形状和操作场所等均没有限制；（3）需要调节的工艺参数少，容易操作；

（4）强化效果显著：表层应力分布均匀，晶粒细化能达到纳米级，疲劳性能可提高 10~100 倍。因此用超声喷丸的方式对镍基合金进行强化是本文的主题。

1.2 喷丸强化的研究现状

上世纪 60 年代，I.I.Mukhanov 等人^[8]研究了超声强化改善焊接性能。1975 年，E.Sh.Statnikov^[9]提出了超声强化技术。八十年代，乌克兰巴顿研究所成功的研制出超声喷丸设备，并在海军舰艇焊接中得到应用^[10]。法国 Chardin 等人^[15]根据经典的随机模型-布尔结构建立了预测超声喷丸覆盖率的模型，并通过实验验证了模型的可靠性。自此，许多科学家开始了超声喷丸强化技术的研究，在理论和工程应用方面都取得了不错的研究成果：超声喷丸强化技术能够降低焊接的残余应力，提高零件的疲劳性能。超声喷丸能够在材料内部形成压应力层使得材料的晶粒细化。

1999 年，中科院的卢柯^[11]首次提出了通过超声喷丸实现金属表面自纳米化的想法。同年，陶乃镛等人^[12]利用超声喷丸在纯铁的表面获得了纳米层。南京大学冯淦等人^[13]利用超声喷丸实现了 20 钢的表面纳米化，发现超声喷丸处理后试样表面的平均微观应变仅为 0.02%-0.04%，远低于其他剧烈塑性变形方法。中国空军工程大学汪诚等^[14]对比研究了激光丸粒和超声喷丸对不锈钢表面组织和机械性能的影响，研究发现超声喷丸晶粒的细化程度更高，而激光丸粒能够使不锈钢获得更深的残余应力层和更高的表面硬度。武汉理工大学王东坡等人^[15]对 45 钢进行超声喷丸强化，材料经过超声喷丸后最终材料的性能得到了改善。李进一等人^[16]采用 Abaqus 模拟 304 不锈钢在超声喷丸后残余应力，并通过改变喷丸速度、撞针直径和个数、喷丸时间、摩擦力和喷丸强度对应力场的影响，得出喷丸时间在 2×10^{-5} s 时喷丸强化效果最好，后续的很多时间都是采用该事件为最佳喷丸强化时间。

1.3 本课题的研究内容

本文通过对镍基高温合金 GH4169 的表面进行超声喷丸处理，分别在 20°C 和 760°C 的温度条件下，进行拉、压、扭转、弯曲等力学性能模拟，并对喷丸与

未喷丸试件的疲劳寿命进行分析，主要研究内容包含以下四点：两种载荷加载方式，速度载荷和位移载荷对试件进行超声喷丸强化；

- (1) 对 20°C和 760°C温度环境下，板材进行拉、压、扭转、弯曲等力学试验模拟，通过对比探究残余压应力能否抵消一部分压、拉应力，高温下残余应力是否松弛；
- (2) 对喷丸前后的板试件进行疲劳寿命分析，通过分析探究喷丸金属表面是否存在晶粒细化现象，提高试件的疲劳寿命；
- (3) 总结模拟数据。

第二章 试件材料及软件介绍

2.1 模拟准备过程及研究目的

2.1.1 模拟准备过程

(1) .准备阶段

撰写课题研究方案,进行大量的材料收集,最终采用超声喷丸对镍基高温合金 GH4169 进行强化,因为超声喷丸可以实现复杂形状试件的强化,超声喷丸表面粗糙度比未喷丸表面微裂纹减少,提高了材料的使用寿命。

(2) .实施阶段

通过分析确定数值模拟建模的具体参数,就不同加载方式,位移载荷和速度载荷对试件进行喷丸强化,就不同温度 20°C 和 760°C 进行力学性能分析,结合相关数据对模拟进行设计。

(3) .总结阶段

对收集的材料数据信息进行汇总,最终撰写论文,以模拟法进行研究,并用文献相关结论对模拟进行佐证。

2.1.2 实验研究目的

- (1) .验证超声喷丸形成的压应力层,时间受力后,内应力能否抵消一部分拉、压应力;
- (2) .验证高温下是否会使时间残余应力松弛;
- (3) .验证喷完后疲劳寿命是或否提升。

2.2GH4169 合金的化学成分及材料性能

镍基高温合金在航天航空领域被广泛应用。镍基合金所含的合金元素含量高、热变形大、加工温度区间窄,增加了生产制造的难度。所以如何才能更好的制备镍基合金是当前面临的重大问题。

表 2-1 GH4169 镍基合金元素含量表

C	P	S	Mn	Cr	Mo	Ti	Al	B	O
0.022	0.002	0.002	0.018	14.8	4.9	3.51	4.1	0.02	0.0134

表 2-2 GH4169 材料性能

温度 $T/^\circ\text{C}$	弹性模量 E/Gpa	线膨胀系数 (10^{-6}C^{-1})	热导率 $k/$ ($10^{-3}\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	比热容 $C/$ ($\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	泊松比 ν
20	204	-	13.4	427	0.3
100	201	11.8	14.7	450	0.3
200	193	13	15.9	473	0.3

300	181	13.5	17.8	481.1	0.3
400	176	14.1	18.3	493.9	0.32
500	160	14.4	19.6	514.8	0.32
600	150	14.8	21.2	539	0.33
700	141	15.4	22.8	573.4	-

泊松比是材料横向应变与纵向应变的比值，也叫横向变形系数，它是反映材料横向变形的常数。

2.3 Abaqus 软件介绍

ABAQUS 创建于 1978 年，2005 年时和 Dassault Systèmes 公司合并，该公司总部位于 Providence, Rhode Island(USA)。办事处遍布全球，主要开发用于工程的分析软件。ABAQUS 是一套功能强大的有限元软件，它能解决简单的线性分析也能处理复杂的非线性问题。ABAQUS 拥有可以自己组建的材料模型库，包括金属、复合材料、橡胶、高分子材料等。ABAQUS/CAE，采用 CAD 方式建模和可视化视窗系统，具有良好的人机交互特性。

在欧美发达国家，有限元分析是产品从研发到最终生产前的一个必不可少的环节。CAE 在改造产品设计、降低生产成本、提高寿命等方面都诸多方面都有非常重要的作用。在我国有限元分析目前只应用于航空航天、汽车、造船等大型企业，而在发达国家普通的消费类设计也广泛应用。在我国近年来虽然有限元应用广泛，但是和发达国家仍有巨大的差距。

面对复杂的模拟对象感到无从人手，所建的模型或者过于简单，没有体现出所模拟问题的重要特征，或者过于复杂，将大量精力和计算时间浪费在不重要的细节上，即使能够得到分析结果，也无从得知这个结果是否正确，准确度有多高。静力分析的建模过程比较简单，不确定性因素少，比较容易出结果，因此应该始终将其作为首选的分析类型来考虑。用静力分析来模拟运动的对象，就好像用相机对一个运动的对象进行抓拍，所得到的是受力最大的那个瞬间。但有些高速喷丸，像子弹贯穿物体，还有接下来需要分析的超声喷丸强化就需要采用动力显示的求解方法。

2.4 本章小结

通过超声喷丸对材料的强化的相关介绍，了解了超声喷丸的结构，原理以及应用现状，结合镍基合金的相关制备条件，化学成分及相关的物理性能参数，为后文的强化镍基合金提供足够的理论基础。

第三章 超声喷丸过程的数值模拟

3.1 材料参数的定义

GH4169 镍基合金的一些基本性能参数，模拟镍基合金超声喷丸最重要的除了弹性模量，泊松比，就是本构模型的建立，因为本构模型直接影响模拟的准确性。

GH4169 镍基合金的塑性参数采用 Johnson-Cook 模型：

$$\sigma_{\varepsilon q} = [A + B(\varepsilon)]^n [1 + C \ln(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})] [1 - T^{*m}] \quad (3-1)$$

其中 $\sigma_{\varepsilon q}$ 为有效应力， A 、 B 、 C 和 m 为材料常数， n 是加工硬化系数， $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ 为标准化后的有效塑性应变率， T^* 定义为

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_{melt} - T_r} \quad (3-2)$$

T_{melt} 为熔点， T_r 为室温， $T_r=298K$

本文中 $A=1241Mpa$ ， $B=622Mpa$ ， $m=1.05$ ， $n=0.6522$

表 3-1 GH4169 镍基合金参数

参 数	密度	泊 松 比	比热容	弹性模量	导热系数	换热系数	热膨胀系数
大 小	8.24g/cm ³	0.3	707.4J/(Kg·°C)	199.9GPa	171W/m·K	h=2W/(m ² ·°C)	1.87×10 ⁻⁵ /°C

参数参考上图密度 8.24g/cm³，泊松比 0.3，弹性模量 199.9Gpa，应用材料后，装配时选择固定，分析步时增量步大小根据电脑算例，如相对简单，初始可以设成 1，后划分网格。泊松比是指材料在单向受拉或者受压时，横向的正应变与轴向正应变的比值。有限元仿真计算中网格的划分影响着仿真计算的成本与精度。相同条件下，网格划分越细小计算精度越高，同时计算的成本也有所增加。在充分考虑计算成本与精度后，本文采用局部加密网格划分技术，即局部区域网格划分较为细密。有限元分析运算需要划分网格，网格的大小直接影响运行的速度，但是网格划分越细相应的时间也越长，计算成本也大大提高。

3.2 位移载荷的模型建立

(1) 位移载荷定义超声喷丸首先建模，单位制采用 mm。第一个位移载荷 0.01mm，模型尺寸为 80mm×40mm×18mm，对于材料的定义参数，密度 8.24×10⁻⁹t/mm³，杨氏模量 199900Mpa，泊松比 0.3，塑性-硬化类型各向同性，

屈服应力 550Mpa，塑性应变 0。装配时撞块与下方模型接触。分析步由于喷丸，采用动力显示，时间 1 秒，几何非线性打开，接触定义表面与表面接触，撞头设置参考点与离散刚体耦合。载荷设置 X 向位移 80mm，Y 方向 0.01mm 通过幅值-表将数据填入，频率 400，通过 EXCEL 直接生成。构建 80mm×40mm×18mm 的模型块，为了模型简化先绘制 30mm×20mm×5mm 的方块撞针，采用三维离散刚体可划分网格但因为模型属于刚体结构遂不考虑变形运算。此次试验模拟，在其他相关论文中从未采用过位移载荷，由于应力层深度未知，应力层的确定存在不确定性，以下将通过改变参数的形式来验证假设。由于材料受超声撞针的高速撞击，所以残余应力及表面硬化会在材料表面形成，所以在设计模型之初选择了 4mm 的区域，在接下来的划分网格中分区域划分网格，避免算例的损失，更快的得到运算结果。

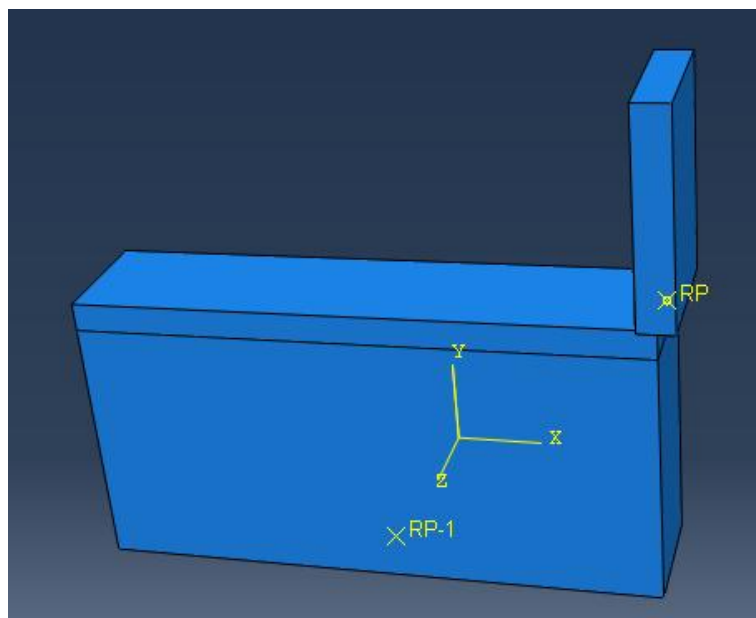


图 3-1 位移载荷模型图

(2) 编辑材料属性，通过前面的表格得到 GH4169 镍基合金的一些基本材料参数密度、弹性模量、塑性及超声喷丸会对材料表面造成损伤，引入 Johnson-Cook 损伤数据完善材料属性。

(3) 创建分析步，分析步类型本次采用动力显示分析步，时间的一秒即为实际的运算时间。场输出请求管理器是对选择的某几项如应力位移以低的频率写进数据库，而历程输出请求管理器是对某个节点位移高频的记录于数据库中。



图 3-2 分析步的选择图

(4) 对于相互作用模块，首先确定接触面冲块下表面和材料的上表面，相互作用类型选择表面与表面接触。

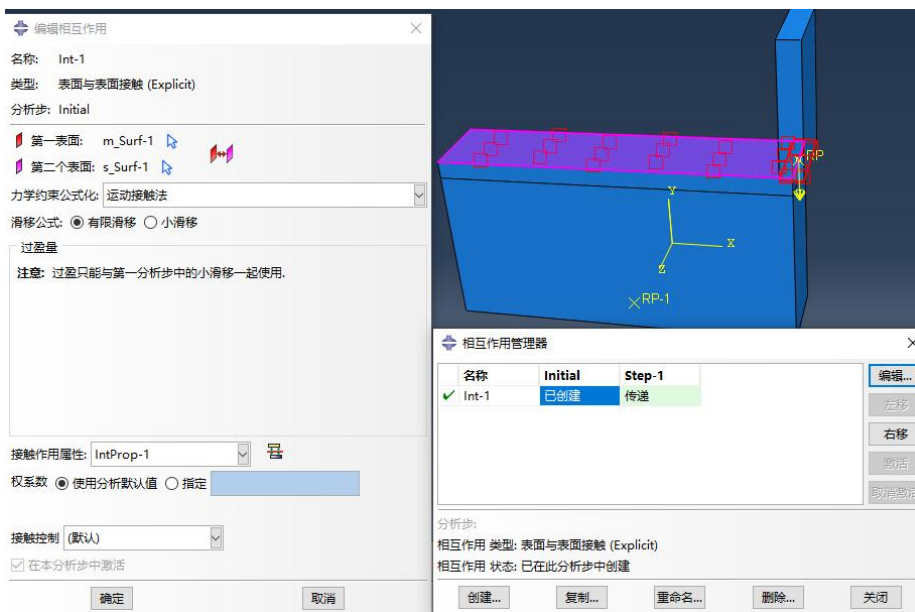


图 3-3 相互作用图

(5) 网格的划分，之前提到为了运算分析的速率，采用更高效的网格划分方法，单元类型单元库中采用显式 C3D8R 单元。

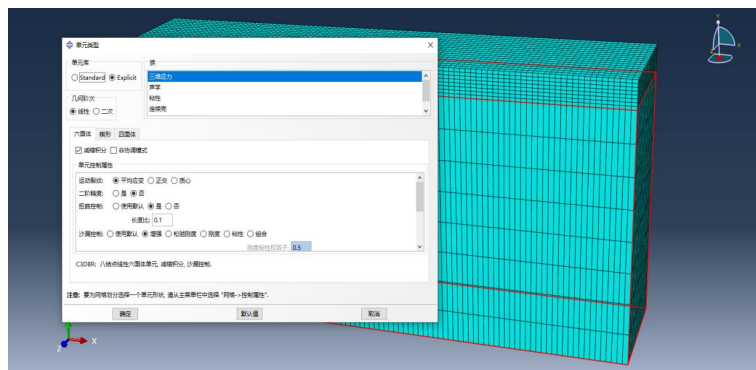


图 3-4 网格划分的单元选择及不同区域的网格分布

(6) 对于载荷的划分，只需要设置两个边界条件。将材料下表面完全固定，撞块分别设置水平速度及撞块上下高速撞击的频率。一般超声喷丸设备的频率为 15-40KHZ。



图 3-5 位移载荷图

(7) 作业建立后提交

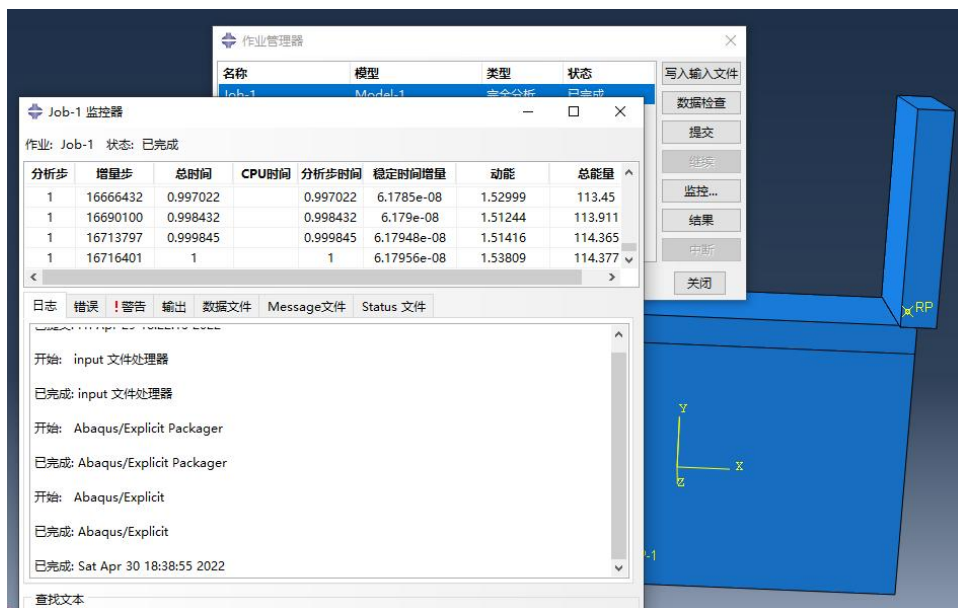


图 3-6 作业管理器图

(8) 模拟结果

由于沿 X 轴正向速度过快导致喷丸不连续。垂直于试件表面的 Y 方向最大压应力 - 548.1Mpa，材料整体沿 Y 方向分布的压应力范围在绿色区域 - 68.58Mpa ~ - 548.1Mpa。残余应力存在在试件表面，后续调整位移载荷和位移幅值周期。

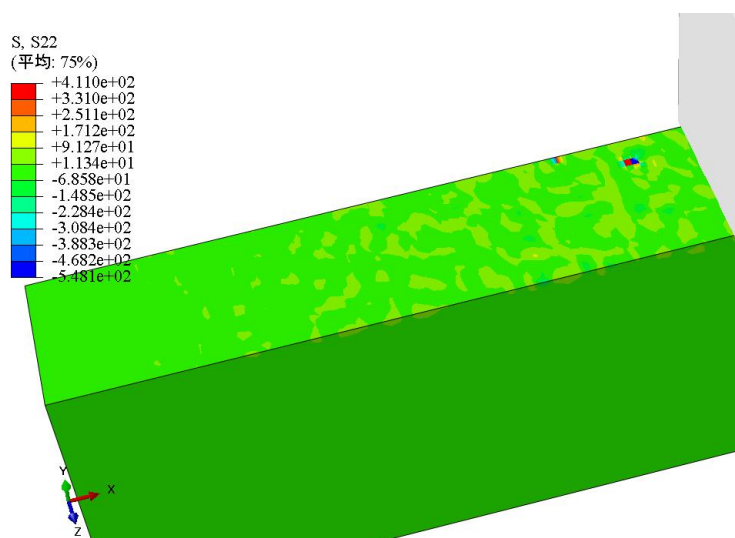


图 3-7 Y 方向应力分布图

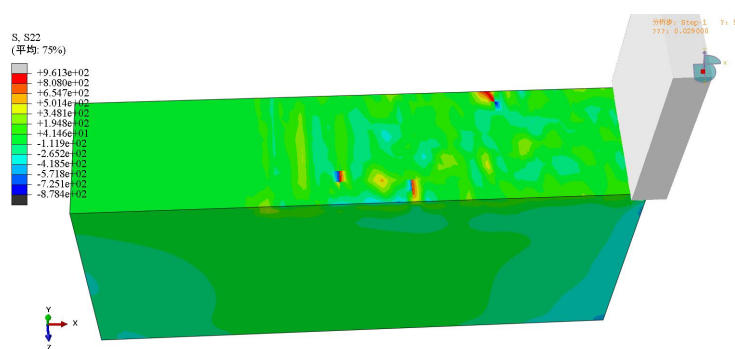


图 3-8 位移载荷 0.15mm0.029S 时刻 Y 方向应力图

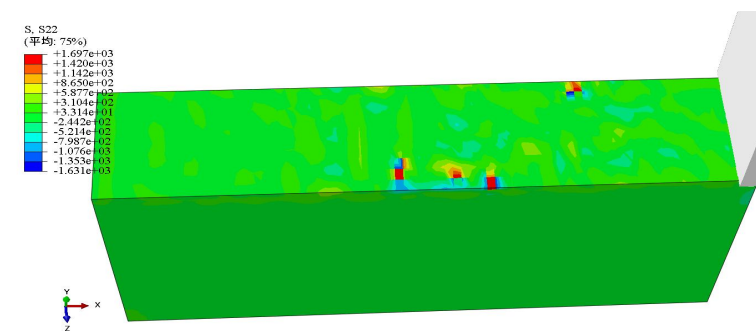


图 3-9 位移载荷 0.15mmY 方向最大应力

从图 3-8 和 3-9 可以看出，当位移载荷设定在 -0.15mm 时，材料自左向右移动，材料只承受撞块给的垂直冲击，在 0.029S 时刻，试件可以看到试件垂直方向右端部 725.1Mpa 的压应力，而试件从左至右移动结束后，整体压应力分布在绿色区域 $-244.2\text{Mpa} \sim -521.4\text{Mpa}$ ，第二个模型位移载荷 0.15mm ，基本数据未变，Y 方向位移幅值-表数据填入 EXCEL 生成的 1000 次振幅。

随着位移载荷的增大，材料表面的压应力随着增大，两次实验得到位移载荷

- 0.01mm, Y 方向最大压应力 - 548.1Mpa, 材料整体沿 Y 方向分布的压应力范围在绿色区域 - 68.58Mpa~ - 548.1Mpa。当位移载荷设定在 - 0.15mm 时, 整体压应力分布在绿色区域, - 244.2Mpa~ - 548.1Mpa。

3.3 速度载荷的模型建立

建模和之前的方法类似就不再赘余, 本模型基本尺寸 140mm×35mm×3.6mm, 9 撞针模型, 塑性 Johnson-cook, $A=450\text{Mpa}$, $B=1700\text{Mpa}$, $n=0.65$, $m=1.3$, 熔化温度=0, 过渡温度=0, 损伤演化 $d1=-0.09$, $d2=0.27$, $d3=0.48$, $d4=0.014$, $d5=3.87$, 参考应变率 1。 $V=20000\text{mm/s}$, 水平速度 $V=0.14\text{mm/s}$, 动力显示总时间 80 秒。 20°C 的屈服强度 $R_{eH}=725\text{Mpa}$, 760°C 的屈服强度 $R_{eH}=376.3\text{Mpa}$ 。同时撞击板材, 分析步采用动力显式, 时间 80 秒, $v=20000\text{mm/s}$ 。速度载荷下的应力分布

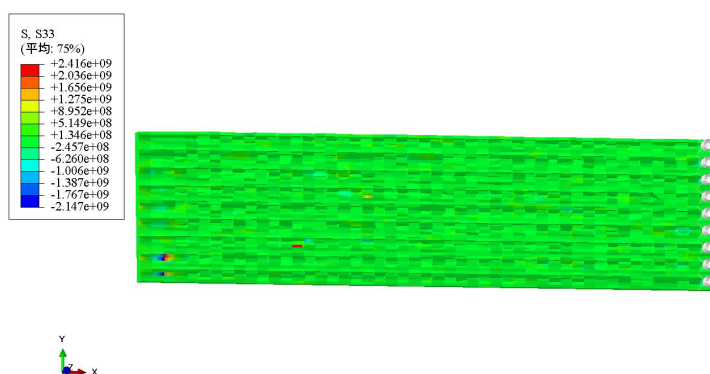


图 3-10 S33 应力分布

从图中可看出, 试件整体压应力范围 - 245.7Mpa~ - 626Mpa。

3.4 模型确定

初期 0.01mm 时表面应力很小, 只有局部区域出现红色大应力存在, 但是当位移载荷增加到 0.15mm 时, 整体呈现出较大的压应力, 残余应力层深度超过参考实验文献的 250um, 因为位移载荷增大, 受力将会呈现几何倍数的增大, 在 0.0029S 时刻试件右端从上至下受到 725.1Mpa 的压应力, 位移载荷需要大量的模拟存在合理性但是需要大量的模拟反复验证, 其二由于模拟的超声喷丸喷头是一个长方体, 撞击过程中并未出现平面撞击更均匀的现象。对速度载荷的实验模拟压应力范围 - 245.7Mpa~ - 626Mpa, 验证了初次冲击的应力分布及释放边界条件得到的残余应力, 采用现有的分析数据速度的控制能很好地得到表面均匀残余应力的分布图, 从图 3-10 中也能很好地看出模拟撞针形式冲击, 冲击后表面有微小的凹坑, 超声喷丸的效果更均匀, 为了更好地模拟超声冲击, 为后续力学试验提供了很好地模拟材料支持, 遂后面的模拟力学试验模型采用速度载荷方法。

第四章 力学实验模拟

4.1 力学性能模拟

前期通过对两种载荷的模拟,综合分析方法和一些实际理论,采用速度载荷方法,能更有效地控住超声喷丸的残余应力,在航空发动机叶片在高速旋转过程中受高离心力,扭转重载等负载,故实验模拟材料高温受拉、压、扭转、弯曲等不同条件的作用,近似模拟叶片在发动机的受力。

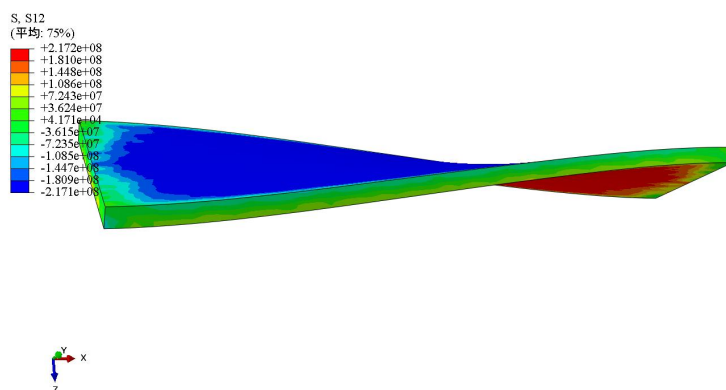
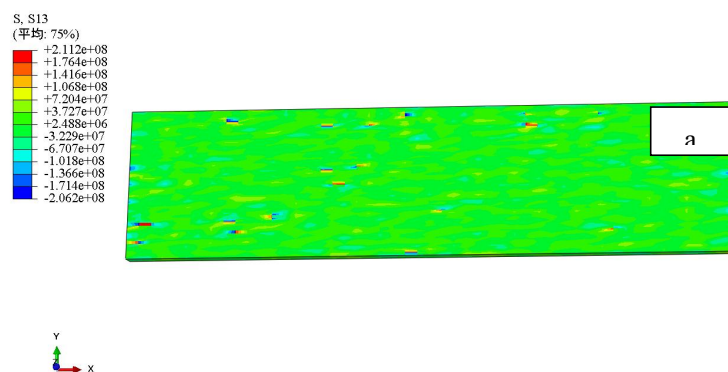
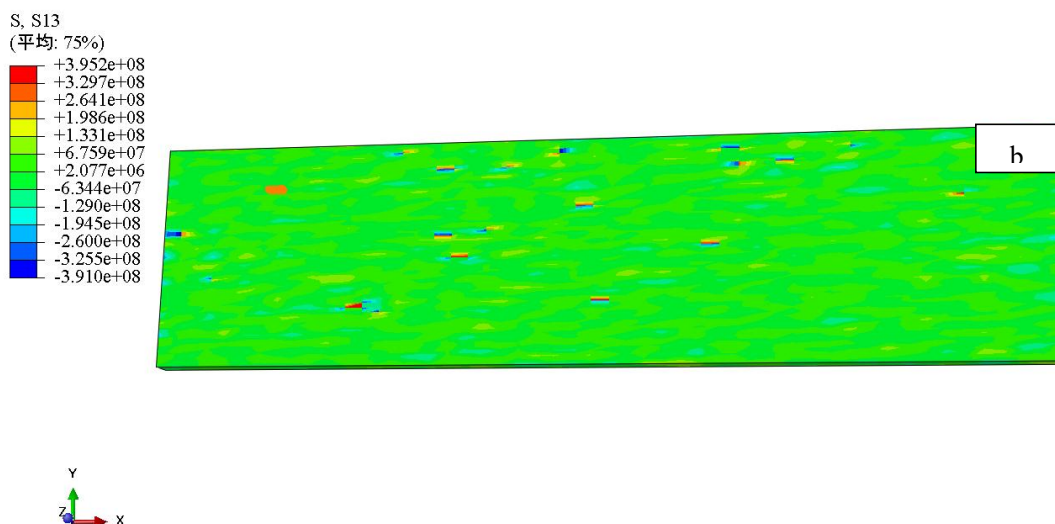


图 4-1 760°C高温下扭转

由于需要模拟高温环境下的载荷,760°C的屈服强度为 376.3Mpa,给予材料 0.1 弧度扭转。材料上表面由于超声冲击后残余压应力扭转后整体分布 - 180.9Mpa ~ - 217.1Mpa 的剪应力,材料下表面整体分布 + 180.9Mpa ~ + 217.1Mpa 的剪应力。



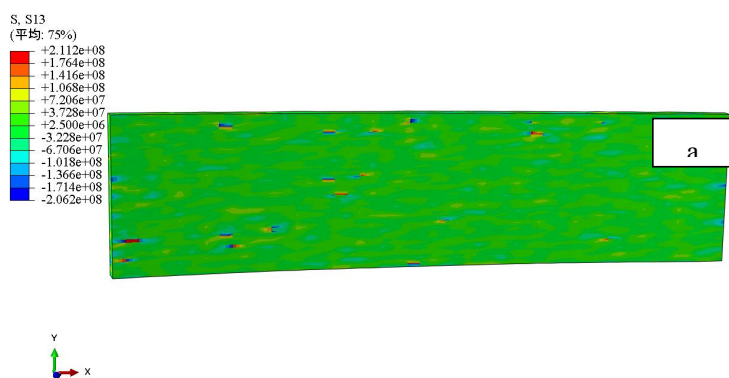
(a) 760°C 100Mpa 拉应力



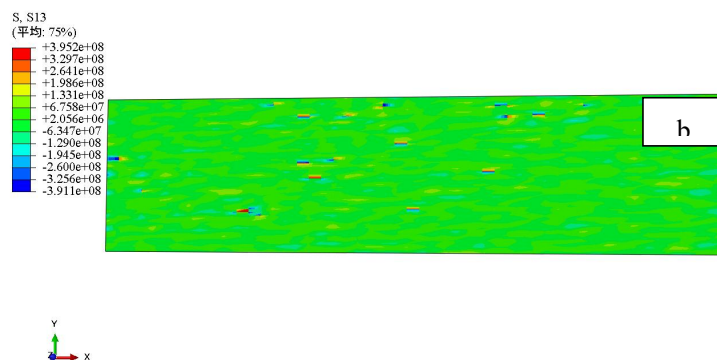
(b) 20°C 100Mpa 拉应力

图 4-2 20°C和 760°C温度下 S13 剪应力

通过两个板件不同温度下，进行拉伸模拟可以看出，760°C试件的剪应力范围 - 32.29Mpa ~ - 206.2Mpa，而 20°C时剪应力范围在 - 63.44Mpa ~ - 391.0Mpa，通过两张图进行对比不难看出，在 20°C情况下，微观原子由于超声喷丸产生较大的内应力，当外部加载拉应力时，内应力抵消一部分拉应力。而在 760°C时原理相同，材料内部残余压应力由于高温，原子获得能量，使得残余压应力松弛。相同的喷丸残余应力下，温度高，应力松弛幅度增加，随着温度的上升剪应力下降 184.8Mpa。



(a) 760°C受压 100Mpa



(b) 20°C受压 100Mpa

图 4-3 760°C(a)和 20°C温度下 S13 方向力

通过两个板件不同温度下，进行受压模拟可以看出，760°C试件的剪应力范围 - 32.28Mpa ~ - 206.2Mpa，而 20°C时剪应力范围在 - 63.47Mpa ~ - 391.1Mpa。模拟试件在不同温度下受压载荷下发现，残余应力在试件受压下同样起作用，有阻碍试件变形的作用。因为超声喷丸引入高密度位错，组织滑移难以进行，变形抗力增加，遂与受拉的剪应力数值几乎相同。

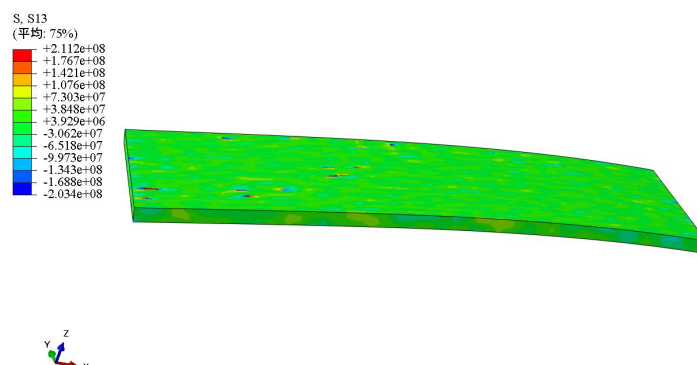


图 4-4 760°C弯曲实验 200Mpa 压应力

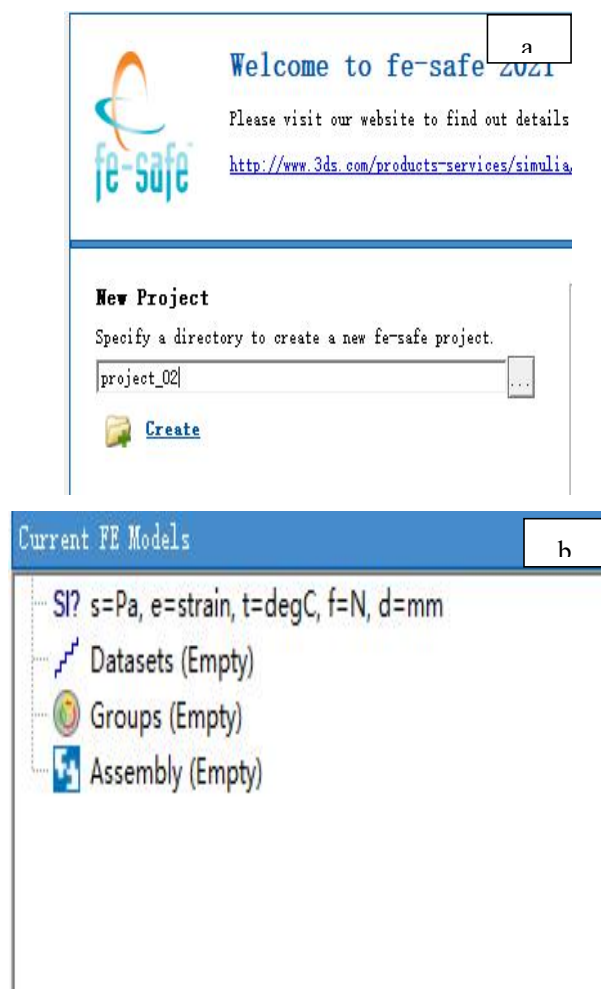
通过图 4-4 右侧固定左侧受向下拉的 200Mpa 压强，可以看出固定端应力出现最大压应力值蓝色区域 - 203.4Mpa。其余部分均匀的绿色范围大小为 - 30.62Mpa ~ - 203.4Mpa。指出前图中 U-displacement-位移，S-mises-应力。

20°C和 760°C两块试件进行拉伸，受压，弯曲，扭转的模拟。常温 20°C下材料的屈服应力为 725Mpa，760°C时屈服强度 376.3Mpa，760°C试件的剪应力范围 - 32.29Mpa ~ - 206.2Mpa，而 20°C时剪应力范围在 - 63.44Mpa ~ - 391.0Mpa，受压模拟可以看出，760°C试件的剪应力范围 - 32.28Mpa ~ - 206.2Mpa，而 20°C时剪应力范围在 - 63.47Mpa ~ - 391.1Mpa。其力学性能如图未有明显降低。常温下拉伸过程中，由于晶粒在超声喷丸作用后细化，材料的滑移现象在拉伸模拟中会减弱发生，因为试件的残余应力抵消了一部分试件所受的拉应力，但在高温下，

微观原子吸收能量变得活跃，喷丸冲击产生的残余应力降低，强化效果减弱。通过超声喷丸强化可以从前图中看出喷完后试件表面会形成诸多的痕迹（弹丸坑），相比较位移载荷的撞块喷头，圆冲头的应力集中小，降低了应力集中系数。由于超声喷丸对表面进行的强化作用，使得晶粒细化，并随垂直方向，距离表面越远，残余应力越小，直至接近未喷完材料状态。通过模拟实验，试件经喷丸表面细化是由位错和孪晶交割相互作用产生，在超声喷丸之初，微观原子以位错运动为主，随着振动和超声的持续，内应力逐渐增大，晶粒细化。

4.2 疲劳分析

通过 Abaqus 运行 Job 得到的 ODB 文件，保存文件。打开 Abaqus 中的 fe-safe 软件，选择保存路径，然后 Create。如图 4-1 (b) 区域鼠标右击“Open Finite Element Model...”找到之前得到的 ODB 文件打开。



(a) 创建疲劳文件目录

(b) 打开 odb

图 4-5 fe-safe 创建

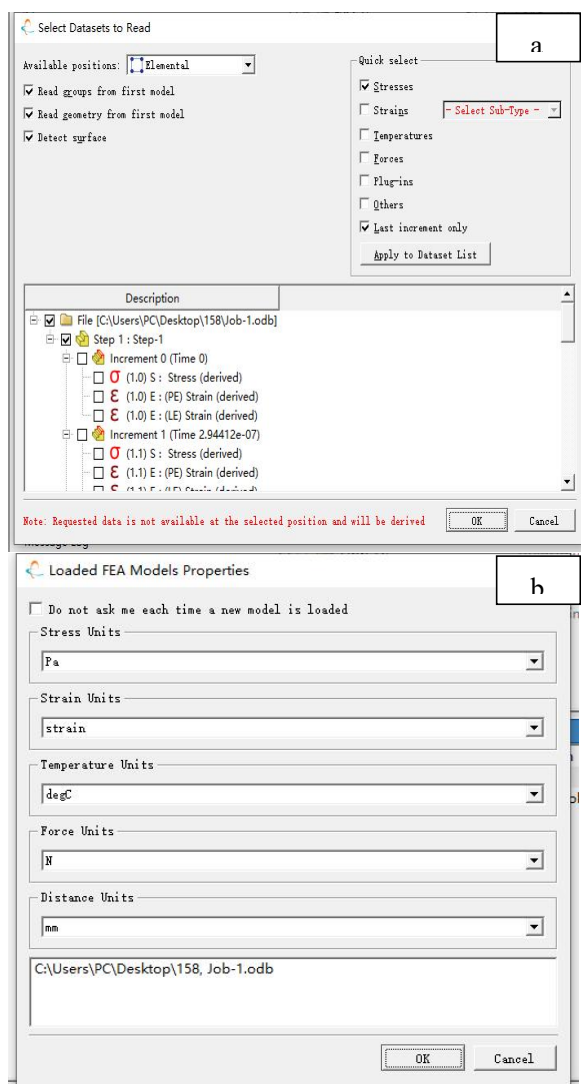


图 4-6 导入模型

仅导入应力和最后一步增量步的结果，应用于数据设置表，由于之前采用的单位制是 Pa，所以右侧的单位确定窗口保持默认即可。在 Material Database 中没有 GH4169 镍基合金的现有数据，需要自行创建弹性模量和泊松比，选择一种材料如图 4-7，将弹性模量 $E=130000$ 改为 199900，泊松比 Poissons Ratio 由 0.33 改为 0.3。在 Analysis Settings 中将数据导入 Material。

gen : Const Amp Endurance Limit (2nf)	1E15
gen : Default Knock-down Curve	undefined
gen : Default MSC or FRF	"D:/ab/win_b64/Durability_resources/database/greyiron.msc"
gen : E (MPa)	130000
gen : equivalent-specs	undefined
gen : equivalent-specs-possibles	undefined
gen : heat-treatment	undefined
gen : Hours List (s)	undefined
gen : Poissons Ratio	0.33
gen : ref-code	undefined
gen : specimen-type	undefined
gen : Temperature List (degC)	0
gen : UCS (MPa)	undefined

图 4-7 给定材料弹性模量及泊松比

在 Loading settings 中，设置载荷系数，对称循环 $R = -1$ ，频率输入 100HZ，如图 4-4。



图 4-8 载荷系数

在下部 Probability 中设置循环次数为 10^7 。在 Output File 中设置好分析结果路径，点击下端的分析按钮在 Exports 设置输出变量，应力与寿命。最后点击 Analyse。疲劳计算中，计算完成后，回到 Abaqus 软件，打开结果文件查看疲劳寿命。

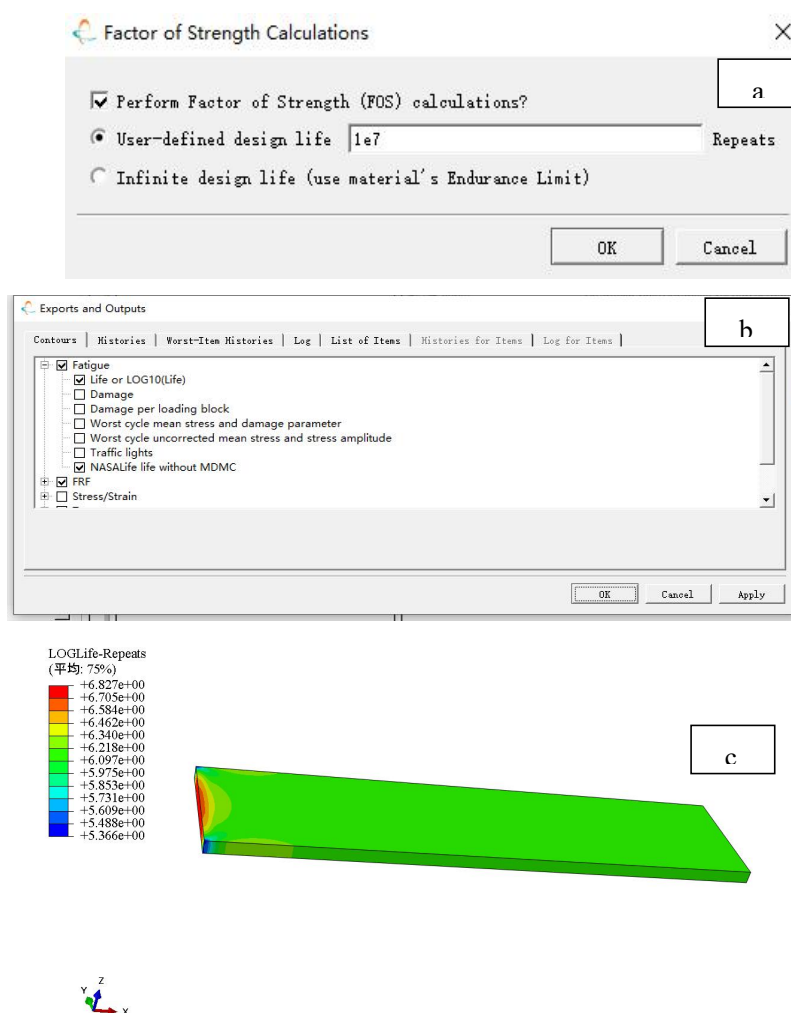


图 4-9 (a)(b)疲劳循环次数及云图输出(c)未喷丸寿命云图

未喷丸疲劳寿命如图 4-9 (c)，疲劳寿命选择图中最小数值处，最小出现在蓝色区域， $+5.366e+00$ ，实际疲劳次数 232273，约合 2.32×10^5 次。由于材料各向一致，所以裂纹及断裂会出现在未过渡圆角处，下图为左侧厚度方向的两条边，

其他区域颜色一致是因为其他地方没有缺陷或者应力集中点，导致断裂的位置随机。其他相关论文中试件由于中间采用变尺寸或中间打小孔，造成应力集中，易从指定区域断裂。

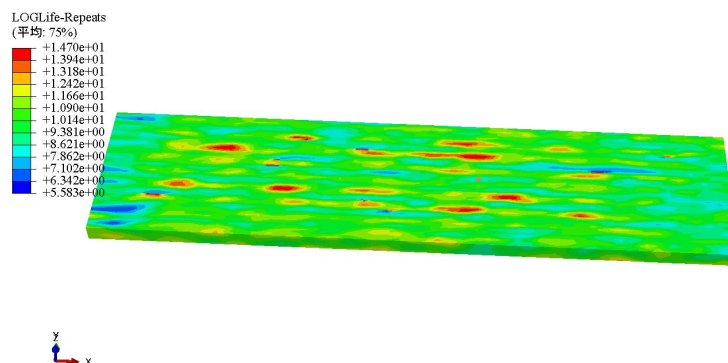


图 4-10 超声喷丸试件寿命云图

对经喷丸试件施加 100Mpa 的压强，通过 fe-safe 模拟，疲劳寿命出现在蓝色区域为+5.583e+00，实际疲劳次数 382824，约合 3.83×10^5 次。由于喷丸表面存在残余应力，有残余应力层，表面强化，表面硬度大于试件内部，各向性质较未喷丸出现不一致情况，试件表面存在大量的压应力，晶粒细化，应力场能够抵消一部分拉应力，使得超声强化后的疲劳寿命 3.83×10^5 次，高于未喷丸试件疲劳寿命 2.32×10^5 次，疲劳寿命较未喷丸试件提高了百分之 65.09%。超声喷丸使试件表面发生塑性变形，形成延厚度方向的纳米层结构。孪晶组织通过喷丸引入的高密度位错，使得滑移难以进行，变形抗力增加，从而疲劳寿命得到提升。机加工后的镍基合金由于表面存在微小的裂纹，疲劳模拟时会从微裂纹中扩展，进而断裂，而喷丸强化后，试件塑性变形，阻碍了裂纹扩展。超声喷丸的实质就是材料表面产生塑性变形，微观原子位错滑移，试件内应力达到孪生变形的临界分切应力发生孪生变形，位错运动受阻，抗塑性变形能力提升，疲劳寿命增加。

4.3 总结

(1) 扭转模拟时，760°C试件上表面整体分布 - 180.9Mpa~ - 217.1Mpa 的剪应力，试件下表面整体分布 + 180.9Mpa~ + 217.1Mpa 的剪应力。20°C和 760°C两种温度下试件受 100Mpa 的拉应力作用，760°C试件的剪应力范围 - 32.29Mpa~ - 206.2Mpa，而 20°C时剪应力范围在 - 63.44Mpa~ - 391.0Mpa。由于晶粒在超声喷丸作用后细化，因为试件的残余应力抵消了一部分试件所受的拉应力。相同的喷丸残余应力下，温度高，应力松弛幅度增加，随着温度的上升剪应力下降 184.8Mpa。压缩模拟时，760°C试件的剪应力范围 - 32.28Mpa~ - 206.2Mpa，而 20°C时剪应力范围在 - 63.47Mpa~ - 391.1Mpa。受压模拟可以看出 760°C微观原子吸收能量变得活跃，喷丸冲击产生的残余应力降低，强化效果减弱。弯曲模拟

时试件受向下 200Mpa 拉应力，可以看出固定端应力出现最大压应力值蓝色区域 - 203.4Mpa。其余部分均匀的绿色范围大小为 - 30.62Mpa~ - 203.4Mpa。

(2) 对喷丸和未喷丸两个试件进行疲劳模拟，超声强化后的疲劳寿命 3.83×10^5 次，高于未喷丸试件疲劳寿命 2.32×10^5 次，疲劳寿命较未喷丸试件提升了 65.09%，得出了超声喷丸确实对疲劳寿命和屈服强度有所提升。

第五章 总结

本文对镍基合金 GH4169 进行试验, GH4169 是航空发动机主要采用的材料, 由于其工作环境和载荷等原因, 试图寻找提升材料性能的方法, 提出了超声强化的机制。对航空发动机主要部件材料 GH4169 进行了分析, 研究了金属表面通过超声喷丸得到强化, 并在模拟高温的工况环境进行力学性能的测试, 具体得到以下结论:

(1) 经过喷丸后的试件表面的粗糙度有所提升, 试件表面形成深浅不一的区域, 垂直于试件方向形成凹凸不平区域, 相比于原始材料, 喷丸后的表面区域形成强化, 存在残余应力, 通过对两种载荷的分析, 速度载荷对比位移载荷残余应力层更好控制, 在超声喷丸过程中, 材料表面由于喷丸会发生位错, 超声喷丸能有效的提高晶粒细化程度。

(2) 扭转模拟时, 760℃超声喷丸后扭转试件 0.1 弧度, 上表面整体分布 -180.9Mpa ~ -217.1Mpa 的剪应力, 材料下表面整体分布 +180.9Mpa ~ +217.1Mpa 的剪应力。拉伸模拟设置 20℃和 760℃两种温度进行力学模拟, 试件受 100Mpa 的拉应力作用, 760℃试件的剪应力范围 -32.29Mpa ~ -206.2Mpa, 而 20℃时剪应力范围在 -63.44Mpa ~ -391.0Mpa。由于晶粒在超声喷丸作用后细化, 材料的滑移现象在拉伸模拟中会减弱发生, 因为试件的残余应力抵消了一部分试件所受的拉应力。相同的喷丸残余应力下, 温度高, 应力松弛幅度增加, 随着温度的上升剪应力下降 184.8Mpa。压缩模拟时, 760℃试件的剪应力范围 -32.28Mpa ~ -206.2Mpa, 而 20℃时剪应力范围在 -63.47Mpa ~ -391.1Mpa。受压模拟可以看出 760℃微观原子吸收能量变得活跃, 喷丸冲击产生的残余应力降低, 强化效果减弱。弯曲模拟时试件受向下 200Mpa 拉应力, 可以看出固定端应力出现最大压应力值蓝色区域 -203.4Mpa。其余部分均匀的绿色范围大小为 -30.62Mpa ~ -203.4Mpa。

(3) 对喷丸和未喷丸两个试件进行疲劳模拟, 由于喷丸表面存在残余应力, 有残余应力层, 表面强化, 表面硬度大于试件内部, 各向性质较未喷丸出现不一致情况, 试件表面存在大量的压应力, 晶粒细化, 使得超声强化后的疲劳寿命 3.83×10^5 次, 高于未喷丸试件疲劳寿命 2.32×10^5 次, 疲劳寿命较未喷丸试件提升了 65.09%, 得出了超声喷丸确实对疲劳寿命和屈服强度有所提升。分析疲劳断口, 未喷丸试件表面存在大量微小的裂纹, 由于施加了疲劳载荷裂纹扩展最后形成断裂, 而通过超声喷丸强化, 表面存在压应力层, 晶粒细化, 且表面存在的超声喷完后的凹坑增加了表面及近表面的强度, 试件表面的微裂纹被破坏, 较未喷完试件疲劳寿命提升, 再次验证了超声喷丸的强化理论。

参考文献

- [1] 专家解析制造大飞机技术难点需突破 10 项技术 [N]. 北京日报, 2007 年 4 月 5 日.
- [2] 叶文新航空发动机机械磨损的故障诊断与风险评估[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [3] 陈文豪.镍基高温合金涡轮盘成形工艺的数值模拟分析[D]. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2014.
- [4] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册(第 2 卷)[M].第 2 版,北京:中国标准出版社, 2002.
- [5] 曾维虎,周同金,张勇,王涛,付书红.GH416 合金高温高应力持久变形后的组织演变[J].铸造技术,2018, 39(12):2651-2655.
- [6] 王庆增,陈国胜,孙文儒.航空涡轮盘用 GH4169G 合金研制[J].宝钢技术,2013(02):37-42.
- [7] 刘小渝.超声波喷丸消除钢结构桥梁焊接残余应力的试验研究[J].中国铁道科学,2008,29(5):46-49.
- [8] Mukhanov I.I, Golubev Yu.M. Strengthening steel components by ultrasonically vibrating ball[J]. Vestn. Mashin, 1966, 11: 52.
- [9] Statnikov E.Sh, Zhuravlev L.V, Alekseev A.F, et al. Ultrasonic head for strain hardening and relaxation treatment [P]. Russian: 472782, 1975.
- [10] L.M.洛巴诺夫,单际国.巴顿焊接研究所在结构焊接及强度领域的最新研究方向[C].第九届全国焊接会议论文集,中国,黑龙江,1999:48-52.
- [11] Lu K, Lu J. Surface Nanocrystallization (SNC) of Metallic Materials-Presentation of the Concept Behind a New Approach[J]. Journal of Materials Science & Technology, 1999,15(3):193-197.
- [12] Tao N R, Sui M L, Lu J, Lu K. Surface Nanocrystallization of Iron Induced by Ultrasonic Shot Peening [J]. Nanostructured Materials, 1999,11(4): 433-440.
- [13] Feng G, Shi L, Lü J, Lu K. Investigation of Surface Nanocrystallization of A Low Carbon Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening[J].Acta Metallurgica Sinica,2000,36(3): 300-303.
- [14] Wang C, Lai Z L, Sun D, Zhou L C, An Z B. Comparison Research on Mechanical Properties of Stainless Steel after Laser Peened and Ultrasonically Peened[J].Advanced Materials Research.2013.690-693:2107-2111.
- [15] 王东坡,宋宁霞,王婷.纳米化处理超声金属表面[J].天津大学学报,2007,40(2):228-233.
- [16] 李进一,凌祥,周建新.超声喷丸残余应力场的有限元模拟[J].航空材料学报,2012,32(1):84-88.

致 谢

本篇论文是在导师的指导下完成的，导师从前期对我所属研究区域，进行针对性分析，在迷茫时给予方向。每周的指导就现有的问题进行针对性的指导，让课题组的成员们遇到问题时分享，减少后面出现类似错误的可能，让实验少走弯路，并最初完成论文的撰写。

回首四年，取得了些许成绩，生活中有快乐也有坚信。感谢老师四年来的孜孜不倦的教会及成长的关爱。毕业设计是对大学四年所学知识的汇总，是理论联系实际的基础，通过毕业设计，让我很好的复习了之前所学的专业知识，夯实了基础。在整个毕设期间，相互学习，注重沟通交流，在设计过程中，遇到很多问题，发挥每个人的优势，将大家的力量充分发挥，用实际行动证明了 $1+1>2$ 。给未来的工作学习一个很好的引导。再次对帮助过我的导师和课题组成员们致以最真诚的谢意。

十几年求学历程中，离不开父母的鼓励和支持，是他们辛勤的工作，无私的奉献，为我创造了良好的学习环境，才能顺利完成学业，感谢他们一直以来对我的抚养和培育。没有他们作为我的强大后盾，我是不能完成本科阶段的科研任务。