



天津中德应用技术大学

Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 本科生毕业设计

喷丸金属疲劳性能研究

Study On Mechanical Properties of Shot Peened Metal

姓 名 \_\_\_\_\_ 周行 \_\_\_\_\_

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

喷丸金属疲劳性能研究  
**Study On Mechanical Properties of Shot Peened Metal**

姓 名 \_\_\_\_\_ 周行 \_\_\_\_\_

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		申 报 人	姓 名	宋宗贤		
专 业	材料科学与工程			技术职务	正高	副高	中级 √
题目名称	喷丸金属疲劳性能研究						
题目类型	自拟	题目来源	生产实际				
课题来源、背景及意义	<p>航空发动机是飞机的心脏，是国之重器。航空发动机体现了国家的工业基础、科技水平和国防实力，其热端部件的制造技术直接影响和制约了航空发动机的水平。目前制造发动机叶片材料仍以钛合金和镍基合金居多。发动机叶片等重要航空关键部件在服役期间承受的交变荷载次数很高，对材料的疲劳性能要求较为严苛。因此本课题对喷丸后金属进行疲劳性能的研究意义重大。</p>						
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 制订研究方案。 在对喷丸强化的原理和设备的了解的前提下，预设心理目标并制定可行的研究方案。</li> <li>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。 精筛挑选适合的实验材料，深入了解并掌握实验设备以及配套的使用方法，以便达到预想中的实验目的。</li> <li>3. 进行试验，对实验所得数据进行详细记录。 将筛选好的实验材料，以特定的实验方法，经过实验设备实验，最终得出结果，并及时使用测量设备测量数据并记录。</li> <li>4. 结合相关参考文献，分析实验数据及机理。 参照国内外在此领域的先进专业文献，认真比对并分析实验数据的异同点以及原因。</li> <li>5. 撰写论文 整理实验数据和心得，总结提炼，以论文和报告的形式呈现。</li> </ol>						
工作条件	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 硬度仪</li> <li>2. 疲劳机</li> <li>3. 喷丸机</li> <li>4. 镍基合金材料</li> </ol>						

知识与能力要求	掌握试验仪器的操作能力及超声喷丸机的使用,材料疲劳性能的分析能力及硬度计的使用能力。
<p>系（教研室）审查意见：</p> <p style="text-align: right;">负责人(签名)： 年 月 日</p>	



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

## 毕业设计任务书

题 目： 喷丸金属疲劳性能研究

学 院： 航空航天大学

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 周 行

学 号： 18414030119

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

# 毕业设计任务书

## 1. 毕业设计课题背景及意义

航空发动机是飞机的心脏，是国之重器。航空发动机体现了国家的工业基础、科技水平和国防实力，其热端部件的制造技术直接影响和制约了航空发动机的水平。目前制造发动机叶片材料仍以钛合金和镍基合金居多。

其中镍基合金与钛合金相对而言属于新兴工业金属材料，其中以镍基合金更甚。镍基合金除具有高耐蚀性外，还具有以下优点：高强度、高热强固性，以及耐应力腐蚀破裂和耐腐蚀疲劳等。

然而这些金属也有着不小的弊端。如同其它难镀金属一样，镍基合金具有强烈的钝化能力，属于较难处理的金属；传统的主流表面改性技术的缺点在于力度达不到预定的要求，喷丸技术的出现解决了这一问题。

喷丸成形的基本原理是：利用高速弹丸（直径 1-6mm）流撞击金属板材的表面，使受撞击的表面及其下层金属材料产生塑性变形而延伸，从而逐步使板材发生向受喷面凸起的双向弯曲变形。喷丸还可用于表面强化，提高抗疲劳和耐腐蚀性等；

喷丸成形技术的优点主要有：

(1) 工艺装备简单，不需要成形模具，因此零件制造成本低，对零件尺寸大小的适应性强

(2) 由于喷丸成形后，沿零件厚度方向在上、下两个表面均形成残余压应力(如下图所示)，因此在零件成形的同时，还可以改善零件的抗疲劳性能；

但是任何事物都有正反两面，喷丸技术亦是如此，有利就有弊——喷丸的弹丸的初始速度较大，弹丸高速冲击零件表面会产生相对较深的凹坑，此外传统喷丸的弹丸使用量大，在高速冲击下弹丸的破碎难免发生，破碎的弹丸表面容易擦伤风扇叶片表面；

考虑到发动机叶片等重要航空关键部件在服役期间承受的交变荷载次数很高，对材料的疲劳性能要求较为严苛，为了恰到好处的解决目前存在的技术问题，研究喷丸工艺对金属疲劳性能产生的影响成为迫在眉睫的任务，因此本课题的开展意义重大。

## 2. 毕业设计课题任务的内容和要求

1. 制订研究方案。

在对喷丸强化的原理和设备的了解的前提下，预设心理目标并制定可行的研究方案。

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。

精筛挑选适合的实验材料，深入了解并掌握实验设备以及配套的使用方法，以便达到预想中的实验目的。

3. 进行试验，对实验所得数据进行详细记录。

将筛选好的实验材料，以特定的实验方法，经过实验设备实验，最终得出结果，并及时使用测量设备测量数据并记录。

4. 结合相关参考文献，分析实验数据及机理。

参照国内外在此领域的先进专业文献，认真比对并分析实验数据的异同点以及原因。

5. 撰写论文

整理实验数据和心得，总结提炼，以论文和报告的形式呈现。

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）:

毕业设计（论文）一套

4. 推荐参考资料:

- [1] 孟宪凯. 激光温喷丸强化航空轻质合金的振动模态及疲劳延寿机理[D]. 江苏大学, 2017.
- [2] 刘牧熙. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温保持后的力学性能及微观组织研究[D]. 江苏大学, 2019.
- [3] 盛杰. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温疲劳特性及其延寿机理[D]. 江苏大学, 2019.
- [4] 姚亮亮, 张显程, 刘峰, 涂善东, 马聪. 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.
- [5] 陈竞炜. 镍基高温合金GH4169喷丸强化性能研究及参数优化[D]. 上海交通大学, 2017.
- [6] 王作伟. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温疲劳性能的数值模拟及试验研究[D]. 江苏大学, 2018.
- [7] 吕鹤婷. 喷丸对疲劳寿命影响的数值模拟研究[D]. 山东大学, 2016.
- [8] 孟宪凯, 周建忠. 激光温喷丸强化航空轻质合金的振动模态及疲劳延寿机理[J]. 机械工程学报, 2019, 55(06):165.
- [9] Mohammad Asaduzzaman Chowdhury. Advanced Surface Engineering Research[M]. IntechOpen:2018-11-14.
- [10] Xiang Y. F., Mei R. L., Wang S. P., Azad F., Zhao L. Z., Su S. C.. Numerical investigation of the effect of laser shock peening parameters on the residual stress and deformation response of 7075 aluminum alloy[J]. Optik, 2021, 243:
- [11] Ji-Yin Zhang, Chang-Feng Yao, Min-Chao Cui, Liang Tan, Yun-Qi Sun. Three-dimensional modeling and reconstructive change of residual stress during machining process of milling, polishing, heat treatment, vibratory finishing, and shot peening of fan blade[J]. Advances in Manufacturing, 2021 (prepublish)::

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

## 本科生毕业设计开题报告

题 目： 喷丸金属疲劳性能研究

学 院： 航空航天

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 周 行

学 号： 18414030119

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：2021 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）课题的目的和意义

航空发动机是飞机的心脏，是国之重器。航空发动机体现了国家的工业基础、科技水平和国防实力，其热端部件的制造技术直接影响和制约了航空发动机的水平。目前制造发动机叶片材料仍以钛合金和镍基合金居多。

其中镍基合金与钛合金相对而言属于新兴工业金属材料，其中以镍基合金更甚。镍基合金除具有高耐腐蚀性外，还具有以下优点：高强度、高热强固性，以及耐应力腐蚀破裂和耐腐蚀疲劳等。

然而这些金属也有着不小的弊端。如同其它难镀金属一样，镍基合金具有强烈的钝化能力，属于较难处理的金属；

超声喷丸作为一种新型的表面处理与改性工艺，为表面改性这一技术领域开拓了新的灵感与启发。超声喷丸的工作原理是通过超声振动，使丸粒高速撞击工件表面并植入残余压应力，提升工件疲劳强度的冷加工工艺。广泛用于提高零件机械强度以及耐磨性、抗疲劳和耐腐蚀性等。

喷丸相比其他表面强化工艺的优势：表面强化处理种类多，与热处理相比，喷丸不受材料限制；与激光喷丸等比，价格低廉；与滚压、碾压、挤压等相比，喷丸不受工件形状和尺寸的限制。总之，喷丸因为具有高适应性、高通用性、高生产效率以及合理的设备费用、低能量要求等优点而应用广泛。

截至目前为止，超声喷丸在表面改性方面使用过的研究材料更多集中在铁和不锈钢，而在钛合金镍基合金等新兴航空材料方面的研究略有不足。由于不同金属材料的组织结构和性能迥然不同，喷丸工艺对其的影响规律与影响程度也必然会有所差异。

考虑到发动机叶片等重要航空关键部件在服役期间承受的交变荷载次数很高，对材料的疲劳性能要求较为严苛，本课题的开展无论是对于新兴航空材料的性能的改进，还是对于超声喷丸改性技术地应用的不断发展，都意义重大。

### （二）国内外研究情况及发展趋势

喷丸作为一种冷加工工艺，能在工业界得到如此重视，是经过工业生产应用反复证明得到。它自上世纪 20 年代诞生于国外以来，因为其提升材料性能的有效性而最先应用于汽车工业，但随后一段时间内由于种种原因使它发展的非常缓慢。到了上世纪 50 年代初，伴随着世界航空工业的快速发展，喷丸工艺进入了发展黄金期。基于航空工业的高风险、高可靠性的要求，其使用的材料都是高强度材料，但是大量高强度材料的使用，随之而来的确是材料疲劳失效带来的大量灾难性故障，并且具统计，疲劳失效占整个失效数目的 80% 以上。因此，如何提高飞机零构件的抗疲劳能力成为行业急需解决的关键性问题，而喷丸强度效果之显著、成本之低廉，使的其他表面强化工艺都相形

见细，因此喷丸强化工艺被广泛的应用于航空工业，并给予了充分的肯定。到 20 世纪 50 年代末，喷丸工艺以成来西方航空工业大国飞机制造行业不可或缺的成形工艺之一，并伴随机床控制技术的进步和发展，落后的机械控制式喷丸机也逐渐被智能化的数控喷丸机所取代。目前 MIC、美国波音公司和德国罗斯勒有限公司等少数几家公司垄断了先进的喷丸成形技术。其中 MIC 通过研发以及竞争兼并，以经形成高度垄断、大型和专业化的喷丸工艺技术和整套成形设备兼营的跨国集团公司。波音以其在飞机制造行业的领先地位和无可比拟的科研实力，成为喷丸成形技术成功应用的典型代表。Vapor Blast 公司提供的当时欧洲最先进的数控喷丸强化设备，为 A380 飞机机身整体壁板的喷丸强化立下了汗马功劳，A380 飞机超临界外翼下翼面整体壁板长度 30 余 m、厚度 30 余 mm，这代表了国际喷丸成形工艺技术的最新成果，也是迄今为止采用喷丸成形技术所获得的长度最长、厚度最大构件。

在国内，自上世纪 50 年代引进苏联相关工艺开始，经过 40 多年的发展，终于在上世纪 90 年代成功从机械控制喷丸迈向数控喷丸成形时代，以研制成功 ARJ21 飞机超界外翼下翼面整体壁板为标志，国内首次实现真正意义上的喷丸成形。

近年来喷丸的学术研究和商业应用在国内受到普遍重视，国内很多科研机构专门从事喷丸等表面处理技术的研究，例如江南大学先进表面处理中心、西安交通大学金属材料强度国家重点实验室。山东省科学院新材料研究所表面技术中心、武汉材料保护研究所等。从百度查询的质料显示、国内从事喷丸等表面处理设备研制和生产的的企业超过 100 多家，其中很多企业的产品达到国际先进水平，产品服务世界 500 强企业。

通过查找网络资料，不难推测，未来喷丸成型手段将会日趋多样化，而且可喷对象也将日益多元化，如激光冲击、混合水射流喷丸等以经出现，今后更多的新方法相信也一定将会被提出以满足日益增加的市场化需求，同时喷丸技术的进步也很可能会使可喷对象更加不受环境和尺寸的束缚。

### **（三）主要研究内容**

- （1）镍基合金喷丸硬度和拉伸性能实验结果分析
- （2）镍基合金喷丸疲劳性能分析

### **（四）参考文献**

- [1] 孟宪凯. 激光温喷丸强化航空轻质合金的振动模态及疲劳延寿机理[D]. 江苏大学, 2017.
- [2] 刘牧熙. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温保持后的力学性能及微观组织研究[D]. 江苏大学, 2019.
- [3] 盛杰. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温疲劳特性及其延寿机理[D]. 江苏大学, 2019.
- [4] 姚亮亮, 张显程, 刘峰, 涂善东, 马聪. 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.

- [5] 陈竞炜. 镍基高温合金GH4169喷丸强化性能研究及参数优化[D]. 上海交通大学, 2017.
- [6] 王作伟. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温疲劳性能的数值模拟及试验研究[D]. 江苏大学, 2018.
- [7] 吕鹤婷. 喷丸对疲劳寿命影响的数值模拟研究[D]. 山东大学, 2016.
- [8] 孟宪凯, 周建忠. 激光喷丸强化航空轻质合金的振动模态及疲劳延寿机理[J]. 机械工程学报, 2019, 55(06):165.
- [9] Mohammad Asaduzzaman Chowdhury. Advanced Surface Engineering Research[M]. IntechOpen:2018-11-14.
- [10] Xiang Y. F., Mei R. L., Wang S. P., Azad F., Zhao L. Z., Su S. C.. Numerical investigation of the effect of laser shock peening parameters on the residual stress and deformation response of 7075 aluminum alloy[J]. Optik, 2021, 243:
- [11] Ji-Yin Zhang, Chang-Feng Yao, Min-Chao Cui, Liang Tan, Yun-Qi Sun. Three-dimensional modeling and reconstructive change of residual stress during machining process of milling, polishing, heat treatment, vibratory finishing, and shot peening of fan blade[J]. Advances in Manufacturing, 2021 (prepublish):

## 二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021/12/3-2021/12/09	查阅文献，了解喷丸的应用、国内外研究现状等相关知识，完成开题报告。	完成开题报告
2021/12/20-2022/12/28	查找并详细分析资料和文献，学习超声喷丸金属表面改性工艺。	完成实验数据及资料的收集，掌握喷丸金属表面改性工艺
2021/12/29-2022/1/04	根据实验设备和材料，拟定试验的计划。	整理准备完成实验设备与实验材料，并敲定实验计划
2022/1/5-2022/4/18	实施实验方案，采集实验数据并进行分析总结	完成试验方案，进行分析并总结得出得出结论
2022/4/19-2022/5/02	根据有限元分析结果和试验方案结论进行总结，撰写论文并完善。	总结试验分析结论，撰写并完善毕设论文

2022/5/10-2 022/5/16	检查修改一次论文初稿	完成论文初稿
2022/5/17-2 022/5-29	根据指导老师的讲评及意见，修改二次论文草稿	提交二次论文草稿
2022/5/30-2 022/5/31	讲评第二次论文草稿、集中解决论文有关问题漏洞并及时修改	完成漏洞修改
2022/6/01-2 022/6/11	基本完成论文大纲要求，论文成型，根据指导老师讲评做出最后修改	最终定稿
2022/6/12-2 022/6/18	整理打印论文，装订论文	整理完毕并装订成册
2022/6/19-2 022/6/30	准备参加答辩	能够稳定发挥，争取顺利通过答辩
<b>完成课题的 现有条件</b>	1、 硬度仪 2、 疲劳机 3、 喷丸机 4、 镍基合金材料	
<b>指导教师 意见</b>	指导教师： _____ 年 ____ 月 ____ 日	
<b>开题答辩 小组意见</b>	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：

周行

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

本文以 GH4169 型镍基合金作为实验材料，采用硬度测试，拉伸测试，以及疲劳实验，研究喷丸对金属疲劳性能的影响。通过显微硬度实验，对比分析超声喷丸处理实验参数的改变对于显微硬度的提升效果;通过静力拉伸性能实验，对比分析超声喷丸处理实验参数的改变对于静力拉伸性能的提升效果;通过疲劳性能实验，对比分析数据，总结不同的温度条件对于疲劳性能的服役表现的影响规律。

硬度测试的实验结果显示，喷丸时间并非越长越好，存在最优范围，为 1-2min; 喷丸的振幅较高时，喷丸强化的效果更显著。拉伸实验的数据进一步证明了，喷丸确实会对拉伸性能有一定的提升，但物极必反，喷丸时间不宜过长; 振幅的提高确实可以使拉伸性能获得更高的增益。综合的考虑，为了兼顾硬度提升的同时，使得抗拉强度与屈服强度也能够得到较大提升，并且不对延伸性造成太大破坏，总结得出最佳喷丸参数应为振幅 40 微米，时间 1 分钟。高温疲劳性能的实验结果表明，在中低温的环境下超声喷丸后的材料的疲劳性能表现更优异，而对于高温服役条件下，超声喷丸的表现稍显逊色; 超声喷丸后的试件在低应力条件下寿命更久。

**关键词：**超声喷丸；镍基合金；疲劳性能

## ABSTRACT

In this paper, GH4169 nickel base alloy is used as experimental material. The effect of shot peening on metal fatigue properties is studied by hardness test, tensile test and fatigue test. Through the microhardness experiment, the effect of changing the experimental parameters of ultrasonic shot peening on improving the microhardness is compared and analyzed; Through the static tensile property experiment, the effect of changing the experimental parameters of ultrasonic shot peening on the improvement of static tensile property is compared and analyzed; Through the fatigue performance experiment, the data are compared and analyzed, and the influence law of different temperature conditions on the service performance of fatigue performance is summarized.

The experimental results of hardness test show that the longer the shot peening time is, the better. There is an optimal range of 1-2 min; When the amplitude of shot peening is higher, the effect of shot peening is more significant. The data of tensile test further proves that shot peening can indeed improve the tensile properties to a certain extent, but the extremes of things must be reversed, and the shot peening time should not be too long; The increase of amplitude can indeed obtain higher gain of tensile properties. Comprehensive consideration, in order to take into account the increase of hardness, make the tensile strength and yield strength can be greatly improved, and do not cause too much damage to the extensibility, it is concluded that the best shot peening parameter should be the amplitude of 40 microns and the time of 1 minute. The experimental results of high temperature fatigue performance show that the fatigue performance of the material after ultrasonic shot peening is better in the medium and low temperature environment, but the performance of ultrasonic shot peening is slightly inferior in the high temperature service condition; The specimen after ultrasonic shot peening has a longer service life under low stress conditions.

**Key words:** Ultrasonic shot peening; Nickel base alloy; Fatigue performance

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 课题的目的和意义 .....	1
1.2 国内外研究情况 .....	1
1.2.1 国外研究情况 .....	1
1.2.2 国内研究情况 .....	2
1.3 课题的主要研究内容 .....	2
第二章 实验条件及方法 .....	4
2.1 实验材料 .....	4
2.2 实验设备及方法 .....	4
2.2.1 显微硬度测试设备及方法 .....	4
2.2.2 拉伸性能测试设备及方法 .....	5
2.2.3 超声喷丸设备及方法 .....	6
2.2.4 疲劳实验设备及方法 .....	7
第三章 显微硬度与拉伸性能实验分析 .....	9
3.1 喷丸前后显微硬度分析 .....	9
3.1.1 实验数据 .....	9
3.1.2 喷丸时间对试件显微硬度的影响 .....	9
3.1.3 喷丸振幅对试件显微硬度的影响 .....	10
3.2 喷丸前后拉伸性能分析 .....	12
3.2.1 喷丸时间对试件拉伸性能的影响 .....	13
3.2.2 喷丸振幅对试件拉伸性能的影响 .....	14
第四章 喷丸疲劳性能分析 .....	17
4.1 常温疲劳性能分析 .....	17
4.2 高温疲劳性能分析 .....	18
4.3 疲劳曲线汇总分析 .....	21
第五章 结论 .....	22
参考文献 .....	23
致 谢 .....	24

# 第一章 绪论

## 1.1 课题的目的和意义

航空发动机是飞机的心脏，是国之重器。航空发动机体现了国家的工业基础、科技水平和国防实力，其热端部件的制造技术直接影响和制约了航空发动机的水平。目前制造发动机叶片材料仍以钛合金和镍基合金居多。其中镍基合金与钛合金相对而言属于新兴工业金属材料，其中以镍基合金更甚。镍基合金除具有高耐蚀性外，还具有以下优点：高强度、高热强固性，以及耐应力腐蚀破裂和耐腐蚀疲劳等。

超声喷丸作为一种新型的表面处理与改性工艺，为表面改性这一技术领域开拓了新的灵感与启发。超声喷丸的工作原理是通过超声振动，使丸粒高速撞击工件表面并植入残余压应力，提升工件疲劳强度的冷加工工艺。广泛用于提高零件机械强度以及耐磨性、抗疲劳和耐腐蚀性等。喷丸相比其他表面强化工艺的优势：不受材料限制；价格低廉；不受工件形状和尺寸的限制。美中不足则在于：超声喷丸处理的实验材料多为钢铁材料，以及铝合金等工程常用材料，对于镍基合金材料经过超声喷丸处理后表面改性的研究不足，相关规律有待进一步分析。

由于不同金属材料的组织结构和性能迥然不同，喷丸工艺对其的影响规律与影响程度也必然会有所差异。考虑到随着航空业的发展，对发动机叶片等重要航空关键部件在服役期间承受的交变荷载次数的要求越来越高，对材料的疲劳性能要求较为严苛，本课题的开展无论是对于新兴航空材料的性能的提升，还是对于超声喷丸改性技术地应用的不断发展，都意义重大。

## 1.2 国内外研究情况

### 1.2.1 国外研究情况

喷丸工艺，从本质来讲，属于一种表面冷加工工艺，常用于强化金属材料或是具备一定塑性的非金属材料。此工艺自问世便一直受到各大工业应用领域的深切关注，而且经过技术的洗礼与时间的考验，其实用性与稳定性也得到了证明与认可。

喷丸工艺自20世纪20年代诞生于美国，一经应用便在表面强化方面取得了立竿见影的卓越成效。当时这项工艺主要应用于汽车行业。它的发展在这段时间内非常缓慢。20世纪60年代初，随着世界航空工业的快速发展，各种高强度材料曾井喷式发展，且被大量应用于飞机的各个关键承力部件，以满足航空工业的高风险和高可靠性要求；但是疲劳失效的问题开始不断接踵而至。据统计，疲劳失效是当时主要事故原因。因此，如何提高飞机零部件的抗疲劳性能已成为航空工业亟待解决的关键问题。随着大胆的尝试采用喷丸成形工艺，人们发现该技术不

仅对于飞机复杂金属零件强化效果明显，而且不会引起材料外形尺寸的大幅改变。这对于当时还主要依靠铆接和锻造的航空业提供了一种新思路。20世纪70年代，随着喷丸工艺的发展，国外的工程师在飞机机翼设计过程尝试加入预应力，为了这一目标，逐渐发展完善预应力喷丸工艺，使得喷丸工艺体系进一步得到扩充。

近年来通过研发、竞争和兼并，出现了数家垄断性强、规模大、设备齐全的跨国集团公司。以波音、空客为代表的几大航空公司在喷丸领域凭借其成熟完备的体系而奠定了超然的地位。

### 1.2.2国内研究情况

相较于国外的喷丸技术发展进程，国内喷丸工艺领域研究从20世纪60年代开始发展，起步时间较晚。20世纪90年代初中期，经过不懈的努力以及一系列针对技术难题的相关研究，国内预应力喷丸技术的空白得以填补。21世纪初，在国外实行技术垄断与封锁的背景下，相关科研单位不畏艰苦奋斗前行，成功研发ARJ21飞机大型超临界机翼整体壁板喷丸技术，这一里程碑式的创举，标志着我国成为少数几个拥有自主开发预应力喷丸技术能力的国家之一。近年来，我国首次将整体喷丸技术运用到战略运输机的研制当中，并且取得圆满成功，这标志着我国再次取得了领先世界的技术成果，成为第一个掌握整体喷丸成形技术的国家。

一直以来，喷丸领域的更新不曾放缓脚步，作为工业领域的后起之秀，尽管无数匠人已经不断地从它身上获取灵感并研制出新的技术，例如超声喷丸、激光喷丸、双面喷丸等，但它的潜能似乎尚未被完全发掘殆尽，反而依旧源源不断地为工业提供生命力与创造力。喷丸工艺无论是对喷丸对象，还是喷丸成形手段，或是喷丸设备的改进创新，又或者是与其他工艺结合从而创造出新工艺，在这些领域与技术方面的研究都还有着很大的进步空间，尚且等待后人前赴后继去丰富拓展。

### 1.3课题的主要研究内容

本文通过对喷丸试样进行对比研究，汇总实验数据并加以分析，从而总结超声对喷丸GH4169镍基合金的疲劳性能影响。实验的主体思路可以分为两部分，分别是测试静态性能与真实工作环境中的疲劳性能。

主要研究内容包括以下几项：

(1) 对喷丸处理前后的试件显微硬度进行测量，将数据结果汇总，并根据实验结果对比分析，从而研究超声喷丸处理实验参数（喷丸振幅、喷丸时间两方面）的改变对于显微硬度的提升效果；

(2) 分别对喷丸处理前后的试件进行静力拉伸性能实验，将实验数据进行

整理并对比分析，从而研究超声喷丸处理实验参数（喷丸振幅、喷丸时间两方面）的改变对于静力拉伸性能的提升效果；

（3）分别对喷丸处理前后的试件进行疲劳实验，结果分析，将实验数据进行整理并对比分析数据，总结不同的温度条件（常温、中温、高温）对于疲劳性能的影响规律。

## 第二章 实验条件及方法

### 2.1 实验材料

本文的实验试件所应用的材料为GH4169镍基高温合金，该实验材料在-253—700℃温度范围内具有良好的综合性能，650℃以下的屈服强度居变形高温合金的首位，并具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化、耐腐蚀性能，以及良好的加工性能，能够制造各种形状复杂的零部件，被广泛应用于航空航天工业领域。如下表2-1所示，GH4169镍基合金的化学成分中镍元素与铬元素为主，其中镍化学成分较为稳定，具有耐腐蚀耐溶解，较强的钝化能力及良好的可塑性、硬度、延展性等特点。金属铬具有较高的耐腐蚀性。他们的化学排布方式对于GH4169镍基合金的性能至关重要。

表2-1 GH4169镍基合金化学成分

化学成分	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Co
所占百分比	50~55	17~21	2.8~3.3	余量	4.75~5.5	1

表2-1 GH4169镍基合金化学成分（续）

化学成分	C	Mn	Si	S	Cu	Al
所占百分比	0.08	0.35	0.35	0.01	0.3	0.2~0.8

### 2.2 实验设备及方法

#### 2.2.1 显微硬度测试设备及方法

本次实验采用维氏显微硬度计测试材料的表面硬度，设备如图2-1所示。此设备的测试精度与性能已经经过精心调制与测试，已经将机械设备的失误概率降到最低，能够确保实验数据准确有效。硬度的指标与疲劳性能密不可分，疲劳断裂位置位于疲劳裂纹萌生区，而硬度高低决定了疲劳裂纹萌生的位置。通常在硬度较低区域容易优先产生疲劳裂纹。

为了更加直观的测试经过喷丸处理过前后的镍基合金表面梯度方向的硬度变化，决定选用显微硬度测量法，测量纵深方向硬度的变化，测试面的方向位于首喷丸表面侧方。测试点为从零件表面0微米处到距离表面200微米处，每个测试点的垂直距离间隔为40微米。。测试时将工具头移动到待测试件表面持续加载一定时间后松开，此时仪器会自动计算显微硬度。为了减小测试误差，材料的选取应注意表面光洁平整。实验中每组试件设置五个测试点，深度间隔为50微米。



图2-1 维氏显微硬度计

## 2.2.2 拉伸性能测试设备及方法

本次实验用到的拉伸设备为拉伸试验机，用以测试屈服强度，抗拉强度以及延伸率，设备如图 2-2 所示。该设备相较于单柱拉力试验机性能更加稳定，实验结果更准确。本次实验的目的是各个实验材料进行分组拉伸实验，采集相对应的实验数据进行并分析比对，从而研究总结超声喷丸对镍基合金材料的拉伸疲劳性能影响规律。在常温下，采用试验机分别对进行过超声喷丸处理以及没进行超声喷丸处理的试件，施加静态拉伸载荷。实验前应将试件表面进行擦拭，确保试件表面光洁平整；为了使实验设备施加的拉伸载荷的施力方向与试件中心轴线一致，应确保试件与夹紧装置的齐平度、垂直度、中心对称度严密一致。随后启动设备，在电脑的控制下不断施加拉力，直至试件断裂，随后记录参数。

上述所有实验为了确保数据科学准确，避免出现偶然性，每种试件应设置多组，求取中间值。



图2-2 拉伸实验机

### 2.2.3 超声喷丸设备及方法

喷丸强化是用高速度弹丸撞击金属零件表面使之产生残余压应力并形成细化压晶粒的冷作硬化层，从而提高零件疲劳强度和抗应力腐蚀能力的一种工艺方法。与传统喷丸相比，超声喷丸不受材料种类、形状及尺寸等限制，因此可以用来处理形状复杂的工艺零部件。超声喷丸不需要对弹丸进行重复购买收集或是清洗工作，可以循环使用，而且操作简便易上手。

如图2-3所示，为本次超声喷丸实验的主要设备超声喷丸机。该仪器主要由超声波发生器，超声转换器，超声变幅杆，喷头组成。超声喷丸摒弃了以压缩空气作为驱动的传统模式，改为以超声驱动作为能源。工作时，喷头推动喷丸机匣体内的丸料或是撞针以高速喷出，并控制其反复冲击金属构件表面，使构件表面和次表面在加工硬化的作用下发生塑性变形，形成塑性变形层，冲击完成时在构件表层留下残余应力，从而提升疲劳性能。



图2-3 超声喷丸机

相较于传统喷丸而言，超声喷丸无论是力度，还是对深度都更为明显，因此常用于处理传统喷丸技术难以处理的厚度较厚的实验材料。

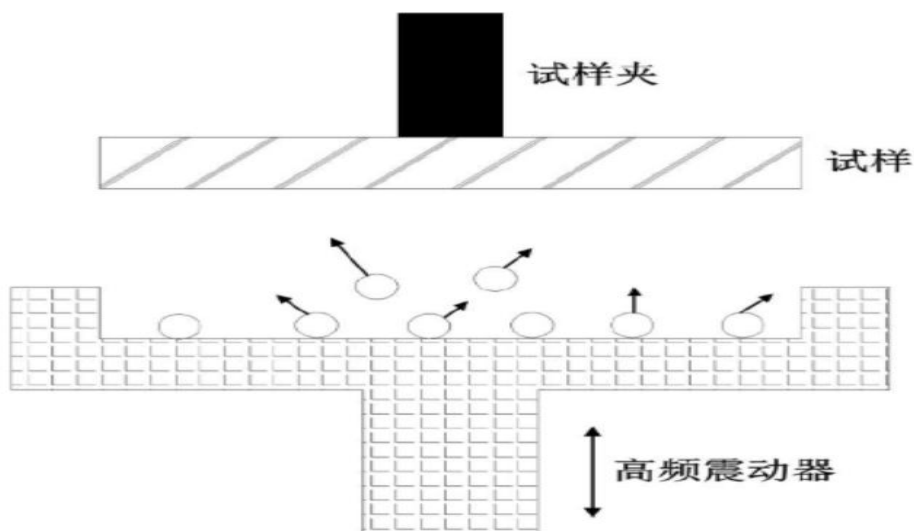


图2-4 超声喷丸装置工作原理

## 2.2.4 疲劳实验设备及方法

疲劳性能实验的设备为超声疲劳机，如图2-5所示。超声疲劳机由超声疲劳电源、执行机构以及附加装置三部分构成。

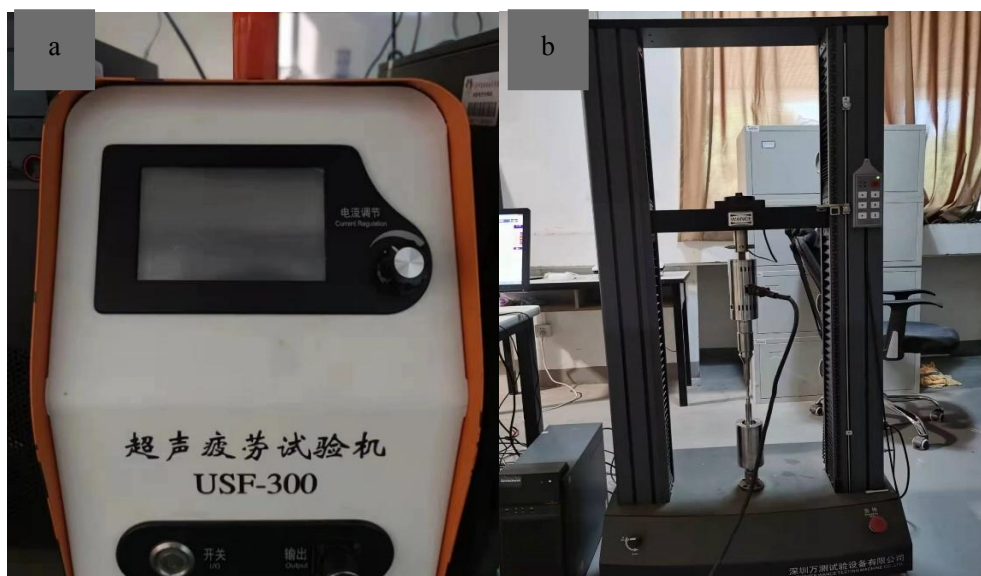


图2-5超声疲劳试验机 (a) 电源 (b) 设备主体

其中超声疲劳电源的作用是将交流电信号转化为高频交流电信号，然后将接收到的信号传递给执行机构。执行机构包括换能器和变幅杆。换能器的职能是将输入进来的电信号输出为振动信号，变幅杆将接收到振动信号后将其放大施加于试件，从而实现对于实验材料试件疲劳应力载荷的控制。

实验时，将预备好的实验材料，即试件，经由夹紧装置固定于疲劳试验机，随后启动设备，对试件拉伸的同时施加交变应力（振动载荷）。启动设备时，初始入口力不应设置过大。疲劳试验在疲劳机施加的振动载荷实验的目的为了模拟真实环境下镍基合金材料的工作条件，以便更准确的研究超声喷丸处理后的材料的性能。为了数据更加客观真实，实验选取的试件厚度相对较厚，实验的时间也更长。

与此同时，为了模拟高温环境，在超声疲劳试验机的基础上，增加了高频感应加热系统。该系统的高频感应加热设备的原理是电磁感应加热原理，将电能转化为热能。配合红外温度传感器与计算机实现对温度的控制。

### 第三章 显微硬度与拉伸性能实验分析

#### 3.1 喷丸前后显微硬度分析

对于合金材料而言，硬度不仅是衡量抵抗塑性变形能力的指标，同时也对强度，韧性与拉伸性能有着密切的影响，进而最终对疲劳性能产生影响。

##### 3.1.1 实验数据

如表1所示，为了方便比对，设置了四组实验，其中分别为：一组未喷丸试件与三组喷丸后试件，实验编号1—4。

表3-1 距离表面不同位置的显微硬度HV

编号	处理情况	距离 $\mu\text{m}$	硬度				
			0	50	100	150	200
1	喷丸前		380	378	379	376	379
2	喷丸后（喷丸振幅 $40\ \mu\text{m}$ ，处理时间 1min）		450	420	400	380	376
3	喷丸后（喷丸振幅 $40\ \mu\text{m}$ ，处理时间 2min）	硬度	475	432	408	395	381
4	喷丸后（喷丸振幅 $20\ \mu\text{m}$ ，处理时间 1min）		420	400	385	378	375

##### 3.1.2 喷丸时间对试件显微硬度的影响

根据表3-2实验数据，可以看到，喷丸前试件的初始硬度约为380，将喷丸振幅设置为固定值40，当对材料进行初始喷丸时间1min的处理后，试件的表面硬度由380提高到450，展现出数值为70、幅度为18.42%的提升，且在距离材料表面100微米的深度范围内，随着深度增加，硬度都表现出了一定程度的提高，增幅由13.22%逐渐衰落至5%，深层显微硬度逐渐与表面硬度持平。继续增强喷丸时间至2min，此时重新测量显微硬度，材料的表面硬度为475，相对于初始硬度有了20%的提高幅度，不难看出，目前为止，经喷丸处理后试件的表面硬度的变化规律依旧是随时间增加而提高，且增幅较为明显。而且，随着喷丸时间的增加，材料的显微硬度收到的影响范围已经由100微米增加到了150微米，换言之，在对于材料深层结构的显微硬度方面，喷丸时间的延长所带来的提升效果确实不仅仅作用于表面，而且还会向材料结构更深处持续产生加强作用然而通过与前两组数据对比，不难发现，随着超声喷丸实验的继续进行，喷丸的时间逐渐增加，试件材料表面硬度的提升程度开始逐渐减小，由数据生成的相应的曲线斜率也呈现出逐渐平缓的趋势。最终，试件的表面硬度的提升在超声喷丸的时间增加到2min时达到

最大max值。

由此可以总结出喷丸的时间对于GH4169镍基合金的硬度影响规律为阶段性，而非无限增强，随着实验的继续深入，试件的表面硬度不仅提升幅度微小，而且会对深层表面的硬度造成损坏；为了同时兼顾效率与提升效果，最优的强化时间范围应尽力保持在2min内。

表3-2 不同喷丸时间的材料硬度

编号	处理情况	距离	0	50	100	150	200
		$\mu\text{m}$					
1	喷丸前		380	378	379	376	379
2	喷丸后（喷丸振幅 $40\ \mu\text{m}$ ，处理时间 1min）	硬度	450	420	400	380	376
3	喷丸后（喷丸振幅 $40\ \mu\text{m}$ ，处理时间 2min）		475	432	408	395	381

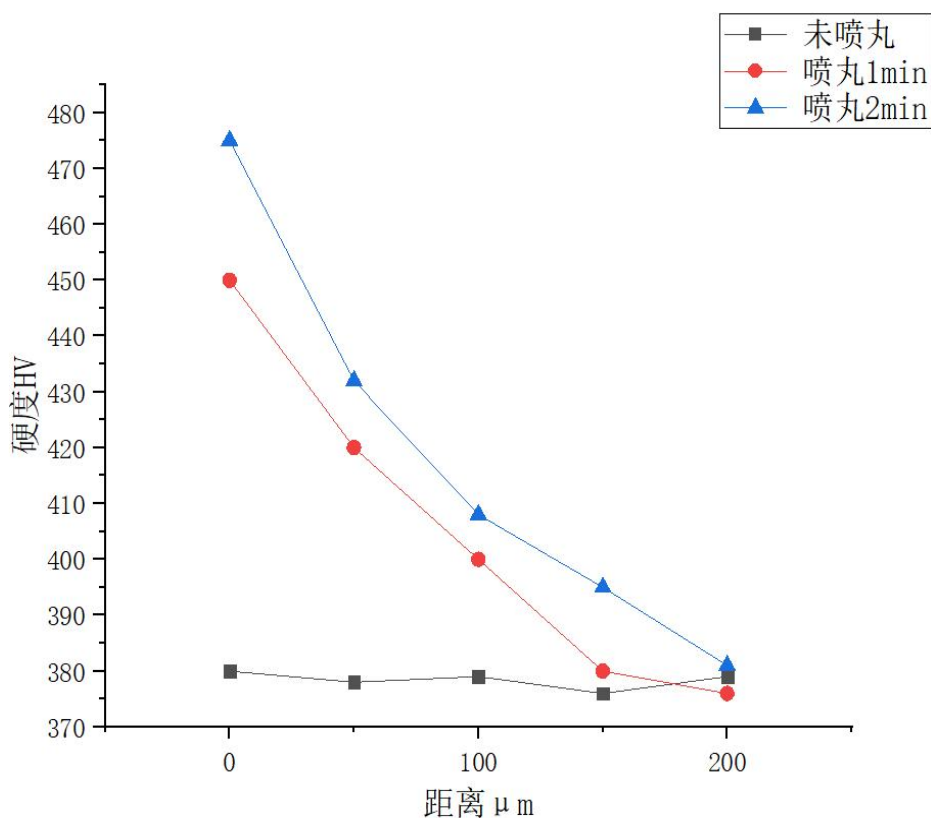


图3-1 显微硬度提升对比

### 3. 1. 3喷丸振幅对试件显微硬度的影响

通过实验并收集的实验数据，进行整理根据对比1号、2号、4号实验数据，可以看到，喷丸前试件的初始硬度约为380，将喷丸时间设置为固定值1min，分析比对不同振幅对于材料显微硬度的影响。

表3-3 不同喷丸振幅的显微硬度HV

编号	处理情况	距离	0	50	100	150	200
		$\mu\text{m}$					
1	喷丸前		380	378	379	376	379
2	喷丸后（喷丸振幅 $40\ \mu\text{m}$ ，处理时间 1min）	硬度	450	420	400	380	376
4	喷丸后（喷丸振幅 $20\ \mu\text{m}$ ，处理时间 1min）		420	400	385	378	375

当振幅为40时，试件的表面硬度由380提高到450，展现出数值为70、幅度为18.42%的提升，且在距离材料表面100微米的深度范围内，随着深度增加，硬度都表现出了一定程度的提高，增幅由13.22%逐渐衰落至5%，深层显微硬度逐渐与表面硬度持平。

当振幅为20时，此时重新测量显微硬度，材料的表面硬度为420，相对于初始硬度有了10.52%的提高幅度，尽管依旧有不小的增幅效果，但明显效果大不如前，而且后续对于更深层表面的显微硬度提升愈发乏力，甚至骤降到3%以下。为了更加清晰的分析结果，这里依旧采用点线图点图进行比对。

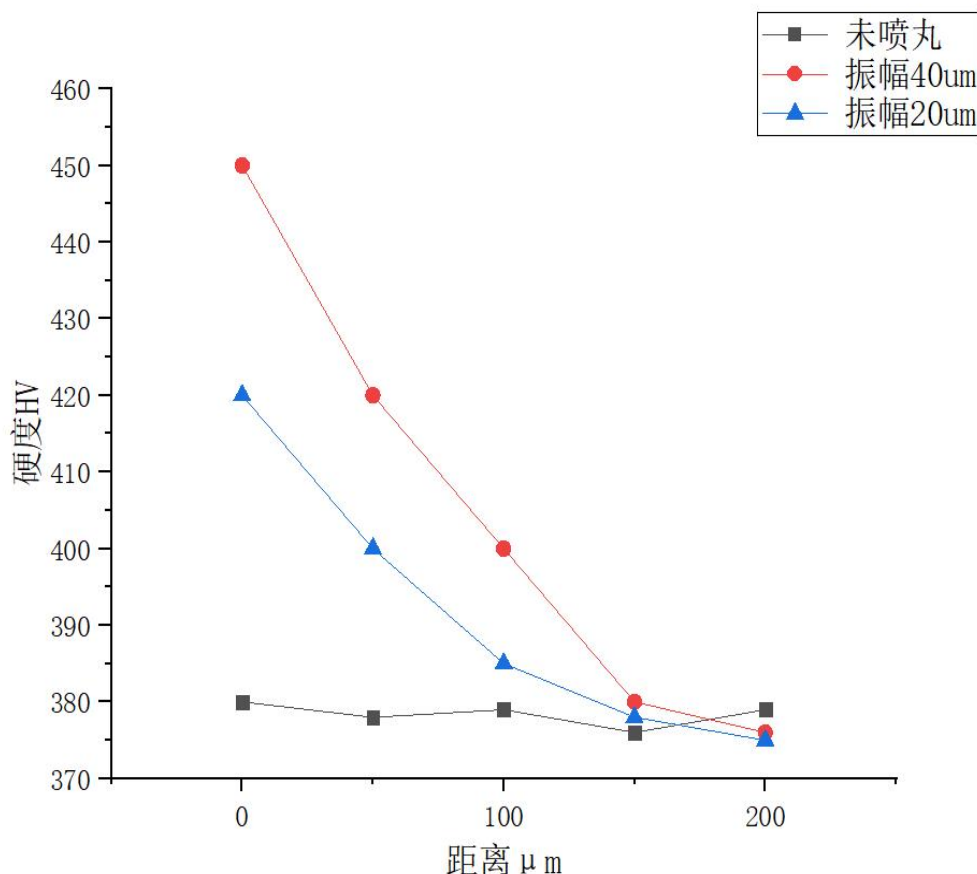


图3-2 显微硬度提升对比

由此观之，可以总结出超声振幅对试件表面硬度的影响规律为——超声振幅的高低对于喷丸过后试件表面硬度的提升效果成正比，换言之，振幅越高，硬度的提升作用越显著。这是因为振幅越高，会使得丸粒撞击在试件表面时所携带的动能越大，在构建表面和次表面所留下的残余应力也就越大，因此表面硬度的提升越显著。

### 3.2 喷丸前后拉伸性能分析

众所周知，在种类繁多的诸多用以检测材料疲劳性能的方法之中，拉伸是最为常见且使用度最为普遍的方法之一。通过静力拉伸实验以方面着手实验，采集材料的各项性能参数，包括屈服强度、抗拉强度、伸长率，并对实验数据进行横向与纵向分析比对，从而总结超声喷丸的各项因素对于疲劳性能的影响规律。

如表3-4所示，为了方便比对，设置了四组实验，其中分别为：一组未喷丸试件与三组喷丸后试件，实验编号1—4。

表3-4 拉伸测试结果

编号	处理情况	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)
1	未喷丸			
2	喷丸			
3	喷丸			
4	喷丸			

1	喷丸前	934	1195	30.3
2	喷丸后（喷丸振幅 40 $\mu\text{m}$ ，处理时间 1min）	950	1202	28
3	喷丸后（喷丸振幅 40 $\mu\text{m}$ ，处理时间 2min）	955	1210	25
4	喷丸后（喷丸振幅 20 $\mu\text{m}$ ，处理时间 1min）	943	1200	29.5

### 3.2.1 喷丸时间对试件拉伸性能的影响

记录实验数据整理，如表所示，

表3-5 不同喷丸时间拉伸性能

编号	处理情况	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)
1	喷丸前	934	1195	30.3
2	喷丸后（喷丸振幅 40 $\mu\text{m}$ ，处理时间 1min）	950	1202	28
3	喷丸后（喷丸振幅 40 $\mu\text{m}$ ，处理时间 2min）	955	1210	25

根据对比1号、2号、3号实验数据，可以看到，在喷丸前试件的初始屈服强度为934MPa，抗拉强度为1195MPa，伸长率为30.3%，将喷丸振幅设置为固定值40，当对材料进行初始喷丸时间1min的处理后，试件的屈服强度由934提高到950，展现出数值为16Mpa的提升；抗拉强度由1195MPa增长到1202MPa。

在拉伸试验中，还有一个重要的指标就是延伸率。延伸率的数值可以直观地反映材料的塑性性能的好坏。此时不得不注意，伸长率由30%降到28%，这似乎是塑性性能降低的预兆。

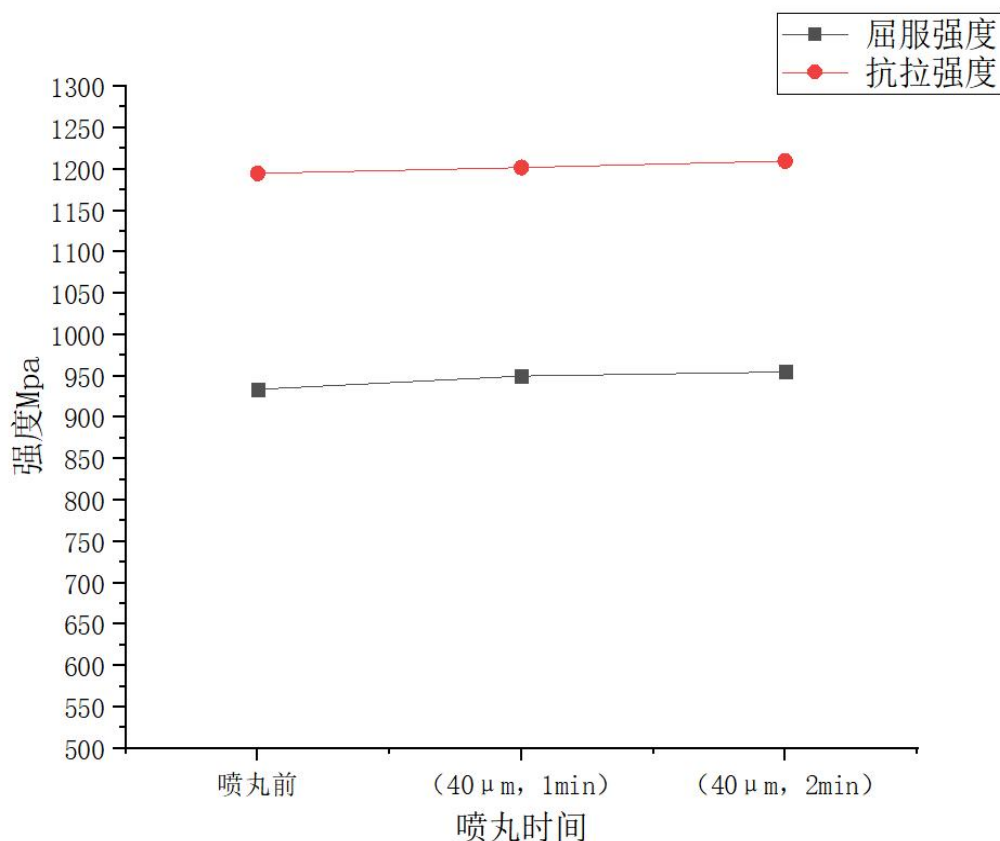


图3-3 不同喷丸时间拉伸性能对比

随着实验继续进行，将喷丸振幅设置为固定值40，当对材料进行初始喷丸时间2min的处理后，屈服强度与抗拉强度的提升似乎依旧不明显，反观延伸率。此时相较初始伸长率而言下滑幅度更加明显，通过以上数据，不难看出，喷丸时间的增加不仅对于抗拉与屈服强度的改善不明显，而且还会对材料本身的延伸性能收到极大的损失。由此观之，为了在提升显微硬度的基础上将不必要延伸率的损失降低，应尽量节约喷丸时间。

根据喷丸的冷作加工硬化原理，结合前面的实验可知，当喷丸时间增加时，引入的残余应力也越来越多，在残余应力的作用下，材料的抵抗形变的能力也随之增加。金属的晶界抗疲劳断裂的能力的提升是以牺牲延伸率为前提，其结果就是必然会导致塑性与韧性的下降。

### 3.2.2 喷丸振幅对试件拉伸性能的影响

记录实验数据整理，如表3-6所示，可以看到，在喷丸前试件的初始屈服强度为934MPa，抗拉强度为1195MPa，伸长率为30.3%，将喷丸时间设置为固定值1min，振幅为40，试件的屈服强度由934提高到950，展现出数值为16MPa的提高；抗拉强度由1195MPa增长到1202MPa，但此时不得不注意，伸长率由30%降到28%，这似乎是拉伸性能降低的预兆。

表3-6 不同振幅拉伸性能

编号	处理情况	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)
1	喷丸前	934	1195	30.3
2	喷丸后 (喷丸振幅 40 $\mu\text{m}$ , 处理时间 1min)	950	1202	28
4	喷丸后 (喷丸振幅 20 $\mu\text{m}$ , 处理时间 1min)	943	1200	29.5

随着实验继续进行, 将喷丸振幅调节为20, 再次进行测量, 屈服强度与抗拉强度相较于原始数据而言提升率出现下降, 反观延伸率。此时相较初始伸长率而言下滑幅度反而较小, 几乎无明显变化, 而如果与上一组对比, 可以发现, 在伸长率损失这一环节上似乎更加优异, 延伸性能的保持效果相对较好。在综合考虑性能硬度、拉伸性能以及延伸率多方面综合性能的总体提升效果以及时间效率后, 总结出最佳的喷丸参数是: 振幅40, 时间1min。

通过对比本组数据, 并与之前的五组一起进行横向纵向比对可以总结出, 尽管将振幅降低确实是个可以减少延伸率损失的好方法, 但振幅的提升对于延伸性能的损失较为轻微, 并不占主要原因; 而且振幅的提高可以使得同样的喷丸时间条件下, 材料的性能得到更多的提升, 增加时间的利用效率。这是因为振幅的提高会使喷丸过后材料表面引入的残余应力适度的增加, 从而提升屈服强度和抗拉强度。

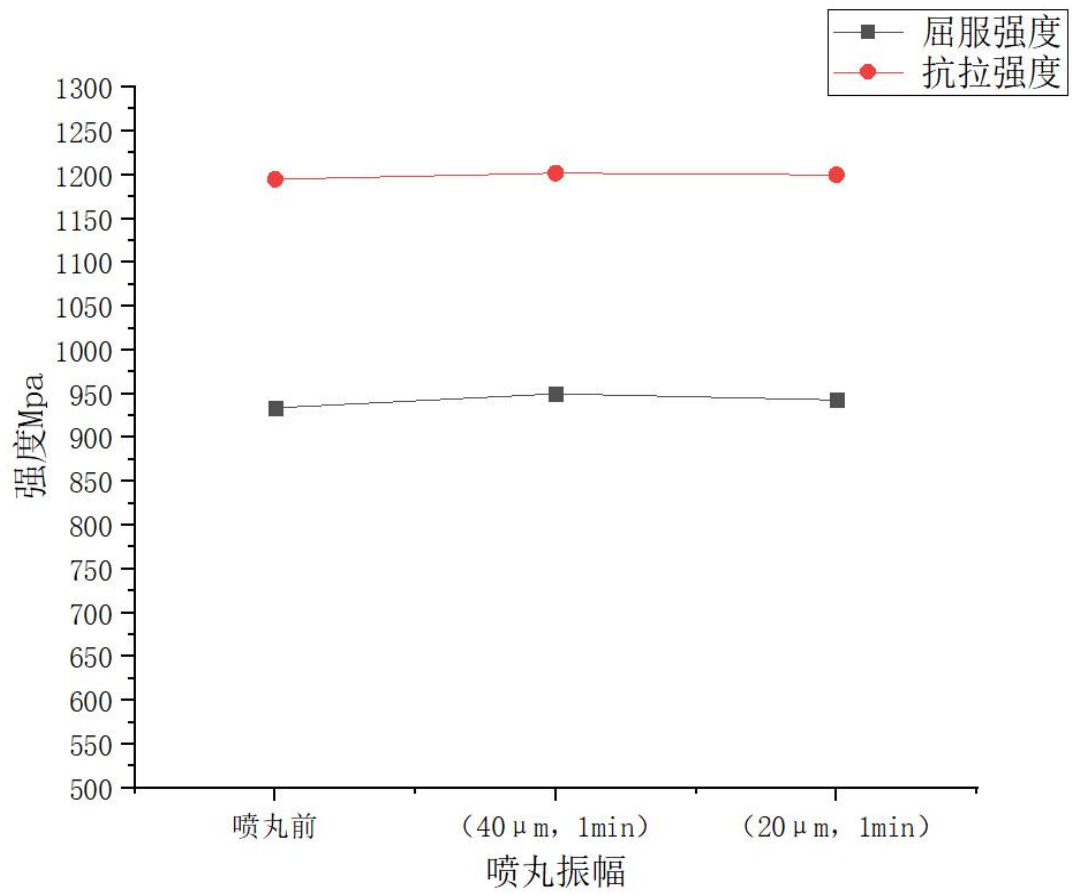


图3-4 不同喷丸振幅拉伸性能对比

## 第四章 喷丸疲劳性能分析

GH4169镍基合金多应用于航空发动机关键部位，其服役环境经常面临高温与高频超声疲劳载荷的双重考验，因此，为了更加贴切的研究体现在真实工作环境下镍基合金的疲劳性能表现，本次实验分别设立3个温度区间，研究不同温度下，喷丸前后实验材料的高频疲劳性能表现。

对没有喷丸和喷丸（喷丸振幅 $40\ \mu\text{m}$ ，处理时间 $1\text{min}$ ）的试件，分别在常温、 $300^\circ\text{C}$ 和 $600^\circ\text{C}$ 进行超声疲劳试验，应力比 $R=-1$ 。

### 4.1 常温疲劳性能分析

表4-1和表4-2分别为常温实验环境下未喷丸试件疲劳试验结果与喷丸后疲劳试验结果。为了使实验更加科学准确，避免偶然性，两组实验分别设置了5组数据，通过对比在同样的应力幅值下，试件最终发生疲劳断裂时所承受的交变应力循环周数的异同，来直接反应喷丸前后疲劳性能的改善情况。图表数据整理如下：

表4-1 常温喷丸前结果

件号	应力幅 MPa	次数	试件情况
1	600	$2 \times 10^6$	断裂
2	590	$5.5 \times 10^6$	断裂
3	582	$6.1 \times 10^6$	断裂
4	562	$5 \times 10^7$	断裂
5	525	$5 \times 10^8$	断裂

表4-2 常温喷丸后结果

件号	应力幅 MPa	次数	试件情况
1	600	$2 \times 10^7$	断裂
2	590	$9 \times 10^6$	断裂
3	582	$6 \times 10^7$	断裂
4	562	$9 \times 10^7$	断裂
5	525	$8 \times 10^8$	断裂

由表中数据对比，可以看到，喷丸后发生疲劳断裂时的应力循环次数明显比未喷丸时呈现指数倍增。

另外，根据上表数据，绘制疲劳曲线，由图4-1所示的疲劳S-N曲线可以看出，喷丸后的试件S-N曲线要远远高于未喷丸试件，这说明，超声喷丸确实可以大幅提升GH4169镍基合金的疲劳性能。

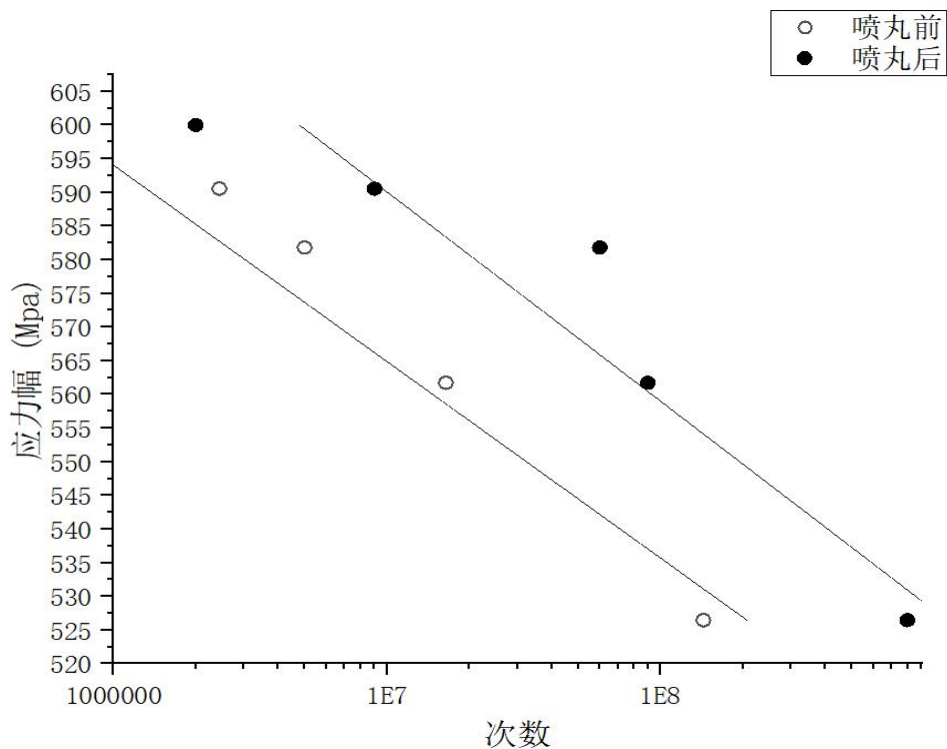


图4-1 常温喷丸疲劳曲线

## 4.2 高温疲劳性能分析

### (一) 300℃疲劳性能分析

表4-3和表4-4分别为温度300摄氏度实验环境下未喷丸疲劳试验结果与喷丸后疲劳试验结果。实验依旧分别设置5组数据，图表数据整理如下：

表4-3 300℃喷丸前结果

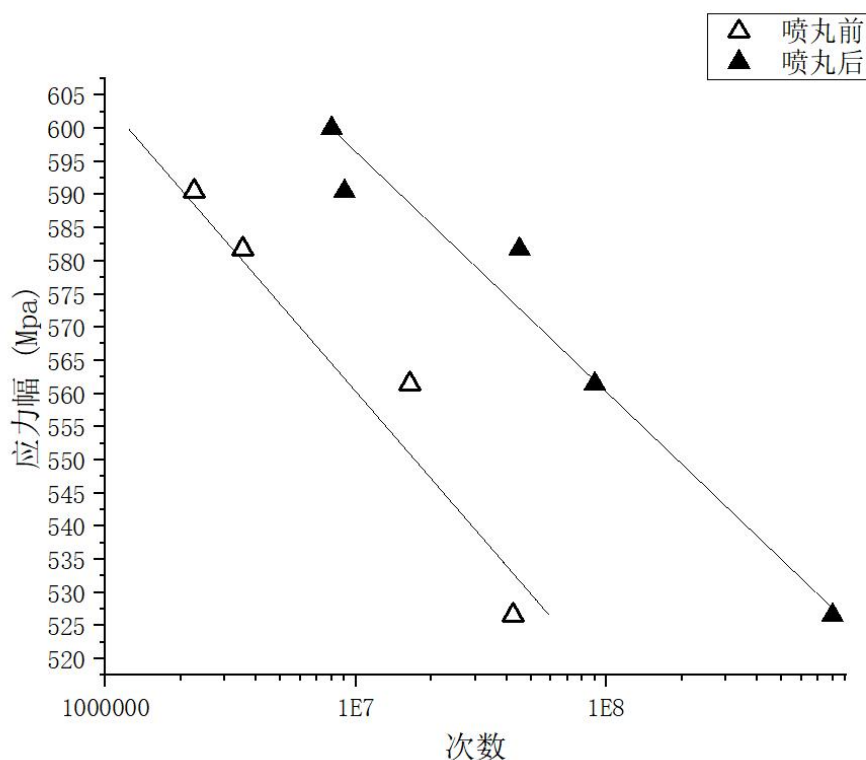
件号	应力幅 MPa	次数	试件情况
1	600	$1 \times 10^6$	断裂
2	590	$5 \times 10^6$	断裂
3	582	$5 \times 10^6$	断裂
4	562	$4.3 \times 10^7$	断裂
5	525	$4 \times 10^8$	断裂

表4-4 300℃喷丸后结果

件号	应力幅 MPa	次数	试件情况
1	600	$7 \times 10^6$	断裂
2	590	$5 \times 10^7$	断裂
3	582	$5 \times 10^7$	断裂
4	562	$9 \times 10^7$	断裂

整体来看，在300℃环境下，经过同样喷丸处理后，材料的表现相比室温下确实有一定程度的降低。根据循环次数来判断，未喷丸的试件疲劳性能降低程度更明显，喷丸后的试件也受到了轻微幅度的影响。之所以呈现这样的结果，很可能是因为温度的提升使材料出现软化，导致疲劳性能损失。

而且经过图4-2的S-N曲线比对分析，在整体水平上，喷丸后的结果仍然要优于未喷丸。这说明尽管温度有所提升，喷丸处理所带来的疲劳性能的提升效果依旧较为明显，尤其是在高幅值应力下，喷丸处理后的试件依旧有着出色的表现。



4-2 300℃喷丸疲劳曲线图

## (二) 600℃疲劳性能分析

表4-5和表4-6分别为600摄氏度实验环境下未喷丸疲劳试验结果与喷丸后疲劳试验结果。同样地，两组分别设置了5组数据。图表数据整理如下：

表4-5 600℃喷丸前结果

件号	应力幅 MPa	次数	试件情况
1	600	$8 \times 10^5$	断裂
2	590	$4.3 \times 10^6$	断裂
3	582	$4.5 \times 10^6$	断裂
4	562	$4 \times 10^7$	断裂
5	525	$3.3 \times 10^8$	断裂

表4-5 600℃喷丸后结果

件号	应力幅 MPa	次数	试件情况
1	600	$8 \times 10^6$	断裂
2	590	$9 \times 10^6$	断裂
3	582	$4.5 \times 10^7$	断裂
4	562	$9 \times 10^7$	断裂
5	525	$8 \times 10^8$	断裂

通过观察表4-5与表4-6，整体来看，在600℃环境下，经过同样喷丸处理后，材料的表现相比300℃下再度有一定程度的降低，而且幅度较为明显。

图4-3的S-N曲线可以更加直观地说明这一切，在图像中，未经喷丸处理的试件SN曲线斜率骤然升高，而且与喷丸处理后的试件的SN曲线的间距逐渐增加，这说明高温环境下，未喷丸试件疲劳性能受到了大幅损失，而喷丸后的试件的疲劳性能损失相对较轻。

出现这一情况的原因是因为高温使得材料软化加剧，疲劳性能大幅损失；而喷丸处理赋予试件的疲劳性能的增强效果虽然受到削弱，但仍旧有所保留，使得材料在高温交变载荷工作条件下，服役表现依旧良好，性能较为稳定。

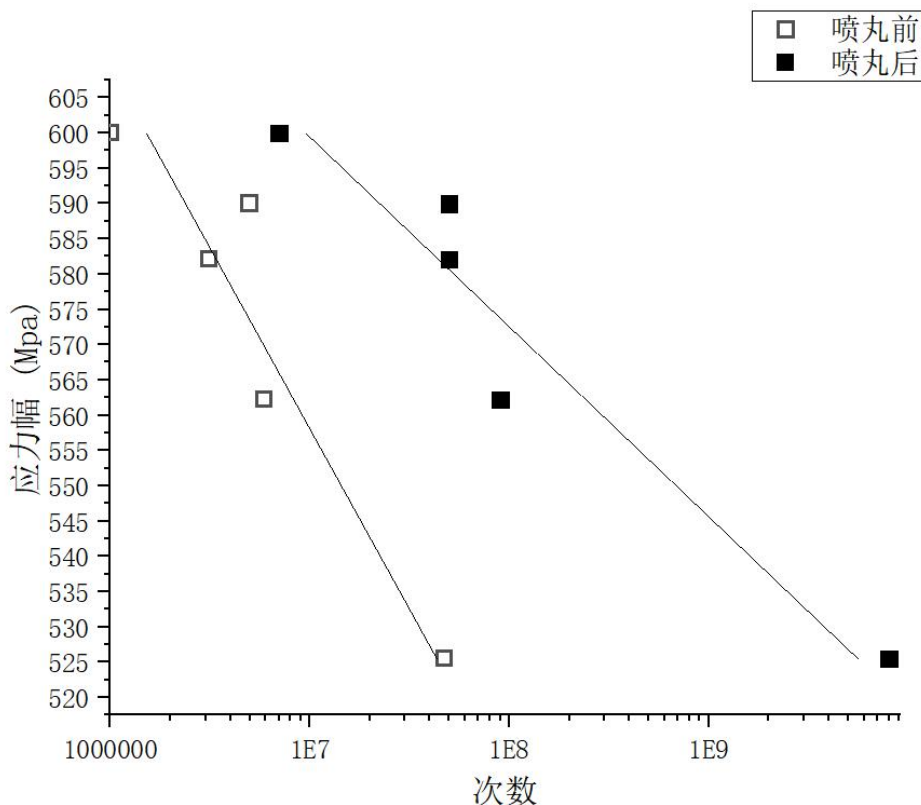


图4-3 600℃喷丸疲劳曲线

### 4.3 疲劳曲线汇总分析

如图4-4所示，为三种温度条件（常温、300摄氏度、600摄氏度）下，各自未喷丸于喷丸处理后的试件的S-N曲线的汇总对比。可以发现，这些材料的共同点在于，随着应力幅值的逐渐降低，无论是否经过喷丸处理，疲劳性能都有提升；当实验温度提升时，疲劳性能全都呈现降低。从图中可以清晰的分析出，当实验设置的温度为常温与300℃时，在所有的应力条件下均展现出了疲劳性能的提高，且效果较明显，尤其是当载荷减小时，超声喷丸对实验材料的疲劳寿命的提升程度极其优异，关于这点可以通过观察各曲线的斜率来判断，其中常温条件下喷丸处理后的试件的S-N曲线的斜率，在低应力阶段最为明显，因此性能的提升效果也就不言而喻。然而，这并不代表着600摄氏度条件下没有提升。事实上，应力较低时，喷丸后的试件也呈现出了较为明显的性能改善，但是与常温以及300摄氏度区间相比，疲劳性能的总体提升效果不明显，而且在高应力载荷幅值时的疲劳性能的实验结果稍显逊色。很明显喷丸对于材料的性能强化相较于高温服役环境而言，在常温与300摄氏度环境下的提升更为明显。换言之，超声喷丸处理过后的镍基合金材料更适合于中低温环境下服役。

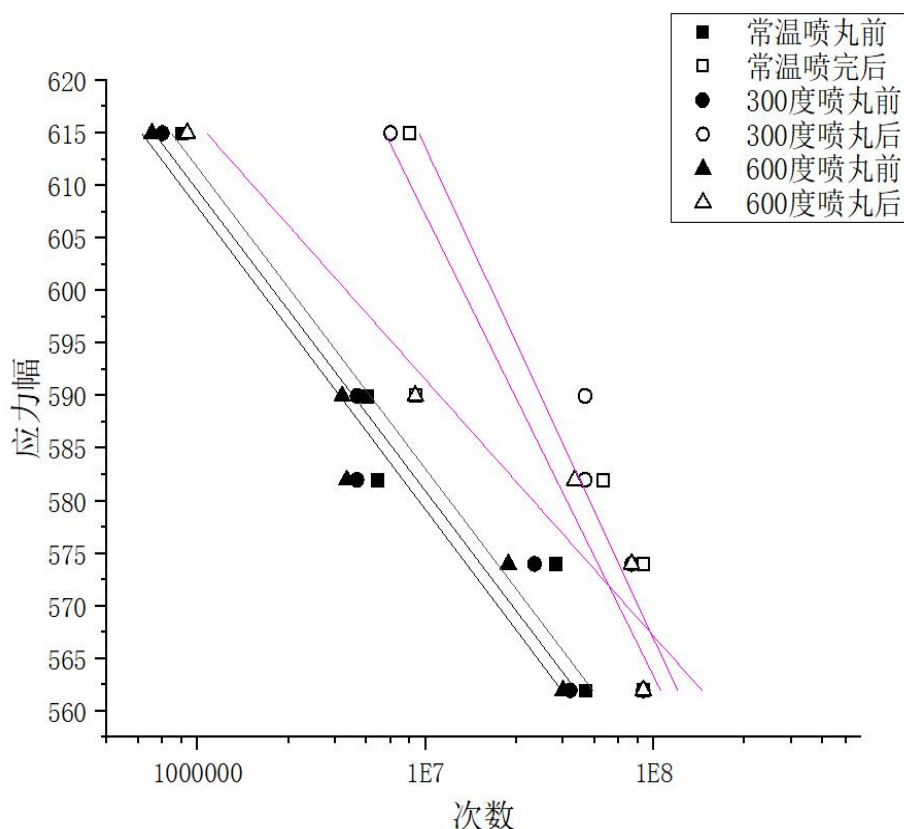


图 4-4 疲劳曲线汇总

## 第五章 结论

本文将GH4169镍基合金作为实验材料，开展了大量的超声喷丸试验工作，并借助显微硬度仪以及疲劳试验机等设备进行大量的数据采集并进行汇总，研究了超声喷丸处理工艺的各项实验参数对显微硬度，静力拉伸性能以及疲劳性能的影响规律，得出以下结论：

(1) 在室温条件下，分别改变超声喷丸的振幅与时间，研究对显微硬度的影响规律，发现当喷丸时间逐渐增加时，材料的显微硬度会随之递增，对于深层表面的显微硬度的影响深度也会越来越深，但超过两分钟后效果开始不再明显，说明喷丸时间存在最优范围，并非越久越好；通过改变振幅，发现振幅较低时，喷丸强化效果不明显，而当振幅提高，强化效果也呈现正相关，换言之喷丸的振幅较高时，喷丸强化的效果更显著。

(2) 在室温条件下，分别改变超声喷丸的振幅与时间，研究对静力拉伸性能的影响规律，发现在时间为1分钟时，有了一定的提升，但是随着时间逐渐增加，不仅仅材料的屈服强度与抗拉强度提升不明显，而且使延伸率大幅下降。不难看出，喷丸时间的增加不仅对于抗拉与屈服强度的改善不明显，而且还会对材料本身的延伸性能收到极大的损失。根据喷丸的冷作加工硬化原理，结合前面的实验可知，当材料的硬度提升时，在残余应力的作用下，金属的晶界抗疲劳断裂的能力的提升是以牺牲延伸率为前提，其结果就是必然会导致塑性与韧性的下降。由此观之，为了在提升显微硬度的基础上将不必要延伸率的损失降低，应尽量节约喷丸时间；当调节振幅进行试验后，可以看到尽管降低振幅确实可以减轻延伸率损失，但对于结果的影响程度并不明显，而且当振幅较高时可以使拉伸性能获得更高的增益。

(3) 通过结合前面两项，处于综合的考虑，为了兼顾硬度提升的同时，使得抗拉强度与屈服强度也能够得到较大提升，并且不对延伸性造成太大破坏，总结得出最佳喷丸参数应为振幅40微米，时间1分钟。

(4) 通过对比常温、中温300℃、高温600℃条件下未喷丸试件与喷丸后试件，以及在不同应力作用下的疲劳性能表现不难发现，在常温与中温的环境下超声喷丸对于材料的疲劳性能的提升更加显著，而对于高温服役条件下，超声喷丸的表现虽然稍显逊色，但依旧保留着较强的增强效果；超声喷丸后的试件在中低温与低应力条件下性能更加优异。

## 参考文献

- [1] 孟宪凯. 激光温喷丸强化航空轻质合金的振动模态及疲劳延寿机理[D]. 江苏大学, 2017.
- [2] 刘牧熙. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温保持后的力学性能及微观组织研究[D]. 江苏大学, 2019.
- [3] 盛杰. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温疲劳特性及其延寿机理[D]. 江苏大学, 2019.
- [4] 姚亮亮, 张显程, 刘峰, 涂善东, 马聪. 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.
- [5] 陈竞炜. 镍基高温合金GH4169喷丸强化性能研究及参数优化[D]. 上海交通大学, 2017.
- [6] 王作伟. 激光喷丸强化IN718镍基合金高温疲劳性能的数值模拟及试验研究[D]. 江苏大学, 2018.
- [7] 吕鹤婷. 喷丸对疲劳寿命影响的数值模拟研究[D]. 山东大学, 2016.
- [8] 孟宪凯, 周建忠. 激光温喷丸强化航空轻质合金的振动模态及疲劳延寿机理[J]. 机械工程学报, 2019, 55(06):165.
- [9] Mohammad Asaduzzaman Chowdhury. Advanced Surface Engineering Research[M]. IntechOpen:2018-11-14.
- [10] Xiang Y.F., Mei R.L., Wang S.P., Azad F., Zhao L.Z., Su S.C.. Numerical investigation of the effect of laser shock peening parameters on the residual stress and deformation response of 7075 aluminum alloy[J]. Optik, 2021, 243:
- [11] Ji-Yin Zhang, Chang-Feng Yao, Min-Chao Cui, Liang Tan, Yun-Qi Sun. Three-dimensional modeling and reconstructive change of residual stress during machining process of milling, polishing, heat treatment, vibratory finishing, and shot peening of fan blade[J]. Advances in Manufacturing, 2021(prepublish):

## 致 谢

在此，首先感谢毕业设计导师。本论文是在导师的细心指导下完成的，导师认真严谨的工作作风，一丝不苟的工作态度，以及渊博的学识让我深深折服。此文的上上下下无处不凝结着导师的心血以及智慧的结晶。不得不说，导师的指导令我受益良多。

其次，感谢我的父母多年来对我的培养与关心，他们为我的求学之路付出了巨大的心血，他们在生活和学习中给予我最坚定的支持，为我提供了源源不断的动力。

感谢疲劳课题实验组的各位成员，通过与它们之间进行学术探讨与交流，使得我多次克服了实验过程中的迷惘与困惑，他们的功劳同样不小。

最后感谢天津中德应用技术大学，为我提供的优异的工作环境与学习氛围，也向四年里教授了我知识与技能的所有老师，以及所有给予我帮助与支持的同学致以最真诚的谢意。