



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

## 本科生毕业设计

金属表面超声喷丸装置结构设计

Structural Design Of Ultrasonic Shot Device On Metal  
Surface

姓 名           郝以诺            
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

金属表面超声喷丸装置结构设计

Structural Design Of Ultrasonic Shot Device On Metal  
Surface

姓 名           郝以诺            
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	材料科学与工程			技术职务	正高	副高	中级 √
题目名称	金属表面超声喷丸装置结构设计						
题目类型	自拟	题目来源	生产实际				
课题来源、背景及意义	<p>发动机叶片在发动机运转过程中承受超高周疲劳载荷，喷丸强化工艺可以提高叶片的疲劳寿命。目前国内叶片的强化一般采用传统的喷丸方式，但是传统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，因此经传统喷丸后的零件表面粗糙度较大，影响零件的疲劳寿命；此外传统喷丸设备体积巨大，工作现场有噪声和粉尘污染，且能耗较高。因此本课题对超声喷丸的结构设计具有重大意义。</p>						
任务及要求	<p>(1) 制订研究方案。                  (2) 设置材料性能及参数。                  (3) 对零件及部件进行设计。                  (4) 对产品进行组装设计。                  (5) 对产品功能进行复核。</p>						
工作条件	三维制图软件及喷丸强化设备。						
知识与能力要求	掌握机械结构设计的基本知识，金属表面强化的机理，三维制图能力及有限元分析能力。						
系（教研室）审查意见： <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">                     负责人(签名): _____ 年 月 日                 </div>							



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：金属表面超声喷丸装置结构设计

学 院：航空航天大学

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：郝以诺

学 号：18414020322

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

发动机叶片在发动机运转过程中承受超高周疲劳载荷，而疲劳断裂又是零件断裂失效的主要形式，并且断裂失效对零件和机械设备的破坏最大，同时可能会造成较大的人员和设备事故，因此零件的抗疲劳破坏性能就变得尤为重要，通过改善零件抗疲劳破坏的能力，进而达到对机械零件进行强化，提高其使用寿命和可靠性的目的。

超声喷丸强化是一种预应力表面强化工艺，通过弹丸冲击构件表面发生弹塑性变形引入残余压应力层，抑制裂纹扩展和延缓疲劳失效，提升叶片、盘、轴、鼓筒、轴颈等航空发动机、燃机轮机转子关键件的疲劳寿命。将喷丸强化工艺应用到发动机叶片的强化阶段，能够将裂纹萌生从表面转移到次表面区域，延缓疲劳失效的发生，可以提高发动机叶片的疲劳寿命。目前国内叶片的强化一般采用传统的喷丸方式，但是传统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，因此经传统喷丸后的零件表面粗糙度较大，影响零件的疲劳寿命；而且传统喷丸设备体积巨大，工作现场有噪声和粉尘污染，且能耗较高。因此本课题对超声喷丸的结构设计具有重大意义。

## 2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

（1）制订研究方案。

在对超声喷丸强化的原理和设备结构了解的基础上，制订可行、科学的研究方案。

（2）设置材料性能及参数。

根据方案，设置合适的材料参数。

（3）对零件及部件进行设计。

利用三维制图软件，对零部件进行设计。

（4）对产品进行组装设计。

将设计好的零部件进行配合，按预先设计完成装配。

（5）对产品功能进行复核。

应用有限元仿真模拟，对产品进行分析和预测。

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) 毕业设计（论文）一套

4. 推荐参考资料：

- [1] 蔡晋,谢广安,闫雪,李威.TC4 钛合金超声喷丸强化覆盖率试验与数值分析[J].航空制造技术,2021,64(19):30-36.
- [2] 班虎飞.气动辅助超声喷丸强化的实验研究[D].导师：轧刚.太原理工大学,2013.
- [3] 李朝阳,李道朋,张炜舜,傅波.压电振子阵列型超声喷丸强化[J].应用声学:1-12.
- [4] 杨天南,林爽,蔡晋.超声喷丸激励振动幅值对 TC4 钛合金表面状态影响的仿真研究[J].航空精密制造技术,2020,56(04):14-18.
- [5] 蔡晋,闫雪,李威,孟庆勋.基于 DEM-FEM 耦合的超声喷丸强化数值分析[J/OL].航空学报:1-13[2021-12-01].
- [6] 丛家慧,王磊.超声喷丸表面强化技术的研究现状与应用进展[J].机械工程材料,2019,43(05):1-5.
- [7] 张聪惠,任海涛,荣花,刘颖.热处理对超声喷丸 TC4 疲劳性能的影响[J].中国表面工程,2018,31(06):22-27.
- [8] 汤秋华.金属材料超声表面强化技术的研究与应用进展[J].中国金属通报, 2018.
- [9] 赵蕾.铝合金预应力超声喷丸成形件表面层性能分析[J].航天制造技术, 2019.
- [10] Fei Yin, Milan Rakita, Shan Hu, Qingyou Han. Overview of ultrasonic shot peening[J]. Surface Engineering, 2017.
- [11] J. Marteau, M. Bigerelle. Relation between surface hardening and roughness induced by ultrasonic shot peening[J]. Tribology International, 2015.

所在专业审查意见:

负责人: \_\_\_\_\_

年 月 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

航空发动机零部件失效事件中，叶片引起的疲劳损坏和失效占70%左右。发动机叶片在发动机运转过程中承受超高周疲劳载荷，而疲劳断裂又是零件断裂失效的主要形式，并且断裂失效对零件和机械设备的破坏最大，同时可能会造成较大的人员和设备事故，因此零件的抗疲劳破坏性能就变得尤为重要，通过改善零件抗疲劳破坏的能力，进而达到对机械零件进行强化，提高其使用寿命和可靠性的目的。而超声喷丸强化是一种预应力表面强化工艺，通过弹丸冲击构件表面发生弹塑性变形引入残余压应力层，抑制裂纹扩展和延缓疲劳失效，提升叶片、盘、轴、鼓筒、轴颈等航空发动机、燃机轮机转子关键件的疲劳寿命。因此作为一种新型的先进制造技术，就可以被用来提高零件的抗疲劳破坏性能，强化金属板料表面。

将喷丸强化工艺应用到发动机叶片的强化阶段，能够将裂纹萌生从表面转移到次表面区域，延缓疲劳失效的发生，可以提高发动机叶片的疲劳寿命。而目前国内叶片的强化一般采用传统的喷丸方式，但是传统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，因此经传统喷丸后的零件表面粗糙度较大，影响零件的疲劳寿命；而且传统喷丸设备体积巨大，工作现场有噪声和粉尘污染，且能耗较高。想要改善传统喷丸，减少其缺点，提高其性能，就要想办法着手于以上这些缺陷。因此本课题在对超声喷丸的原理和设计结构了解的基础上，通过制订科学合理的研究方案，利用三维制图软件对结构进行设计优化，设置合适的材料参数，对零部件进行组装，利用有限元分析对产品进行分析复核等，最终达到改善传统超声喷丸缺陷的目的，所以本课题对超声喷丸的结构设计具有重大意义。

## (二)国内外研究（应用）情况及发展趋势

超声喷丸是在传统喷丸技术的基础上发展起来的一种新型表面强化技术。在20世纪50年代出现了一种撞针式超声喷丸强化方法（也称为超声冲击），利用超声冲击枪前端的冲击针头不断撞击材料表面产生强化效果，冲击针头的运动方向和速度均可控。1960年，开发出了一种类似于传统喷丸的弹丸式超声喷丸技术。该技术通过超声使振动工具头产生高频振动，在密闭腔体内驱动弹丸撞击零件表面使其得到强化，弹丸的运动方向和速度是随机分布的。超声喷丸能获得较好的强化效果和较深的强化层，其工作设备体积小、能耗低，强化过程中噪声相对较小，因此已经成为材料表面强化技术发展的新方向。

除了上文论述到的可以用来强化金属板材表面外，还可以实现金属板料的成形，如飞机的发动机、机翼、蒙皮等部件，在航空航天具有广阔的应用前景和巨大的社会效益以及经济效益。值得相信的是在未来，随着航空运输业的发展，超声喷丸技术一定会在航空航天领域得到高度的重视。目前，国内外超声喷丸除了应用于航空航天，还广泛应用于海洋工程、桥梁建造、工程机械、轨道交通等领域，并成功地向表面工程、铝合金结构矫形、辅助3D打印等领域拓展。一直以来，金属表面超声喷丸技术研发十分活跃，新手段新方法相继出现，并且以控制喷丸区域和变形为目的的超声喷丸强化技术在国内外已有学者研究并取得了一定的成果。随着应用面越来越广泛，超声喷丸强化技术这个工作也变得任重而道远。

## (三) 课题主要研究内容

- 1.通过查阅大量相关资料对超声喷丸工艺深入研究。
- 2.借助观察、查阅手册等方法对超声喷丸强化设备结构进行研究。
- 3.对传统超声喷丸设备的缺陷以及造成缺陷的原因进行研究。
- 4.通过三维制图对超声喷丸结构强化优化方案进行确定和研究。
- 5.利用仿真模拟对优化后产品功能进行复核和研究。

#### (四) 参考文献

- [1]蔡晋,闫雪,李威,孟庆勋.基于 DEM-FEM 耦合的超声喷丸强化数值分析[J/OL].航空学报:1-13[2021-12-01].
- [2]班虎飞.气动辅助超声喷丸强化的实验研究[D].导师: 轧刚.太原理工大学,2013.
- [3]闫林林. 超声喷丸技术的理论与实验研究[D].南京航空航天大学,2010.
- [4]丛家慧,王磊.超声喷丸表面强化技术的研究现状与应用进展[J].机械工程材料,2019,43(05):1-5.
- [5]李朝阳,李道朋,张炜舜,傅波.压电振子阵列型超声喷丸强化[J].应用声学:1-12.
- [6]蔡晋,谢广安,闫雪,李威.TC4 钛合金超声喷丸强化覆盖率试验与数值分析[J].航空制造技术,2021,64(19):30-36.
- [7]杨天南,林爽,蔡晋.超声喷丸激励振动幅值对 TC4 钛合金表面状态影响的仿真研究[J].航空精密制造技术,2020,56(04):14-18.
- [8]赵蕾.铝合金预应力超声喷丸成形件表面层性能分析[J].航天制造技术, 2019.
- [9]张聪惠,任海涛,荣花,刘颖.热处理对超声喷丸 TC4 疲劳性能的影响[J].中国表面工程,2018,31(06):22-27.
- [10]Fei Yin,Milan Rakita,Shan Hu,Qingyou Han. Overview of ultrasonic shot peening[J]. Surface Engineering,2017.
- [11]J. Marteau,M. Bigerelle. Relation between surface hardening and roughness induced by ultrasonic shot peening[J]. Tribology International,2015.

#### 二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
------	------	------

<p>2021. 12. 10- 2021. 12. 31</p> <p>2021. 1. 1- 2021. 1. 31</p> <p>2021. 2. 1- 2021. 2. 28</p> <p>2022. 3. 1- 2022. 3. 31</p> <p>2022. 4. 1- 2022. 4. 30</p>	<p>查阅相关资料,了解超声喷丸技术的国内外研究现状,制订研究方案,撰写开题报告。</p> <p>详细分析文献和资料,对超声喷丸装置存在的缺陷进行分析。</p> <p>学习跟课题相关的知识与技能,对超声喷丸装置存在的缺陷提出改进方案。</p> <p>对超声喷丸结构零部件进行设计、组装、利用有限元分析对改进后的装置进行复核。</p> <p>根据有限元分析结果对研究方案进行总结,撰写论文并加以完善。</p>	<p>了解相关内容,撰写并完善开题报告。</p> <p>对超声喷丸装置存在的缺陷分析完成。</p> <p>分析超声喷丸结构并完成改进方案。</p> <p>设计完成超声喷完装置,完成功能的复核。</p> <p>总结方案并完成论文的撰写。</p>
<p><b>完成课题的 现有条件</b></p>	<p>(1) 超声喷丸强化设备;</p> <p>(2) 掌握 CATIA、SolidWorks、AutoCAD 等工程制图软件;</p> <p>(3) 实事求是,善于学习的能力。</p>	

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： **郝以诺**

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

疲劳断裂是金属零件在应用的过程中最常见的一种失效形式，很大程度上影响了设备的使用安全。超声喷丸作为一种新型的机械零件强化处理技术，被广泛的应用于机械零件的生产强化过程中，用于提高零件的疲劳性能，而传统机械喷丸离生产使用的规范和要求还相差甚远，因此本文提出一种新型的用于提高零件疲劳性能的数控超声喷丸纳米化装置。首先在对原有超声喷丸设备的结构、组成及机理研究的基础上，设计出数控超声喷丸纳米化装置的图纸，并根据设计图纸进行草图绘制、建模装配，描述数控超声喷丸纳米化装置的组成部分及其工作原理，结合其结构特点和功能特性，在特定的工况下，对其施加静应力，增加疲劳振动的次数，利用有限元分析软件进行静应力分析和疲劳分析，根据运算结果确定出受力后以及增加疲劳载荷后变形最大的部分，分析该装置能否承受住静应力载荷和疲劳振动的作用，并探究出该装置是否满足提高金属疲劳性能的条件，实验结果表明：对喷丸腔室及发动机叶片进行静应力分析以及疲劳分析，喷丸腔室及发动机叶片均产生微小变形，变形程度不足以影响喷丸的质量以及强化的程度，且发动机叶片在得到强化的基础上，没有发生疲劳损坏，因此设计的数控超声喷丸纳米化装置可以满足强度需求，且达到了喷丸强化零件表面的效果。

**关键词：**超声喷丸装置；静应力分析；有限元分析；表面强化

## ABSTRACT

Fatigue fracture is the most common form of failure in the application of metal parts, which largely affects the safety of equipment. Ultrasonic blasting as a new type of mechanical parts processing technology, is widely used in the production process of mechanical parts, used to improve the fatigue performance of parts, and the traditional mechanical blasting is far from the production specifications and requirements, so this paper puts forward a new type of CNC ultrasonic blasting device to improve the fatigue performance of parts. Firstly, based on studying the structure, composition and mechanism of the original ultrasonic shot blasting device, Design the drawing of CNC ultrasonic shot nanochemical device, Sketching, modeling and assembly according to the design drawings, Describe the components and working principle of CNC ultrasonic shot nanochemical device, Combined with its structural and functional characteristics, Under specific working conditions, Apply a static stress to it, Increase the number of fatigue vibrations, Static stress analysis and fatigue analysis using finite element analysis software, According to the operation results, determine the maximum deformation after the force and after increasing the fatigue load, Analyze whether the device can withstand the static stress load and fatigue vibration, And explore whether the device meets the conditions to improve the metal fatigue performance, The experimental results show that the static stress and fatigue analysis of the pelshot chamber and engine blade, The pelshot chamber and engine blades produce minor deformation, The degree of deformation is not enough to affect the quality of the pelting and the degree of reinforcement, And on the basis of the reinforcement of the engine blade, No fatigue damage has occurred, Therefore, the designed CNC ultrasonic spray shot nanochemical device can meet the strength requirements, And it has achieved the effect of shot blasting and reinforcing the surface of the parts.

**Key words :** Ultrasonic shot device; Static stress analysis; Finite element analysis; Surface reinforcement

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 国内研究情况.....	1
1.2.2 国外研究情况.....	2
1.3 课题目的和意义.....	2
1.4 课题研究内容.....	3
第二章 超声喷丸技术概述.....	4
2.1 超声喷丸工艺.....	4
2.2 超声喷丸设备.....	6
第三章 超声喷丸装置结构设计.....	9
3.1 设备建模工具简介.....	9
3.2 三维移动台.....	9
3.3 翻转台.....	13
3.4 换能器.....	18
3.5 发动机叶片模型.....	21
3.6 超声喷丸装置.....	22
第四章 静应力与疲劳分析.....	24
4.1 有限元简介.....	24
4.2 静应力分析.....	24
4.3 疲劳分析.....	28

第五章 总结与展望.....	32
参考文献.....	33
致 谢.....	34

## 第一章 绪论

### 1.1 引言

通过改善金属表面结构件应力状态，防止表面因疲劳产生裂纹，从而显著提高金属疲劳性能的一种表面处理技术。超声喷丸强化是想要运用到振动激励的机械能，因此利用超声波能量进行转化，最终得到机械振动所需的能量。超声喷丸过程即受到振动激励的弹丸，在设计好的工装腔室内产生不定的循环的撞击。弹丸在不停撞击过程中所产生的动能使零件表面的材料结构发生变化，零件吸收动能后表面得到强化，超声喷丸就是利用该原理实现强化零件的目的。本文通过分析超声喷丸装置的结构，研究设计出一种新型的金属表面超声喷丸装置，并对其进行静应力分析及疲劳分析，最终达到强化零件金属表面的目的。

### 1.2 国内外研究现状

#### 1.2.1 国内研究情况

最为一种新型的表面处理技术，超声喷丸相较于传统喷丸占有很大的优势。一直以来，以强化零件为目的的超声喷丸技术的研究受到越来越多学者的青睐。新技术也逐渐被研发出来，并且以控制超声喷丸的范围为目的的喷丸技术也取得了一定的成就。随着应用面越来越广泛，超声喷丸强化技术这个工作也变得任重而道远。

在 20 世纪 50 年代提出了一种新型的超声喷丸方式，该方式采用撞针对零件进行强化，可以通过控制撞针的角度和撞击的速度实现对撞针轨迹的控，使强化过程增加了人为可控性。20 实际 60 年代，出现了采用弹丸作为介质对工件进行冲击的弹丸式超声喷丸技术，即在密闭的腔室内，利用超声换能器使超声波能量转换成动能，弹丸在动能的作用下，从各个不同的角度不断的冲击工件表面，进而提高工件表面的抗疲劳性能。该技术一经研发，便获得了非常好的效果，很大程度上提高了涡轮叶片的使用寿命。至此研究人员发现超声喷丸可以得到相对好的起到强化金属材料的作用，并且超声喷丸设备相对更小巧便捷、消耗的能量更低一些，因而成为了强化零件表层材料的新方向。但尽管如此，到 20 世纪 70 年代，对于超声喷丸技术的应用仍没有建立起一套相对规范化大的准则。直至 20 世纪 80 年代，我国才颁布了第一个规范性的说明，随后又对超声喷丸检验方法和标准进行了说明。规范性文件 and 说明使得超声喷丸工艺真正的在机械制造业中应用开来。经过超声喷丸强化后的零件，得到了非常可观的强化效果。航空航天领域、交通运输领域、石油开采领域等相继将超声喷丸投入到实际生产应用中，用于提高金

属表层材料的性能。还可以为金属材料的成形做出贡献，比如飞机的尾翼、机翼、起落架、机身蒙皮等部件，在航空航天制造中扮演着非常重要的角色。

但中国直至现在，也不具备生产大型喷丸强化设备的能力，虽然有部分机械厂商仿制过喷丸强化机床，但因为技术存在一定的瓶颈，使得生产出的设备并没有达到想要的强化程度，这就不得不进口国外的设备，而我国作为制造业名列前茅的大国，在超声喷丸设备的制造上，还需要前行一大步，值得相信的是在未来，随着航空业运输业等制造业的发展，超声喷丸技术一定会在航空航天领域得到高度的重视。我国在未来也会出现一个可以生产喷丸强化机床的精英队伍，带领中国在世界喷丸工艺的发展中不断进步。

### 1.2.2 国外研究情况

超声喷丸为最近十几年兴起的一项新型的强化金属表面的技术，在欧洲美国等国家已经有了一定的使用经验。二十世纪二三十年代，超声喷丸先是被应用于汽车行业中，之后在军工产品制造和航空用产品制造中逐渐应用开来。1948年，为了促使超声喷丸工艺有更好的发展前景，美国相继颁布了“宇航材料规范”“金属零件喷丸”等工艺规范。美国工程师及联邦政府都对有关于喷丸处理做了规定，其中包括弹丸的尺寸、喷完过程中所需要的量具以及需要进行喷丸处理的材料，细节精确到了针对钢的型号、铝合金的类别等需要采用的喷丸方法以及检验工艺等。这些规定和标准，很大程度上促进了喷丸工艺应用的发展与运用。在这些规范的基础之上，波音公司、麦道公司、罗尔斯-罗伊斯公司等一些国外的航空公司都制定了更为规范的喷丸工艺说明，使喷丸工艺由最初的较为繁杂的机械化水平发展到现如今的自动化水平。国际上较为著名的制造喷丸强化机床的USG集团和ROSLER集团可以为客户提供多种类型的数控喷丸强化机床。二十世纪九十年代中期，法国一家公司投入到了超声喷丸技术的研究上，现如今已经拥有自己的一套工艺设备。

国际上还通过测试受喷表面纳米层的研究来测试试件的导热率，利用超声波对经过纯铁进行喷丸处理，发现经过退火后的纯铁试件的表面颗粒可以达到纳米层，之后还对表层晶粒进一步深入研究，发现表面的纳米层可以很大程度上提高金属表面的硬度和抗疲劳特性。除此之外还比较了激光喷丸处理和超声喷丸处理后工件得到强化的效果，发现超声喷丸处理后的效果要远远好于激光喷丸处理，并且超声喷丸的设备的使用和操作要远远比其他的强化方式更加简单易操作喷丸过程更容易控制。总而言之，喷丸强化工艺在国际上正向着更加新型有活力的方向发展，未来也会有更多的产品借助喷丸强化工艺进行产品的升级，喷丸强化将成为制造业发展中的一个重头角色。

### 1.3 课题目的和意义

航空发动机零部件失效事件中,叶片引起的疲劳损坏和失效占 70%左右发动机叶片在发动机运转过程中承受超高周疲劳载荷,而疲劳断裂往往最容易造成零件的失效,而零件的断裂很大程度上会影响设备的正常运行,造成很大的安全隐患,因此零件的抗疲劳破坏性能就变得尤为重要,通过提高零件的抗疲劳特性,进而达到对机械零件进行强化,提高其使用寿命和可靠性的目的。而超声喷丸强化是一种预应力表面强化工艺,通过弹丸冲击构件表面发生弹塑性变形引入残余压应力层,抑制裂纹扩展和延缓疲劳失效,提升叶片、盘、轴、鼓筒、轴颈等航空发动机、燃机轮机转子关键件的疲劳寿命。因此作为一种新型的先进制造技术,就可以被用来提高零件的抗疲劳破坏性能,强化金属板料表面。

将喷丸强化工艺应用到发动机叶片的强化阶段,可以抑制裂纹的萌生,或者将裂纹从表面转移到亚表面区域,延缓疲劳失效的發生的时间,可以提高发动机叶片的疲劳寿命。而现如今国内叶片的强化仍然选用传统的喷丸方式,这种方式有一个明显的缺点,即弹丸喷出的一瞬间速度太大,造成零件表面产生弹丸冲击的痕迹,在喷丸的过程中,涉及的弹丸数量较多,弹丸一旦发生破损,叶片表面也会遭到破坏,喷丸结束后,表面就会非常粗糙,零件的疲劳寿命也会有所降低,而且喷丸设备所占空间较大,并且消耗能量多,对环境还有污染。想要改善传统喷丸,减少其缺点,提高其性能,就要想办法着手于以上这些缺陷。因此本课题在对超声喷丸的原理和设计结构了解的基础上,通过制订科学合理的研究方案,利用三维制图软件对结构进行设计优化,设置合适的材料参数,对零部件进行组装,利用有限元分析对产品进行分析复核等,最终达到改善传统超声喷丸缺陷的目的,所以本课题对超声喷丸的结构设计具有重大意义。

#### 1.4 课题研究内容

本文主要介绍了超声喷丸装置的结构组成及各部分的功用,通过设计建模、静应力分析、疲劳分析确定该装置的科学性与可行性。本文主要进行了以下的工作:

- (1) 设计超声喷丸装置,利用 SolidWorks 软件建立模型;
- (2) 对设计的超声喷丸装置的结构部件进行装配;
- (3) 利用 SolidWorks 软件对模型进行静应力模拟分析;
- (4) 利用 SolidWorks 软件对模型进行模拟疲劳分析,对产品功能进行复核。

## 第二章 超声喷丸技术概述

### 2.1 超声喷丸工艺

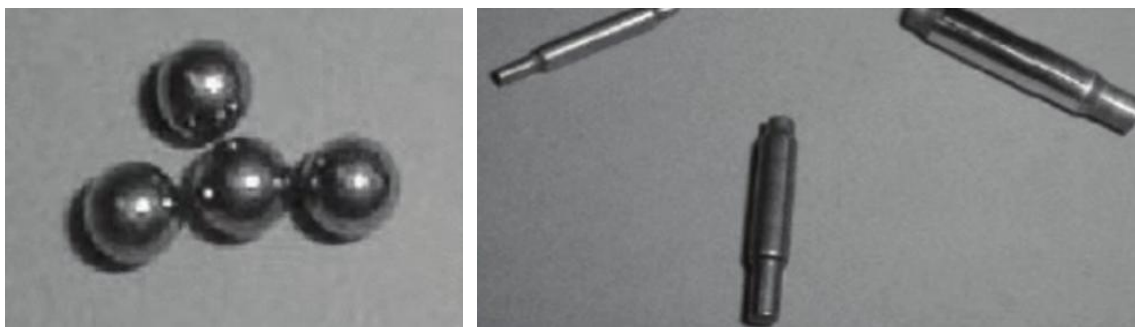
随着机械水平不断的提升，机械产品在生产过程中也逐渐被强调高强度和高疲劳性能，但是大多情况下，单单强调强度也是不行的，在强度增大的同时，还要确保其他的性能不被影响。在实际应用中，材料的失效大多发生在表面或亚表面，这直接影响到零件的综合服役性能，因此表面强化成为机械产品关键零部件不可缺少的加工工序。而超声喷丸工艺弹丸冲击方式的差异对零件表面特性和机械性能有显著影响。超声喷丸工艺可以应用于零部件的强化、喷丸喷射成形、提高焊件质量、防止应力腐蚀裂纹等方面。喷丸强化不仅能显著地提高零件的疲劳强度，而且还能提高零件的抗应力腐蚀能力。喷丸强化除了显著提高零件的上述性能之外，对其抗拉强度、屈服强度、冲击强度、塑性等基本上无明显的影响。

材料表面完整性主要包括两个方面：一是与材料表面纹理变化有关，包括表面粗糙度和宏观缺陷等；二是与材料物理性质的变化有关，包括显微组织、表面硬度和残余应力等。超声喷丸参数，如丸粒材料、丸粒直径、冲击振幅、覆盖率、喷丸时间、喷丸距离等，都会给材料表面的完整性带来不同程度的影响。

#### (1) 设备工作原理

利用纳米金属的优异性能对金属进行表面结构改良，即制备具有纳米晶体结构的表面层，可提高工程材料的综合力学性能和环境服役行为。

超声喷丸主要是将超声波能量转化成机械能进而使弹丸产生机械振动，通过高强度弹丸的不规则运动，不断击打金属材料的表面，最终达到强化金属表面的目的。超声喷丸采用的喷丸介质除了采用常见的钢丸（图 2-1a 所示）外，还能使用具有不同曲率半径端头的喷针，如图 2-4b 所示。



(a) 钢丸

(b) 喷针

图 2-1 喷丸介质

法国一所喷丸研究所针对传统喷丸与超声喷丸进行了研究，研究表明，超声喷丸可以更好的提高金属表面的抗疲劳性能，粗糙度更能满足所需的要求，而且表面残余应力值更大。自 1996 年，法国的 SONATS 公司于正式投入该项目的研究，

现在已经开发出一套全新的超声喷丸设备，并且将该技术应用于零件制造业、航空航天、船舶制造业等，如图 2-2 是某空客公司对焊接的机身壁板（如图 2-2a 所示）进行超声喷丸强化（如图 2-2b 所示）的示意图。除此之外，通过超声喷丸技术对金属材料表层纳米化分析，是当前超声喷丸研究的一个热点方向。

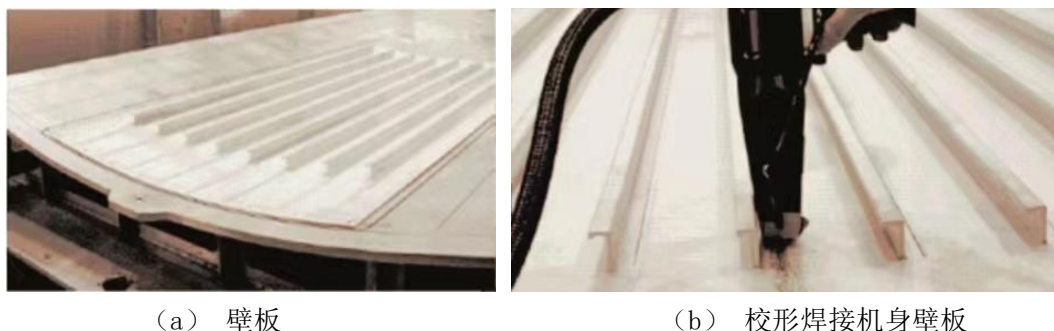


图 2-2 强化机身壁板

目前，控制超声喷丸装置的工艺参数主要是通过人工来实现，因此在未来，自动控制超声喷丸装置将会成为超声喷丸发展的一大趋势，自动控制喷丸装置使喷丸强化更加的便捷，提高了喷丸强化的效率。

## (2) 超声喷丸优缺点

超声喷丸技术作为一个便捷可靠的金属强化技术，未来具有很好的发展前景，通过超声喷丸技术在使用的过程中所呈现出的特点，总结了以下几点优势：

1) 操作过程简单方便。在强化的过程中，所涉及到的参数数量较少，更容易对设备进行控制。可以通过改变超声换能器发出的超声波的频率或者改变丸粒撞击材料表层的次数进而影响材料表层残余应力的变化以及强化的程度，以达到更加精确控制金属材料表面残余应力场的目的。

2) 被强化的零件表面光滑，粗糙度好。经统计，超声喷丸相较于传统喷丸，强化程度以及所产生的表层残余应力是传统喷丸的几十倍。喷丸强化后的表层材料粗糙度良好，表面光滑瑕疵少，得益于弹丸的方向以及速度都是随机的，并且相较于传统喷丸，超声喷丸喷出丸粒的速度远远要小，这就使得超声喷丸对于金属表层材料的强化起到了非常好的效果，更加有效的提高了金属零件的抗疲劳性能。

3) 没有污染，丸粒硬度大，不易破损，在实际生产中，可以更好的保护环境。超声喷丸技术是纯绿色无污染的一种金属表面强化技术，相较于需要清洗、除污的传统喷丸占有很大的优势，并且弹丸的材料一般选择硬度较大的硬质合金，很大程度上降低了破损的可能性，通常是不需要进行清理的。

4) 调节设备相关的参数，可以对零部件表面进行更加细微的处理。

5) 设备简单，可以对复杂的零件进行强化。

6) 超声喷丸装置工作效率高，耗费的时间短。

7) 强化后, 材料的被硬化部位深度更大, 表面残余应力值更大。

由于超声喷丸强化技术是运用残余压应力的变化而使材料表面产生压力形变进而起到强化的作用, 喷丸成形的处理方式简单, 而决定喷丸效果的因素多样, 现存的技术还不够先进, 使得对于精确强化金属表面变得困难。因此需要对喷丸成形的参数与残余应力产生的效果和表面强化的程度之间的关系进行研究, 才便于加快该技术进入实际市场应用的速度。

### (3) 被强化零件特点

1) 受喷材料的性能和喷丸强度决定零件受喷表面残余压应力的大小和压应力层的深度。材料的强度和硬度越高, 压应力就越大, 压应力层的深度就越浅, 喷丸强度越高, 压应力层的深度也越大。

2) 尺寸增大。受喷表面的金属被挤出, 形成微小的金属波峰, 因此尺寸增大。需要指出的是, 喷丸强化工艺对材料的抗拉强度, 没有明显的影响; 延伸率略有降低; 表面硬度有所增高; 冲击韧性有所下降, 但喷丸强化能大幅度提高循环载荷作用下金属的疲劳强度。

3) 受喷表面更加粗糙。随着喷丸强度的提高、表层硬度的降低、弹丸尺寸的减小, 受喷表面的粗糙度变差。

4) 金属材料受喷表层的材料组织发生改变。

## 2.2 超声喷丸设备

在超声喷丸的过程中, 大量高速弹丸喷射到被强化零件的表面, 相当于有无数个小锤锤击金属表面, 使受喷材料表面的金属围绕每个弹丸向四周延伸, 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。

超声喷丸设备一般由电源(即超声波发生器)、振动系统(包括变幅杆和超声换能器)两部分组成。超声喷丸常用的频率是从 15kHz 到 20kHz, 位移振幅通常在 10~100 $\mu\text{m}$  之间。当频率一定时, 增大振幅可以提高加工速度, 但振幅不能过大, 否则会使振动系统超出疲劳强度范围而被损坏。并且, 当位移振幅一定, 而频率增加时, 也可以提高加工速度, 但频率增加后, 损耗的也会增大。因此, 经常采用比较低的超声频率。

### (1) 电源(超声波发生器)

超声波发生器作用是把市电转换成与超声波换能器相匹配的高频交流电信号, 驱动超声波换能器工作, 以给往复运动的变幅杆提供能量。

当超声振动系统的谐振频率由于某种原因变化时, 可以通过“电反馈”和“声反馈”自动跟踪超声发生器的工作频率, 确保超声振动系统处于良好的谐振状态。因此, 超声波发生器的一般要求如下:

- 1) 输出阻抗和超声振动系统相应的输入阻抗相匹配;
- 2) 频率调节范围和超声振动系统的频率变化范围一致, 并且能够连续调节;
- 3) 输出功率应尽量有连续的较大的可调节范围, 对于不同零件的加工有很好的适应性;
- 4) 结构简便, 运行效率高, 安全可靠, 操作维护方便。

特点: 单机运行功率大, 可以达到几千瓦以上; 当超过额定电压和额定电流时, 可以起到很好的保护作用; 具备欠压保护的功效; 自动频率跟踪调整; 占比空间小, 质量轻; 通风散热方便, 结构设计合适; 连续操作可靠易行。

## (2) 振动系统 (包括变幅杆和超声换能器)

超声波发生器输出高频信号后, 超声振动系统的开始发挥其作用, 将此高频信号转换成机械振动能量, 然后通过变幅杆增加输出端幅值, 从而完成超声波喷丸过程。

### 1) 超声变幅杆

超声波变幅杆作为超声波振动系统中的一个重要的组成部分, 其主要作用是放大机械振动的振幅, 并且集中超声能量在较小的面积上, 即聚集能量。

按照其振动的类型, 可将其分为纵振、弯振、扭振和复合振动 (纵扭、纵弯、弯扭), 在超声处理和加工应用中, 最为普遍应用的为纵振型。

按照单一变幅杆的母线形状进行分类, 分为指数、圆锥、阶梯、余弦、悬链线等类别, 如果将以上单一类别的变幅杆进行组合应用, 即成为复合型变幅杆。

从其功能来分类, 分为二分之一波长与四分之一波长两类。

即使超声变幅杆的分类比较多, 但是纵振、弯振、扭振变幅杆在设计时均是从其振动方程入手, 设计的步骤和过程都是类似的。

### 2) 超声换能器

超声换能器即谐振于超声频率的压电陶瓷, 其主要作用表现在能量的转换上, 将超声波发生器的电信号转化为机械振动动能, 再借以变幅杆将振幅变大, 完成超声喷丸过程。目前, 最常见的超声换能器主要有两种:

#### ①压电换能器

按照材料种类, 压电换能器又能分为两类, 分别是压制烧结而成的压电陶瓷以及按照一定的方向打磨和切割的单晶材料。压电陶瓷有成型比较简单、阻抗低、效率高、电压电源低等特点, 采用不同的组合和极化的方式, 因而比较适合高频工作, 可以非常便捷的实现不一样的振动模态。单晶材料电声效率高, 传输功率高, 也同样适用于高频段。而在低频段 (几千到几十千赫) 内使用的大多是夹层结构。

#### ②磁致伸缩换能器

磁致伸缩换能器是指铁、镍及其合金等材料随着磁场强度的变化长度也有所伸缩的现象。按照材料类型，磁致伸缩换能器又分为用铁氧体粉末压制烧结而成的换能器和具有磁致伸缩特性的金属材料换能器。磁致伸缩换能器具有容易冷却、电源电压低等特点。

## 第三章 超声喷丸装置结构设计

### 3.1 设备建模工具简介

超声喷丸装置基于 SolidWorks 软件完成建模, SolidWorks 是一款功能强大的中高端 CAD 软件, 方便快捷是其最大特色。该软件以参数化特征造型为基础, 具有功能强大、易学、易用等特点, 是当前最优秀的中档三维 CAD 软件之一。SolidWorks 有全面的零件实体建模、生成工作机构的分解动画制作和高级动画制作等功能。本论文运用 SolidWorks 进行金属表面超声喷丸装置的三维建模。

### 3.2 三维移动台

本次利用 solidworks 三维建模软件建模, 下面为金属表面超声喷丸装置三维移动台的建模过程:

(1) 打开 solidworks, 首先绘制三维移动台的主基座。以原点为起始点, 画出主基座的草图轮廓, 并根据设计尺寸对当前平面草图进行标注 (330\*50mm), 完成主基座草图。对平面图形进行 Z 方向拉伸 420 毫米, 得到三维模型图。三维移动台建模过程如图 3-2 至图 3-8 所示。

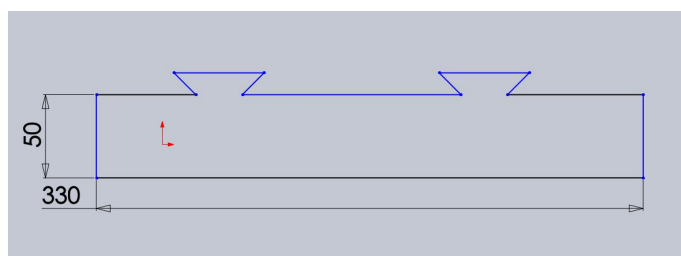


图 3-1 二维示意图

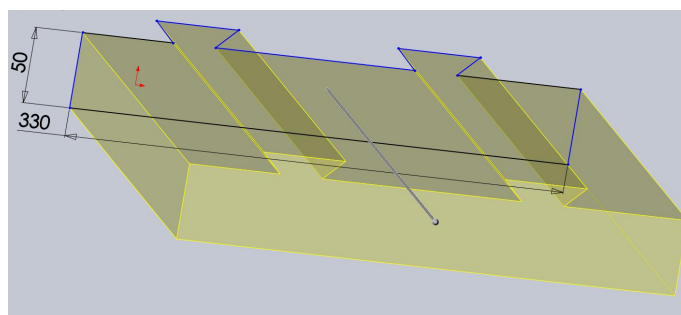


图 3-2 底座建模

(2) 在主基座上表面平面上建立草图, 第二部分尺寸为 228\*120mm, 拉伸深度 20mm, 孔的直径为 14mm, 采用线性草图阵列, 阵列出平面上的孔, 拉伸切除得到如图 3-3 所示的效果。

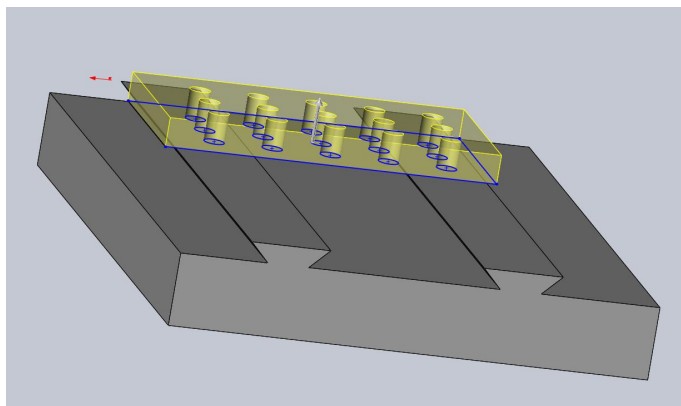


图 3-3 第二部分

(3) 进入草图编辑器，正视于第二部分的上表面，绘制 140mm\*30mm 的矩形和直径 20mm 的两个圆，退出草图，拉伸高度为 220mm。

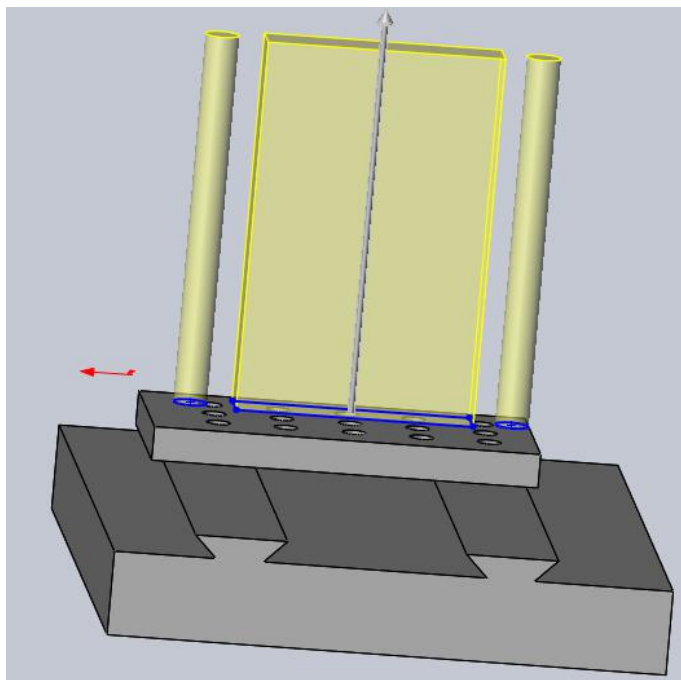


图 3-4 第三部分

(3) 在第三部分的基础上，建立平面，绘制草图，矩形尺寸为 234\*49.4mm，倒角半径为 6mm，拉伸高度为 60mm，如图 3-5 所示。

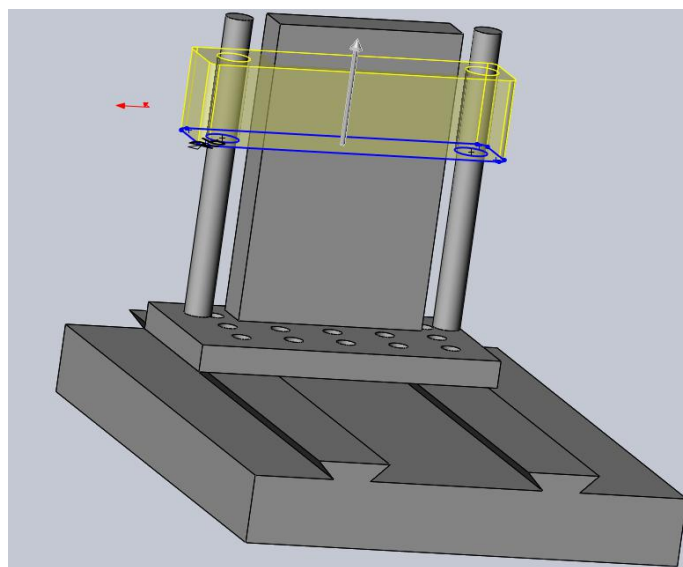


图 3-5 第四部分

(4) 在第四部分的基础上，正视于前平面，进入草图绘制，绘制  $160 \times 74 \text{mm}$  的矩形，采用拉伸命令，拉伸长度为  $50 \text{mm}$ 。

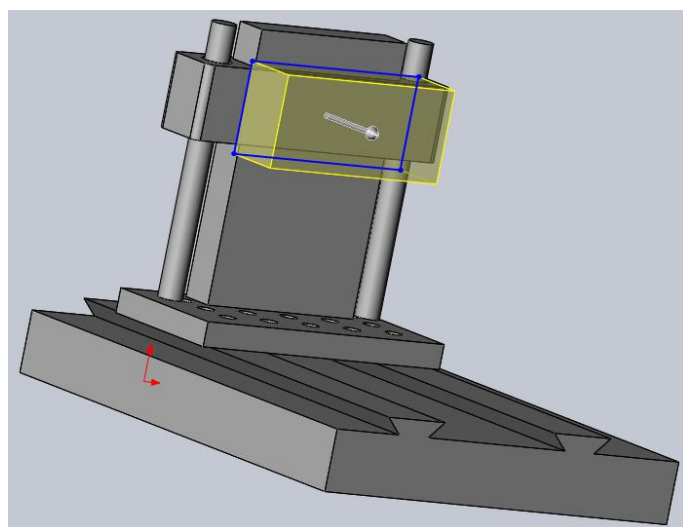


图 3-6 第五部分

(5) 和第五部分的底面齐平，建立草图，绘制  $177 \times 75 \text{mm}$  的矩形，拉伸高度为  $94 \text{mm}$ ，如图 3-7 所示。

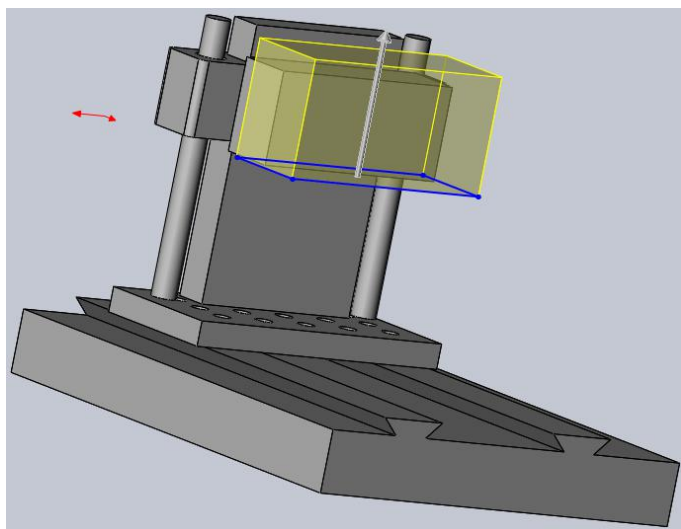


图 3-7 第六部分

(6) 在底座的侧面建立草图，绘制出草图轮廓（180\*20mm），退出草图，拉伸长度为 360mm，如图 3-8 所示。

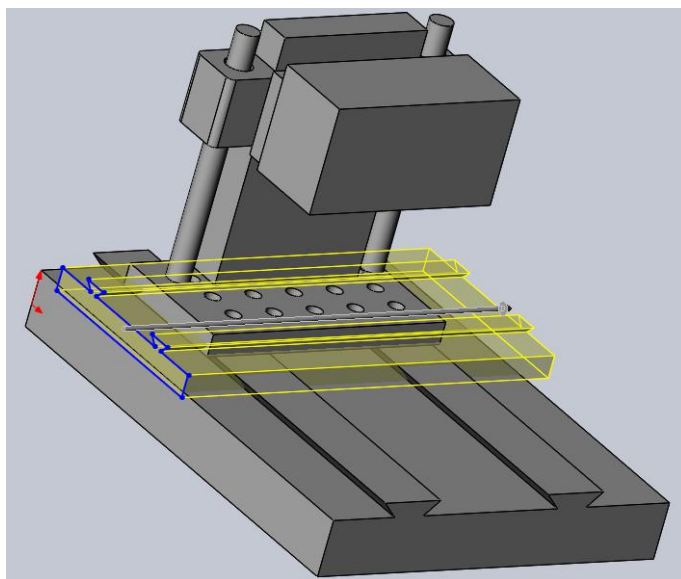


图 3-8 第七部分

(7) 完成各部分的草图绘制与拉伸后，三维移动台最终的 3D 模型如图 3-9 所示。

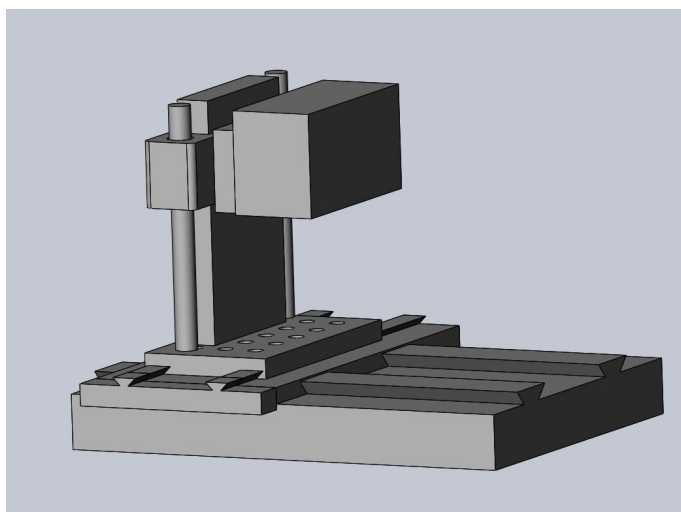


图 3-9 3D 模型图

### 3.3 翻转台

(1) 建立基准面 1，在基准面 1 上画出机体的草图（530\*200mm），倒角半径为 10mm，机体深度给定为 260mm，如图 3-10、3-11 所示。

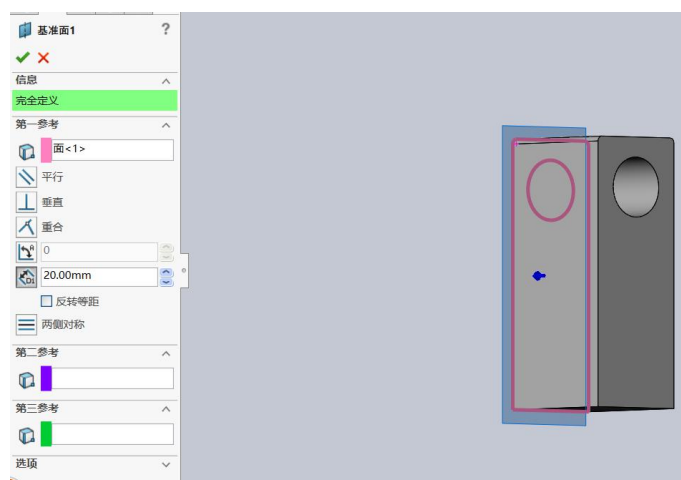


图 3-10 翻转台机体基准面

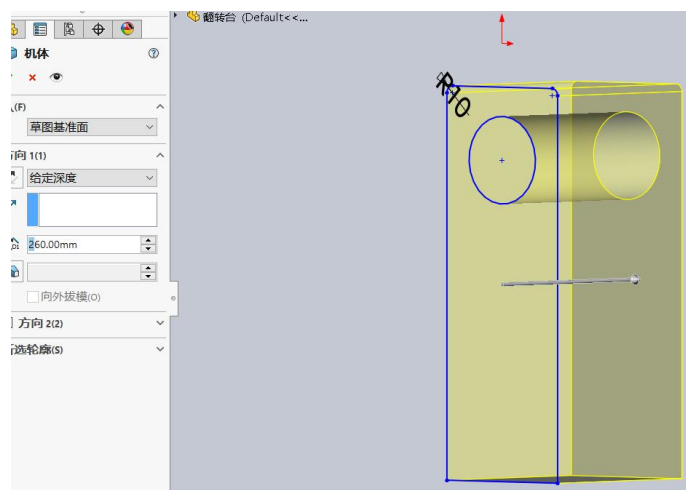


图 3-11 翻转台机体

(2) 在机体上拉伸切除出主轴，主轴尺寸为直径 118mm，如图 3-12 所示。

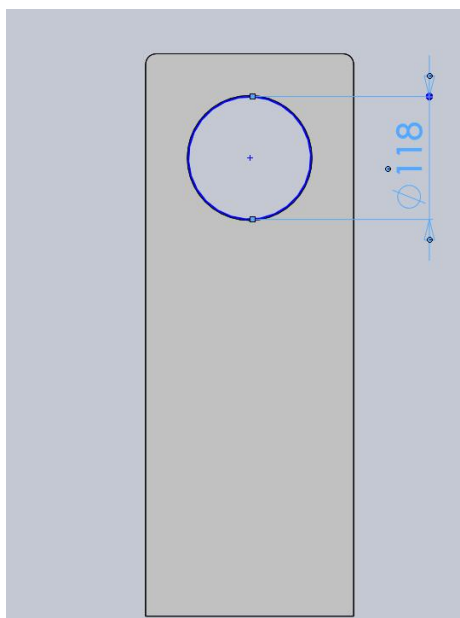


图 3-12 主轴草图

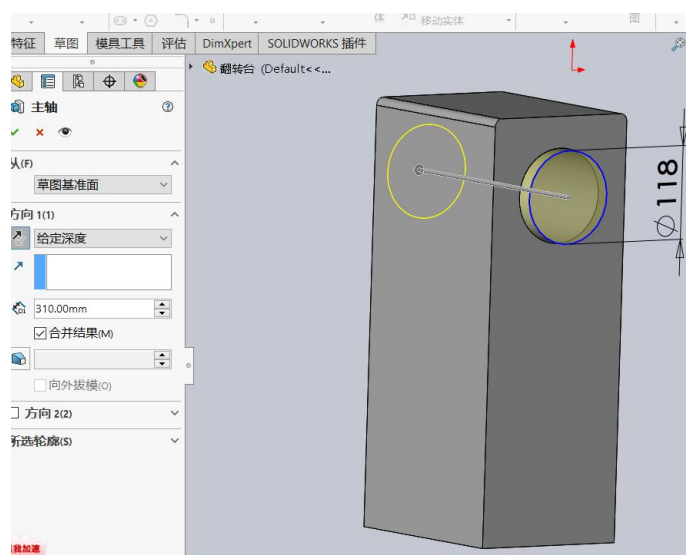


图 3-13 主轴模型

(3) 采用圆周阵列、拉伸切除等方式画出翻转台上的转盘如图 3-15 所示，转盘大圆直径为 200mm，孔的直径为 14mm，如图 3-14 所示。

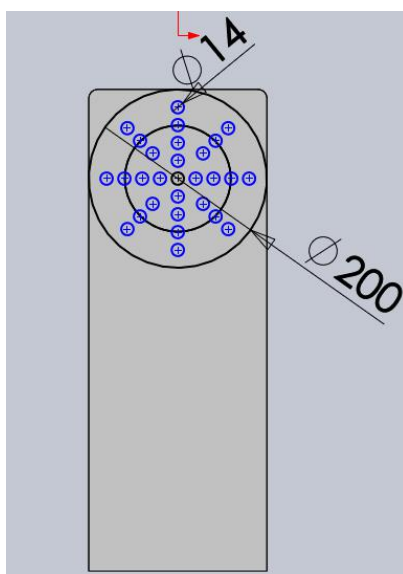


图 3-14 转盘尺寸

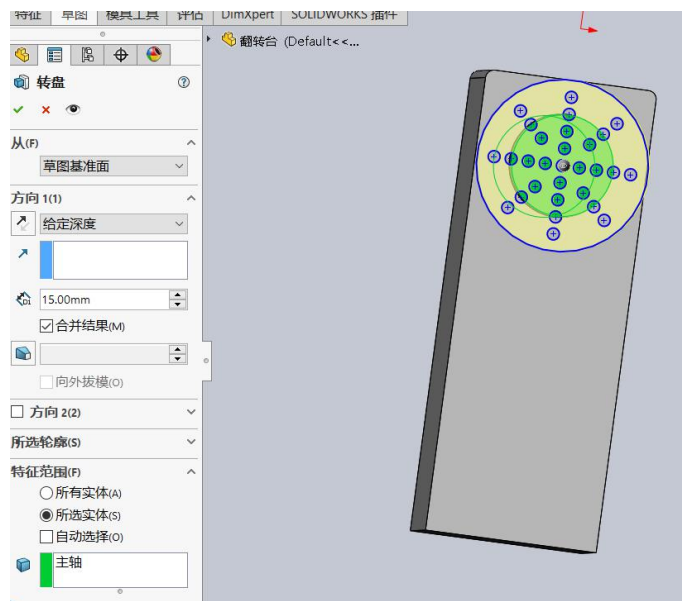


图 3-15 转盘拉伸切除

(4) 根据翻转台特征对翻转台进行拉伸切除，如图 3-16 所示。

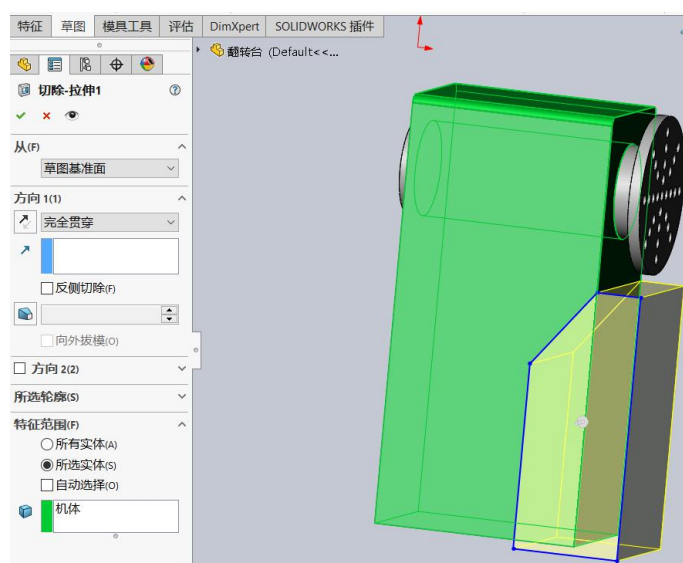


图 3-16 翻转台拉伸切除

(5) 翻转台 3D 模型图，如图 3-17 所示。

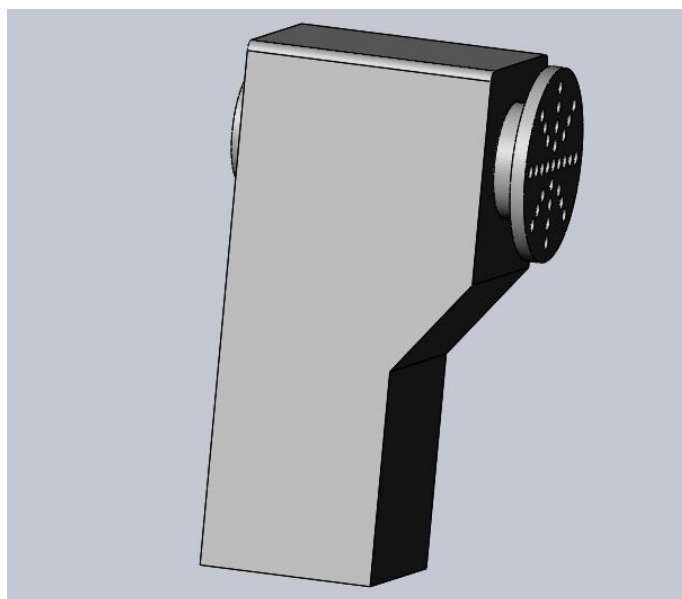


图 3-17 翻转台 3D 模型图

(6) 运用拉伸旋转建立翻转台顶尖模型图，给定高为 480mm，如图 3-18 所示。

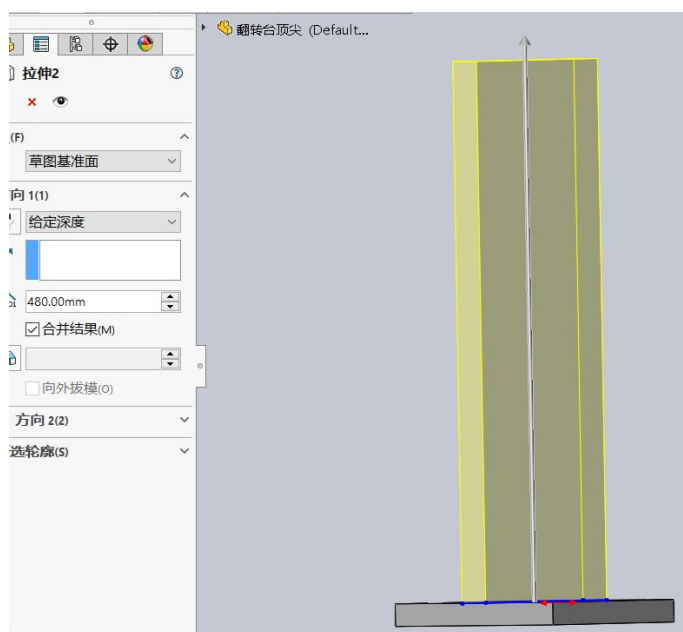


图 3-18 翻转台顶尖模型图

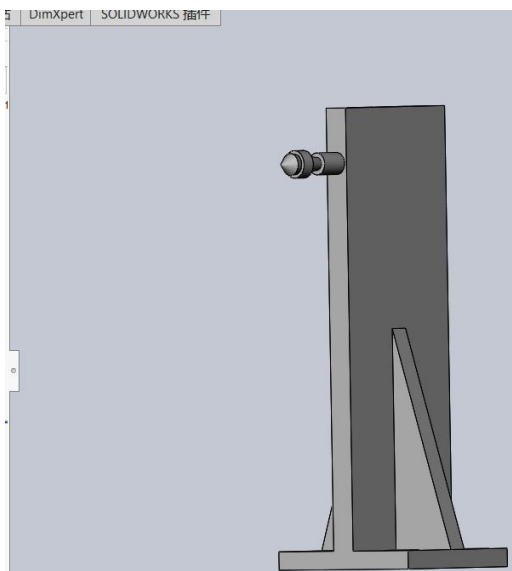


图 3-19 翻转台顶尖 3D 模型图

### 3.4 换能器

(1) 选定基准面，画出超声换能器的轮廓图，进行旋转，得到 3D 模型，如图 3-20 所示。

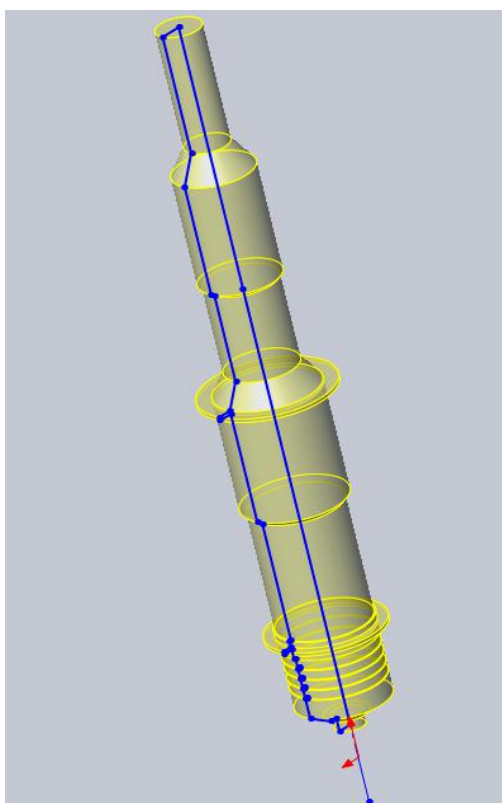


图 3-20 超声换能器模型图

(2) 线性阵列，间距为 60mm，阵列出另外两个超声换能器，如图 3-21 所示。

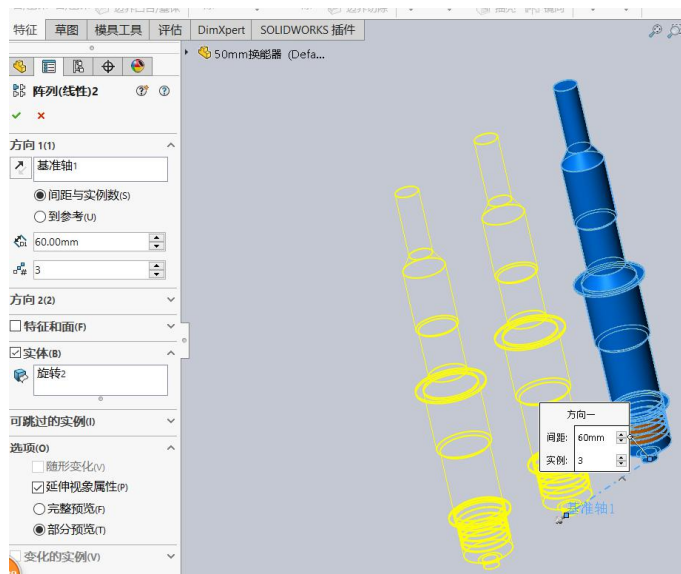


图 3-21 超声换能器的阵列

(3) 通过拉伸切除等命令，画出喷丸腔室（201\*86mm）拉伸高度为 70mm，如图 3-22 至图 3-25 所示。

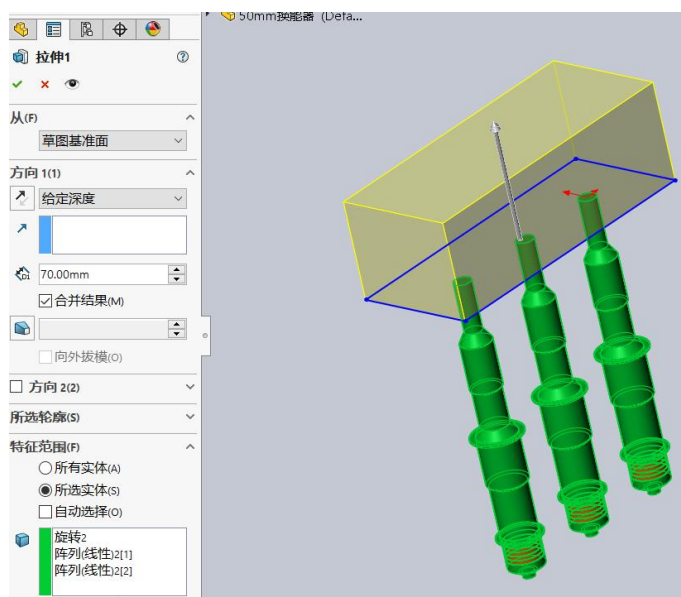


图 3-22 建立草图

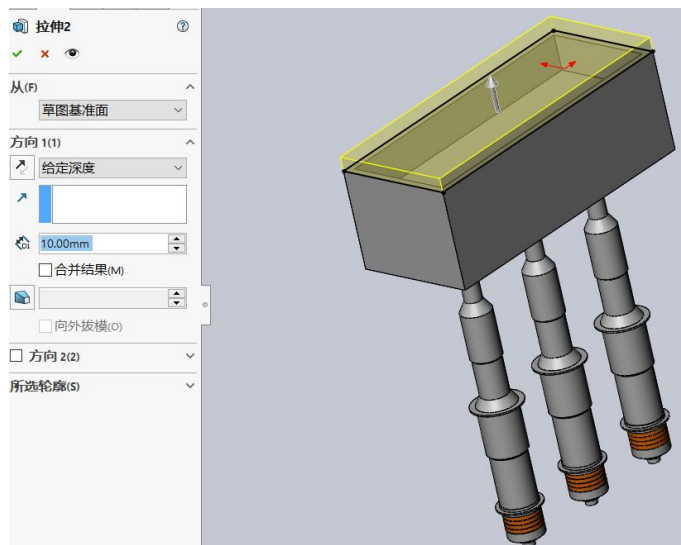


图 3-23 建模过程

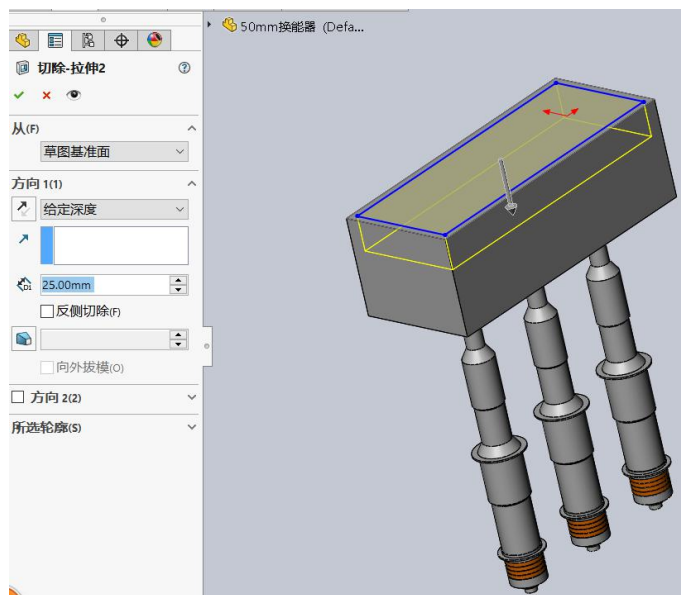


图 3-24 拉伸切除

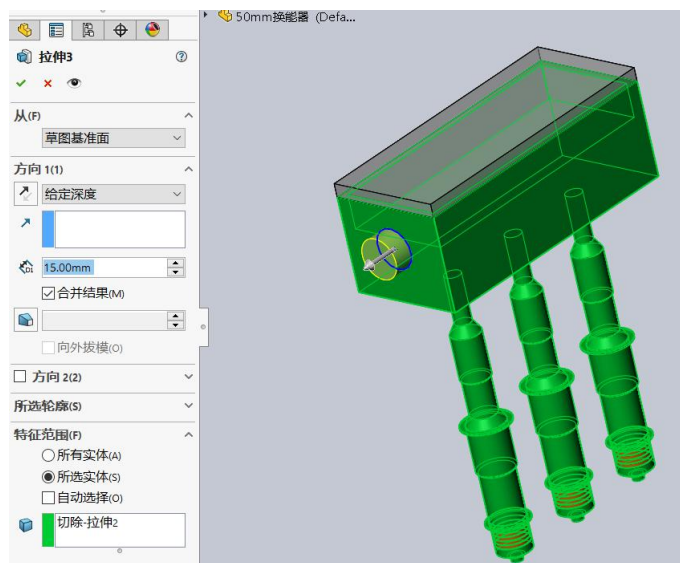


图 3-25 喷丸腔室

### 3.5 发动机叶片模型

(1) 在基准面上，运用样条曲线的命令画出发动机叶片的轮廓图，采用拉伸命令，给定深度 60mm，对轮廓图进行拉伸，如图 3-26 所示。

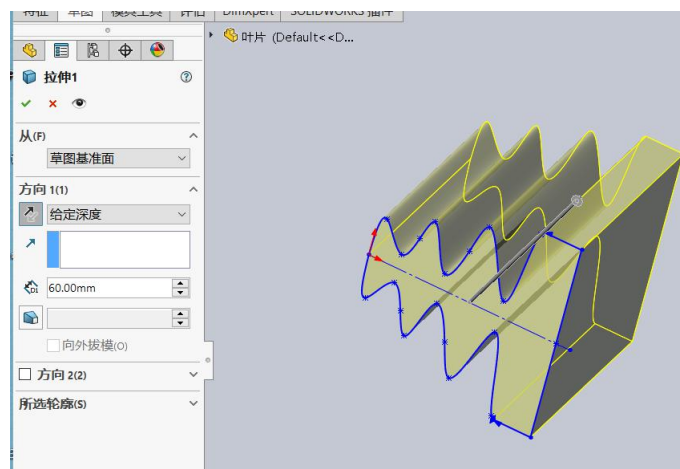


图 3-26 叶片建模过程

(2) 继续采用拉伸命令，对发动机叶片剩余部分进行拉伸（深度为 135mm）如图 3-27 所示。

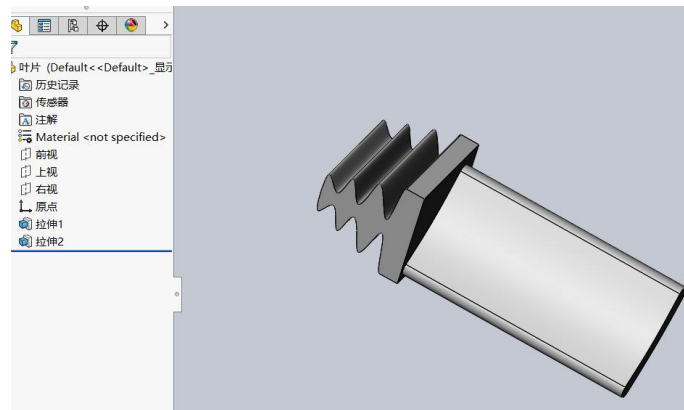


图 3-27 发动机叶片 3D 模型图

### 3.6 超声喷丸装置

综上，运用 SolidWorks 软件对超声喷丸装置进行三维建模，组装完成最后的模型图，如图 3-28 所示。

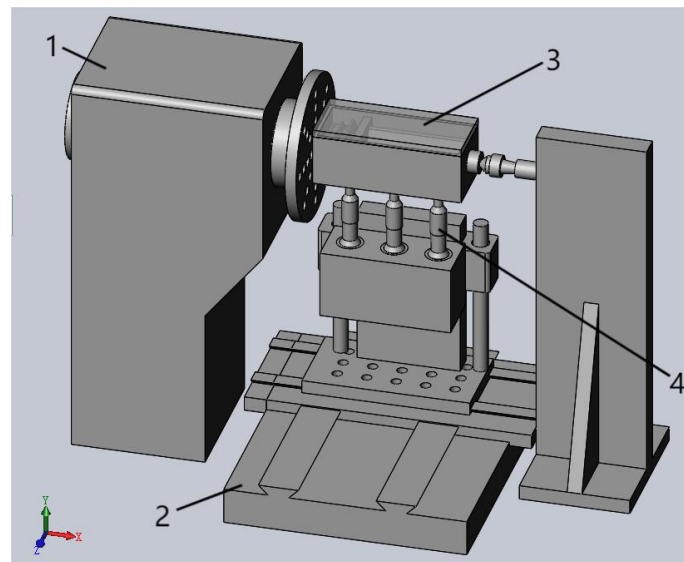


图 3-28 数控超声喷丸纳米化新装置原理样机

1-翻转机构 2-三维移动平台 3-喷丸腔室 4-超声换能器阵列

(1) 数控超声喷丸纳米化装置主要由三维移动平台、数字超声波电源、超声波换能器装置、翻转机构组成，如图所示。超声波换能器装置安装在三维移动平台上。超声波换能器装置包括由换能器和喷丸腔室。处理工件时，由夹持工装将其固定在腔室内，夹持工装和翻转机构连接。三维移动平台可以使超声波换能器在 X、Y、Z 三个方向进行移动。夹持工件时，需要通过调节 X、Y、Z 三个方向实现翻转机构对叶片的准确夹持。竖直方向可调节喷丸高度，即工件受喷表面与超声喷丸工具头表面的距离；且工件可绕自身纵向轴线 360 度自由翻转；超声波换能器装置进出需留出足够空间，以便装卸工件和更换喷丸介质。

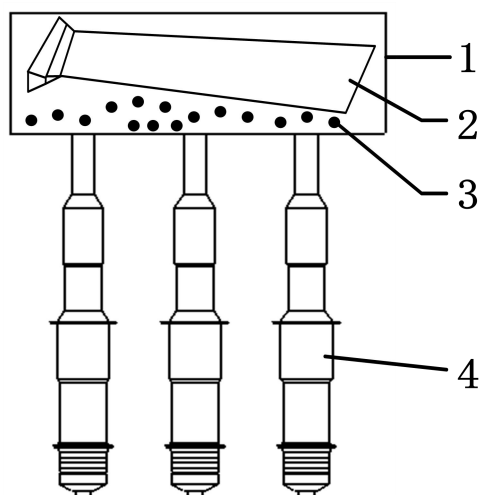


图 3-29 超声喷丸原理示意图

1-喷丸腔室 2-发动机叶片 3-喷丸丸粒 4-超声换能器

(2) 数字式超声波电源具备谐振频率跟踪和恒定振幅控制两大性能，确保喷丸强度的稳定。超声波换能器类型为压电陶瓷式。超声喷丸处理对振幅的要求比较高，超声波换能器采用的  $3/2$  波长的结构，由半波长的变幅杆和半波长的工具头实现振幅的两级放大。由于单个的工具头端面面积远小于叶片受喷面积，拟采用多个超声波换能器组成阵列，以实现大面积的处理。为减小温度升高造成的谐振频率漂移，使用压缩冷却空气对换能器进行冷却。

(3) 根据数控超声喷丸纳米化装置样机的基本构型和超声波系统结构，完成装置的机电细节设计。考虑航空发动机叶片的形状与尺寸，合理设计喷丸腔室与叶片工装夹具，既要确保叶片的准确安装固定，也能顺利实现叶片的翻转。设计各个运动机构的构成，选用主要功能部件。

## 第四章 静应力与疲劳分析

### 4.1 有限元简介

在分析一整个物体时，由于质量和体积较大，故采用有限元方法，有限元法即把被分析物体看成由多个单元体组合而成，单元体小块是有体积的，因此为有限个小块。

有限元分析的常用术语：

(1) 网格：进行有限元分析必不可少的一个步骤，通常有三角形和四面体形两种形状。

(2) 单元：网格划分中每一个三角形和四面体形都可被称之为单元。

(3) 节点：单元上面的点位。

(4) 刚体：忽略被分析物体的形变，将被分析物体看作一个刚体。

(5) 载荷：对被分析物体施加的力，包括压力、拉力、支持力、重力、振动载荷等。

在实际应用中解决问题时，有限元法有非常广的应用范围，可快速有效的解决许多其他方法难以解决的问题，有限元法的本质即为离散，每个单元体都有独一无二的表达式，并且只与相邻的单元体有所联系，因此即可用连续方程来表示研究物体。而在科学计算的领域，需要求解多类的微分方程，其中不免有很多难以求解的微分方程，这时就会运用到有限元法，将微分方程离散化，再利用程序辅助求解。运用此方法就可以将复杂的问题简单化。有限元法是物理上的近似方法，其与经典的近似法相比是比较精确的，在解决实际问题时，由于其精度高，能够适应复杂模型，相对于不同形状的零件可以做到更好的处理，并且可以针对不同的材料做出分析，尤其是在载荷突变的结构中，更能发挥其优势，再加上现有软件的支持，使得有限元法更被广泛的应用于解决数值计算问题。

有限元法在国内的应用日渐广泛，发展速度非常快，常用的有限元程序有 ANSYS、SAP、ASKA、MSC、SUPER 等。这些有限元软件不仅可以分析零件的结构，还具有强大的前处理和后处理功能，在机械工程应用中，发挥着不可或缺的作用，无论是哪个环节，其操作的方便性和强大的处理功能都深受用户们的喜爱。

### 4.2 静应力分析

(1) 运用 SolidWorks 插件 Simulation 对喷丸腔室进行静应力分析，首先建立新算例，选择静应力分析，超声换能器材料选定为合金钢，固定夹具，对喷丸腔室施加外部载荷，生成网格，如图 4-1 所示，运行此算例，查看位移、应力的结果，如图 4-2 和 4-3 所示。

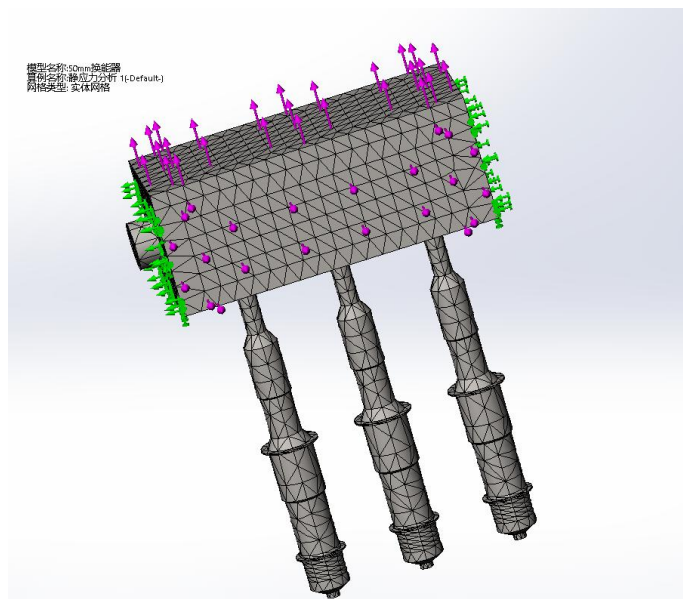


图 4-1 划分网格

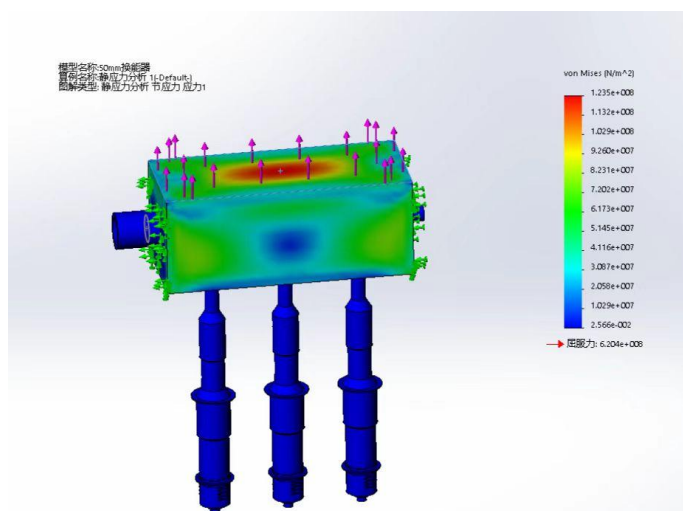


图 4-2 应力结果

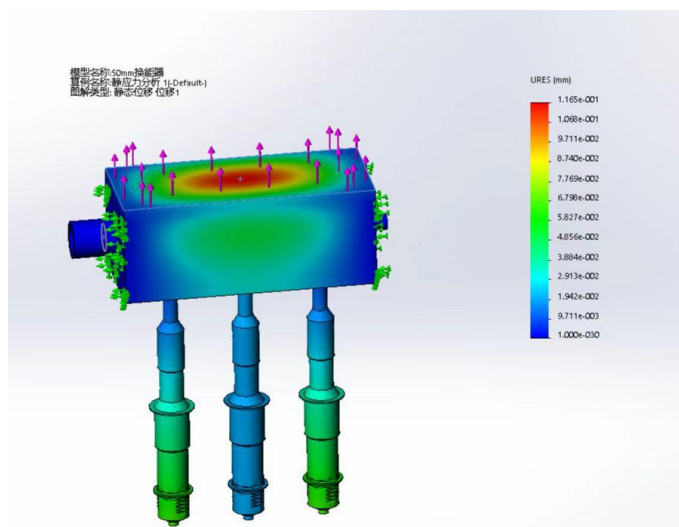


图 4-3 位移结果

结果分析：当喷丸速度为 60m/s 时，根据弹丸的质量及加速度以及超声波产生的动能，计算喷丸腔室受到的力约为 217MPa，喷丸腔室两边施加约束，对喷丸腔室上表面施加方向向上的 217MPa 的力，发现当变形比例为 156.08 时，最大变形发生在喷丸腔室的顶部，即图 4-3 上表面红色部位所示，观察喷丸腔室静应力结果颜色的分布情况，发现大部分地方呈现出蓝色和绿色，只有上表面一小部分呈现出黄色和红色，说明喷丸腔室受力后变形情况还是较好的，没有特别大程度的破坏。通过应力结果发现变形最小处应力值为  $1 \times 10^{-3} \text{N/m}^2$ ，最大处应力值为  $1.235 \times 10^8 \text{N/m}^2$  小于屈服力  $6.204 \times 10^8 \text{N/m}^2$ ，满足强度的要求，位移最小量为  $1.0 \times 10^{-3} \text{mm}$ ，最大量为 0.1165mm，变形量很小，几乎可以忽略不计，经过设定安全系数发现当安全系数为 1 时，此时图示为全蓝色，表示该零件满足受力要求，因此该喷丸腔室可以满足设计强度的要求。

(2) 运用 SolidWorks 插件 Simulation 对三维移动台进行静应力分析，首先建立新算例，选择静应力分析，发动机叶片材料选定为合金钢，固定夹具，对三维移动台施加外部载荷，生成网格，运行此算例，查看位移、应力的结果，如图 4-4 和 4-5 所示。

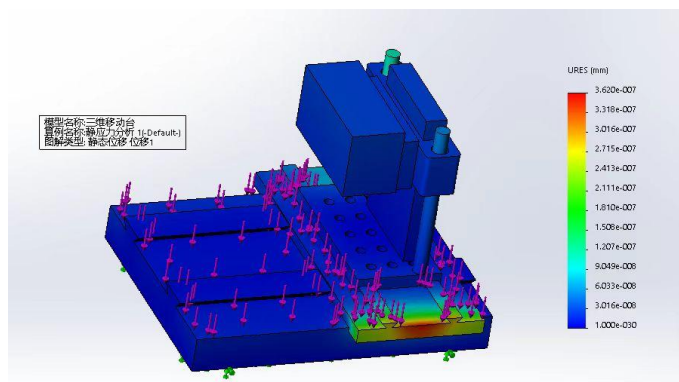


图 4-4 位移结果

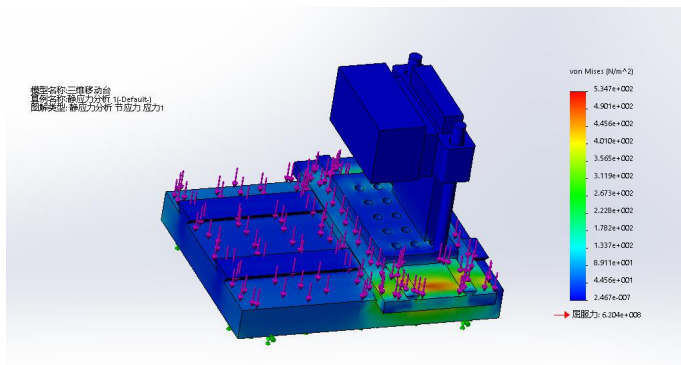


图 4-5 应力结果

结果分析：当喷丸速度为 60m/s 时，根据弹丸的加速度、质量以及超声换能器转换的动能等参数计算三维移动台的受力，计算三维移动台受到的力约为 200MPa，三维移动台底部施加约束，对三维移动台上表面施加方向向下的 200MPa 的力，发现当变形比例为 156.08 时，最大变形发生在三维移动台的右侧，即图 4-5 上表面红色部位所示，观察三维移动台静应力结果颜色的分布情况，发现大部分地方呈现出蓝色和绿色，只有上表面一小部分呈现出黄色和红色，说明三维移动台受力后变形情况还是较好的，没有特别大程度的破坏。通过应力结果发现变形最小处应力值为  $1 \times 10^{-3} \text{N/m}^2$ ，最大处应力值为  $5.347 \times 10^2 \text{N/m}^2$  小于屈服力  $6.204 \times 10^8 \text{N/m}^2$ ，满足强度的要求，位移最大量为  $3.62 \times 10^{-7} \text{mm}$ ，变形量很小，因此三维移动台几乎没有变形，符合使用的要求，经过设定安全系数发现当安全系数为 1 时，此时图示为全蓝色，表示该零件满足受力要求，因此该三维移动台可以满足设计强度的要求。

(3) 运用 SolidWorks 插件 Simulation 对连杆进行静应力分析，首先建立新算例，选择静应力分析，连杆材料选定为合金钢，固定夹具，对连杆施加外部载荷，生成网格，运行此算例，查看位移、应力的结果。

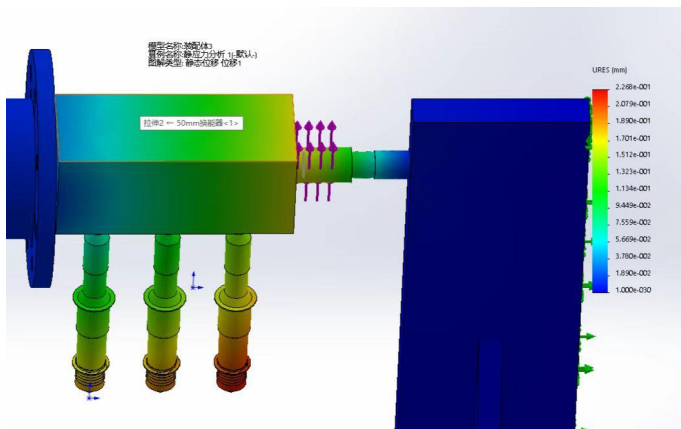


图 4-6 位移结果

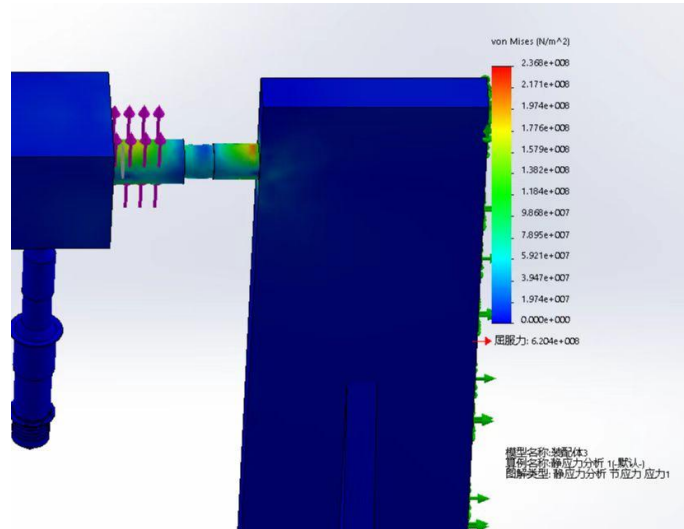


图 4-7 应力结果

结果分析：当喷丸速度为 60m/s 时，根据弹丸的加速度、质量、超声换能器转换的动能以及喷丸腔室受到的力等参数计算连杆的受力约为，计算连杆受到的力约为 174MPa，连杆关联部位施加约束，对连杆施加方向向上的 174MPa 的力，发现当变形比例为 156.08 时，最大变形发生在如图 4-7 所示的红色部分，观察连杆静应力结果颜色的分布情况，发现大部分地方呈现出蓝色和绿色，只有上表面一小部分呈现出黄色和红色，说明连杆受力后变形情况还是较好的，没有特别大程度的破坏。通过应力结果发现变形最小处无应力，最大处应力值为  $2.368 \times 10^8 \text{N/m}^2$  小于屈服力  $6.204 \times 10^8 \text{N/m}^2$ ，满足强度的要求，位移最小量为  $1.0 \times 10^{-3} \text{mm}$ ，位移最大量为 0.2268mm，变形量很小，因此三维移动台几乎没有变形，符合使用的要求，经过设定安全系数发现当安全系数为 1 时，此时图示为全蓝色，表示该零件满足受力要求，因此该三维移动台可以满足设计强度的要求。

### 4.3 疲劳分析

在 Simulation 菜单下，点击“新算例”，选择“疲劳”，点击确定，建立疲劳算例树。

#### (1) 设置“负载”

在疲劳分析时，按照前面的静应力分析的操作步骤，依据叶片上的受力情况做两个静应力分析，右键点击“负载”，点击“添加事件 1”，在“循环次数”中输入数值，在负载类型中选择“完全反转（LR=-1）”。

#### (2) 设置材料属性

在事例树中，右键点击零件，选择“应用/编辑疲劳数据”打开“疲劳 SN 曲线”，插值选择“双对数”，定义选择“曲线-0”。

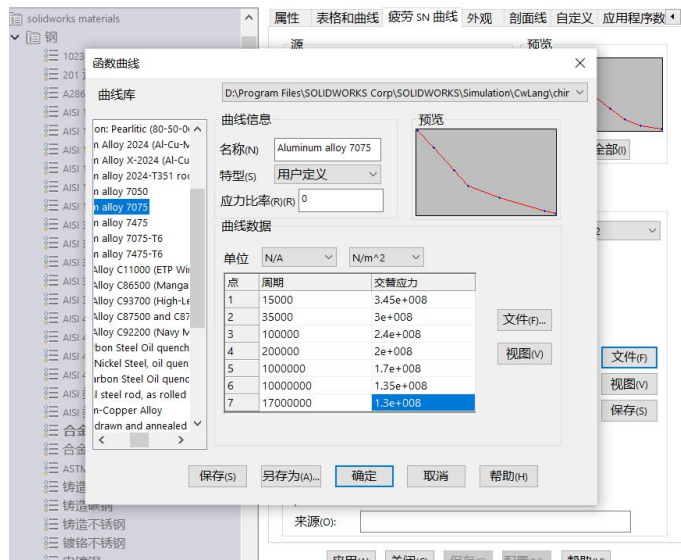


图 4-8 7075 的 S-N 线

在选项卡中点击“文件”，打开材料曲线库，找到 Aluminum alloy 7075 的 S-N 曲线。点击“保存”，点击“确定”。SN 曲线选项卡下，点击“应用”，完成零件材料的设置，如图 4-8 和 4-9 所示。

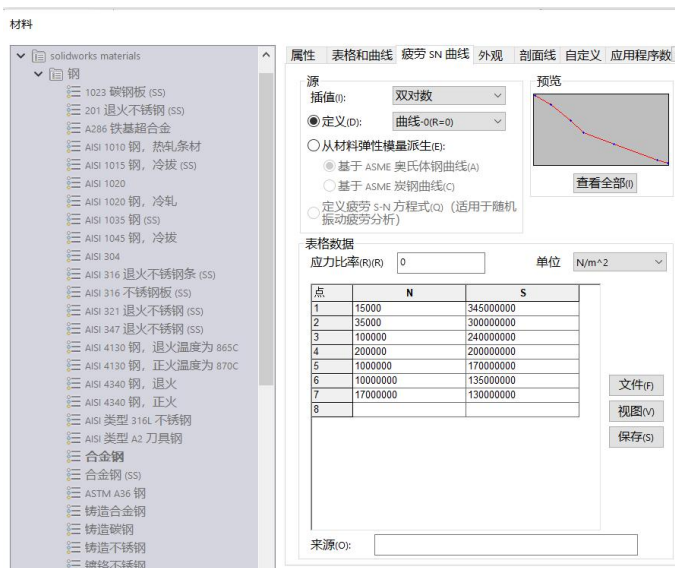


图 4-9 设置材料属性

### (3) 运算

在疲劳点击菜单中“运算此算例”，得到疲劳分析的结果，查看疲劳断裂的位置。

右键点击“结果”，选择“定义疲劳图解”，出现疲劳图解选项卡，可以选择图解类型，即可分析最终的运行结果。

#### 1) 喷丸腔室

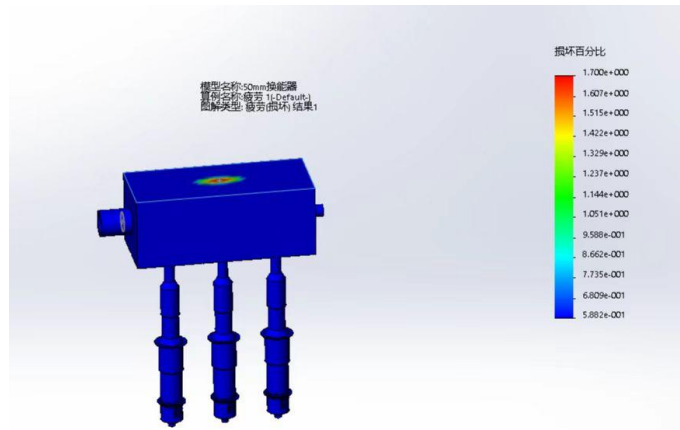


图 4-12 损坏结果

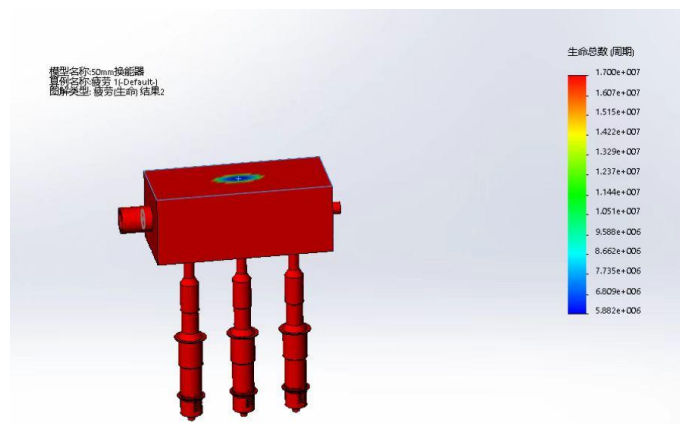


图 4-13 疲劳寿命

结果分析：对喷丸腔室施加 217MPa 的静应力后，设定材料后对喷丸腔室增加疲劳载荷的次数为  $1 \times 10^4$ ，对其进行疲劳分析，通过疲劳损坏结果，发现疲劳损坏图大部分呈现蓝色，只有上表面呈现绿色、黄色和红色，破坏百分比最小为 0.5882，最大为 1.7，说明喷丸腔室大部分抗疲劳破坏性能良好，只有上表面较易受到疲劳破坏。通过疲劳寿命结果图发现大部分呈现红色，只有上表面一小部分呈现黄色、绿色和蓝色，生命周期最短为  $5.882 \times 10^6$ ，最长为  $1.7 \times 10^7$ ，表明喷丸腔室绝大部分的疲劳寿命还是相对较高的，只有上表面一小部分疲劳寿命较低，如图 4-13 上表面不同颜色部位所示，所以可以通过改变喷丸腔室顶部的材料以及增加厚度等方法对其进行强化。

## 2) 连杆

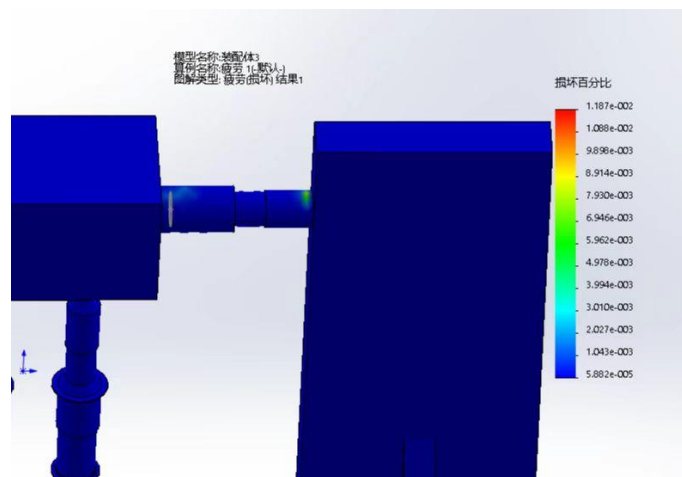


图 4-14 损坏结果

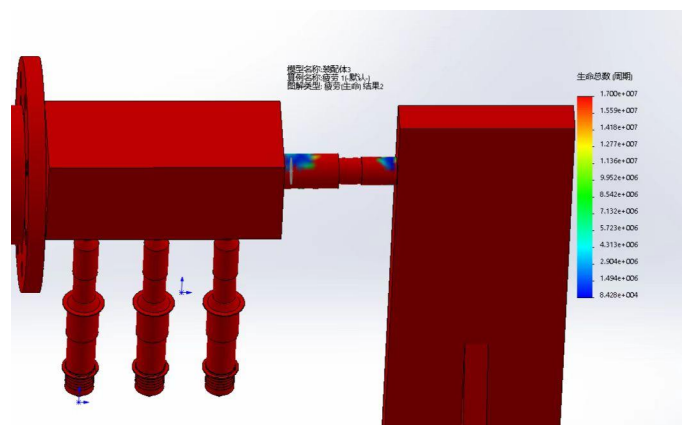


图 4-15 疲劳寿命

结果分析：对连杆施加 174MPa 的静应力后，设定材料后对连杆增加疲劳载荷的次数为  $1 \times 10^4$ ，对其进行疲劳分析，通过疲劳损坏结果，发现疲劳损坏图大部分呈现蓝色，只有一小部分呈现绿色、黄色和红色，如图 4-14 所示，破坏百分比最小为  $5.882 \times 10^{-5}$ ，最大为  $1.187 \times 10^{-2}$ ，说明连杆大部分抗疲劳破坏性能良好，只有一小部分较易受到疲劳破坏。通过疲劳寿命结果图发现大部分呈现红色，只有一小部分呈现黄色、绿色和蓝色，如图 4-15 所示，生命周期最短为  $8.428 \times 10^4$ ，最长为  $1.7 \times 10^7$ ，表明连杆绝大部分的疲劳寿命还是相对较高的，只有一小部分疲劳寿命较低，即图 4-15 上不同颜色的部位所示，生命周期最短的部位也对应最容易发生疲劳破坏的部位，所以可以通过改变连杆易发生损坏部位的材料以及增大截面的方法对其进行强化。

## 第五章 总结与展望

本文旨在设计一个新型的金属表面超声喷丸装置，通过对超声喷丸装置结构的研究以及对文献资料的整理参考，主要进行了以下的工作：

（1）研究超声喷丸技术在国内外的现状及发展趋势，分析现有超声喷丸装置的不足之处，提出研究内容，设计新型金属表面超声喷丸装置。

（2）了解超声喷丸工艺以及超声喷丸装置的组成以及各部分的功用，以便于后期的研究和设计。

（3）根据设计出的金属表面超声喷丸装置结构进行草图绘制、三维制图以及装配组装。

（4）定义超声喷丸装置的材料属性，对金属表面超声喷丸装置进行静应力分析以及疲劳分析，查看结果，分析是否达到预期。

根据静应力分析和疲劳分析的结果，通过观察颜色的变化以及应力和位移的数值，经过分析发现主要部件经过受力后几乎没有变形，应变很小，基本上可以达到承受应力和疲劳的效果，满足设计强度的要求。后期希望将设计的金属表面超声喷丸装置，进行实际的验证，也希望设计的超声喷丸装置可以应用到实际的金属表面强化中来，使强化金属过程更加的便捷，提高金属表面强化工作的效率。

## 参考文献

- [1] 蔡晋,闫雪,李威,孟庆勋.基于DEM-FEM耦合的超声喷丸强化数值分析[J/OL].航空学报:1-13[2021-12-01].
- [2] 班虎飞.气动辅助超声喷丸强化的实验研究[D].导师: 轧刚.太原理工大学,2013.
- [3] 闫林林. 超声喷丸技术的理论与实验研究[D].南京航空航天大学,2010.
- [4] 丛家慧,王磊.超声喷丸表面强化技术的研究现状与应用进展[J].机械工程材料, 2017, 43(05):1-5.
- [5] 李朝阳,李道朋,张炜舜,傅波.压电振子阵列型超声喷丸强化[J].应用声学:1-12.
- [6] 蔡晋,谢广安,闫雪,李威.TC4钛合金超声喷丸强化覆盖率试验与数值分析[J].航空制造技术,2021,64(19):30-36.
- [7] 杨天南,林爽,蔡晋.超声喷丸激励振动幅值对TC4钛合金表面状态影响的仿真研究[J].航空精密制造技术,2020,56(04):14-18.
- [8] 赵蕾.铝合金预应力超声喷丸成形件表面层性能分析[J].航天制造技术, 2019.
- [9] 张聪惠,任海涛,荣花,刘颖.热处理对超声喷丸TC4疲劳性能的影响[J].中国表面工程,2018,31(06):22-27.
- [10] Fei Yin,Milan Rakita,Shan Hu,Qingyou Han. Overview of ultrasonic shot peening[J]. Surface Engineering,2017.
- [11] Mohammad Asaduzzaman Chowdhury.Advanced Engineering Reserach[M]Intech:2018.
- [12] J. Marteau,M. Bigerelle. Relation between surface hardening and roughness induced by ultrasonic shot peening[J]. Tribology International,2015.

## 致 谢

花开花落万物道，聚散离别终有时。行文至此，四年的大学生活也落下了帷幕。提笔致谢的瞬间，四年的生活一闪而过，有很多的美好，也有不少的遗憾。十分感谢在四年的时光里，路过我生命的每一个人，亦或是良师益友，亦或是陌生人的温暖，正是因为他们，才使得我的大学生活更加的丰富多彩。

首先，要感谢我的毕设指导老师宋宗贤老师，从毕业论文的开题答辩到论文的撰写完成，在此期间都给予了我很大的帮助，在我每次遇到困惑时，都能耐心的为我解答。人生之幸，得遇良师。还要感谢在我二十余年的求学路上，对我谆谆教诲的父母，不求回报的给予与付出是我成长路上最强大的后盾。感谢他们对我不断的教导与鼓励，才使我有面对未来的勇气。感谢四年来认识的所有的朋友们，是他们让我有了热爱生活的力量。正是因为他们的陪伴，四年的时光才得以更加的温暖。最后还要感谢一直以来坚持变好、努力生活、积极乐观的自己，也祝愿自己在未来能够继续保持对生活的热爱，奔赴下一场花海。

最后，衷心的感谢在百忙之中抽出宝贵的时间对本论文给予评阅和指导建议的各位专家、老师们。