



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

本科生毕业设计

镍基合金表面喷丸模拟分析

Simulation Analysis Of Nickel-based Alloy Surface Shot Peening

姓 名 杨阳
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

镍基合金表面喷丸模拟分析

Simulation Analysis Of Nickel-based Alloy Surface Shot Peening

姓 名 杨阳
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	镍基合金表面喷丸模拟分析						
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。</p> <p>现代燃气涡轮发动机有 50%以上质量的材料采用高温合金，其中镍基高温合金的用量在发动机材料中约占 40%。镍基合金在中、高温下具有优异综合性能，适合长时间在高温下工作，能够抗腐蚀和磨蚀，是最复杂的、在高温零部件中应用最广泛的合金。镍基高温合金主要用于航空航天领域 950~1050°C 下工作的结构部件，如航空发动机的工作叶片、涡轮盘、燃烧室等。</p> <p>超声喷丸是一种预应力表面强化工艺，它的基本原理：丸料以高速 (20m/s~150m/s) 反复冲击金属构件表面，就像无数的小锤反复敲击着构件表面，使构件表面和次表面发生了一定的塑性变形，从而在塑性表层中产生金属特有的冷作硬化，并在冲击完成时在构件表层形成与构件表面平行的和均匀的残应力层，从而提高构件表面强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力。</p> <p>喷丸可有效提高构件表面强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力，从而广泛应用于航空、车辆、压力容器、汽轮机等行业。在航空工业中，几乎所有相对危险的零件均采用了喷丸加工，在改善疲劳可靠性的同时有效降低了飞机重量。因此，研究镍基高温合金的超声喷丸工艺对于我国航天航空事业的发展具有重要意义。</p>						
	<ol style="list-style-type: none"> 1) 查阅相关文献资料，掌握 ABAQUS 模拟软件的使用方法 2) 利用 ABAQUS 软件建立有限元模拟分析模型 3) 利用 ABAQUS 软件模拟分析镍基合金表面喷丸强化过程 						

任务及要求	<p>4)更改喷丸强化的工艺参数，分析、</p> <p>5)不同参数下镍基合金表面的变化</p> <p>6)根据模拟出现象得出相关结论</p> <p>7)撰写论文。</p>
工作条件	金属喷丸设备和扫描电镜。
知识与能力要求	掌握喷丸强化试验仪器的操作能力及正交试验分析能力。
<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（论文）任务书

题 目：镍基合金表面喷丸模拟分析

学 院：航空航天大学

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：杨阳

学 号：18414030118

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。现代燃气涡轮发动机有 50% 以上质量的材料采用高温合金，其中镍基高温合金的用量在发动机材料中约占 40%。镍基合金在中、高温下具有优异综合性能，适合长时间在高温下工作，能够抗腐蚀和磨蚀，是最复杂的、在高温零部件中应用最广泛的合金。镍基高温合金主要用于航空航天领域 950~1050℃ 下工作的结构部件，如航空发动机的工作叶片、涡轮盘、燃烧室等。

超声喷丸是一种预应力表面强化工艺，它是以高速(20m/s~150m/s) 反复冲击金属构件表面，就像无数的小锤反复敲击着构件表面，使构件表面和次表面发生了一定的塑性变形，从而在塑性表层中产生金属特有的冷作硬化，并在冲击完成时在构件表层形成与构件表面平行的和均匀的残应力层，从而提高构件表面强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力。

由于上述的变化，喷丸可有效提高构件表面强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力，从而广泛应用于航空、车辆、压力容器、汽轮机等行业。在航空工业中，几乎所有相对危险的零件均采用了喷丸加工，在改善疲劳可靠性的同时有效降低了飞机重量。因此，研究镍基高温合金的超声喷丸工艺对于我国航天航空事业的发展具有重要意义。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

- 8) 查阅相关文献资料，掌握 ABAQUS 模拟软件的使用方法
- 9) 利用 ABAQUS 软件建立有限元模拟分析模型
- 10) 利用 ABAQUS 软件模拟分析镍基合金表面喷丸强化过程
- 11) 更改喷丸强化的工艺参数，分析不同参数下镍基合金表面的变化
- 12) 根据模拟出现象得出相关结论
- 13) 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] 张正.基于喷丸残余应力场的疲劳裂纹扩展的数值模拟[D].浙江理工大学,2013.
- [2] 王欣,云辉,付书红,等.喷丸强度对 TC17 及 GH4169 合金表面完整性和高温疲劳性能的影响[J].金属热处理,2018,43(1):67-71.
- [3] 李丹阳,殷凤仕,王晓明,朱胜,韩国峰.镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势[J].表面技术,2020,49(08):105-122.
- [4] 尚建勤,曾元松.喷丸成形技术及未来发展与思考[J].航空制造技术,2010(16):26-29.
- [5] 鲜鹏,李军.喷丸技术的发展与研究[J].金属世界,2020(01):32-36.
- [6] 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.
- [7] P.J.Arrazola,A.Kortabarria,A.Madariagaetc.,On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy:Experiments and predictions with finite element simulation[J],Simulation Modelling Practice and Theory,2014,41,87-103
- [8] 王延忠,李菲,陈燕燕,等.TC4 喷丸强化仿真与试验.北京航空航天大学学报,2019,45(9): 1723-1731.
- [9] 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.
- [10] 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[2022-05-07].
- [11] 蔡晋,KiplagatCollins Cherutich,李威,师俊东,林爽.超声喷丸 FGH97 粉末高温合金表面粗糙度试验与数值分析[J].表面技术,2021,50(06):250-257.
- [12] Jianyue hang,Yongxin Jian,Xuzhe Zhao,Dean Meng,Fusheng Pan,Qingyou Han.The tribological behavior of a surface-nanocrystallized magnesium alloy AZ31 sheet after ultrasonic shot peening treatment[J].Journal of Magnesium and Alloys,2021,9(04):1187-1200.

[13] Ning Wang, Jinlong Zhu, Bai Liu, Xiancheng Zhang, Jiamin Zhang, Shantung Tu. Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process and Shot Peening on Fretting Fatigue Performance of Ti-6Al-4V[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(06): 81-93.

所在专业审查意见：

负责人： _____

年 月 日

- [1] 张正.基于喷丸残余应力场的疲劳裂纹扩展的数值模拟[D].浙江理工大学,2013.
- [2] 王欣,云辉,付书红,等.喷丸强度对 TC17 及 GH4169 合金表面完整性和高温疲劳性能的影响[J].金属热处理,2018,43(1):67-71.
- [3] 李丹阳,殷凤仕,王晓明,朱胜,韩国峰.镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势[J].表面技术,2020,49(08):105-122.
- [4] 尚建勤,曾元松.喷丸成形技术及未来发展与思考[J].航空制造技术,2010(16):26-29.
- [5] 鲜鹏,李军.喷丸技术的发展与研究[J].金属世界,2020(01):32-36.
- [6] 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.
- [7] P.J.Arrazola,A.Kortabarria,A.Madariagaetc.,On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy:Experiments and predictions with finite element simulation[J],Simulation Modelling Practice and Theory,2014,41,87-103
- [8] 王延忠,李菲,陈燕燕,等.TC4 喷丸强化仿真与试验.北京航空航天大学学报,2019,45(9): 1723-1731.
- [9] 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.
- [10] 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[2022-05-07].
- [11] 蔡晋,KiplagatCollins Cherutich,李威,师俊东,林爽.超声喷丸 FGH97 粉末高温合金表面粗糙度试验与数值分析[J].表面技术,2021,50(06):250-257.
- [12] Jianyue hang,Yongxin Jian,Xuzhe Zhao,Dean Meng,Fusheng Pan,Qingyou Han.The tribological behavior of a surface-nanocrystallized magnesium alloy AZ31 sheet after ultrasonic shot peening treatment[J].Journal of Magnesium and Alloys,2021,9(04):1187-1200.
- [13] Ning Wang,Jinlong Zhu,Bai Liu,Xiancheng Zhang,Jiamin Zhang,Shantung Tu.Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process and Shot Peening on Fretting Fatigue Performance of Ti-6Al-4V[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2021,34(06):81-93.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.3-2021.12.5	搜集资料，明确选题方向，并提交任务书	完成任务书的撰写
2021.12.7-2021.12.9	构思并撰写开题报告，完善后提交	提交开题报告
2022.2.5-2022.2.20	整理实习日志，进行实习总结，撰写并提交实习报告	实习工作总结
2022.3.5-2022.3.20	完成开题答辩及毕业论文初稿	初步定稿
2022.4.3-2022.4.10	补充、修改并提交论文初稿	完善毕业论文
2022.4.12-2022.4.20	依据导师的指导，修改论文，完成并提交二稿	轻微改动毕业论文
2022.4.21-2022.4.30	完善论文并提交终稿	完成毕业论文终稿
2022.5.1-2022.5.10	准备毕业论文答辩材料，准备答辩	答辩准备充分，一次通过
完成课题的 现有条件	1.金属喷丸设备 2.有限元分析软件 3.镍基合金金属若干	
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
本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，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，本学位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。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

杨阳

年 月 日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，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。

学位论文指导教师签名：

年 月 日

摘 要

GH4169 镍基高温合金因其优越的材料性能被广泛应用于航空发动机高精尖零部件上，尤其是 GH4169 镍基高温合金在高温等极端环境下仍然拥有着极好的疲劳强度、耐燃气腐蚀等性能，使其在航空发动机这一部件所使用的材料中占比超过 40%，因此，本文所研究的内容是 GH4169 镍基高温合金的喷丸过程模拟，以及分析在改变某一项喷丸参数后，GH4169 镍基高温合金的应力场分布情况。

本文利用 ABAQUS 有限元分析软件进行 GH4169 镍基合金表面喷丸模拟分析，在不改变其他喷丸参数的条件，只改变喷丸速度这一参数来研究不同喷丸参数下，GH4169 镍基合金表面应力场的分布情况。

本文模型取自 GH4169 涡轮盘毛坯盘缘位置（此处有榫接特征，通常采用喷丸工艺），通过构建 Johnson-cook 本构模型得到能够反映喷丸状况的模型参数。采用三种不同的喷丸速度参数 60m/s、70m/s 和 90m/s 对试件模型进行喷丸处理，观察试件表面产生的应力分布情况。通过分析模拟所取得的应力分布云图、应力曲线图以及位移分布云图，可以得到：随着喷丸速度的增大，GH4169 镍基合金表面应力也随之增加。应力最大值发生在撞针与 GH4169 镍基合金表面接触时，随后趋于稳定。与喷丸作用方向一致时，应力向 GH4169 镍基合金试件内部传递，与喷丸移动方向垂直时，应力向移动方向垂直两侧传递。位移变化最大的位置与撞针和 GH4169 镍基合金表面接触位置基本一致。

关键词：喷丸强化；有限元分析；GH4169 镍基合金；ABAQUS 软件

ABSTRACT

Nickel-based superalloy GH4169 was investigated because of its superior properties of ceramic materials are widely used in aeroengine high-grade components, especially in the high temperature nickel-based superalloy GH4169 was investigated under extreme conditions such as still have a very good fatigue strength, gas corrosion resistance and other properties, make its in the aircraft engine parts of the materials used by more than 40%, therefore, In this paper, the shot peening process of GH4169 nickel-base superalloy is simulated, and the stress field distribution of GH4169 nickel-base superalloy is analyzed after changing one of the shot peening parameters.

In this paper, the ABAQUS finite element analysis software was used to simulate the shot peening on the surface of GH4169 nickel-base alloy. Under the condition of not changing other shot peening parameters, only the shot peening speed was changed to study the distribution of the stress field on the surface of GH4169 nickel-base alloy under different shot peening parameters.

The model in this paper is taken from the edge position of the blank of GH4169 turbine disc (where there are tenon joint features and shot peening process is usually adopted), and the model parameters that can reflect the shot peening condition are obtained by constructing Johnson-Cook constitutive model. Three different shot peening velocity parameters (60m/s, 70m/s and 90m/s) were used topeen the specimen to observe the stress distribution on the specimen surface. By analyzing and simulating the stress distribution, stress curve and displacement distribution, it can be concluded that with the increase of shot peening speed, the surface stress of GH4169 nickel-base alloy also increases. The maximum stress occurs when the firing pin contacts the surface of GH4169 nickel-base alloy and then stabilizes. When it is consistent with the direction of shot peening, the stress transfers to the inside of GH4169 nickel-base alloy specimen, and when it is perpendicular to the direction of shot peening, the stress transfers to both sides perpendicular to the direction of movement. The maximum displacement change is consistent with the contact position between the firing pin and the GH4169 nickel-base alloy surface.

Key words: Shot peening; Finite element analysis; Nickel base alloy; The software of ABAQUS

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 国内研究现状	1
1.2.2 国外研究现状	2
1.3 主要研究内容	3
第二章 试验材料与方法	4
2.1 材料简介	4
2.2 超声喷丸技术特点	4
2.2.1 超声喷丸技术	4
2.2.2 超声喷丸特点	5
2.3 数值模拟方法的选择	6
2.4 影响喷丸强度的因素	6
第三章 模型建立	7
3.1 引言	7
3.2 ABAQUS 软件简介	7
3.3 喷丸过程模型建立	7
3.4 本章小结	13
第四章 喷丸过程的有限元模拟	14
4.1 喷丸过程有限元模拟	14
4.2 喷丸模拟应力计算结果	20

4.3 喷丸模拟位移变形计算结果	21
4.4 不同喷丸速度应力场对比	22
4.4 不同喷丸速度应力曲线对比	23
4.5 本章小结	23
4.6 结论	23
4.7 总结与展望	23
参考文献	27
致 谢	28

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

航空发动机作为飞机的心脏，其制造水平直接体现了一个国家的航空工业基础、科技水平和国防实力，而其中最重要的制作技术在于其热端部件的制造，这项技术能够直观地体现一个国家的航空工业制造水平。当今世界上制造发动机叶片材料仍然以钛合金与镍基合金居多，因此，在提高原材料性能这一项技术上，国与国之间产生了激烈的材料竞赛。

在航空航天的领域中，高温镍基合金是一个绕不开的话题。由于高温镍基合金在中、高温下都具有优异综合性能，能够在高温下长时间工作，其抗腐蚀和磨蚀性能都非常优越。因此，镍基合金是在高温零部件中应用的最广泛的合金，并且在现代飞机的涡轮中有大约 40% 的材料采用了高温镍基合金。

超声喷丸技术是通过超声波发生器产生 15~40KHz 左右的高频次震荡信号，通过中间机构转换为高频机械振动并传递给终端机构（多为撞针），产生巨大的冲击载荷作用于被冲击试件表面，从而使冲击试件表面产生晶粒破碎、晶格高密度位错等现象，同时被冲击试件表面的表面粗糙度、表面光洁度也会发生变化，进而形成能够满足设计所需的塑性变形和残余应力分布。因此，超声喷丸强化可有效提高被冲击试件表面强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力。

喷丸后，根据材料的不同，构件所发生的塑性变形存在一定差距，其共性特征主要包括：在喷丸强化的表面会形成密度很高的晶格位错；试件的外表层被引入残余压应力，而次表层产生了与之相平衡的残余拉应力；试件的表面光洁度会发生变化。

由于上述的变化，喷丸可有效提高构件表面强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力，从而广泛应用于航空、车辆、压力容器、汽轮机等行业。在航空工业中，几乎所有相对危险的零件均采用了喷丸加工，在改善疲劳可靠性的同时有效降低了飞机重量^[1]。因此，研究镍基高温合金的超声喷丸工艺对于我国航天航空事业的发展具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内研究现状

中国早期发动机起步时期就落后于当时世界水准近 50 年，迄今为止，中国航空发动机已经发展了近 70 年。发展初期国内采用仿制国外发动机型号的模式，直到涡喷-14 等型号上才实现自主研制，摆脱了军用航空发动机对国外型号的依赖。我国于 2016 年 8 月，成立了自己的专业化航空发动机国家级企业集团——中国航

发集团公司，其成立的目的在于改变中国过去发动机研制依附于飞机型号的格局，使中国可以获得发动机研制方面更大的自主权，不再受制于国外的发动机型号。在此基础上，我国军用发动机研发水准仍落后于美国 20 年以上。而民用领域，用于商业的大涵道比涡轮风扇发动机仍是空白，相较于国际先进水平 CFM 公司落后至少 15~20 年。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 飞机超临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。



图 1-1 ARJ21 飞机超临界外翼下翼面整体壁板

GH4169 镍基高温合金因其优越的材料性能被广泛应用于航空发动机高精尖零部件上，尤其是 GH4169 镍基高温合金在高温等极端环境下仍然拥有着极好的疲劳强度、耐燃气腐蚀等性能，使其在航空发动机这一部件所使用的材料中占比超过 40%。因此，如何提高 GH4169 镍基高温合金的材料性能具有重大研究意义。

中国航发北京航空材料研究院王欣^[2]等对镍基高温合金 GH4169 疲劳试样进行喷丸试验，研究发现：随喷丸强度的增大，合金表面粗糙度呈上升趋势，但合金表面残余压应力随喷丸强度的增大而减小；镍基高温合金 GH4169 高温光滑弯曲疲劳寿命对喷丸强度不敏感，疲劳寿命随喷丸强度的增大而增大。表面残余应力与喷丸强度曲线均存在一个残余应力数值的极大点，当喷丸强度为 0 时，GH4169 表面残余应力为 -234MPa，喷丸强度为 0.050mmA 时，极大值约为 -827MPa^[3]。

1.2.2 国外研究现状

20 世纪 50 年代末，喷丸工艺以成为西方航空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新成果^[4]。



图 1-2 A380 飞机超临界外翼下翼面整体壁板

美国人 Benjamin·C·Tylman 利用蒸汽压力所产生的离心力，使沙子产生离心力作用于金属材料表面，发明了历史上最早的喷丸加工技术。该技术主要是用于金属表面的除锈作业，并不能对材料进行成形及强化等加工。美国洛克希德马丁公司的 Jim Boerger 尝试用机械装置喷射钢球，用来加工大型飞机整体机翼壁板，并且发现该方法相比传统的锻造技术可以强化诸如飞机机翼之类造型复杂的金属部件，而不会造成零件过度变形。因此该技术很快在航空领域推广开来，形成了现代传统喷丸强化技术的雏形。美国首先在“星座号”飞机上运用了喷丸成形技术，用于加工机翼的整体壁板。这说明喷丸技术不仅可以用于零件材料的局部强化，还可以直接用来对零件毛坯进行成形加工。这一技术终结了过去飞机制造中制造复杂造型零件只能依赖铆接和人工锻打的历史，不仅大幅提高了生产效率，而且还使得飞机的可靠性和极限载荷有所提升。为了解决飞机机翼整体壁板加工过程中无法提供设计所需预应力的问题，美国人率先采用了预应力喷丸技术。该技术的原理是先用夹具在板坯上施加弹性应力，再对其进行喷丸成形。相比传统的喷丸成形方法，预应力喷丸技术不仅克服了机翼内加强筋等复杂结构所带来的局部应力集中的问题，还大幅提高了喷丸成形的成形极限。这一技术使得制造超临界机翼、机身成为可能，一些超音速，甚至 2~3 倍音速的先进飞机开始进入人们的视野^[5]。

1.3 主要研究内容

本文主要研究内容为：确定喷完模拟所采用的材料，选定喷丸使用的方法，确定模型方案。利用 ABAQUS 软件建立 GH4169 镍基高温合金模型、喷丸撞针模型；求解控制方程设置以及模拟结果云图分析。本文主要进行了以下工作：

- (1) 利用 ABAQUS 软件建立有限元模拟分析模型。
- (2) 利用 ABAQUS 软件模拟分析镍基合金表面喷丸强化过程。
- (3) 更改喷丸强化的工艺参数，分析不同参数下镍基合金表面的变化。
- (4) 分析喷丸过程模拟的应力分布图。

第二章 试验材料与方法

2.1 材料简介

GH4169 高温镍基合金能够成为航空发动机涡轮中不可或缺的高性能材料，其材料性能是十分优越的，GH4169 高温镍基合金能够长时间处在高温环境下工作，同时也能够满足航空发动机涡轮叶片所需求的强度，这与其材料的构成密不可分。GH4169 高温镍基合金以镍为主要的成分，镍含量通常能够占比超过 50%。其化学成分占比如表 2-1 所示。

表 2-1 典型 GH4169 镍基高温合金化学成分表

Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Co
50~55	17~21	2.8~3.3	余量	4.75~5.5	1.0
C	Mn	Si	S	Cu	Al
0.08	0.35	0.35	0.01	0.3	0.2~0.8

由于构成 GH4169 镍基高温合金化学成分中含有占比超过 50%的镍，因此其物理性能和力学性能同样十分优越，如表 2-2、2-3 所示。

表 2-2 GH4169 镍基高温合金物理性能

密度 g/cm ³	熔点 °C	比热容 J/kg·°C	弹性模量 GPa	剪切模量 GPa	泊松比
8.24	1260~1320	435	199,9	77,2	0.3

表 2-3 GH4169 镍基高温合金力学性能

热处理方式	抗拉强度 σ _b /MPa	屈服强度 σ _{p0.2} /MPa	延伸率 σ ₅ %	布氏硬度 HBS
固溶处理	965	550	30	≤363

综上所述，在航空发动机涡轮叶片材料的选择上，发动机制造厂商通常会选用 GH4169 镍基高温合金作为主要构件的材料，以满足涡轮叶片在运行过程中高温、高腐蚀、高强度等等的复杂情况。

2.2 超声喷丸技术

(1) 超声喷丸技术

超声喷丸技术是通过超声波发生器产生 15~40KHz 左右的高频次震荡信号，通过中间机构转换为高频机械振动并传递给终端机构（多为撞针），产生巨大的冲击载荷作用于被冲击试件表面，从而使冲击试件表面产生晶粒破碎、晶格高密度位

错等现象，同时被冲击试件表面的表面粗糙度、表面光洁度也会发生变化，进而形成能够满足设计所需的塑性变形和残余应力分布。因此，超声喷丸强化可有效提高被冲击试件表面强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力。如图 2-1 所示。

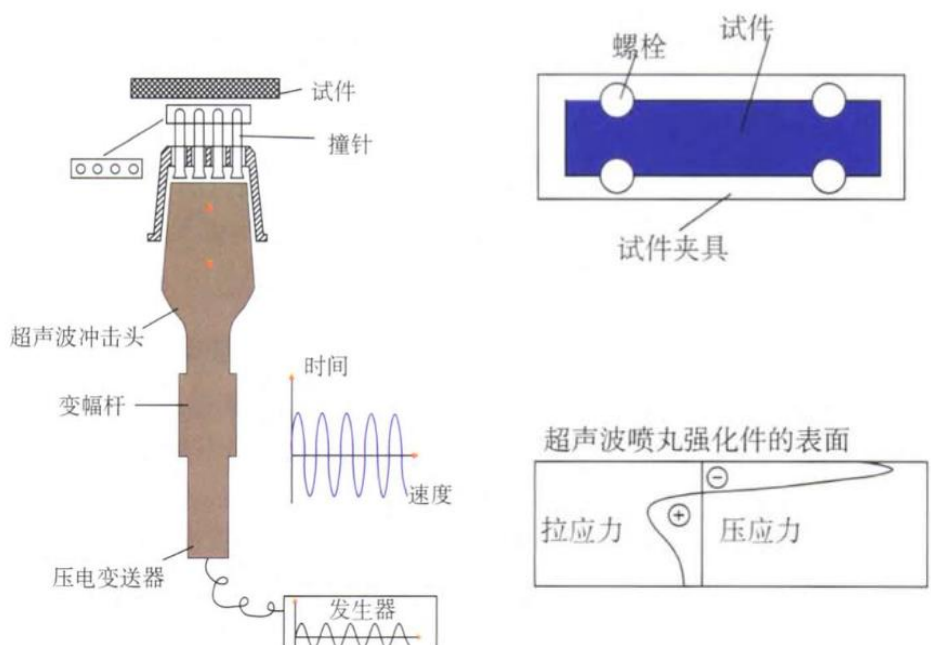


图 2-1 超声喷丸技术原理

(2) 超声喷丸特点

相较于传统机械喷丸技术，超声喷丸技术的优势十分明显，主要有以下几个方面：

① 能够实现较厚板材的强化与成形。与传统的机械喷丸技术相比，因为其优越的高应变效应，能够产生幅度和深度更大的残余应力场，在较厚的板材成形方面具有独特的优势，能够在厚度不大于 22mm 的板材达到成形与强化的效果。

② 可以实现复杂形状工件的成形与强化：因为超声喷丸设备结构简单、操作方便，能够对复杂的结构件进行局部处理，设备的工艺参数少。

③ 可控性好：对于不同特征的工件可以采用适合的设备工艺参数，从而实现工件的精确成形和强化；强化后的材料综合性能相较于其他机械喷丸方法更好。

④ 超声喷丸强化后，工件的表面光洁度、表面粗糙度与其他机械喷丸技术相比更好。

⑤ 无污染：相较于传统机械喷丸需要在每次喷丸之后对弹丸进行收集等一系列操作，超声喷丸采用不易磨损的钢质喷丸介质，磨损之后更换也非常方便。

⑥ 成本低：一般的超声喷丸设备都会做成移动便携式，方便在不同的应用场所使用，其尺寸与能耗都较低。

2.3 数值模拟方法的选择

喷丸数值模拟的研究意义：长久以来，因为设计的参数过多，用实验法研究喷丸工艺过程极为耗时耗力，随着计算机技术和有限元的发展，使用有限元模拟的方法来研究喷丸成形过程中的材料变形、残余应力的形成过程成为可能。而且在喷丸实际作业中，众多喷丸参数的选择需要经过大量实验，而且不同材料、不同形状构件所产生的残余应力也不同，如果能在进行实际作业前利用数值模拟方法进行参数优化，将在实际工业生产中节省生产成本的同时有效提高喷丸的作用效果。

有限元法最初应用于航空器的结构强度计算，随着计算机技术的快速发展和普及，现在有限元方法因其高效已广泛应用于几乎所有的科学技术领域。

纵观当今国际上 CAE 软件的发展情况，可以看出有限元分析方法的一些发展趋势：与 CAD 软件的无缝集成；更为强大的网格处理能力；由求解线性问题发展到求解非线性问题；由单一结构场求解发展到耦合场问题的求解；程序面向用户的开放性。

采用计算机模拟技术，不仅成功地解决并直观地表达出温度场的动态变化，而且为与热过程相关的其他质量问题的研究提供了理论依据和计算思路。如凝固组织、凝固缺陷的评估，热应力与残余变形的预测等一系列化学、物理冶金反应过程的定量分析。温度场的数值解法最常用的是差分法和有限元法。

2.4 影响喷丸强度的因素

影响超声喷丸强度的因素包括：弹丸直径、弹丸数量、喷丸时间、喷丸速度等参数。其中喷丸速度的影响在于：喷丸速度越大，弹丸撞击零件表面的能量越大，冲击力越强，喷丸强度越高；弹丸直径的影响：在不改变其他参数的情况下，弹丸直径越大，喷丸强度越高，这一参数的选择需要根据被喷件来确定，过小的弹丸直径会直接损坏被喷件表面，严重影响喷丸效果。因此，在生产制造中通常采用改变弹丸直径与喷丸速度来调节喷丸强度。

本文采用 ABAQUS 软件对喷丸过程进行模拟，在模型已经确定的情况下，弹丸直径也随之确定。因此，在弹丸直径与其他参数不变的条件下，本文只采用改变喷丸速度这一参数来模拟不同喷丸速度下 GH4169 镍基高温合金表面应力变化。

第三章 模型建立

3.1 引言

本文所采用的是 ABAQUS 有限元分析软件，首先是建立 GH4169 镍基合金的三维模型，其次建立喷丸的丸粒。通过对 GH4169 镍基合金表面喷丸过程的模拟，获得一种能够直接体现不同喷丸速度这一工艺参数对 GH4169 镍基合金表面的喷丸强化效果。

3.2 ABAQUS 软件简介

ABAQUS 是一款功能十分强大的工程模拟的有限元软件，其中包括两个求解器模块：ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 两大模块。ABAQUS/Standard 是一个通用的分析模块，适用于求解线性与非线性问题，包括静力、动力等。ABAQUS/Explicit 采用显示动力学格式，可以模拟短暂的、瞬时的动态事件，比如冲击和爆炸等问题。ABAQUS 软件分析的主要过程包括以下几个步骤：前处理：建立数值模型、划分网格、设置材料属性、载荷以及边界条件等；解算器：提交、监视、控制分析作业、求解控制方程、输出结果等；后处理：可视化分析结果。

本文所研究的内容为镍基合金表面喷丸过程的模拟分析，可以利用 ABAQUS 软件的 ABAQUS/Explicit 模块，通过建立模型、多步分析和划分网格等步骤，模拟出镍基合金表面喷丸强化的过程。

3.3 喷丸过程模型建立

(1) 建立 GH4169 镍基合金模型

按照 GB/T26077-2010 标准设计喷丸试验件（为平板试件），取自 GH4169 涡轮盘毛坯盘缘位置（此处有榫接特征，通常采用喷丸工艺）^[6]。

本文模型仅采用外形尺寸：140*35*3.6（单位：mm）。

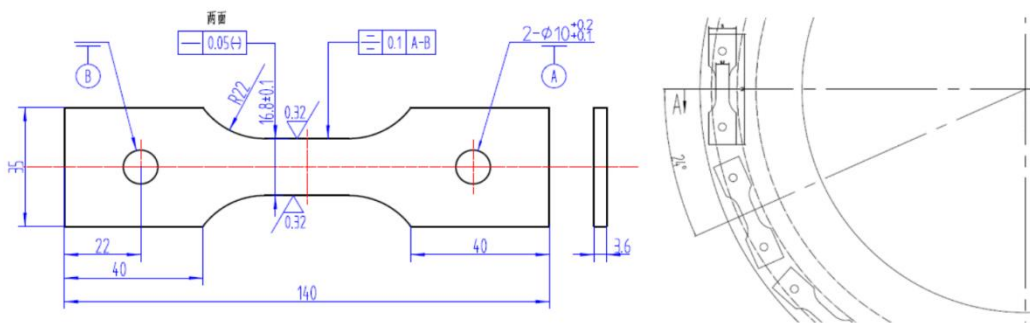


图 3-1 喷丸强化模型尺寸及取样方案

在模型树中选择部件，新建一个名为 GH4169plate 的部件，部件属性如图 3-2

所示。

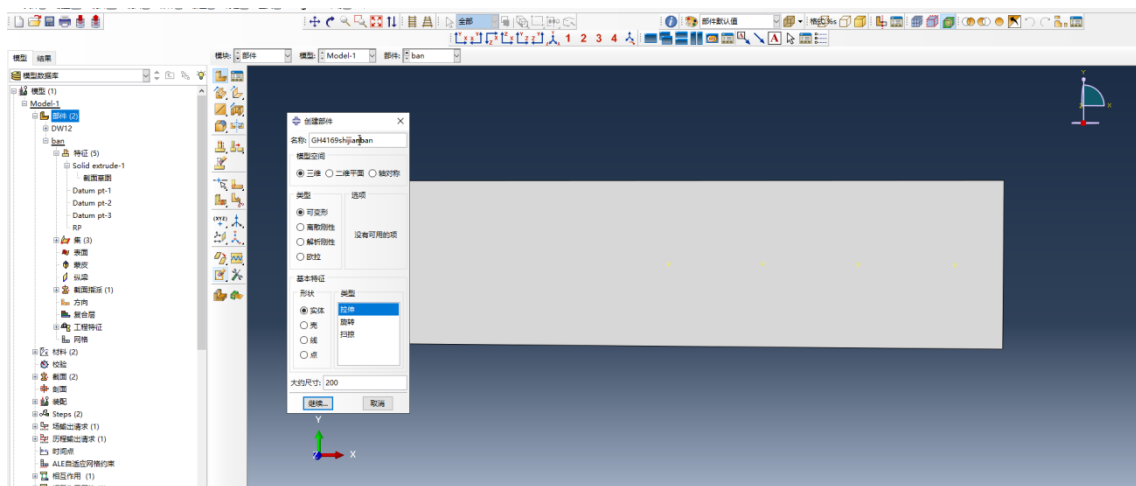


图 3-2 建立 GH4169plate 模型

创建完成后开始绘制 GH4169plate 模型草图，其外形尺寸如下：试件总长度为 140；宽度为 35；板厚为 3.6，具体情况如图 3-3 所示。

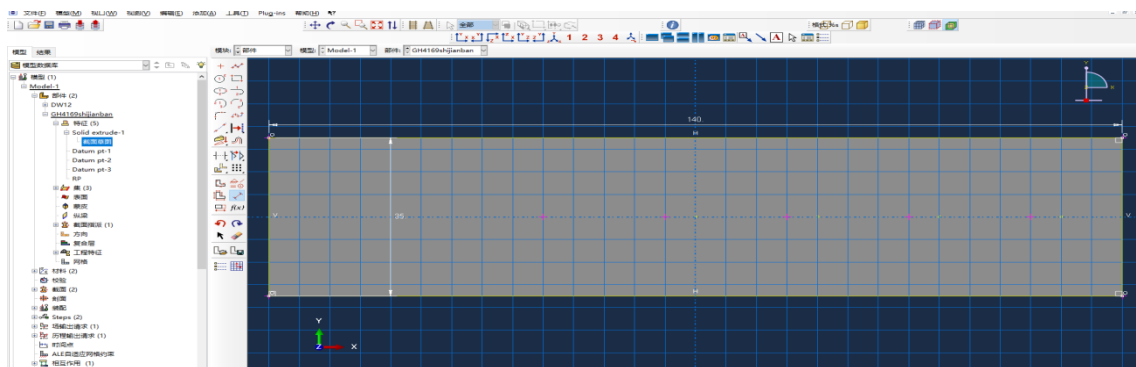


图 3-3 GH4169plate 模型草图

点击完成后生成一个长度 140，宽度 35，厚度 3.6 的拉伸体，如图 3-4 所示。

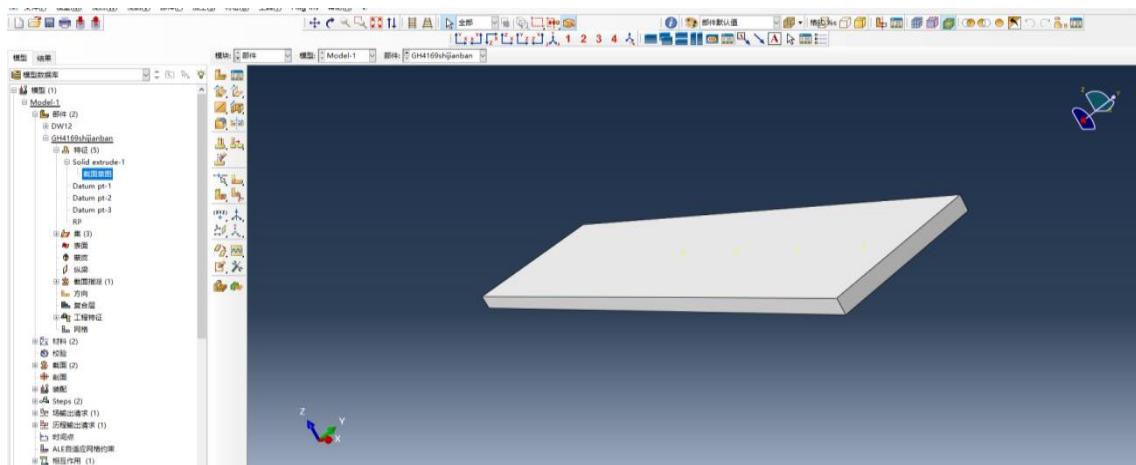


图 3-4 GH4169plate 模型

通过查找 GH4169 镍基合金材料性能表所得到的数据，赋予 GH4169 模型相

应的材料性能。其中包括弹性模量 1999Gpa、泊松比 0.3、密度 8.24g/cm³、屈服强度 550，如图 3-5 所示。

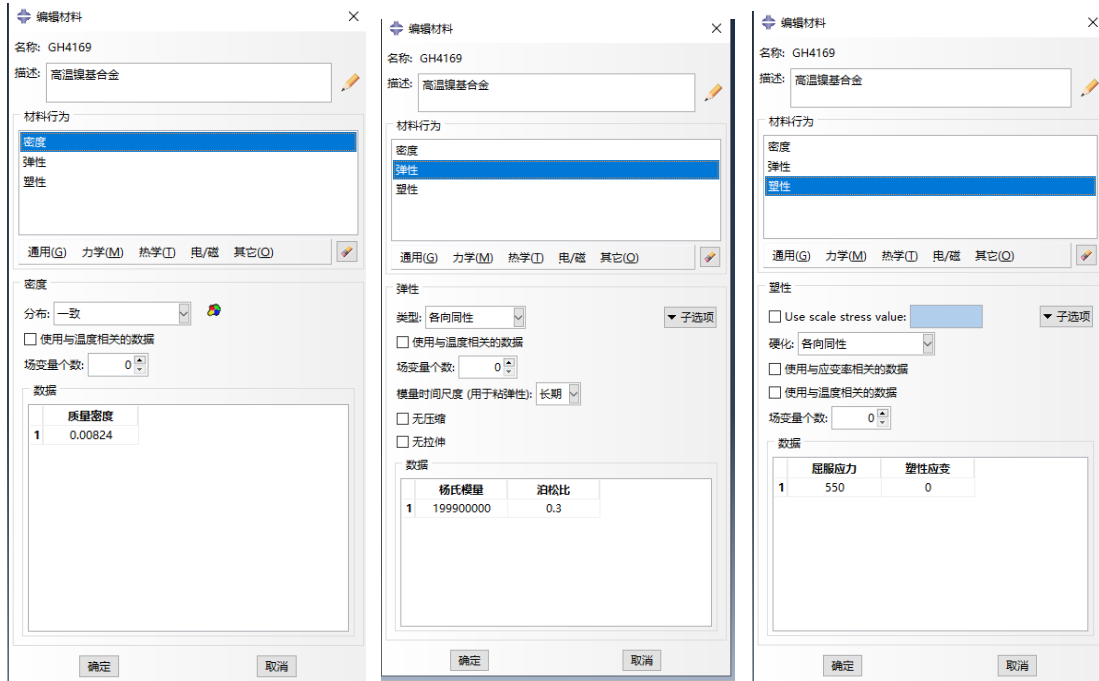


图 3-5 GH4169 性能参数

在喷丸强化的冲击过程中，由于弹丸高速冲击金属材料表面，会产生高应变率以及不规则的弹塑性循环加载，因此需要选择适合动态冲击载荷下的材料本构模型，以反映应变率、温度等对材料循环变形行为的影响。文献^[7]对 Johnson-Cook (J-C)模型应用于 GH4169 的有效性进行了研究，结果表明该模型可有效描述 GH4169 在多种应变率之下的应力应变关系，因此本文采用该模型描述材料在喷丸工艺过程高应变率状态下的应力应变关系^[6]。

J-C 模型表达式为：

$$\sigma_{eq} = [A + B(\epsilon)]^n [1 + C \ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})] [1 - T^{*m}] \quad (3-1)$$

其中 σ_{eq} 为有效应力，A、B、C 和 m 为材料常数，n 是加工硬化系数， ϵ/ϵ_0 为标准化后的有效塑性应变率， T^* 定义为：

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

其中 T_{melt} 为熔点， T_r 为室温， $T_r=298K$ 。因此本文所采用的 GH4169 具体模型参数如表 3-1 所示。

表 3-1 J-C 模型参数表

材料	E GPa	ν	ρ Kg/m ³	A MPa	B MPa	C	m	n	T _m K	ϵ_0
GH4169	212.5	0.321	8240	1241	622	0.0134	1.05	0.6522	1300	1

具体参数设置如图 3-6 所示。

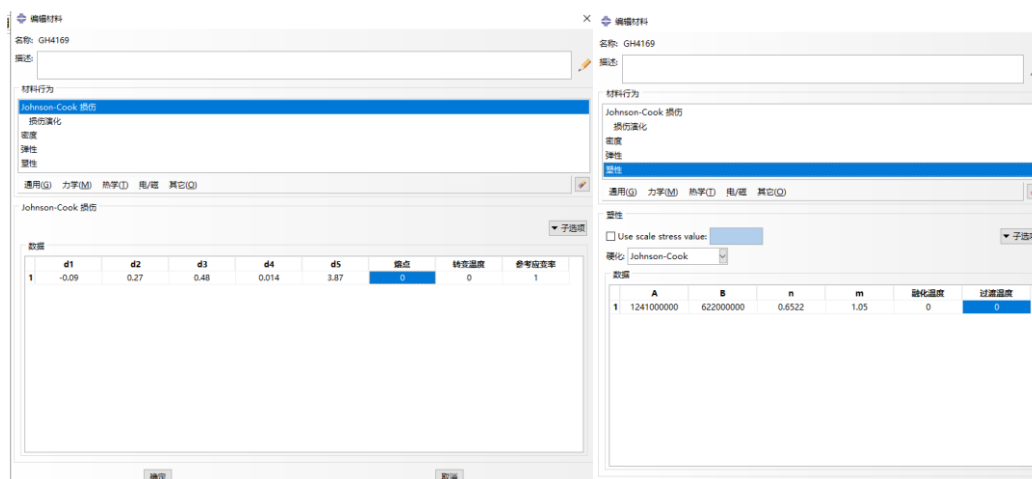


图 3-6 J-C 模型参数

(2) 建立撞针模型

根据查阅的资料显示，一般超声喷丸机器的撞针直径在 1~3mm 之间，其撞击效果与球形弹丸撞击效果近似，因此，本文采用半径为 1.2mm 的弹丸模型进行喷丸过程模拟实验，此次模拟均用单根撞针。

由于本人计算机算力有限，为减少计算量与计算时间，因此在本文的喷丸模拟中，将撞针设置为解析刚体，以达到减少计算时间的目的。

在模型树中选择部件，新建一个名为 DZ-12（单撞针半径 1.2mm）的解析刚性部件，部件属性结果如图 3-7 所示。

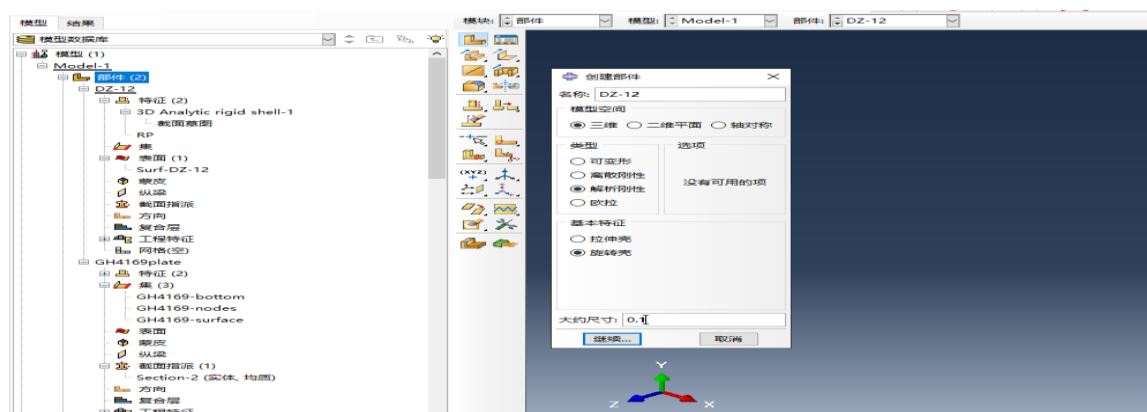


图 3-7 建立单撞针 DZ-12 模型

创建完成后开始绘制 DZ-12 模型草图，其外形尺寸如下：弹丸半径 1.2mm，具体情况如图 3-8 所示。

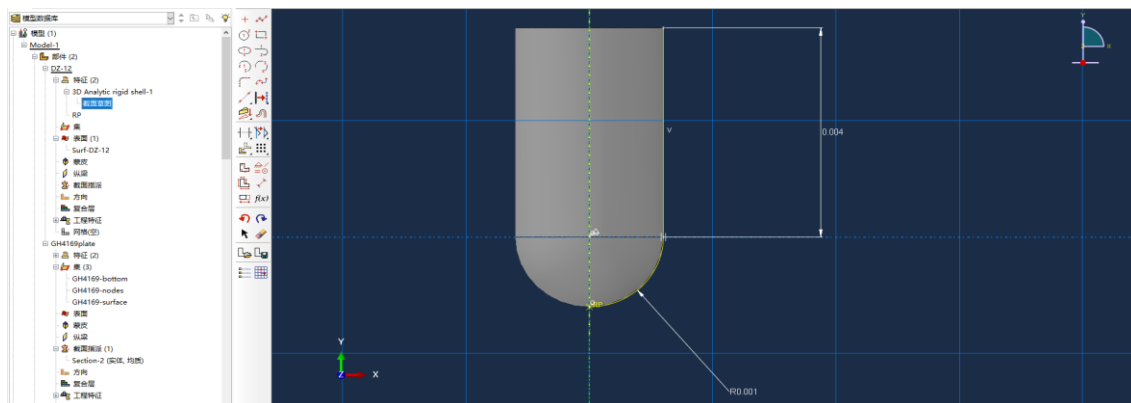


图 3-8 绘制单撞针 DZ-12 草图

点击完成后生成一个半径为 1.2 的旋转壳，如图 3-9 所示。

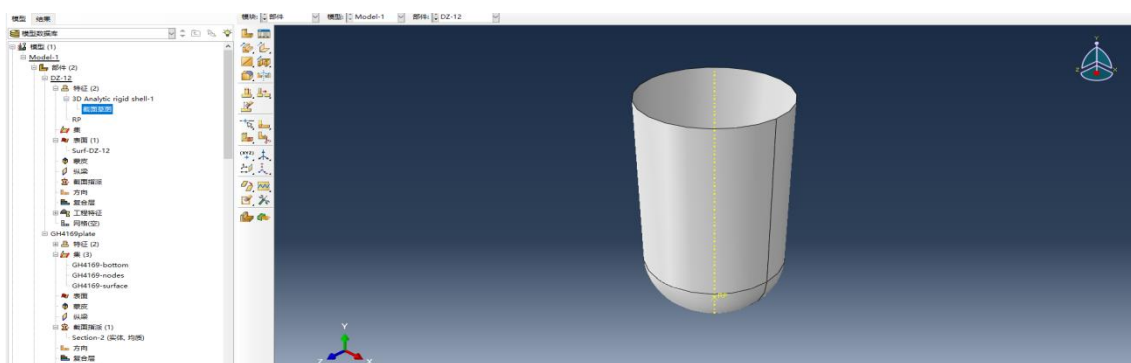


图 3-9 单撞针 DZ-12 模型图

(3) 划分网格

在 ABAQUS 软件中，划分网格是一项非常重要的命令模块，网格划分质量的好坏直接影响了整个模型最后的运算结果和云图显示效果。

在网格模块中打开全局种子命令，种子尺寸属性输入 0.01，如图 3-10 所示。

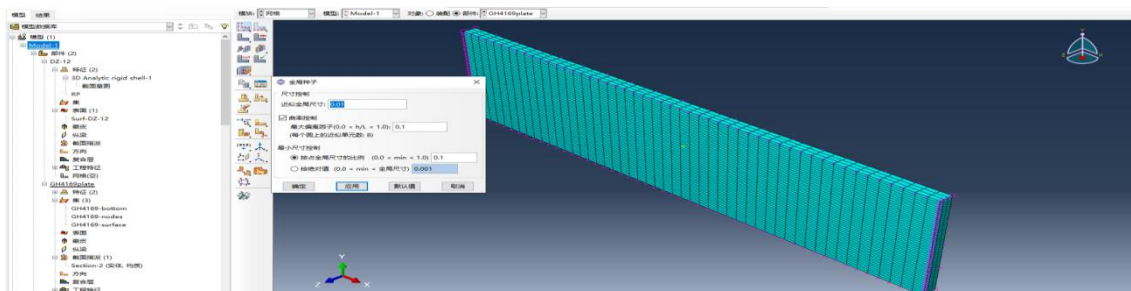


图 3-10 GH4169plate 全局种子属性

应用后生成网格，其网格生成结果如图 3-11 所示。

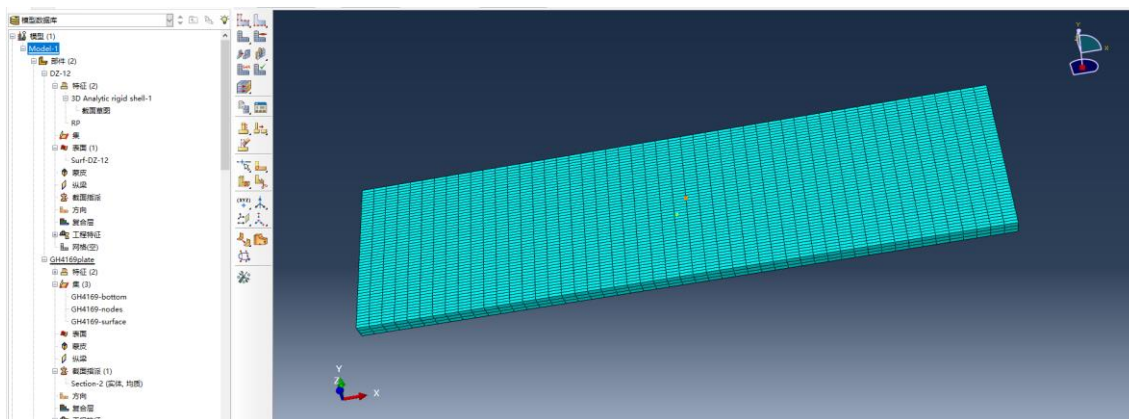


图 3-11 GH4169plate 网格生成结果

(4) 检查网格

Abaqus 软件中非常重要的一项命令就是检查网格，其目的是为了检查划分出来的网格有没有什么缺陷以及错误。

为 GH4169plate 模型检查网格，其结果如图 3-12 所示。

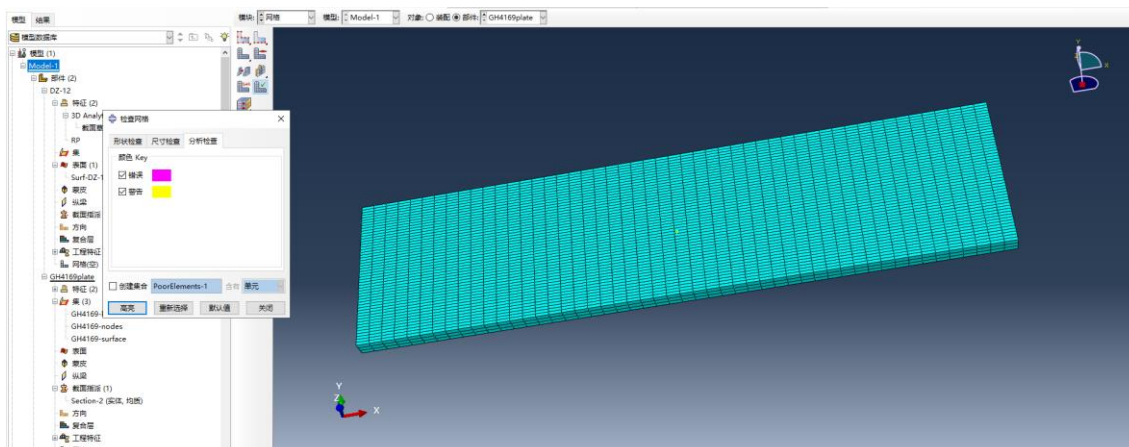


图 3-12 GH4169plate 检查网格结果

在网格检查弹窗中，其黄色高亮部分为警告显示，属于可接受的检查结果；粉红色部分为错误显示，这时就需要对网格重新划分以达到没有错误显示的目的。

(5) 装配

打开装配模块，选择 Create Instance 命令，将弹丸 DZ-12 与 GH4169plate 装配到一起，装配结果如图 3-13 所示。

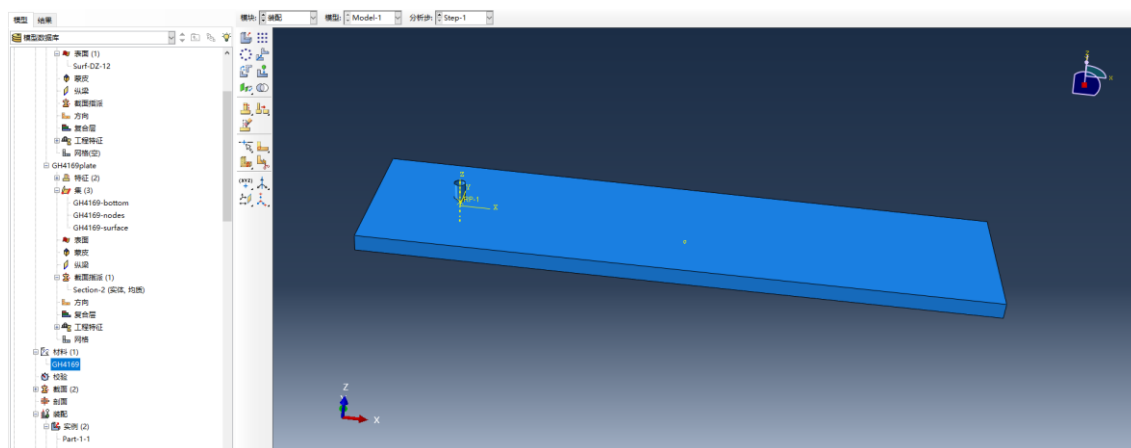


图 3-13 DW12 与 GH4169plate 装配结果

3.4 本章小结

在 GH4169 试件模型建立时，由于试件是受喷件，会产生一定的变形。因此，在选择模型属性时需要选择“三维-可变形”属性，以达到喷丸强化后能够看到相应变化的效果。建立撞针时，由于撞针本身具有相当高的材料强度，在模型属性选择时通过“三维-解析刚性”来设置撞针的模型属性，从而减少计算量以及不需要考虑撞针的变形情况。

建立材料属性时，需要根据所查询到的材料参数进行设置，如果有特殊要求时，可以在添加材料属性界面进行设置，以得到理想的材料参数。

在网格设置时，为得到理想的应力分布云图，在网格的精细度方面需要更高的要求。以本文 GH4169 模型试件为例，其外形尺寸为 140*35*3.6 (mm)，在网格的划分上，需要将其划分为 1mm 的网格精细度，以得到理想的应力分布云图。

在装配 GH4169 试件与撞针模型时，需要先确定两者的空间关系以及两者之间有无干涉等情况，为下一步创建模拟过程建立前提条件。

第四章 喷丸过程的有限元模拟

4.1 喷丸过程有限元模拟

在 ABAQUS 软件中, 分析步模块是关系到整个数值模型以及最终结果云图的最重要的一个模块。因此, 分析步参数的设置直接影响了最终结果云图的呈现。其中包括: 基本信息、增量、质量缩放和其他四个部分。基本信息中涉及到的参数为时间长度, 这一参数的作用是整个模型的模拟时间, 通过改变这一参数来控制模拟所需的时长。在质量缩放这一部分中, 可以通过改变目标时间增量步来调节模拟的计算精度, 一般设置为 $10e-5$ 。增量这一部分在模拟过程中通常为默认, 如果没有特殊需求可以不用改变其参数。

(1) 创建分析步

打开分析步模块, 创建分析步, 数据类型选择【动力, 显示】, 时间选项及其他具体属性如图 4-1 所示。

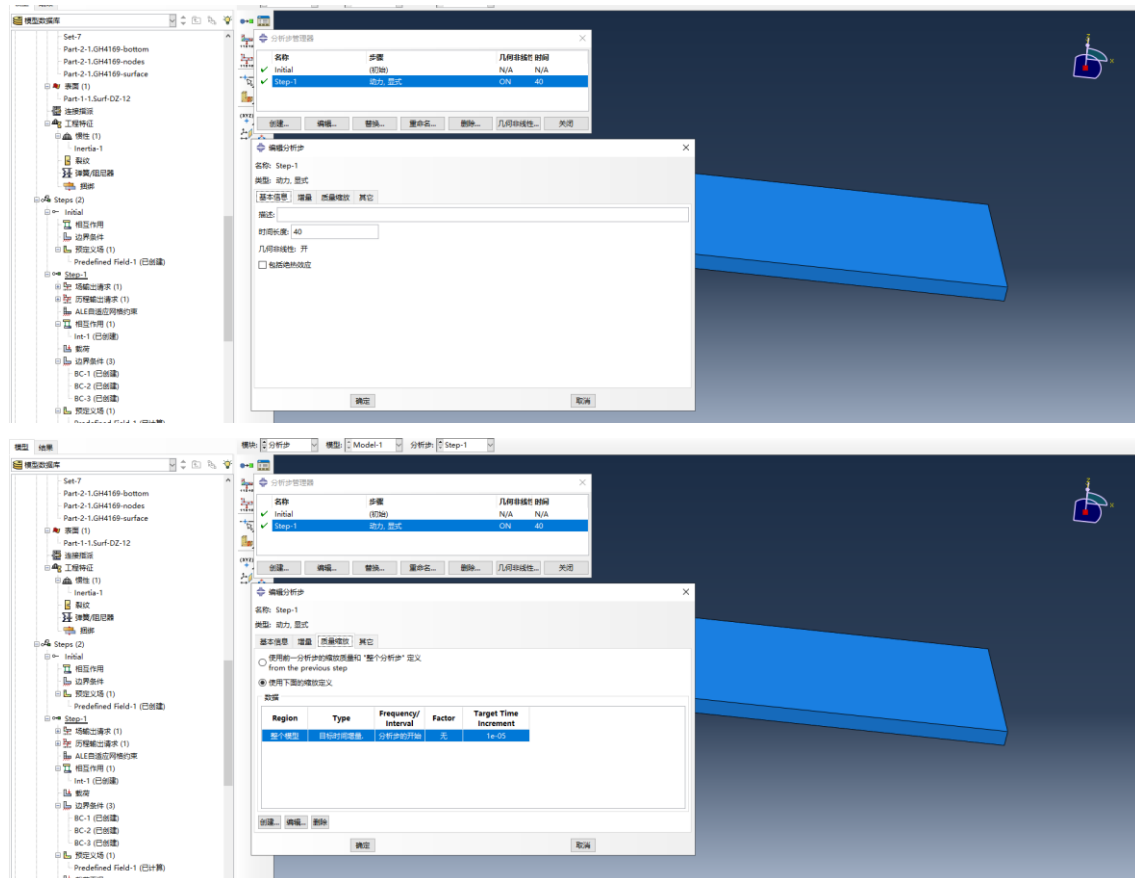


图 4-1 创建分析步

通常场输出请求以及历程输出请求采用默认设置即可，由于本文所采用的 J-C 模型以及需要观察的云图参数有一定要求，因此需要改变场输出请求中几个参数变量以达到预期的效果。

在分析步模块中，点击创建场输出命令，其具体参数如图 4-2 所示。

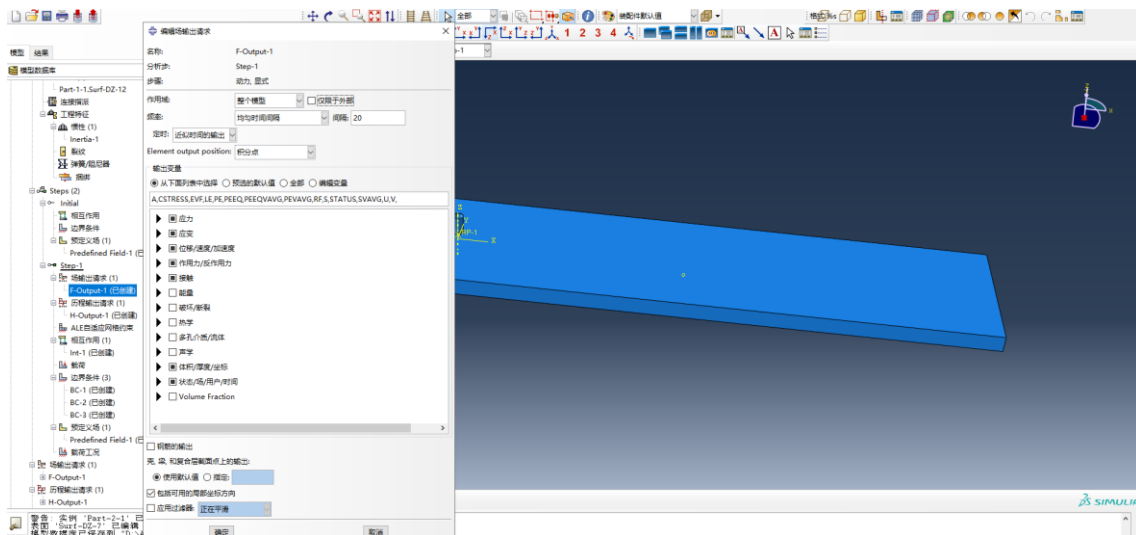


图 4-2 场输出请求参数

在分析步模块中点击创建历程输出命令，其具体参数如图 4-3 所示。

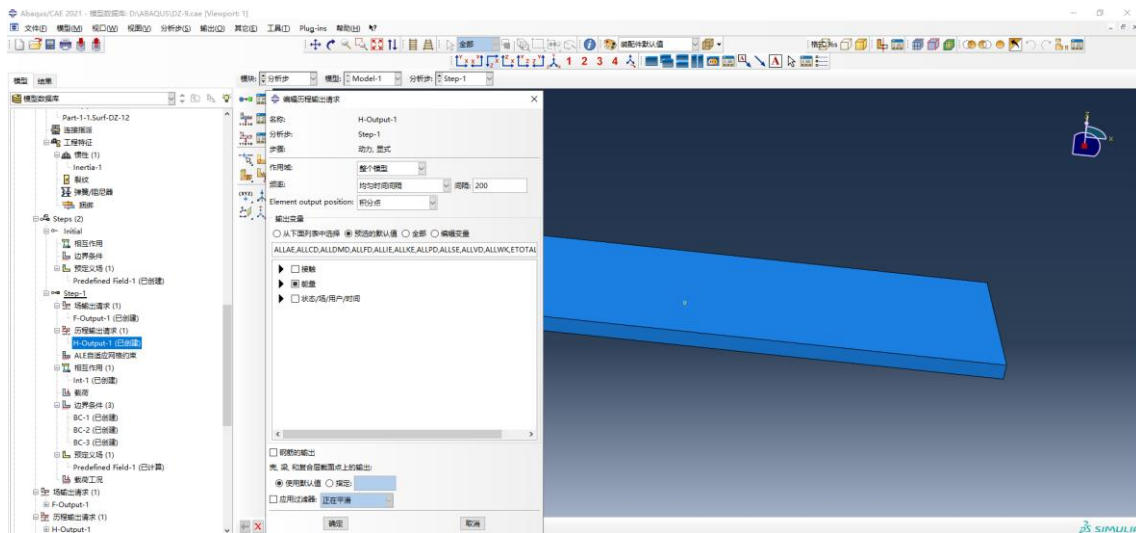


图 4-3 历程输出请求参数

(2) 创建相互作用条件

在创建相互作用之前需要确定相互作用属性 **IntProp-1**，添加切向行为与法向行为，其中切向行为摩擦公式参数调整为罚，摩擦系数设置为 0.2，其他参数均为默认，具体参数如图 4-4 所示。

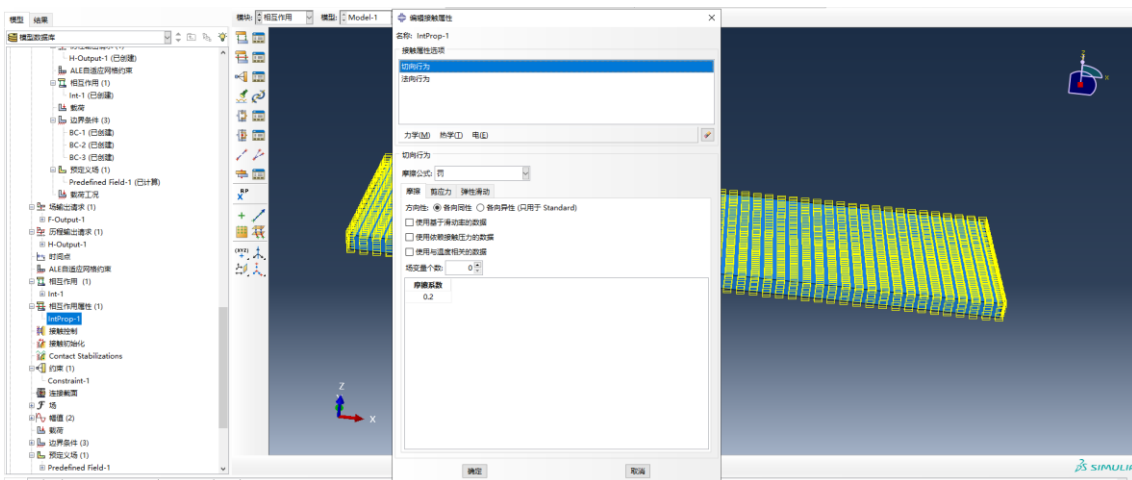


图 4-4 相互作用属性

在分析步模块树中，创建 initial 步骤，其中包括相互作用、边界条件以及预定义场三个子模块，通常在此模块中设置初始条件，初始时刻的边界条件以及初始时刻的相互作用。下一步进行相互作用条件的创建，其具体参数如下：接触类型选择表面与表面接触（explicit）、分析步为：Step-1、第一表面选择 Surf-DZ-Z12 表面、第二表面选择结点区域 GH4165-nodes，相互作用属性选择之前所创建 IntProp-1，其余选项均为默认，如图 4-6 所示。

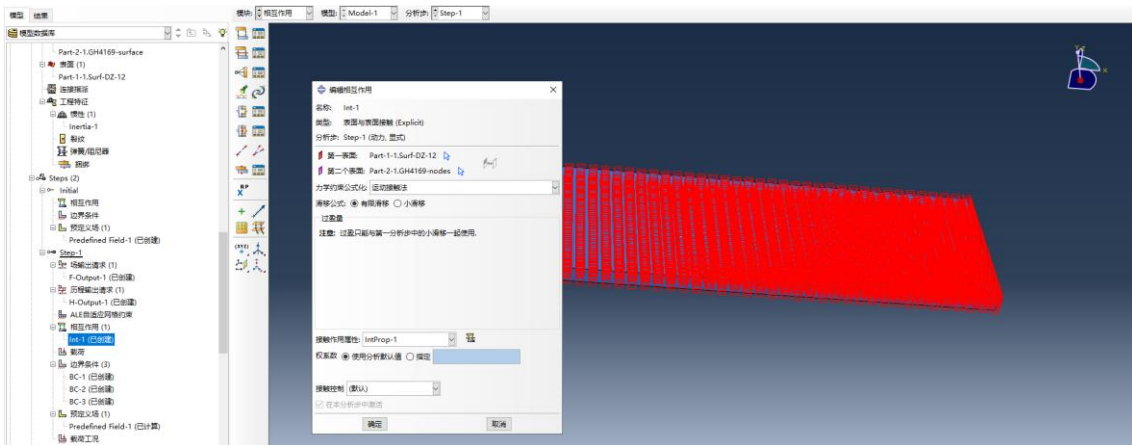


图 4-6 相互作用参数

(3) 创建边界条件

在实际喷丸实验过程中，试件是固定在地面上进行喷丸实验的，因此，需要在边界条件中将试件完全固定，以求得到与实际实验中所限制的条件一致。在载荷模块中，点击创建边界条件命令，其边界条件设置参数结果如图 4-7 所示。

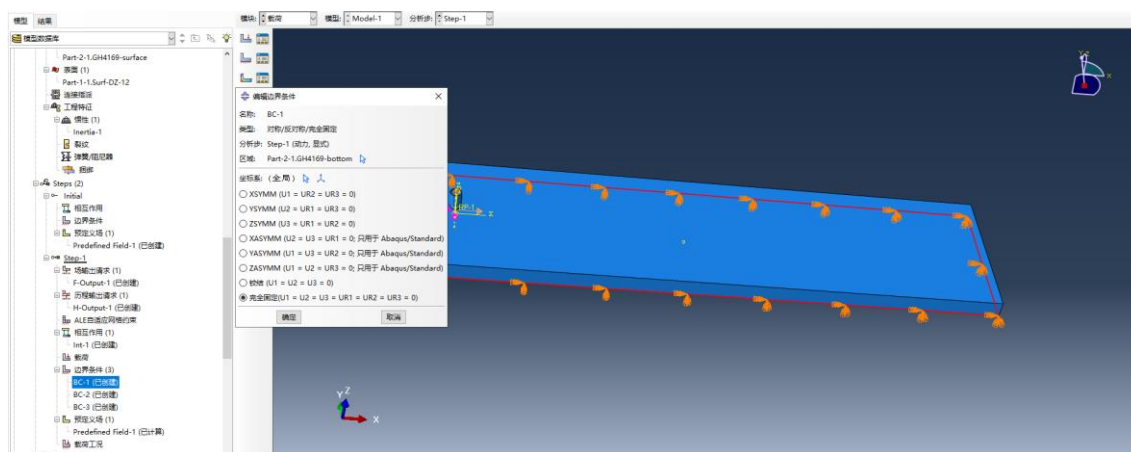


图 4-7 GH4169plate 底面完全固定

喷丸的丸粒所涉及到的边界条件包括【速度/角速度】、【位移/转角】两个，其具体参数设定如图 4-8 所示。

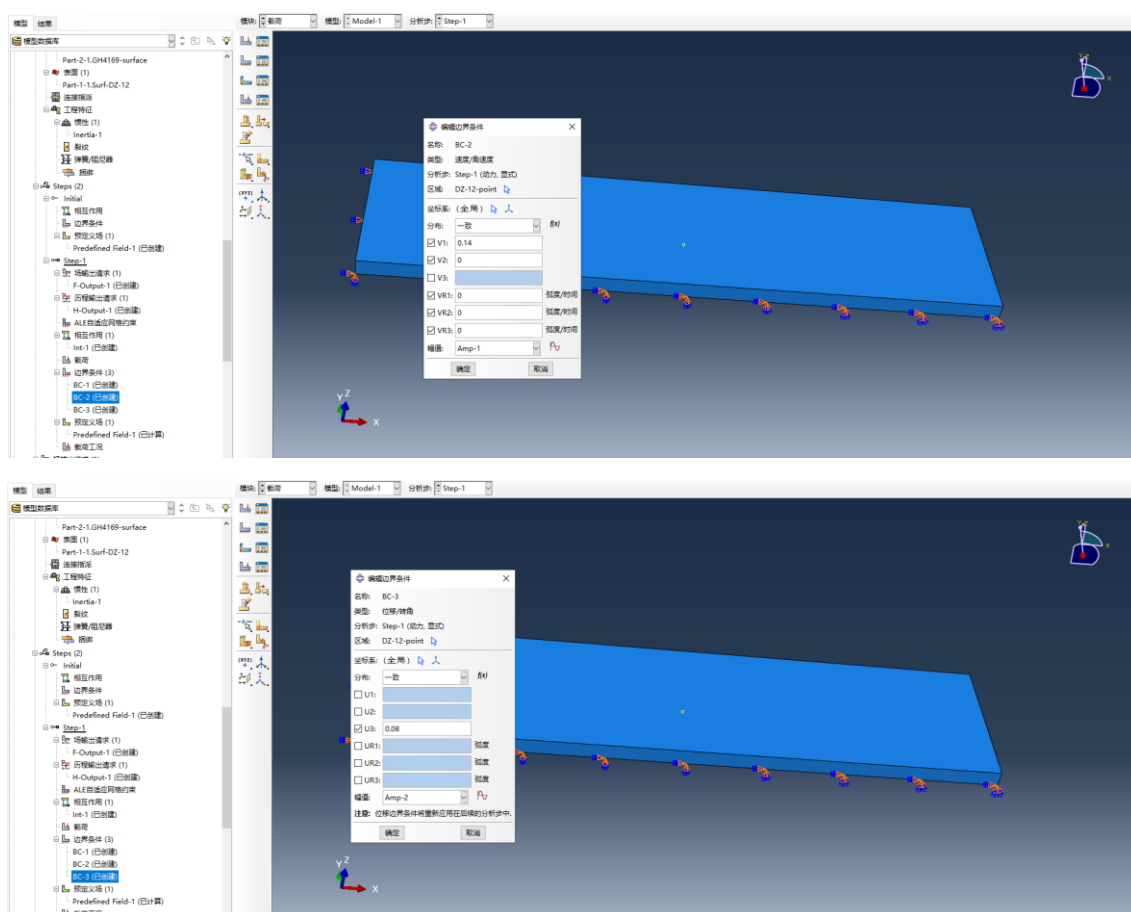


图 4-8 DZ-12 边界条件参数

(4) 创建预定场

预定场的设定是本文在喷丸模拟实验中最重要的一项参数设定，它能够定

此次喷丸模拟实验的喷丸速度，其参数的设定直接影响到了模拟分析结果的体现，在分析步模块中，点击创建预定义场命令，其数据类型选择速度，如图 4-9 所示。

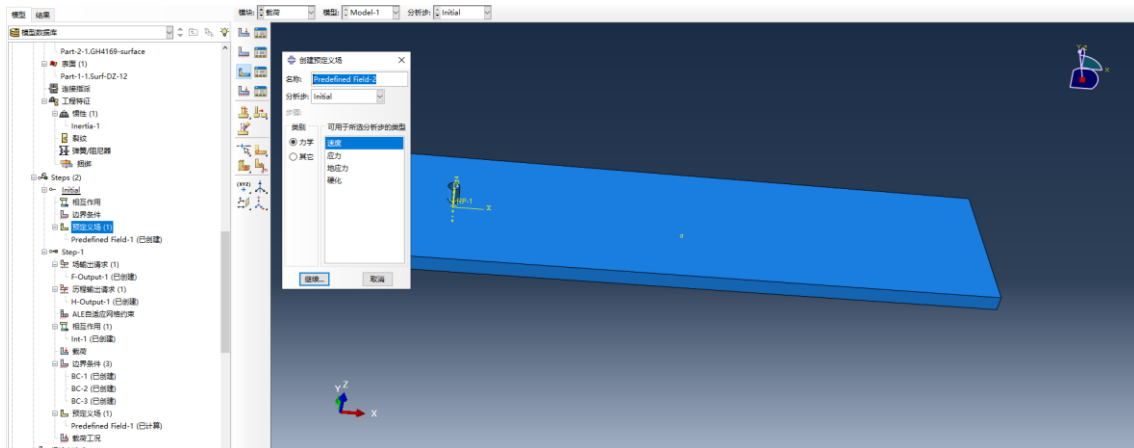


图 4-9 创建预定义场

创建完成后，即可修改所需要的参数，在喷丸速度很小时（30m/s），其表面产生的应力分布不明显，当喷丸速度逐渐增大到 60m/s 时，其表面的应力分布情况能够基本得到理想的应力分布情况，当喷丸速度增大到 120m/s 时，由于速度过大 GH4169 试件产生了剧烈的变形，导致其表面应力分布情况也产生了骤升骤降的情况。因此，本文中模拟喷丸的速度选择分别为 60m/s、70m/s、90m/s，以此反映在不同喷丸速度的情况下喷丸的状态，其具体设定在 ABAQUS 中体现如图 4-10 所示。

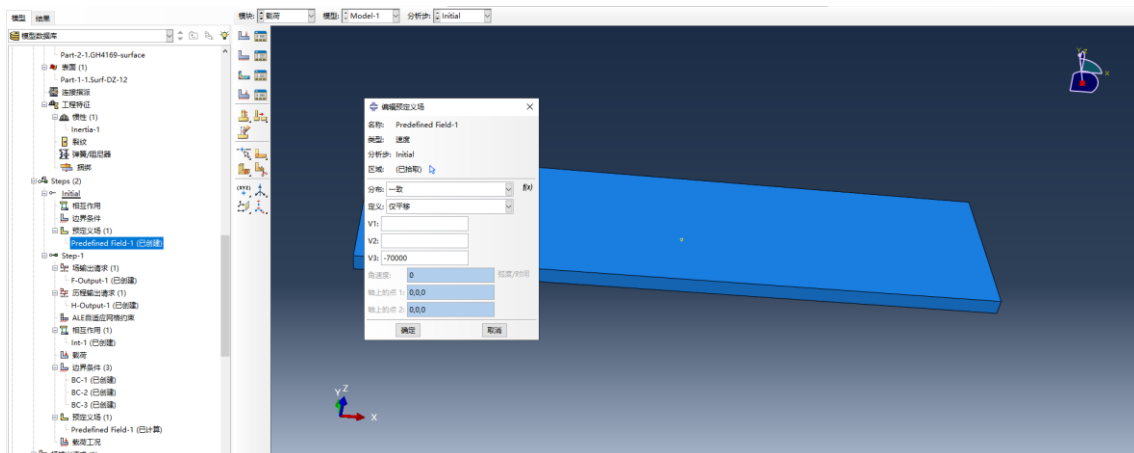


图 4-10 预定义场参数设定

(5) 创建作业

以上步骤均已完成后即可选择最后一步作业操作，在作业模块中，点击创建作业命令，作业名称分别 speed60m、speed70m、speed90m，其余选项均默认，如图

4-11 所示

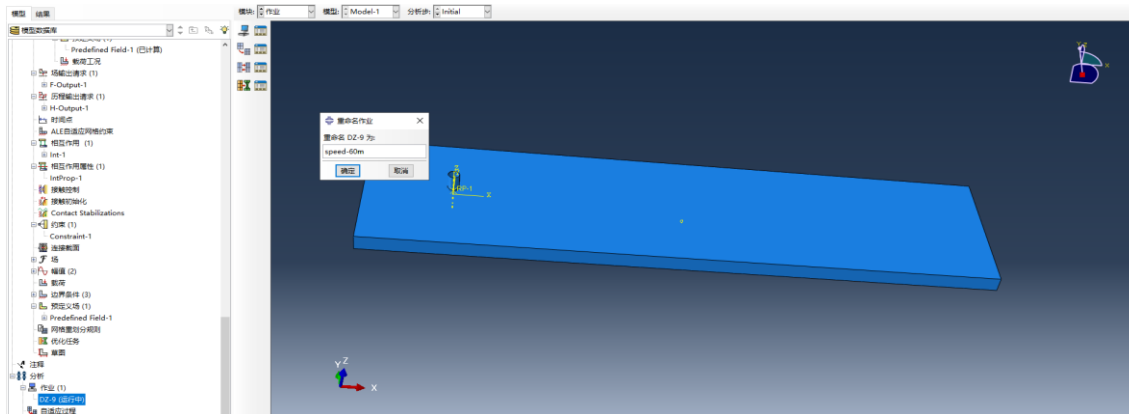


图 4-11 创建作业

完成作业创建后，在编辑作业弹窗中选择所需要的参数，如图 4-12 所示。

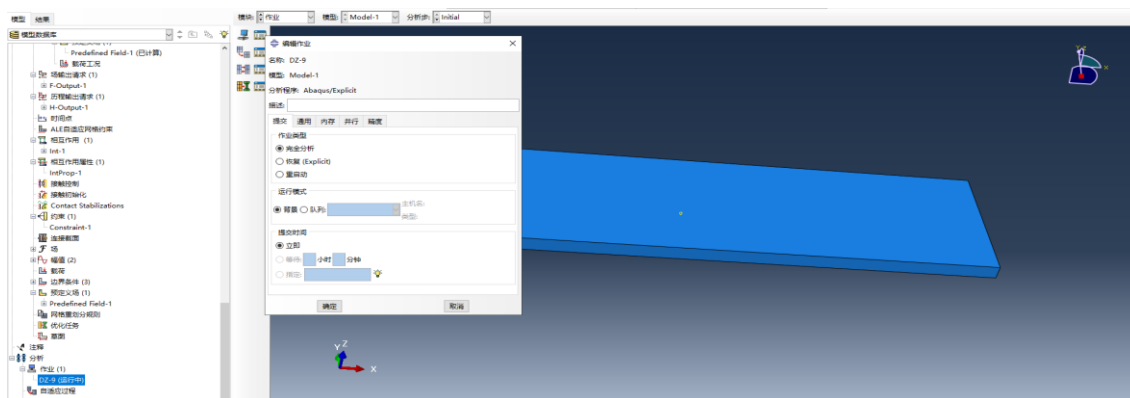


图 4-12 作业参数选择

(6) 提交作业

在创建完作业之后即可提交作业，在作业运行过程中，可以通过监控来观察作业运行的情况以及是否出现错误或者运行不了的情况，如图 4-13 所示。

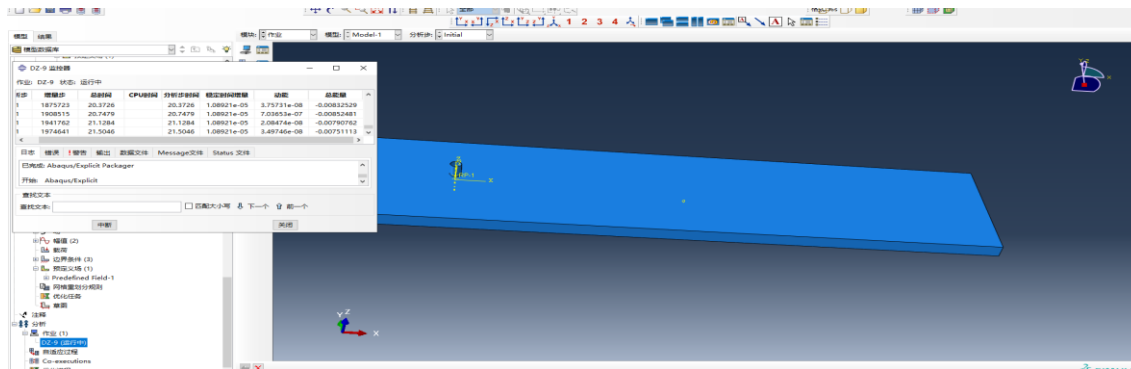


图 4-13 作业监控

4.2 喷丸模拟应力计算结果

作业计算分析完成后，打开可视化界面，观察喷丸模拟的应力分布，图 4-14 到 4-17 为速度在 70m/s 时 S22 平面喷丸过程进行到 10s、20s、30s、40s 时的应力分布情况。

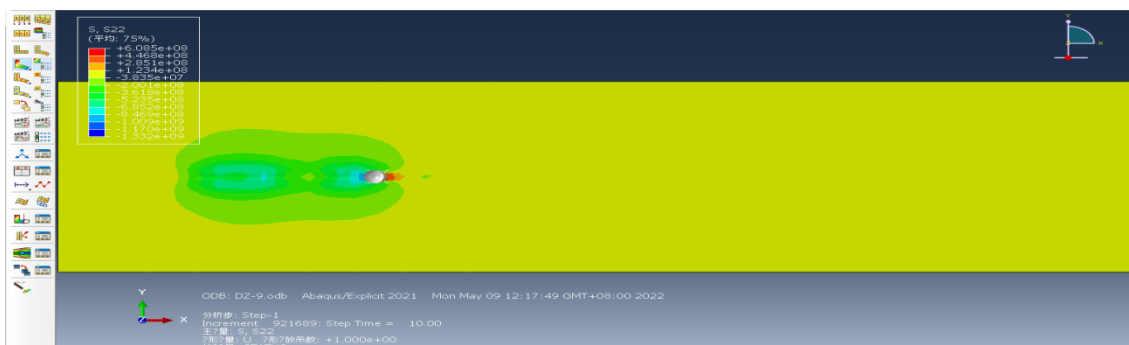


图 4-14 S22 平面喷丸过程 10s 时应力分布

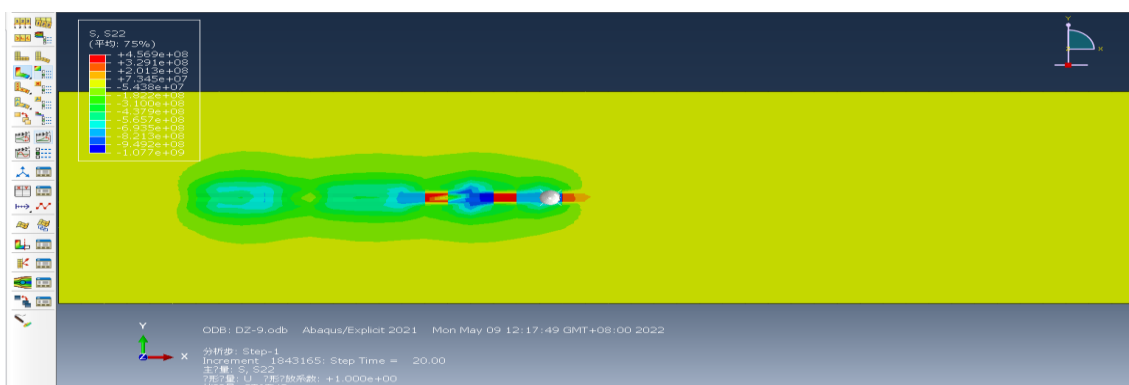


图 4-15 S22 平面喷丸过程 20s 时应力分布

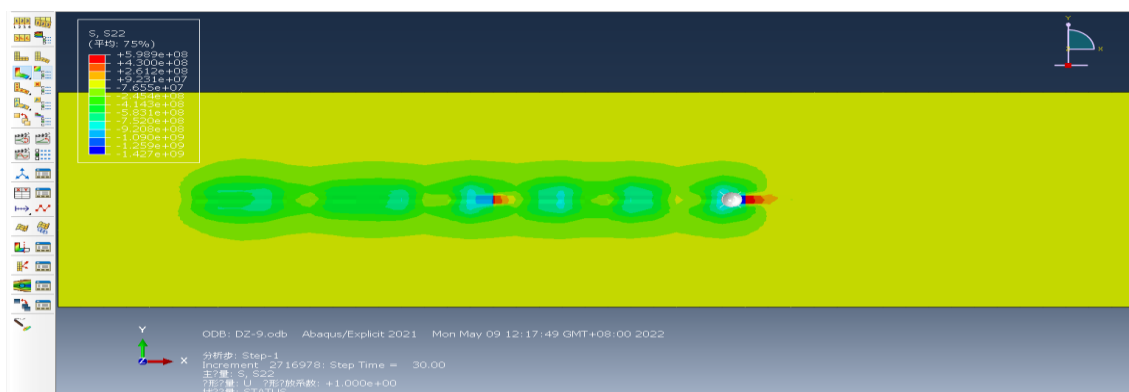


图 4-16 S22 平面喷丸过程 30s 时应力分布

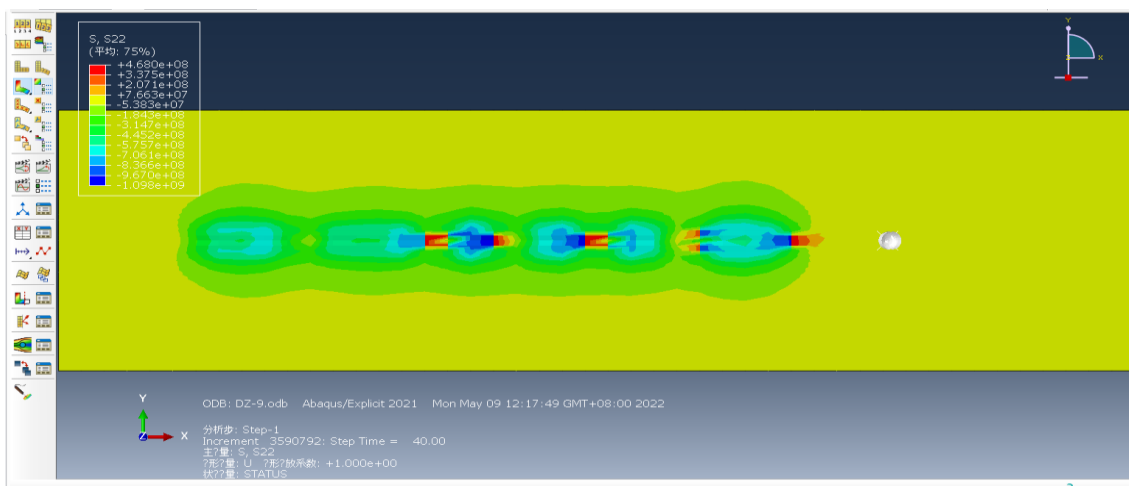


图 4-17 S22 平面向喷丸过程 40s 时应力分布

通过对比四张不同时刻的应力分布图，可以看出在 S22 方向喷丸速度参数为 70m/s 时，撞针与试件接触时压应力区间为-706MPa~-836MPa，而在撞击周边区域压应力分布基本稳定在-575MPa 到-706MPa 这一区间。

4.3 喷丸模拟位移变形计算结果

图 4-18 为喷丸速度 70m/s 时，在 U3 方向所产生的位移变形情况。在图 4-19 中可以观察到，GH4169plate 模型与撞针 DZ-12 接触的中心位置所产生的位移量最大约为-0.052mm，撞针与模型接触周边所产生的最大位移量约为-0.012mm。并且在撞针与模型接触的中心位置产生了向模型内部传递的位移变形。

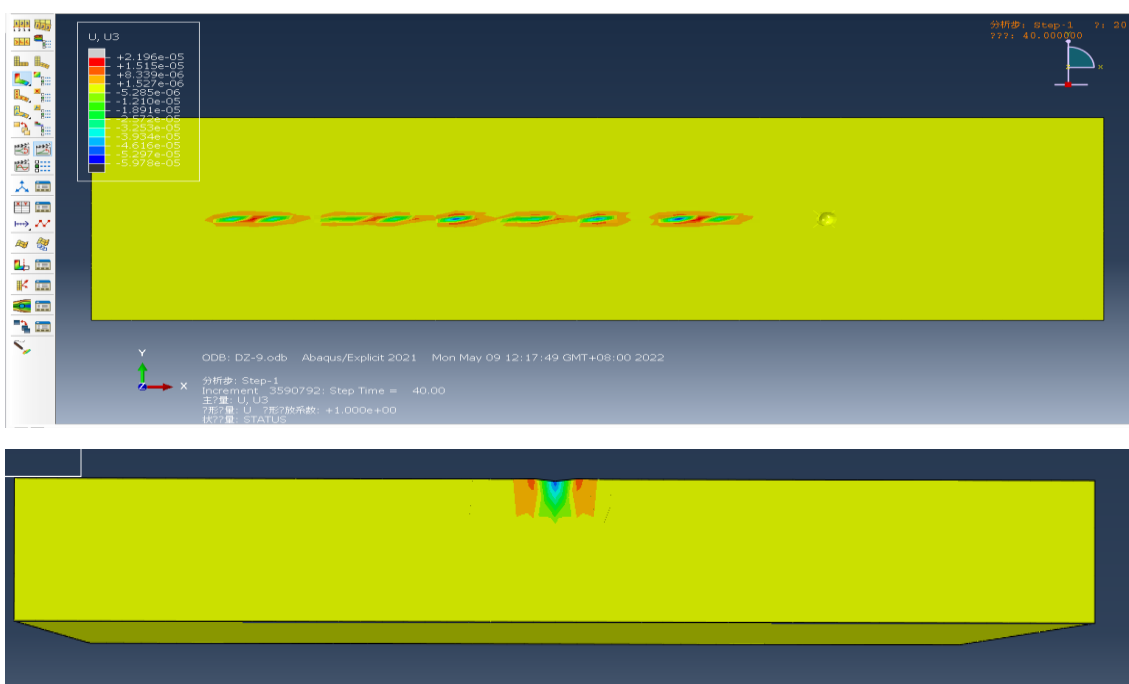


图 4-18 U3 位移分布图

4.4 不同喷丸速度应力场对比

弹丸速度是对喷丸强度影响最直接的因素^[8]。为了研究不同喷丸速度下对 GH4169 镍基高温合金材料表面应力场分布情况，本文分别建立了三种不同喷丸参数模型。图 4-19 到 4-21 分别为喷丸速度 60m/s、70m/s、90m/s 三种不同参数下在 S22 方向、分析步时间 40s 时的应力分布情况。

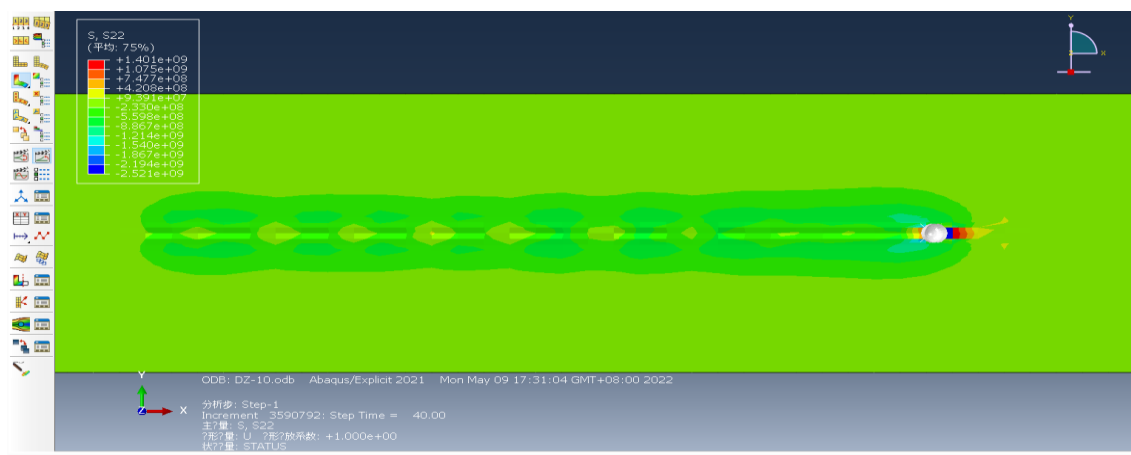


图 4-19 喷丸速度 60m/s，分析步时间 40s 时应力分布

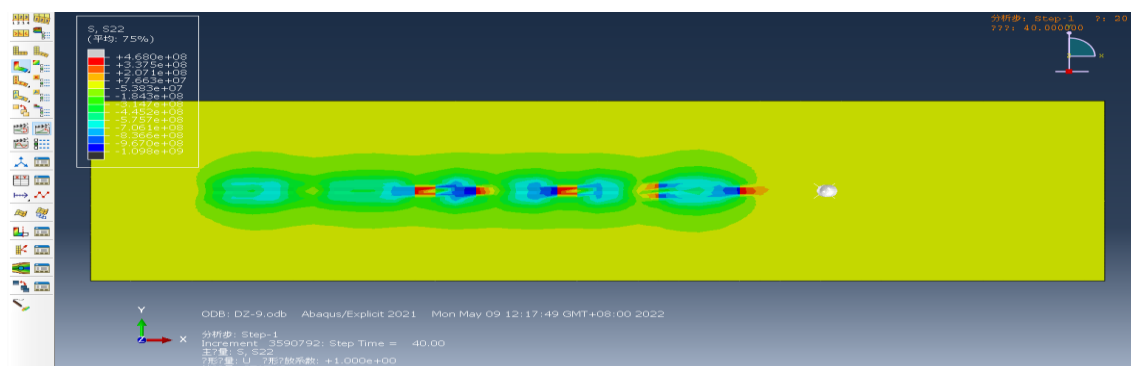


图 4-20 喷丸速度 70m/s，分析步时间 40s 时应力分布

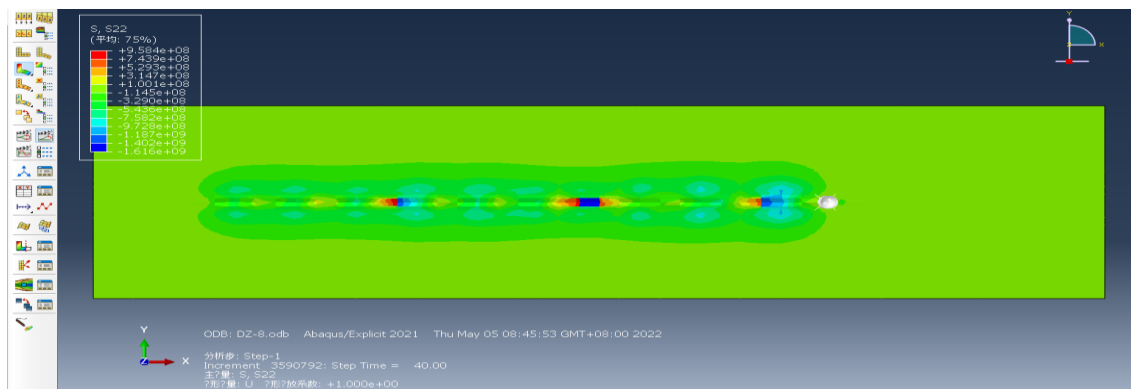


图 4-21 喷丸速度 90m/s，分析步时间 40s 时应力分布

通过对比以上三张应力分布图可以发现，随着喷丸速度的增加，其产生的最大压应力也随之增加。在喷丸速度为 60m/s 时，其撞击区域最大压应力区间为-559MPa~-886MPa；在喷丸速度为 70m/s 时，其撞击区域最大压应力区间-706MPa~-836MPa；在喷丸速度为 90m/s 时，其撞击区域压应力区间-758MPa~-972MPa。最大压应力区间产生位置均为 GH4169plate 模型与撞针接触的位置。

4.4 不同喷丸速度应力曲线对比

在可视化窗口找到“路径”选项，创建一个新的路径 DZ-12-S22，类型为节点列表，在“在视口选择集”中选择“添加于前”。然后在喷丸方向的一条直线路径上依次选择节点。接着找到“创建 X、Y 数据”，以路径方式创建，继续后在“帧”处选择一个分析步时间点作为绘制 X、Y 数据的依据，再从场输出中选择“S”-“S22”，最后点击绘制即有如图 4-22 为喷丸速度 60m/s，S22 方向的应力分布曲线图。图 4-22 到 4-24 分别为同一路径、喷丸速度 60m/s、70m/s 和 90m/s 时，S22 方向的应力分布曲线图。

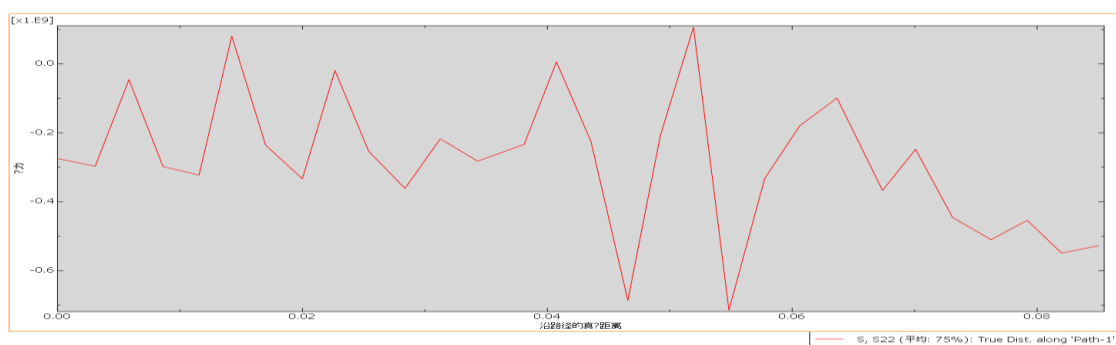


图 4-22 喷丸速度 60m/s，S22 平面的应力分布曲线

由图 4-22 可以看到在整个喷丸模拟的过程中，随着 GH4169 镍基高温合金模型与撞针不断接触，其与撞针接触位置的最大压应力约为-720MPa；撞击产生的周边区域的压应力约为-380MPa；而远离撞击中心位置所产生的最大拉应力约为 120Mpa。

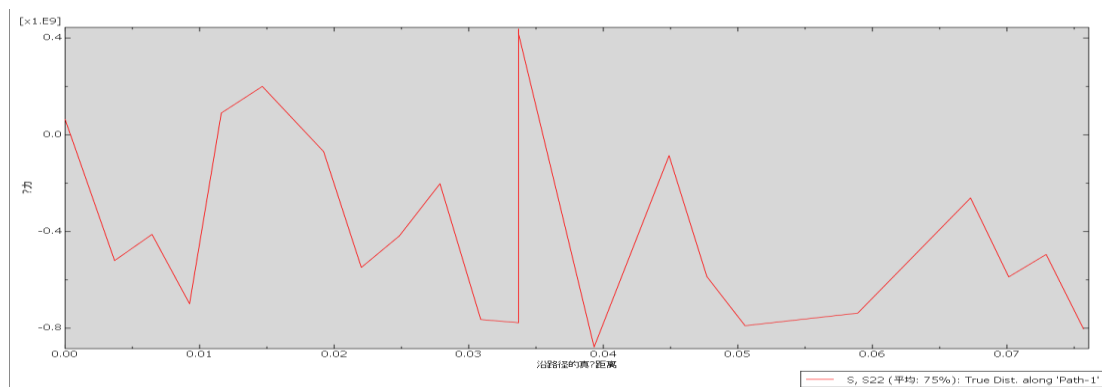


图 4-23 喷丸速度 70m/s, S22 平面的应力分布曲线

由图 4-23 可以看到在整个喷丸模拟的过程中, 随着 GH4169 镍基高温合金模型与撞针不断接触, 其与撞针接触位置的最大压应力约为-870MPa; 撞击产生的周边区域的压应力约为-780MPa; 而远离撞击中心位置所产生的最大拉应力约为 410Mpa。

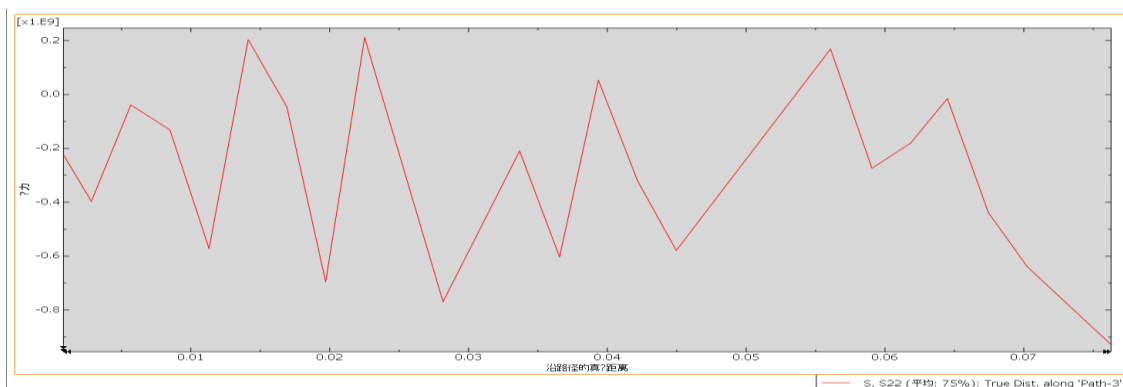


图 4-24 喷丸速度 90m/s, S22 平面的应力分布曲线

由图 4-24 可以看到在整个喷丸模拟的过程中, 随着 GH4169 镍基高温合金模型与撞针不断接触, 其与撞针接触位置的最大压应力约为-920MPa; 撞击产生的周边区域的压应力约为-800MPa; 而远离撞击中心位置所产生的最大拉应力约为 200Mpa。

4.5 本章小结

在整个喷丸模拟的分析过程中的喷丸速度选择上, 由于工业喷丸速度是由 20m/s~150m/s, 因此在确定本次模拟所需的喷丸速度时, 将喷丸速度自 20m/s 的速度逐渐增加到 150m/s, 验证哪种喷丸速度是本次模拟所需的。在喷丸速度很小时 (30m/s), 其表面产生的应力分布不明显, 当喷丸速度逐渐增大到 60m/s 时, 其表面的应力分布情况能够基本得到理想的应力分布情况, 当喷丸速度增大到

120m/s 时, 由于速度过大 GH4169 试件产生了剧烈的变形, 导致其表面应力分布情况也产生了骤升骤降的情况。因此, 本文将喷丸速度确定为 60m/s、70m/s 和 90m/s 三种不同的喷丸速度。

4.6 结论

通过 ABAQUS 软件对 GH4169 喷丸过程进行模拟, 利用 ABAQUS/Explicit 模块分析出喷丸模拟结果与应力分布情况, 最后得出应力分布云图、位移分布云图以及应力产生曲线图。

(1) 由应力分布云图分析可知: 在 S22 方向喷丸速度参数为 60m/s 时, 撞针与试件接触时压应力区间约为-559MPa~-886MPa, 而在撞击周边区域应力分布基本稳定在-233MPa 到-559MPa 这一区间。在喷丸速度参数为 70m/s 时, 撞针与试件接触时压应力区间为-706MPa~-836MPa, 而在撞击周边区域应力分布基本稳定在-575MPa 到-706MPa 这一区间; 在喷丸速度参数为 90m/s 时, 撞针与试件接触时压应力区间为-758MPa~-972MPa, 而在撞击周边区域应力分布基本稳定在-543MPa 到-758MPa 这一区间。最大压应力产生位置均为 GH4169plate 模型与撞针接触的中心位置。

(2) 由位移分布云图分析可知: 喷丸速度 60m/s 时, 在图 4-19 中可以观察到, GH4169plate 模型与撞针 DZ-12 接触的中心位置所产生的位移量最大约为-0.052mm, 撞针与模型接触周边所产生的最大位移量约为-0.012mm。并且在撞针与模型接触的中心位置产生了向模型内部传递的位移变形。

由应力分布曲线图分析可知: 在喷丸速度参数为 60m/s 时, 随着 GH4169 镍基高温合金模型与撞针不断接触, 其与撞针接触位置的最大压应力约为-720MPa; 撞击周边区域的压应力约为-380MPa; 而远离撞击中心位置所产生的最大拉应力约为 120Mpa。在喷丸速度参数为 70m/s 时, 随着 GH4169 镍基高温合金模型与撞针不断接触, 其与撞针接触位置的最大压应力约为-870MPa; 撞击周边区域的压应力约为-780MPa; 而远离撞击中心位置所产生的最大拉应力约为 410Mpa。在喷丸速度参数为 90m/s 时, 随着 GH4169 镍基高温合金模型与撞针不断接触, 其与撞针接触位置的最大压应力约为-920MPa; 撞击周边区域的压应力约为-800MPa; 而远离撞击中心位置所产生的最大拉应力约为 200Mpa。

最后得出, 随着喷丸速度的增大, GH4169 镍基合金表面应力越大。应力最大值发生在撞针与 GH4169 镍基合金表面接触时, 随后趋于稳定。与喷丸作用方向一致时, 应力向 GH4169 镍基合金试件内部传递, 与喷丸移动方向垂直时, 应力向移动方向垂直两侧传递。位移变化最大的位置与撞针和 GH4169 镍基合金表面接触位置基本一致。

4.7 总结与展望

在本文对 GH4169 镍基合金进行喷丸模拟的过程中发现，其材料属性可以设置比较理想的参数，但与实际应用中还存在一定的差异，并不能够完全反映在实际应用中所喷丸的试件情况。只能够给实际的喷丸试件进行一定的参考与补充，相较于超声喷丸与试件接触所产生的复杂的应力情况，模拟只能够反映出一种特定的喷丸情况。

在未来几十年中，数值模拟对实际应用中的喷丸处理会起到愈来愈重要的作用，以目前数值模拟软件的发展来看，未来的数值模拟软件一定可以做到对某一项实际应用的实验进行完全模拟，能够对某一项实验起到至关重要的作用。

参考文献

- [1] 张正.基于喷丸残余应力场的疲劳裂纹扩展的数值模拟[D].浙江理工大学,2013.
 - [2] 王欣,云辉,付书红,等.喷丸强度对 TC17 及 GH4169 合金表面完整性和高温疲劳性能的影响[J].金属热处理,2018,43(1):67-71.
 - [3] 李丹阳,殷凤仕,王晓明,朱胜,韩国峰.镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势[J].表面技术,2020,49(08):105-122.
 - [4] 尚建勤,曾元松.喷丸成形技术及未来发展与思考[J].航空制造技术,2010(16):26-29.
 - [5] 鲜鹏,李军.喷丸技术的发展与研究[J].金属世界,2020(01):32-36.
 - [6] 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.
 - [7] P.J.Arrazola,A.Kortabarria,A.Madariagaetc.,On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy:Experiments and predictions with finite element simulation[J],Simulation Modelling Practice and Theory,2014,41,87-103
 - [8] 王延忠,李菲,陈燕燕,等.TC4 喷丸强化仿真与试验.北京航空航天大学学报,2019,45(9):1723-1731.
 - [9] 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.
 - [10] 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[2022-05-07].
 - [11] 蔡晋,KiplagatCollins Cherutich,李威,师俊东,林爽.超声喷丸 FGH97 粉末高温合金表面粗糙度试验与数值分析[J].表面技术,2021,50(06):250-257.
 - [12] Jianyue hang,Yongxin Jian,Xuzhe Zhao,Dean Meng,Fusheng Pan,Qingyou Han.The tribological behavior of a surface-nanocrystallized magnesium alloy AZ31 sheet after ultrasonic shot peening treatment[J].Journal of Magnesium and Alloys,2021,9(04):1187-1200.
 - [13] Ning Wang,Jinlong Zhu,Bai Liu,Xiancheng Zhang,Jiamin Zhang,Shantung Tu.Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process and Shot Peening on Fretting Fatigue Performance of Ti-6Al-4V[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2021,34(06):81-93.
-

致 谢

行文至此，大学四年也将在此落下帷幕，意味着我将在次结束我的大学生涯。这四年对于我来说，是意义重大的四年，在这里不仅学习了专业知识，各方面能力也得到了提升。都说人生路漫漫，我很珍惜在天津中德应用技术大学遇到的每一个恩师和帮助过我的同学们。

在论文完成之际，我要对我的指导教师宋宗贤致以最诚挚的感谢，在整个论文完成的过程中，无论是在论文的选题、整体构思和参考资料的收集方面，还是在论文的研究方法方面，我都得到了老师细致的帮助和教诲。

在完成毕业论文的过程中遇到了许多问题，包括软件的使用不熟练、参考资料的不足以及在整个模拟分析的过程中所遇到的难点，通过宋宗贤老师与同学们的帮助，最终一一解决了这些在喷丸模拟过程中产生的问题。

在此，我要向给予我帮助的宋宗贤老师与同学们表达衷心的感谢！

四年大学生涯即将结束了，回顾四年来的经历，教师们给了我们很多的指导和帮助，在此深表敬意和感谢。感谢我周围的同学和朋友，在我失意的时候给予我鼓励，在我孤独的时候，他们陪伴我同行，让我感到了这个大家庭的温暖，愿我们的友谊长存。感谢我的父母，是他们的支持才能使我一步一步走到现在，感恩之情无以言表。

感谢天津中德应用技术大学给我提供了一个良好的学习的平台，让我在这里学习和生活了四年，让我有了一个新的开始！