

第二批国家级一流本科课程申报书

(虚拟仿真实验教学课程)

课程名称	金属层状复合材料构件的制备与 性能虚拟仿真实验
专业类代码	0804
负责人	陶杰
联系电话	13347800587
申报学校	南京航空航天大学
填表日期	2021.6.2
推荐单位	江苏省教育厅

中华人民共和国教育部制
二〇二一年六月

填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。

2.文中○为单选；□可多选。

3.团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。

4.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

5.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

6.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

1.基本情况

实验名称	金属层状复合材料构件的制备与性能虚拟仿真实验	是否曾被推荐	○是 √否
实验所属课程(可填多个)	材料科学基础		
性质	○独立实验课 √课程实验		
实验对应专业	材料科学与技术		
实验类型	○基础练习型 √综合设计型 ○研究探索型 ○其他		
虚拟仿真必要性	<input type="checkbox"/> 高危或极端环境 √高成本、高消耗 √不可逆操作 √大型综合训练		
实验语言	√中文 <input type="checkbox"/> 中文+外文字幕(语种) <input type="checkbox"/> 外文(语种)		
实验已开设期次	共 2 次： 1. 开设年月：2019 年 11 月，服务人数：185 人 2. 开设年月：2020 年 11 月，服务人数：151 人		
有效链接网址	(要求填写标准 URL 格式的实验入口网页，不允许仅为文件下载链接) http://jsczfhcl.nuaa.edu.cn		

2.教学服务团队情况

2-1 团队主要成员(含负责人, 总人数限 5 人以内)								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	承担任务
1	陶杰	1963.10	南京航空航天大学	无	教授	13347800587	taojie@nuaa.edu.cn	总体规划
2	沈一洲	1988.04	南京航空航天大学	无	副教授	15251879255	shenyizhou@nuaa.edu.cn	实验结构设计
3	陶海军	1979.07	南京航空航天大学	副院长	副教授	18761684056	taohaijun@nuaa.edu.cn	实验介绍模块设计
4	郭训忠	1981.03	南京航空航天大学	系主任	教授	13601581696	guoxunzhong@nuaa.edu.cn	材料制备模块设计
5	程诚	1991.08	南京航空航天大学	无	讲师	18810870538	c_cheng@nuaa.edu.cn	结果分析模块设计

2-2 团队其他成员						
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	承担任务
1	骆心怡	1965.06	南京航空航天大学	无	副教授	理论校核
2	刘春梅	1989.05	南京航空航天大学	无	讲师	理论分析
3	潘 蕾	1975.10	南京航空航天大学	系书记	教授	实验教学
4	王 芹	1974.10	南京航空航天大学	无	实验师	模块设计
5	陈 军	1978.06	南京先极科技有限公司	项目经理	高级工程师	项目总开发规划
6	张世军	1977.02	南京先极科技有限公司	技术总监	高级工程师	项目功能需求分析
7	夏勇胜	1985.11	南京先极科技有限公司	三维设计师	高级工程师	项目主程序编写
8	汪正兴	1990.08	南京先极科技有限公司	三维设计师	高级工程师	项目场景搭建
9	范昊旻	1979.09	南京先极科技有限公司	UI 设计师	高级工程师	项目 UI 设计
10	徐梦超	1990.03	南京先极科技有限公司	网络工程师	高级工程师	项目网络平台支持

团队总人数： 15 人 其中高校人员数量： 9 人 企业人员数量： 6 人

2-3 团队主要成员教学情况（限 500 字以内）

（近 5 年来承担该实验教学任务情况，以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况）

陶杰，南京航空航天大学二级教授/博士生导师，教学名师，材料科学与工程国家一流专业建设负责人，现任南京航空航天大学先进材料及成形技术研究所所长；江苏省复合材料学会常务副理事长；精品课程《材料科学基础》课程负责人。1998 - 2008 任材料科学与技术学院院长；近年来先后主持了中央军委科技委 173 重点项目、国家自然科学基金联合基金重点项目、江苏省重点研发计划等国家、省部级课题 30 余项，在国内外重要学术期刊发表学术论文 300 余篇，出版著作 4 部，教材 3 部，已获授权国家发明专利 35 件。在金属材料成形、复合材料等方面取得多项重要研究成果，获省部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 2 项。

2007 年入选“江苏省 333 高层次人才培养工程中青年科学技术带头人”，同年被评为“南京航空航天大学教学名师”；2018 年、2019 年分别获南京航空航天大学教学优秀一等奖、教学创新一等奖；主编的《材料科学基础》教材入选“十二五”国家规划教材，2020 年获得中国石油和化学工业优秀出版物奖一等奖，同时联合上海交通大学、北京科技大学、哈尔滨工业大学等国内 20 多所大学，牵头组织了国家级教改项目《材料科学基础》配套在线题库的建设工作。

3.实验描述

3-1 实验简介（实验的必要性及实用性，教学设计的合理性，实验系统的先进性）

1. 项目背景

南京航空航天大学是国家“双一流”学科建设高校，材料科学与工程专业入选 2019 年国家级一流本科专业建设点，2017 年通过教育部工程专业认证，2012 年被列为江苏省重点专业、品牌专业。作为材料科学与工程专业的核心主干课程，基于国家“十二五”普通高等教育本科规划教材，《材料科学基础》切实遵循“两性一度”的金课标准，以学生为中心，建立材料科学基本知识框架，开启学生内在潜力与学习动力，使学生全面了解材料科学基础中的重要概念和基本理论，包括晶体结构、晶体缺陷、扩散理论、凝固理论、相图与相变知识、晶体材料强化方法与机制、回复与再结晶机理等，建立从原子尺度、微观尺度到宏观尺度的材料成分-微观组织-性能的知识体系。

围绕着科研促进并服务于教学的思路，本项目拟开展金属层状复合材料构件的制备与性能虚拟仿真实验平台的建设。其技术基础是基于所主持的国家自然科学基金“Ti/Al 及 Ti/Al₃Ti 层状复合材料协同变形机制与界面组织演化”取得的研究成果。

我国航空航天部门的基础研究指南以及“十三五”国家科技计划明确指出，为实现我国未来武器装备自主创新与跨越发展，突破先进武器装备制造瓶颈，开展 Ti/Al₃Ti 等金属层状复合材料的制备与关键性能研究具有十分重要的意义。面向下一代高性能空天飞行器结构部件隔热、承载的双重要求，Ti/Al₃Ti 层状复合材料综合了金属间化合物 Al₃Ti 低密度、高比强度、优异的高温抗氧化性能和金属 Ti 较高的冲击功吸收能力，成为航空航天领域最具有潜力的高温结构材料。基于 Al₃Ti 的性能特点，制备 Ti/Al₃Ti 复合层板的技术途径是先采用真空热压法制备 Ti/Al 复合材料，然后通过塑性成型的方法加工出 Ti/Al 复合材料瓦楞板，随后经高温加压扩散反应制备出 Ti/Al₃Ti 瓦楞板；将该瓦楞板钎焊组装制成蜂窝芯材，随后与高强耐热面板复合制备出蜂窝夹芯隔热层板。该层状材料综合了面层和芯层的优良性能，在降低构件重量的同时，实现了承载和隔热一体化的功能。

2. 仿真实验的必要性与实用性

金属层状复合材料构件的制备与性能虚拟仿真实验在引导学生深入学习课程相关内容、培养学生综合运用知识解决实际问题的能力、提升学生操作技能等方面将发挥积极作用，具有重要的实践意义。但开展实体实验存在如下问题：

(1) 材料制备周期长，设备资源要求高：制备金属层状复合材料需要使用具有控温、定时功能的真空热压成形设备以及适用于不同制备工序的成形模具，全部制备流程需耗时数天。

(2) 实验过程安全风险大：试样制备过程中需使用强酸、强碱溶液对材料进行表面处理，同时涉及长时间、大压力、高温度的成形过程，实验人员安全防护压力大。

(3) 测试工作内容多：本实验项目涉及金属层状复合材料构件表面微观形貌观察、界面元素分布表征、界面金属间化合物相鉴别以及材料的拉伸性能、压缩性能测试等内容，逐项实施工作量大。

(4) 材料体系选择广，成形工艺参数对实验结果影响复杂：多种金属材料均可以制备层状复合材料，而成形的时间、温度、压力对材料界面形貌、元素分布以及金属间化合物相的形成具有重要的影响，实体实验条件下难以使学生充分体会工艺参数设计对实验结果影响的耦合性与复杂性。

因此，仅依靠实体实验难以完成教学内容，更无法高效达成实验教学目的。采用信息化手段和虚拟仿真技术，通过虚实结合的实验手段，针对不同的材料选择与工艺参数设计，可以实时、精准、直观地体现每一步骤的设计效果，从而极大缩短实验周期，降低实验成本，满足大量学生的教学需求。在虚拟仿真实验中提升学生自主学习能力，实现信息技术与材料工程实践教学的有机融合，提高实践教学质量。

3. 教学设计的合理性

金属层状复合材料构件的制备与性能虚拟仿真实验平台立足于《材料科学基础》课程的核心知识体系，围绕《现代测试分析技术》、《材料力学》、《材料工程实验》等多门重要课程内容，涉及晶体结构、固态相变、固体扩散、材料塑性成形、材料性能测试与分析、微观组织观察与结构表征等内容。平台将有效模

拟 Ti/Al₃Ti 瓦楞板及蜂窝的制备流程，从原始 Ti 箔和 Al 箔的选取、Ti/Al 层状复合材料板材的热压复合制备、Ti /Al 层状复合材料瓦楞板的成形、通过界面扩散反应制备 Ti/Al₃Ti 瓦楞板，包含了成分设计、制备工艺、材料成形加工、组织与性能表征等整个实验流程。学生运用所学知识进行分析、计算、表征、测试校核，自主思考并探究制备具有优良承载性能与隔热性能的金属层状复合材料构件的原理与工艺，在巩固材料科学基础知识和基本理论的同时，对新材料研发与应用的完整流程建立全面的认识。

4. 实验系统先进性

由于实际实验涵盖内容广，设备资源需求大且成本较高，难以组织大量学生同时参与。利用虚拟仿真实验平台将实际金属层状复合材料构件的制备与测试实验合理分解，设置重点突出的互动选项，根据互动选项的选择提供多种实验路线，配合浅显易懂的视频动画与语音讲解，完美再现实验过程。为实验步骤中的互动选项设置分数，并通过线上评分系统根据学生完成虚拟仿真实验的过程细节和实际效果，智能生成实验报告与成绩，简化实验评价过程。为学生创造便利且可重复的实验机会，激发学生的实验兴趣，加强学生对课程相关知识点的理解，并培养其运用所学理论知识解决实际工程问题的能力。

3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

金属层状复合材料构件的制备与性能实验具有较强的综合性，可以深化学生对课程知识的理解程度，培养学生利用所学知识解决实际工程问题的能力，具有重要的实践意义。具体如下：

（1）学生对《材料科学基础》课程中相关知识理解更加透彻并实现灵活运用。包括金属的晶体结构、固体扩散、固态相变、金属的塑性变形及材料表界面工程等内容。

（2）学生深入理解《现代测试分析技术》、《材料力学》课程中相关测试的基本原理，提升对测试技能的实际运用能力：具体包括扫描电子显微（SEM）、能谱仪（EDS）、X 射线衍射（XRD）分析技术和《材料工程实验》中金属材料的拉伸性能测试、压缩性能测试技术等。

（3）学生熟悉实验思路设计、工艺参数调控、测试结果分析等实验流程：

包括选择合适的材料种类、材料尺寸形状、材料预处理方法及设计多个相配套的成形工艺参数等。

3-3 实验课时

(1) 实验所属课程课时： 96 学时

(2) 该实验所占课时： 4 学时

3-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

实验以金属材料扩散与相变基本原理为理论基础，着重涵盖了 Ti- Al 固态相变、扩散定律及其微观机制、影响固体中扩散的因素、固相扩散反应的过程及特点等材料学基本原理。

各环节的实验原理概述如下：

① Ti/Al 复合层板的制备工艺

a. 复合温度

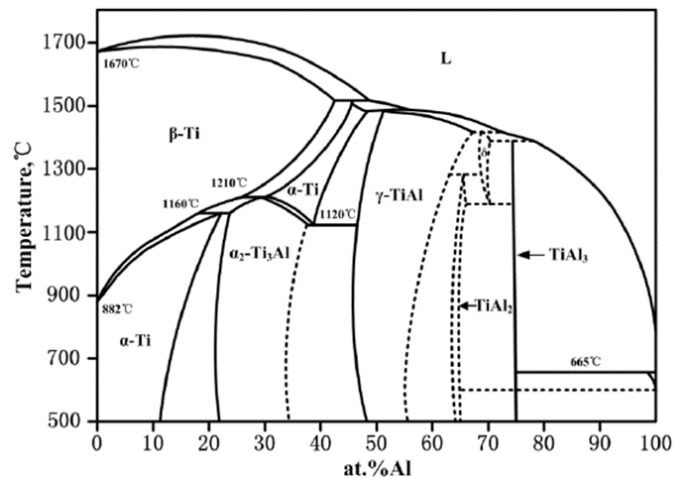


图 1. Ti-Al 二元相图

Ti 与 Al 原子半径相差较小，形成的固溶体为置换型固溶体。原子以空位机制扩散，其扩散激活能由空位形成能 (ΔE_v) 与空位迁移能 (ΔE) 两部分组成。扩散系数的表达式满足 Arrhenius 关系 (1)：

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_v + \Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

其中, D_0 是与晶格参数、原子跳动概率、空位振动频率以及空位形成熵相关的系数。扩散系数为温度的指数函数, 温度升高将使得 Al 和 Ti 的扩散速率得到显著提升。

b. 复合时间

对于 Al 扩散进 Ti 的过程, 初始条件与边界条件为:

$t=0$ 时: $x>0, C=C_0$

$t>0$ 时: $x=0, C=C_s; x=+\infty, C=C_0$

其中, $C_0=0, C_s=12\%$, 因此上述问题的解简化为:

$$\frac{12\%-C}{12\%} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2)$$

同理可得对于 Ti 扩散进 Al 的过程

$$\frac{0.12\%-C}{12\%} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3)$$

基于此, 可求距界面为 x 处的浓度达到 C 时所需的扩散时间。如图 2 所示, 拟合后 Ti-Al 金属间化合物的 $\ln D^{-1}/T$ 线性关系为 $\ln D = -15046.41/T(K) - 9.37$ 。

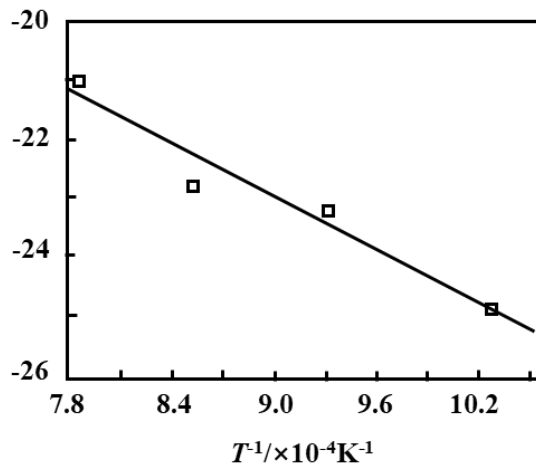


图 2. Ti-Al 金属间化合物的 $\ln D^{-1}/T$ 关系曲线

c. 复合压力

扩散复合过程中, 需要通过外加压力在金属层板间形成牢固的机械结合。外加压力太小难以形成良好的机械结合, 但高温下压力太大 Al 容易被挤出, 需要选择合适的压力参数。

② Ti/Al 瓦楞板成形

利用两步成型法实现Ti/Al瓦楞板成形。如图3(a)所示为热模压预成形设备，热模压预成形系统可以实现板材在真空加热环境下的成形，既能避免氧化，又可进行热成形。

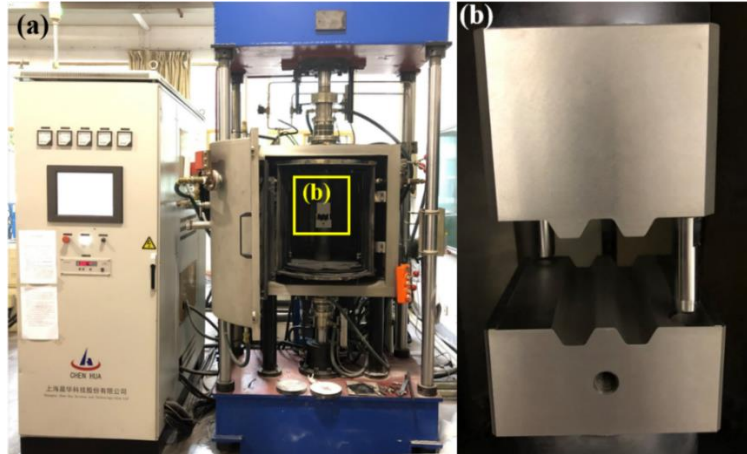


图 3. 热模压预成形, (a)热模压成形设备, (b)热模压成形模具

预成型结束后, 更换无圆角设计的精确双槽瓦楞模具, 对预成形的瓦楞板进行终成形校形, 成形出尺寸精确的瓦楞板。

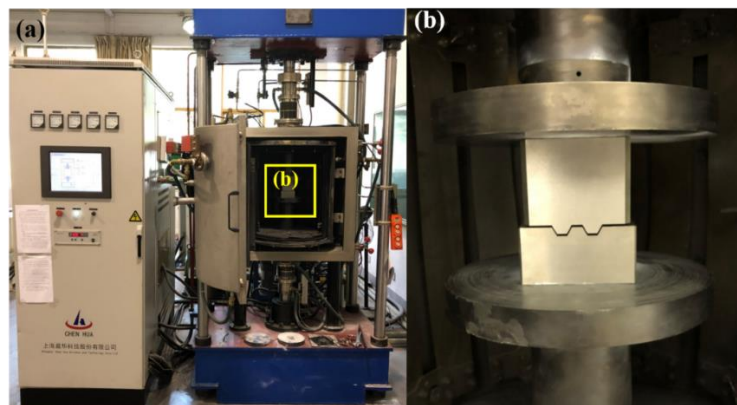


图 4. 热模压终成形, (a)热模压终成形设备, (b)热模压终成形模具

③ Ti/Al₃Ti 瓦楞板复合制备与性能测试

a. 固相扩散反应温度

根据Ti/Al二元相图, 确定合理的制备工艺, 确保生成金属间化合物Al₃Ti。新相形核时, 应综合考虑反应温度对形核驱动力和原子迁移速度的影响, 以确定固相扩散反应温度。

b. 固相扩散反应时间

Al₃Ti相区宽度满足固相扩散反应动力学方程：

$$y = kv\bar{t} \quad (4)$$

其中， y 为反应层厚度(μm)， t 为反应时间(s)， k 为扩散反应速度常数($\text{m/s}^{1/2}$)。扩散反应速度常数可以表示为：

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

其中， k_0 为阿伦尼乌斯常数， E 为反应活化能 (kJ/mol)， R 为气体常数， $R=8.31 \text{ kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ， T 为反应绝对温度(K)。最终的反应动力学方程为：

$$y = 4.71 \times 10^7 \exp\left(-\frac{250.78 \times 10^3}{RT}\right) t^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

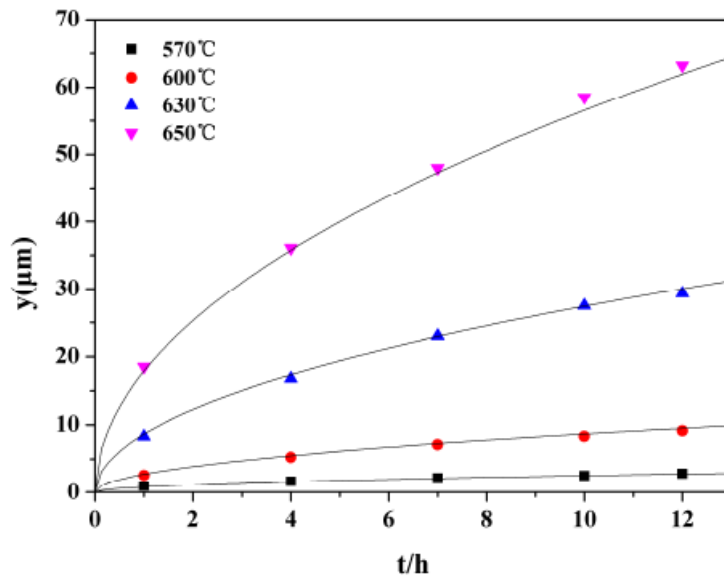


图 5. 反应时间 t (s) 与反应层厚度 y (μm)

c. 扩散反应热压压力

界面两侧的不同原子在相互扩散过程中，若扩散速率不等，会发生原始界面的移动，界面移向原子扩散速率较大的一方，并在扩散速率较大一侧留下孔洞，这种现象称为柯肯达尔效应。为避免孔洞产生，应在反应过程中施加适当的压力。

知识点：共 10 个

- ① Ti-Al 固态相变
- ② 扩散定律及其微观机制
- ③ 影响固体中扩散的因素
- ④ 扩散反应的过程及特点
- ⑤ 金属热压成型过程
- ⑥ EDS 测试方法与结果分析
- ⑦ XRD 测试方法与结果分析
- ⑧ SEM 测试方法与结果分析
- ⑨ 应力-应变曲线分析
- ⑩ 蜂窝夹心板制备与组装

(2) 核心要素仿真设计（对系统或对象的仿真模型体现的客观结构、功能及其运动规律的实验场景进行如实描述，限 500 字以内）

Ti/Al 层状金属材料制备过程：模拟实际实验对金属箔材进行清洗、干燥，设计材料层厚比，提示学生将金属箔材放入真空热压炉，并提供热压复合参数选项。依据学生选择的工艺参数，利用 Abaqus 模拟软件模拟实验结果，得到金属层状复合材料，模拟实验过程与实际实验完全一致，实验结果具有极高仿真度。

模压成型 Ti/Al 复合材料瓦楞板过程：提供不同的模具、模压条件供学生选取，分步完成模压预成型与终成型。模拟结果与同样模压条件下的真实实验结果相同，故其仿真度为 100%。

Ti/Al₃Ti 扩散反应模拟过程：对于模压成型得到的瓦楞板，选择扩散反应实验参数，模拟制备得到 Ti/Al₃Ti 瓦楞板。模拟实验结果与实际实验结果完全相同，具有 100%仿真度。

材料微观组织表征与性能测试：在每一步模拟实验结果中，均可点击不同的测试方法，查看材料的组织结构与各项性能。结果由 Abaqus 模拟软件及真实实验结果相结合，具有较高的仿真度。

3-5 实验教学过程与实验方法

1. 实验教学过程

本项目秉承“能实不虚、虚实结合”的原则，注重学生综合能力培养，提供至少 4 个课时的教学内容，具体实施过程如下：

(1) 教师根据瓦楞板结构以及蜂窝夹芯板的特点，提示学生在进行本项目实验时，要考虑蜂窝夹芯板在承载中的优点。通过性能测试实验，设计出重量轻、强度高、刚性大、稳定性好、隔热性能好的蜂窝夹芯板。

(2) 教师演示金属层状复合材料的制备与性能虚拟仿真实验的使用方法、介绍虚拟仿真系统的主要模块与具体内容。

(3) 教师与学生共同制定自主预习方案，包括组建学习小组、形成具体学习计划等，并指导学生熟悉实验项目的原理、内容，了解考核方式。

(4) 学生自主探究虚拟仿真实验的使用方法和具体功能，进行金属层状复合材料制备以及性能测试相关知识的学习、训练与自我考核。

金属层状复合材料的制备与性能虚拟仿真实验分为：实验简介模块、材料选择与预处理模块、金属层状复合材料制备与表征模块、Ti/Al 瓦楞板成形模块、Ti/Al₃Ti 瓦楞板反应制备与性能测试模块、热防护系统蜂窝夹芯板组装等六个模块，实验项目框架图，如图 6 所示。

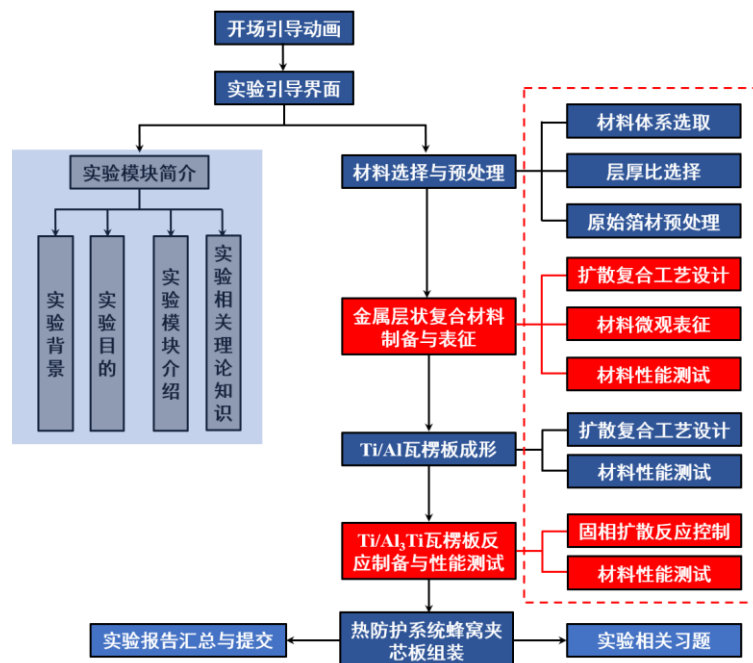


图 6. 实验项目框架图

① **实验简介模块：**通过文字、图片和动画向学生介绍实验背景、实验目的、实验模块、实验相关理论知识。

蜂窝板是由两块很薄的面板和中间一层厚而轻的夹芯层所组成，通常蜂窝芯的高度比蜂窝面板的厚度要高出几倍甚至几十倍，又名蜂窝夹层结构、蜂窝夹芯板。通常用粘接剂将上、下面板与芯子胶接制成整体刚性结构，或者直接注塑或模压获得夹芯结构。蜂窝结构的面板通常采用复合材料层压板、金属板、胶合板和硬塑料板等材料，蜂窝芯则有玻璃钢蜂窝、Nomex 蜂窝、铝蜂窝、纸蜂窝等。

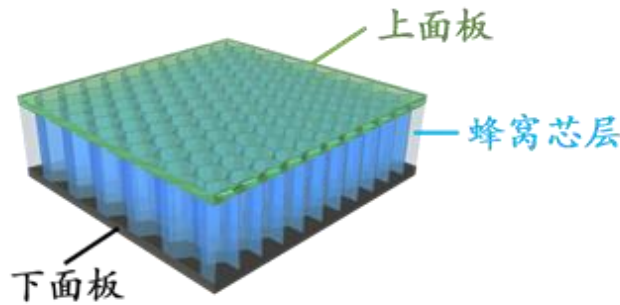


图 7. 蜂窝夹芯板示意图

蜂窝夹芯结构承载理论分析：

蜂窝夹芯的面板材料其性能不仅由每层的材料性能决定，还跟其铺层方法有很大关系。所以其刚度矩阵的物理方程式如下：

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (7)$$

当面板与蜂窝夹芯采用正相交式的铺层方法时,其刚度矩阵如下：

$$\begin{cases} A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k (Z_k - Z_{k-1}) \\ B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) \\ D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k (Z_k^3 - Z_{k-1}^3) \end{cases} \quad (8)$$

在刚度公式中， A_{ij} 是拉伸刚度， D_{ij} 是弯曲刚度， B_{ij} 是耦合刚度。因此，如果 B_{ij} 不为 0，则层压板在弯曲与拉伸之间彼此可以耦合，并且拉力使得层压

板发生拉伸变形的同时也使其产生扭转或弯曲变形。相反地，层压板受到力矩作用时，层压板表面同时也会发生对应的拉伸形变。综上所述，层压板的刚度大小取决于多方因素，主要包括各层面板的力学性能，彼此铺层的方向，所占体积的比例，以及每层之间的铺设顺序。

蜂窝芯的等效弹性参数公式：

$$\begin{cases} E_1 = \frac{4}{\sqrt{3}} E_s (1 - 3 \frac{t_1^2}{l^2}) \frac{t_1^2}{l^2}, V_{12} = 1 - 4 \frac{t_1^2}{l^2} \\ E_2 = \frac{4}{\sqrt{3}} E_s (1 - \frac{5}{3} \frac{t_1^2}{l^2}) \frac{t_1^2}{l^2}, V_{21} = 1 - \frac{8}{3} \frac{t_1^2}{l^2} \\ G_{xy} = \frac{8}{7} \sqrt{3} E_s \frac{t_1^3}{l^3} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_3 = \frac{8}{3\sqrt{3}} E_s \frac{t_1}{l}, V_{13} = \frac{E_1}{E_s} V_3, V_{23} = \frac{E_2}{E_s} V_s \\ G_{13} = \frac{2\sqrt{3}\gamma}{3} \frac{t_1}{l} G_s, G_{23} = \frac{\sqrt{3}\gamma}{3} \frac{t_1}{l} G_s \end{cases} \quad (10)$$

从这两个公式可以明确推断出面内模量远小于面外模量，蜂窝芯对蜂窝夹芯板的刚度贡献也主要表现在其面外模量上，所以需要对其面外模量进行精确计算。

② 材料选择与预处理模块：首先做好实验准备，学生根据元素周期表相关元素的知识回顾内容，进行材料体系（Ti 和 Al）选择。对选择的材料选用合适的清洗液进行清洗，烘干等预处理操作，随后进行复合材料层厚比的设计。在此模块中，学生应了解实验前的准备工作，包括材料元素体系的选择、钛箔和铝箔预处理的相关操作，层厚比设计等基本知识。

③ 金属层状复合材料制备与表征模块：以扩散定律作为理论基础，优化扩散复合工艺温度、压力、时间等参数，制备Ti/Al层状复合材料；并对Ti/Al层状复合材料进行微观形貌表征与EDS能谱分析，评估复合程度；通过拉伸实验评估Ti/Al层状复合材料基本力学性能。在此模块中，学生了解到扩散理论基础、微观形貌表征方法以及力学性能测试方法等基础知识，对金属层板复合材料的制备以及表征有了更深入的了解。

④ Ti/Al瓦楞板成形模块：通过模压工艺对上述制备的Ti/Al层状复合材料进行瓦楞板的预成形；对预成形件进行模压终成形。在此模块中，了解到模压工艺

的基本原理，并通过实验深入了解Ti/Al层状复合材料的成形工艺。

⑤ **Ti/Al₃Ti瓦楞板制备与性能测试模块**：根据扩散反应动力学与Ti-Al二元相图选择热压温度、压力与时间，制备Ti/Al₃Ti瓦楞板；对制备的Ti/Al₃Ti瓦楞板进行压缩性能测试。在此模块中，学生能够学习到金属间的扩散反应动力学相关理论以及Ti/Al₃Ti瓦楞板制备方法，同时也掌握了Ti/Al₃Ti瓦楞板的压缩性能测试方法。

⑥ **热防护系统蜂窝夹芯板组装**：进行瓦楞板—蜂窝芯—蜂窝夹芯板—热防护结构的步骤组装蜂窝夹芯板。在此模块中，能够逐渐熟悉整个热防护系统蜂窝夹芯板的组装过程，并深入了解热防护系统蜂窝夹芯板的整体结构。

2. 实验方法

学生进入实验引导界面，了解实验背景和目的，并完成20道实验相关题目考察预习效果。随后完成实验前期准备工作，包括选取材料元素体系、层厚比以及预处理方式等。选择5组不同工艺参数制备金属层状复合材料，并进行微观组织表征及性能测试。在此基础上，完成Ti/Al瓦楞板的扩散热压成形，表征微观界面形貌与元素分布。随后通过固相反应制备出Ti/Al₃Ti瓦楞板，开展压缩性能测试，最后完成热防护系统蜂窝夹芯板组装。在每一步仿真实验环节，学生都可通过查看设计依据和相关原理，自主进行材料设计与成形工艺参数设置，并进行阶段性设计效果验证。实验全部完成后，系统自动生成实验报告，并给出实验成绩。

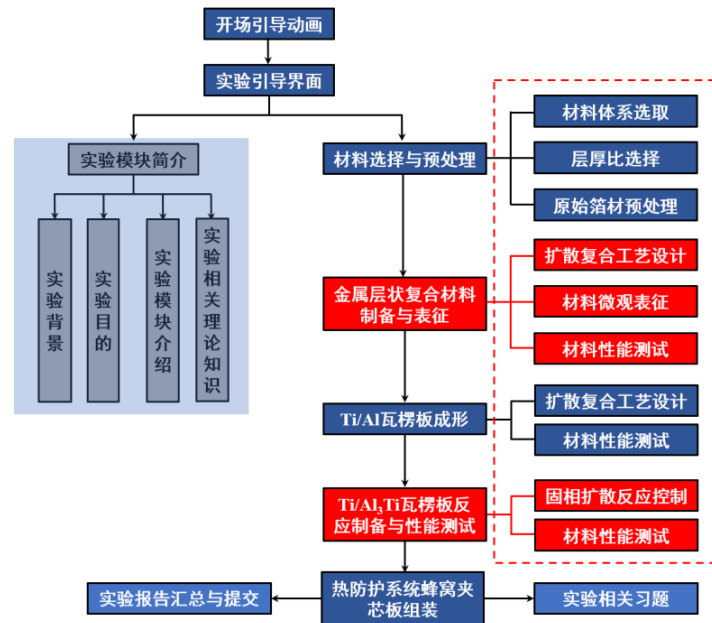


图 8. 金属层状复合材料构件制备和性能虚拟仿真实验操作流程

3-6 步骤要求（不少于 10 步的学生交互性操作步骤。操作步骤应反映实质性实验交互，系统加载之类的步骤不计入在内）

(1) 学生交互性操作步骤，共 15 步，其中 10 步涉及分数评定

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	阅读实验简介,学习相关知识,完成实验预习题。	10 分钟	每答对一道预习题得 0.5 分	10	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input checked="" type="checkbox"/> 预习成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 教师评价报告
2	根据反应方程式正确判断并选取清洗液,分别对铝、钛箔材进行清洗。	5 分钟	正确选取清洗液进行表面预处理得 5 分	5	
3	理解层厚比选择对金属复合材料的界面性能和层板弯曲成形性能的影响,进行层厚比设计。	3 分钟	合理选取层厚比设计方案得 5 分 (选 5/4 结构得满分 5 分, 否则得 4 分)	5	
4	根据固相扩散理论,设计出 5 组 Ti/Al 扩散复合温度、时间、压力等参数方案组合,进行热压制备。	8 分钟	合理设置五组热压方案相关的温度、压力等参数得 15 分 (5 次设计方案均正确,得 15 分; 同时存在正确与错误的实验方案,得 10 分; 均错误,得 5 分; 设计方案一致,得 0 分)	15	
5	选取对应的检测方法,分析结果和层板拉伸测试数据,比较选出最佳扩散工艺方案。	10 分钟	合理选出热压方案中的正确参数得 15 分, 否则得 10 分	15	

6	掌握模压成形过程并进行模具选择,判断并勾选操作流程,执行所需步骤。	8分钟	正确选择成型模具得6分;勾选润滑需求得2分,勾选温热成型条件得2分	10
7	根据固相扩散理论,设计出5组Ti/Al扩散复合方案,包括温度、时间、压力等参数,进行热压制备。	10分钟	合理设置五组扩散反应工艺方案参数得15分(5组参数中包含650°C、20MPa、14h,得满分15分,否则10分)	15
8	依据表征结果比较分析各组界面形貌和元素分布等数据,选取一组最优方案进行后续性能测试。	8分钟	合理选取一组最佳的扩散反应方案得15分(选出的最佳方案若为650°C、20MPa、14h,得满分15分;否则一律5分)	15
9	掌握夹层板的力-位移曲线分析其变形过程	5分钟	正确进行压缩性能测试实验得5分	5
10	熟悉瓦楞板到蜂窝夹芯板的组合过程	5分钟	正确进行蜂窝夹芯板的组装得5分	5

(2) 交互性步骤详细说明

平台登入说明:实验可以通过南京航空航天大学材料学院在线虚拟仿真实验教学中心端口进入。

打开网址: <http://jsczfhcl.nuaa.edu.cn>

“金属层状复合材料构件制备与性能虚拟仿真实验”总学时为4学时,操作步骤由以下15步组成:

① 阅读实验简介,学习相关知识,完成实验预习题

掌握金属层状复合材料构件制备与测试实验的相关背景知识,如图9所示。



图 9. 实验简介—金属层状复合材料实验背景界面

随后出现 20 道预习题，实验者按要求完成相应题目的考核，主要是以客观选择题的形式考查学生对于金属层状复合材料知识点的掌握情况，完成答题后，点击“提交答案”按钮，题目下方会出现参考答案，实验预习自测题界面如图 10 所示。

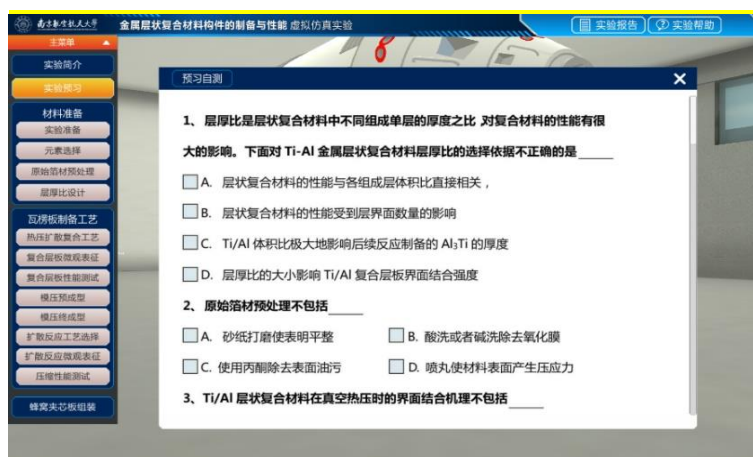


图 10. 实验预习自测题界面

② 元素选择以及实验准备

在进入实验之前，按照进入实验室的要求穿戴好防护用品，包括实验服、防护眼镜、口罩以及防护手套。实验场景为带有自来水的实验台，右下角为烘干箱，场景右侧是实验过程必须穿戴的防护用品，点击下侧的“一键换装”即可，如图 11 所示。



图 11. 实验准备界面

穿戴防护用具后点击“下一步”，进入材料元素体系选择界面。元素选择界面提供十种元素体系供实验者选择，包括过渡金属元素。点击元素图标，弹出该元素各项性质介绍。由于实验的对象为 Ti/Al 合金，实验者同时选中这两种元素点击“下一步”方可以进入下一阶段。材料准备—元素选择界面见图 12 所示。



图 12. 元素选择界面

③ 材料准备——原始箔材预处理阶段

“元素选择”后点击“下一步”进入原始箔材预处理阶段。系统为两组箔材提供不同的清洗方案，实验者根据系统提示的反应方程式选择箔材相应的清洗方案，方案正确后动画开始展示箔材清洗过程，随后用自来水冲洗多余残留的清洗液。图 13 所示为原始箔材预处理—清洗界面。



图 13. 原始箔材预处理—清洗界面

箔材清洗完成后，点击托盘，清洗完成的箔材被放入烘干箱之中，等待箔材完全烘干之后将其取出，完成点击“下一步”。图 14 为箔材预处理—烘干界面。

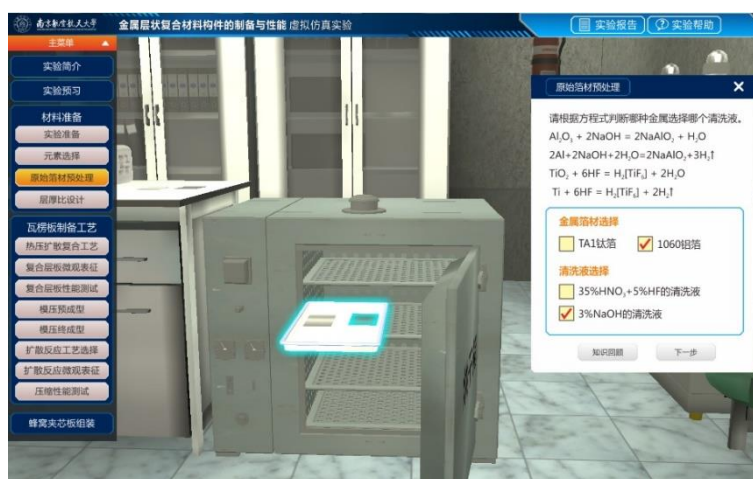


图 14. 原始箔材预处理—烘干界面

④ 材料准备——层厚比选择

铝层厚比的选择有两个依据：一是各组成层体积比以及层界面数量；二是 Ti/Al 体积比。层厚比设计界面如图 15 所示，系统提供三组不同参数的层厚比选择项，点击三组参数前对应的选择方框，动画将展示层状复合材料的铺贴过程，铺叠结束后点击“下一步”。点击“知识回顾”出现三类不同结构层板详细的介绍，层厚比知识回顾界面如图 16 所示。

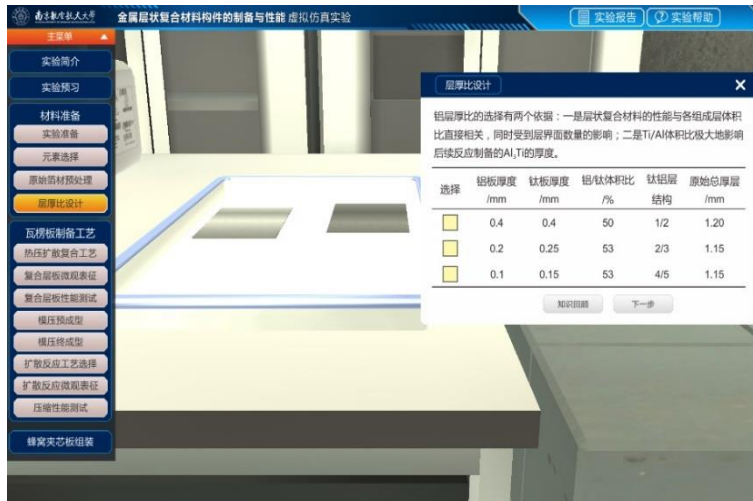


图 15. 层厚比设计界面

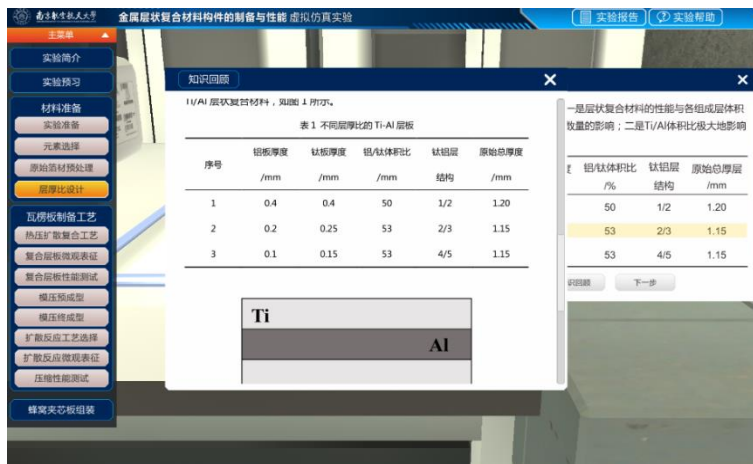


图 16. 层厚比知识回顾界面

⑤ 瓦楞板制备——扩散复合工艺

层厚比设计好之后，进入扩散复合工艺选择阶段。扩散复合工艺界面展示铺贴好的复合材料构件，以及用于脱模的脱模剂，如图 17 所示。先点击脱模剂对热压机的上下板进行喷涂，降低模具与复合材料间的结合力，便于后续的脱模处理，如图 18 所示。



图 17. 扩散复合工艺界面



图 18. 脱模剂喷涂上下热压板界面

根据固相扩散理论，设计 Ti/Al 扩散复合温度、时间、压力等参数。设计好一组即可保存，最多可以进行 5 次设计，比较并选择最佳的设计结果继续进行实验。扩散复合工艺设计界面如图 19 所示。



图 19. 扩散复合工艺选择界面

设计好 5 组实验参数后，点击“热压制备”即可进行热压制备操作，如图 20

所示。热压制备完成之后，系统会自动将产品取出，如图 21 所示。实验提示“扩散复合工艺已经完成，可以进行下一步”如图 22 所示。



图 20. 瓦楞板扩散复合热压制备界面

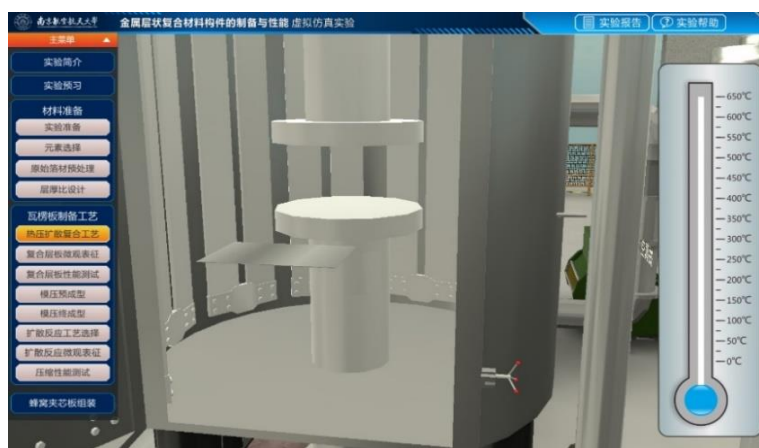


图 21. 瓦楞板从热压机取出界面



图 22. 瓦楞板热压扩散复合工艺完成提示界面

⑥ Ti/Al 瓦楞板制备工艺——复合层板微观表征

扩散复合工艺选择后，对热压制备好的层合板进行微观表征实验。微观表征包括三方面的内容：界面形貌、元素分布以及 XRD 物相分析。微观表征界面如图 23 所示。



图 23. 复合层板微观表征界面

进入微观表征界面，先点击之前工艺选择的方案，再点击上方的表征方法，随后界面弹出实验参数以及各表征方法对应的图像或曲线，如图 24 所示，实验者可以比较分析不同实验参数下表征结果的差异，并对热压工艺进行评价。

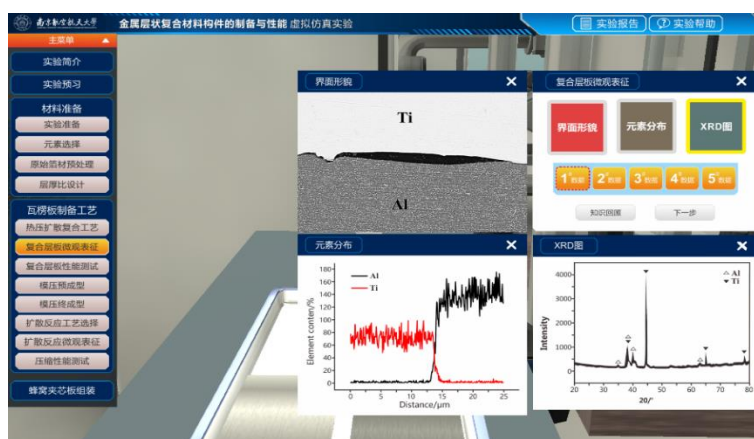


图 24. 不同工艺参数对应的三种微观表征形貌和曲线图

⑦ Ti/Al 瓦楞板制备工艺——复合层板性能测试

复合层板性能测试界面包括实验方案和测试方法的选择，拉伸测试曲线如图 25 所示。先选择实验方案再选择拉伸测试曲线和测试数据，即可获得相应的实验结果，如图 26 所示。该步骤旨在要求实验者比较 5 组复合实验方案，自主判断选

择最佳的一组数据继续进行后续的模式成形实验。



图 25. 复合层板性能测试界面



图 26. 复合层板性能测试拉伸曲线、测试数据界面

⑧ Ti/Al 瓦楞板制备工艺——模压预成形

模压预成形界面包括选择预成形模具以及是否需要润滑条件，如图 27。



图 27. 预成形模块界面

选择合适的“预成形模具”并添加润滑剂，动画显示安装模具以及喷涂润滑剂的过程，界面如图 28 所示。

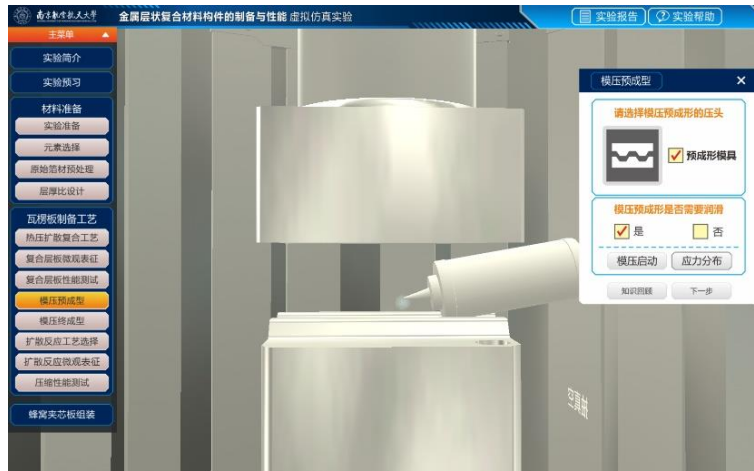


图 28. 安装预成形模具以及喷涂润滑剂界面

动画演示完成之后，点击“模压启动”，上下模板升温加压，模压完成后系统自动将模压成品从模具中取出，如图 29 所示。

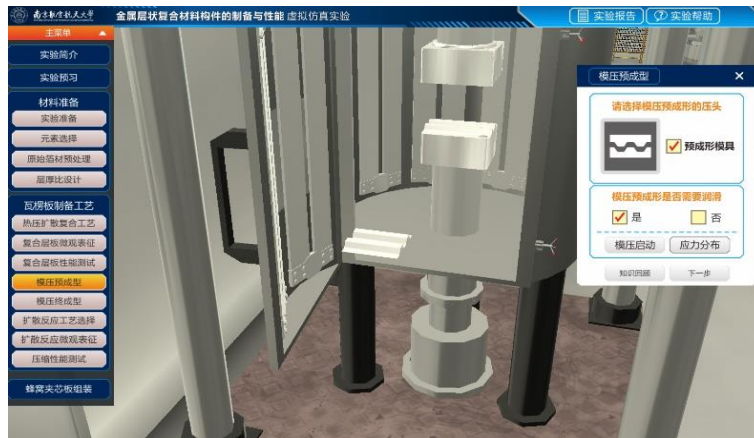


图 29. 预成形模压完成后实验样品取出界面

模压完成，点击“应力分布”按钮，在主界面的下方出现层板模压预成形后层板上下两面的仿真应力云图分析，并展示具体的应力数值。实验者比较不同实验方案的应力差异情况，对于未达到实验预期的结果可以进行重新优化设计。图 30 为模压预成形后层板应力分布界面。

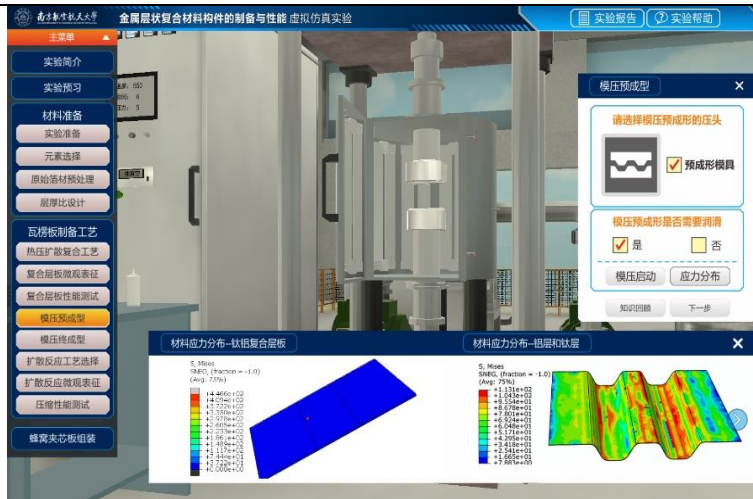


图 30. 模压预成型后层板应力分布界面

⑨ Ti/Al 瓦楞板制备工艺——模压终成型

模压终成型首先需选择成形的压头以及温热成形条件。和预成型采用相同的平台，更换了成形系统的模具，采用无圆角设计的精确双槽瓦楞模具，对预成形的瓦楞板进行终成型校形，制备出精确尺寸的半蜂窝瓦楞板。模压终成型界面如图 31 所示。



图 31. 模压终成型界面

点击“模压启动”，终成型模压完成，点击“应力分布”按钮，在主界面的下方出现层板模压终成型后层板上下两面的仿真应力云图分析，如图 32 所示。

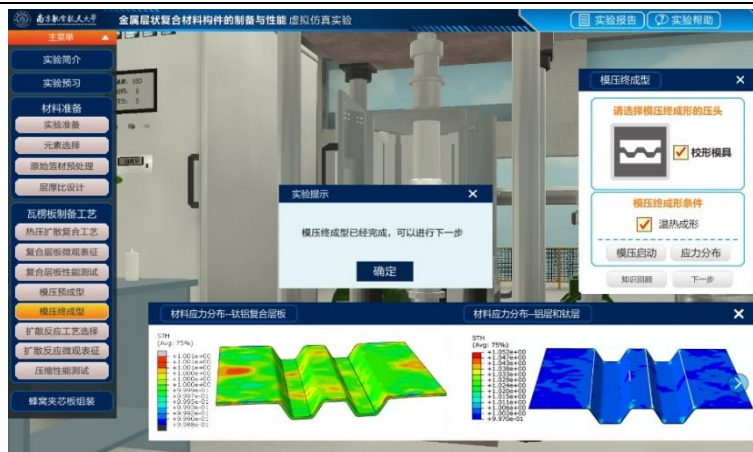


图 32. 模压终成型后层板应力分布界面

⑩ Ti/Al₃Ti 瓦楞板制备工艺——扩散反应工艺选择

根据固相扩散理论，设计 Ti/Al 扩散复合温度、时间、压力等参数。设计好一组即可保存，最多可以进行 5 次设计，比较并选择最佳的设计结果继续进行实验。图 33 为扩散反应工艺选择界面。热压扩散反应界面如图 34 所示。



图 33. 扩散反应工艺选择界面

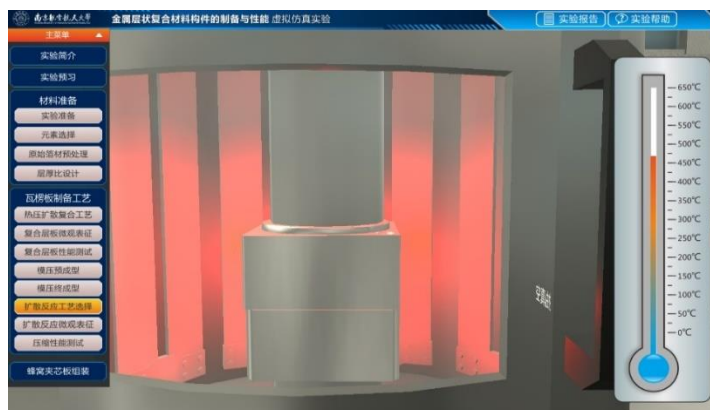


图 34. 热压扩散反应界面

⑪ Ti/Al₃Ti 瓦楞板制备工艺——扩散反应微观表征

进入扩散反应微观表征界面，选择设定好的实验方案，点击其下的“反应过程”得到 Al 和 Ti 界面上扩散反应的动画示意图，如图 35 所示。



图 35. 扩散反应过程示意图界面

点击上方的表征方法，界面跳出对应数据参数及表征方法对应的结果图，如图 36 所示，实验者可以比较不同实验方案之间结果的差异评价扩散反应进行的程度。

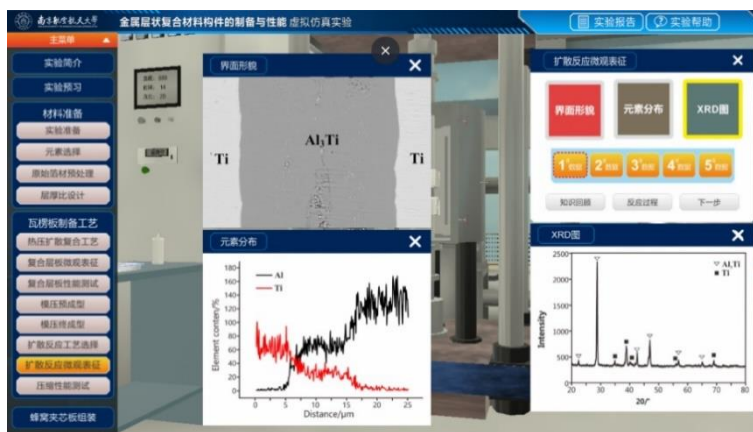


图 36. 扩散反应表征方法得到的曲线图界面

⑫ Ti/Al₃Ti 瓦楞板制备工艺——压缩性能测试

与拉伸实验相似，压缩性能测试界面如图 37 所示。

在压缩测试界面选择实验方案，点击“下一步”，即可得到压缩动态仿真结果和数据曲线，如图 38 所示。



图 37. 压缩性能测试界面

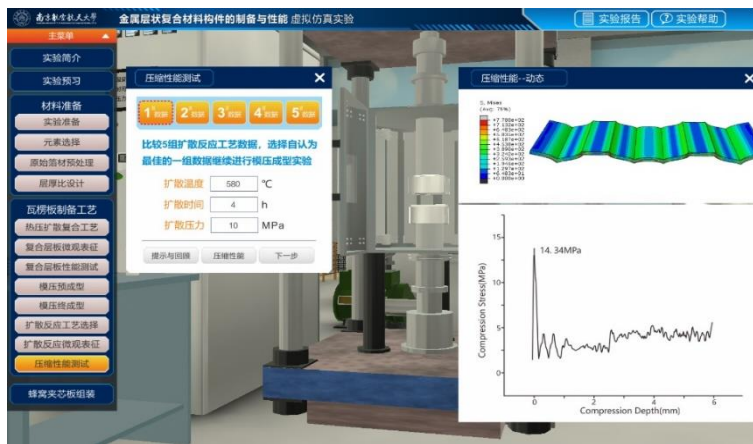


图 38. 压缩动态仿真结果和数据曲线界面

⑬ Ti/Al₃Ti 蜂窝夹芯板组装

将制备好的瓦楞板相对粘贴，组装成蜂窝夹芯板，如图 39 所示。

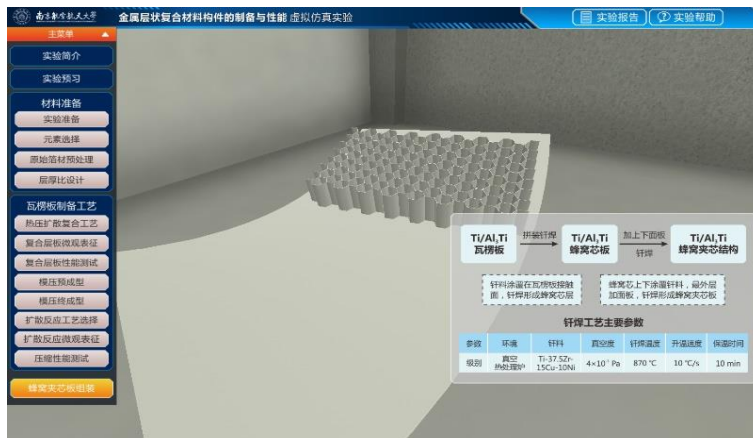


图 39. 组装蜂窝夹芯板界面

⑭ 实验报告生成

学生点击确认完成实验，系统自动生成实验报告，包括各实验流程及设计参数值，如图 40 所示。图 41 为实验者自主输入实验总结界面。



图 40. 自动生成实验报告界面

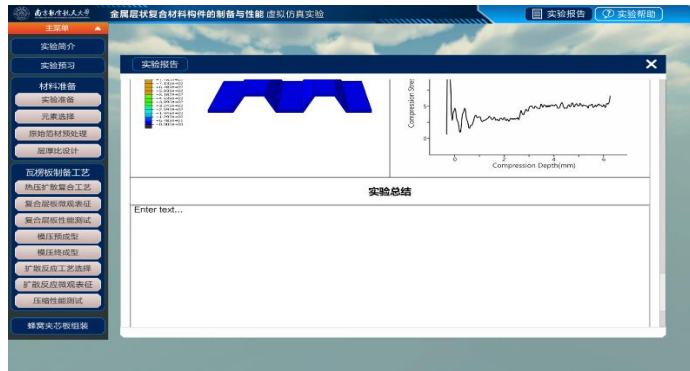


图 41. 实验报告—自主输入实验总结界面

⑮ 实验指导和帮助

实验过程中，实验者遇到问题可点击“帮助”按钮，图 42 为帮助界面。

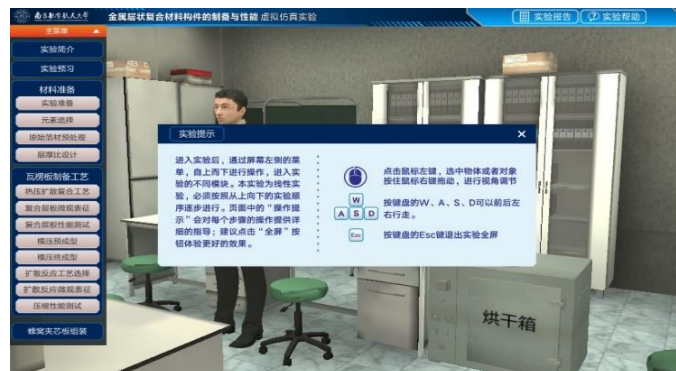


图 42. 实验帮助界面

3-7 实验结果与结论（说明在不同的实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论）

（1）扩散复合工艺及微观表征与性能测试

结果：500°C和 550°C下制备的 Ti/Al 复合层板界面平直无分层，550°C互扩散层厚度增大，层板的断后延伸率更大。600°C下制备的 Ti/Al 复合层板界面有新相生成，拉伸测试表明存在最大的弹性模量；3 MPa 的热压压力下界面有分层出现，在 5 MPa 和 9 MPa 时分层消失，随着热压时间延长，600°C下生成的新相长大。

结论：热压复合制备 Ti/Al 复合层板，600°C生成金属间化合物相 Al_3Ti ，材料弹性模量提高，550°C热压后的复合层板存在最大断后延伸率，因此最佳热压温度应为 550°C。热压压力可以有效降低分层的风险，热压时间延长，新相长大。

（2）Ti/Al 瓦楞板制备

结果：预成形阶段选用未添加润滑的模具，或者校形阶段选用室温模压，复合层板的应力应变分布表明，未润滑时材料表面应力很大，而室温校形时棱角部位应力集中。经过润滑并选用温热成形条件，材料各部位应力集中趋势明显降低。

结论：采用模压预成形+校形工艺，通过增加润滑、降低摩擦，提高成形温度，有利于减少瓦楞板应力集中，获得更好的成形质量。

（3）Ti/Al₃Ti 瓦楞板制备与压缩性能测试

结果：选用扩散反应温度为 580°C或 620°C，在测试的所有保温温度和保温压力下，生成的新相 Al_3Ti 层厚度较薄，且存在较多 Al 残余，而在 650°C下，选用 20 MPa 的压力热压 14h，Al 全部反应生成 Al_3Ti 。在 10 MPa 或者 15 MPa 的压力下，金属间化合物新相与基体 Al 金属界面存在微观分层，且随着热压时间的延长而增大。对含不同体积分数的 Ti/Al₃Ti 瓦楞板进行压缩测试，结果表明 Al 层反应完全的 Ti/Al₃Ti 瓦楞板具有最大的压缩强度。

结论：热压温度对界面扩散反应影响最大，650°C的热压温度保证 Al 不熔化同时界面反应速度最快，是最佳热压温度；扩散反应过程中因金属原子迁移容易形成中心孔洞区，通过增大热压压力可以消除中心孔洞。在 650°C、20 MPa 下热压 14h，可以制备出 Ti/Al₃Ti 瓦楞板，且因为金属间化合物 Al_3Ti 较高的弹性模量，Ti/Al₃Ti 瓦楞板具有较高的压缩强度。

3-8 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

本实验开设专业为材料科学与工程等材料类相关专业三、四年级学生。

(2) 基本知识和能力要求

为提高材料类专业学生的综合实践能力和研发创新能力，进行金属层状复合材料构件的制备与性能虚拟仿真实验。通过该项综合实验，使学生能够综合运用所学知识，在教师的指导下，学习完成 Ti/Al₃Ti 蜂窝状复合夹层板的制备、加工全过程，并进行性能测试表征验证。学生应具备以下能力：

① 掌握材料科学、材料加工、材料物理化学及复合材料等方面的基础理论和基本知识，掌握热处理工艺设计与材料成形加工方法。

② 熟悉并掌握部分现代材料测试分析方法和相关仪器设备的基本原理与使用知识，并具备自主进行材料性能分析的专业知识和能力。

③ 应具备较强的学习能力与自主创新研发和利用所学知识独立思考、分析、解决问题的能力。

④ 能综合运用材料科学基础、热处理和复合材料的相关知识设计复合箔材层厚比、扩散复合工艺、模压成形工艺、固相扩散反应工艺等，完成蜂窝夹芯板的制备加工流程设计与性能测试。

⑤ 初步掌握模压成形力学知识，能根据模压变形过程的应力分布特性以及扩散反应处理后构件的微观界面形貌等表征信息进行热处理和成形过程力学分析。

⑥ 能够利用界面形貌表征结果与力学性能分析测试结果，对比筛选出最佳的制备成型工艺

⑦ 能根据 SEM 微观形貌分析、EDS 能谱元素分布及 XRD 物相谱线图进行扩散结果分析，并解决加工和处理过程中遇到的实际问题。

3-9 实验应用及共享情况

- (1) 本校上线时间：2019年10月8日（上传系统日志）
- (2) 已服务过的学生人数：本校336人
- (3) 附所属课程教学计划或授课提纲并填写：
纳入教学计划的专业数：1，具体专业：材料科学与工程
教学周期：1年，学习人数：400-500人
- (4) 是否面向社会提供服务：是 否
- (5) 社会开放时间：2021年1月1日
- (6) 已服务过的社会学习者人数：271人

4.实验教学特色

（该虚拟仿真实验教学课程的实验设计、教学方法、评价体系等方面的特色，限800字以内）

（1）实验方案设计思路

① 形成蜂窝夹芯板设计与实验的开放性、研究性特点

初始实验参数开放性——将层厚比设计为可变的，由学生自主选择生成；实验过程中参数优化设计具有开放性——通过操作者设计若干组制备参数条件，获得性能不尽相同的样品样件及测试表征结果，通过比较性能测试数据，优化蜂窝板材制备工艺，即扩散复合工艺和固相扩散反应中的温度、时间、压力等可变参数；整个过程由学生自主选择设计，最终得到蜂窝夹芯板的制备参数最优方案。

② 强调设计参数的实时验证，实现蜂窝夹芯板的全过程优化设计

在实验中设计微观表征、拉伸测试、压缩性能测试，在环节中均设置结果分析与性能验证，并在扩散反应制备环节中，加入动画显示反应过程，确保各阶段参数设计的合理性。

(2) 教学方法创新

本项目遵循“能实不虚、虚实结合”的原则，以开放性的自主设计（层厚比选择、模压条件、模具选择等）、参数化的表征结果显示（微观、力学性能）、样品性能与优化设计的链式反馈、交互式的人机界面为教学方式方法，再现实际层状复合材料构件制备与测试的虚拟环境，使学生能够实时开展层状复合材料构件制备工艺和性能的线上仿真探究。

关注材料类学生的综合性、实践性学习需求，实行基于实际问题的互动式、研讨式教学，体现自主式和探究式学习的特点，通过书本图文学习、课堂实时讲授、软件虚拟仿真等多种媒介促进教学准备、线上实验学习、线下交流讨论，同时与线下实体实验相结合（如图 43、44 所示），培养学生实践能力、综合分析能力和创新能力，显著提升实验教学效果。

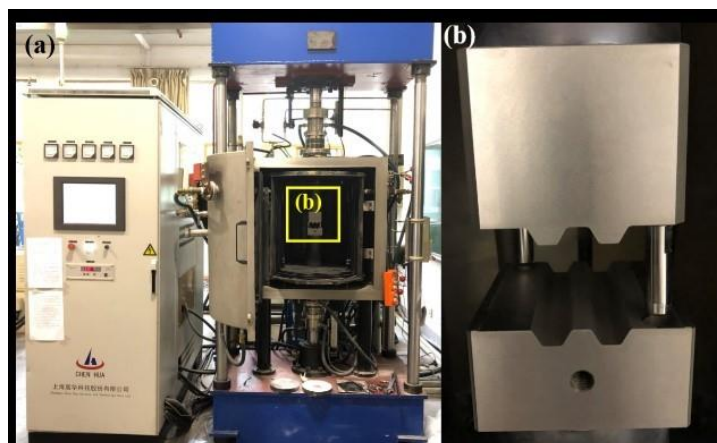


图 43. 热模压成型设备



图 44. SEM 表征测试

(3) 评价体系创新

实验评价：制定了详尽的实验考核要求和评分标准，包括实验操作过程考核与实验目标达成度考核。并从实验报告中体现学生操作流程、各操作步骤中关键参数的设定与计算、关键性能的分析与筛选，及实验操作总体得分。

基本知识点习题考核：在实验前预习阶段和实验后总结阶段均设置了过关习题，且紧扣实验涉及的关键知识点。

5. 实验教学在线支持与服务

(1) 教学指导资源：教学指导书 教学视频 电子教材 课程教案

(申报系统上传) 课件 (演示文稿) 其他

(2) 实验指导资源：实验指导书 操作视频 知识点课件库 习题库

(申报系统上传) 测试卷 考试系统 其他

(3) 在线教学支持方式：热线电话 实验系统即时通讯工具 论坛

支持与服务群 其他

(4) 4名提供在线教学服务的团队成员；4名提供在线技术支持的技术人员；教学团队保证工作日期间提供8小时/日的在线服务

6. 实验教学相关网络及安全要求描述

6-1 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求 (需提供测试带宽服务)

客户端到服务器的网络带宽>50MB 以上

(2) 说明能够支持的同时在线人数 (需提供在线排队提示服务)

经测试，目前能够提供五千到八千左右的并发数量

6-2 用户操作系统要求 (如 Windows、Unix、IOS、Android 等)

(1) 计算机操作系统和版本要求

Windows7 SP1 及以上操作系统

(2) 其他计算终端操作系统和版本要求

Windows7 SP1 及以上操作系统

(3) 支持移动端：是 否

6-3 用户非操作系统软件配置要求（兼容至少 2 种及以上主流浏览器）

(1) 非操作系统软件要求（支持 2 种及以上主流浏览器）

谷歌浏览器 IE 浏览器 360 浏览器 火狐浏览器 其他

(2) 需要特定插件 是 否

如勾选“是”，请填写：

插件名称：（插件全称）

插件容量：M

下载链接：

(3) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

无

6-4 用户硬件配置要求（如主频、内存、显存、存储容量等）

(1) 计算机硬件配置要求

独立显卡， 4G 显存，主频 4 核、内存 8GB、存储容量 500GB

(2) 其他计算终端硬件配置要求

独立显卡， 4G 显存，主频 4 核、内存 8GB、存储容量 500GB

6-5 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

(1) 计算机特殊外置硬件要求

无

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求：无 有

如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求：

6-6 网络安全（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）

(1) 证书编号：32010743001-210001

(2) 请附信息系统安全等级保护备案证明



7.实验教学技术架构及主要研发技术

指标	内容
系统架构图及简要说明	 <p>C/S 架构与 B/S 相结合，实现与互联网平台对接。</p>
实验教学	<p>开发技术</p> <p><input type="checkbox"/>VR <input type="checkbox"/>AR <input type="checkbox"/>MR <input checked="" type="checkbox"/>3D 仿真 <input type="checkbox"/>二维动画 <input type="checkbox"/>HTML5 <input type="checkbox"/>其他</p>
	<p>开发工具</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>Unity3D <input type="checkbox"/>3D Studio Max <input type="checkbox"/>Maya <input type="checkbox"/>ZBrush <input type="checkbox"/>SketchUp <input type="checkbox"/>Adobe Flash <input type="checkbox"/>Unreal Development Kit <input type="checkbox"/>Animate CC <input type="checkbox"/>Blender <input type="checkbox"/>Visual Studio <input type="checkbox"/>其他</p>
	<p>运行环境</p> <p>服务器 CPU 4 核、内存 8 GB、磁盘 500 GB、 显存 4 GB、GPU 型号</p> <p>操作系统 <input checked="" type="checkbox"/>Windows Server <input type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他 具体版本：</p> <p>数据库 <input checked="" type="checkbox"/>Mysql RSQL Server <input type="checkbox"/>Oracle <input type="checkbox"/>其他</p> <p>备注说明（需要其他硬件设备或服务器数量多于 1 台时请说明） 是否支持云渲染： <input type="radio"/>是 <input checked="" type="radio"/>否</p>
	<p>实验品质（如：单场景模型总面数、贴图分辨率、每帧渲染次数、动作反馈时间、显示刷新率、分辨率等）</p>

本实验依托的系统网络结构，如图 45 所示。

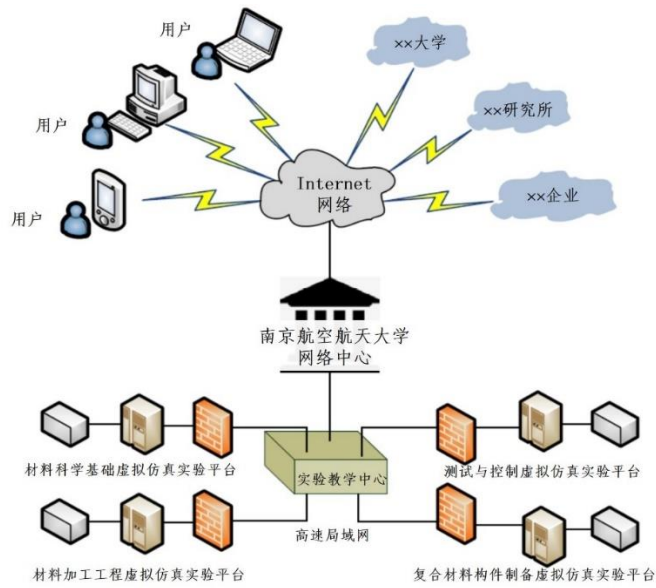


图 45. 系统网络结构

本实验管理功能模块，如图 46 所示。

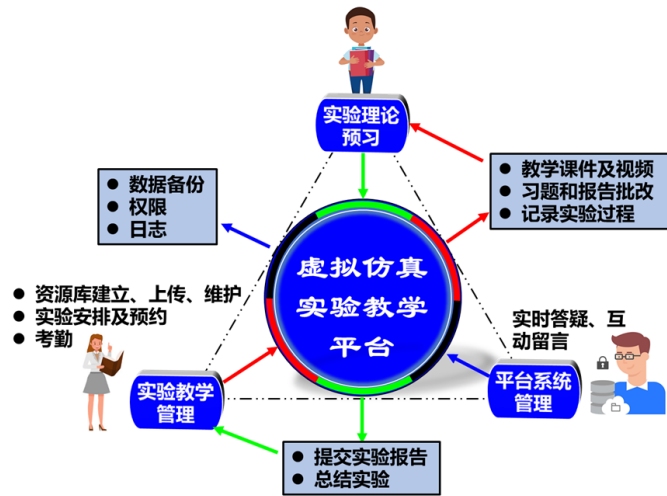


图 46. 实验管理功能

8. 实验教学课程持续建设服务计划

(本实验教学课程今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数)

(1) 课程持续建设

日期	描述
第一年	提供更多可选择的实验参数，设置更多实验路线
第二年	制作并实装 Ti-Al ₃ Ti 扩散反应过程动画
第三年	提供更多加工成型方式，并评价不同成型方式优劣
第四年	提供更多金属材料元素体系
第五年	提供更多金属材料元素体系

其他描述：本实验教学项目今后 5 年通过国家级虚拟仿真实验教学中心“复合材料加工与制备虚拟仿真实验教学中心”的相关实验端口向高校和社会开放，以“工程素养优、创新意识强、专业技能实”为人才培养目标，坚持“应用驱动、开放共享、一致统筹、持续发展”的原则，以学生自主学习和创新科研能力培养为中心，在全国多数高校和企业、研究所推广应用，为材料加工工程、材料科学等学科教学提供强有力的支撑。

(2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年	4	400	1	200
第二年	12	1200	2	500
第三年	20	2000	3	1500
第四年	30	3500	5	2000
第五年	50	7500	8	3500

其他描述：

完善服务后台与支撑体系。每年投入一定成本进行实验项目的开发和推广，激励社会各方积极参与开发虚拟仿真资源、提供资源开放服务。促进校际间，尤其是开设材料加工工程专业的兄弟院校间虚拟仿真实验教学资源共建共享和课程互选、学分互认。

确保项目被认定后 1 年内面向高校和社会免费开放并提供教学服务，1 年后至 3 年内免费开放服务内容不少于 50%，3 年后免费开放服务内容不少于 30%。

9.知识产权

软件著作权登记情况	
以下填写内容须与软件著作权登记一致	
软件名称	金属层状复合材料构件的制备与测试虚拟仿真实验
是否与课程名称一致	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
<p>每栏只填写一个著作权人，并勾选该著作权人类型。如勾选“其他”需填写具体内容；如存在多个著作权人，可自行增加著作人填写栏进行填报。</p>	
著作权人	著作权人类型
	<input checked="" type="checkbox"/> 课程所属学校 <input type="checkbox"/> 企业 <input type="checkbox"/> 课程负责人 <input type="checkbox"/> 学校团队成员 <input type="checkbox"/> 企业人员 <input type="checkbox"/> 其他
权利范围	全部权力
软件著作登记号	2020SR1833185
<p>如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。</p>	
受理流水号	

10.诚信承诺

本团队承诺：申报课程的实验教学设计具有一定的原创性，课程所属学校对本实验课程内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验课程的一切资源）享有著作权，保证所申报的课程或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

实验教学课程负责人（签字）：



2021年 6月 2日

11.附件材料清单

1.课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

2.课程内容学术性评价意见（必须提供）

[由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学科专业领域专家（不少于3名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。]

3.校外评价意见（可选提供）

（评价意见作为课程有关学术水平、课程质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由课程应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以1份为宜，不得超过2份。无统一格式要求。）

