

# 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：高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验

专业类代码：0804

负责人：王德永

联系电话：13584872170

申报学校：苏州大学

填表日期：2021年6月8日

推荐单位：苏州大学

中华人民共和国教育部制

二〇二一年四月

## 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	高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验	是否曾被推荐	○是 <input checked="" type="radio"/> 否
实验所属课程(可填多个)	钢铁冶金学, 钢铁厂设计原理		
性质	○独立实验课 <input checked="" type="radio"/> 课程实验		
实验对应专业	冶金工程		
实验类型	○基础练习型 <input checked="" type="radio"/> 综合设计型 ○研究探索型 ○其他		
虚拟仿真必要性	<input checked="" type="checkbox"/> 高危或极端环境 <input checked="" type="checkbox"/> 高成本、高消耗 <input checked="" type="checkbox"/> 不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练		
实验语言	<input checked="" type="radio"/> 中文 ○中文+外文字幕(语种) ○外文(语种)		
实验已开设期次	共 次: 2 期次 1. 2019年9月至2020年1月, 55人 2. 2020年9月至2021年1月, 53人		
有效链接网址	<a href="http://steelsim.ssis.suda.edu.cn/exp/1.html">http://steelsim.ssis.suda.edu.cn/exp/1.html</a>		

## 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	王德永	1974.06	苏州大学	副院长	教授	13584872170	dywang@suda.edu.cn	实验教学总体设计和在线教学服务
2	屈天鹏	1981.02	苏州大学	无	副教授	13812759225	qutianpeng@suda.edu.cn	实验系统持续改进和在线教学服务
3	胡绍岩	1992.06	苏州大学	无	副教授	13439361912	syhu616@suda.edu.cn	实验平台维护和在线教学服务
4	盛敏奇	1983.10	苏州大学	系主任	副教授	18251186252	shengminqi@suda.edu.cn	实验课程教学组织与在线教学服务

5	王慧华	1976.11	苏州大学	无	副教授	13862144929	hhwang@suda.edu.cn	教学组织与课程管理
---	-----	---------	------	---	-----	-------------	--------------------	-----------

## 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	丁汉林	1980.06	苏州大学	副院长	教授	实验教学能力培养设计
2	国宏伟	1978.10	苏州大学	院长助理	教授	实验教学能力培养设计
3	吕凡	1984.02	苏州大学	实验中心主任	高级实验师	实验教学步骤设计和在线教学服务
4	伍凌	1984.09	苏州大学	研究所所长	教授	实验教学步骤设计
5	仲兆准	1983.12	苏州大学	无	副教授	实验平台维护和在线教学服务
6	侯栋	1990.04	苏州大学	无	副教授	实验教学步骤设计
7	李向龙	1987.08	苏州大学	无	讲师	仿真实验程序设计
8	苏丽娟	1986.01	苏州大学	无	实验室	实验教学步骤设计
9	耿庆功	1987.08	山东星科智能科技股份有限公司	无	工程师	程序开发和技术支持
10	雷康康	1996.07	山东星科智能科技股份有限公司	无	工程师	3D模型设计
11	张川	1989.02	山东星科智能科技股份有限公司	经理	工程师	UI效果设计
12	吴元山	1982.11	南京恒点信息技术有限公司	无	工程师	网页程序和技术支持
13	梁树宝	1978.09	南京恒点信息技术有限公司	无	工程师	技术支持
14	蒋法成	1977.05	南京恒点信息技术有限公司	总经理	工程师	技术支持

团队总人数：19 人 其中高校人员数量：13 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）

本实验所属课程：《钢铁冶金学》和《钢铁厂设计原理》，均为冶金工程专业必修课。团队成员长期承担本科生一线教学任务，项目开发成功后，及时将仿真实验课程应用于教学之中，目前已开设 2 个教学周期，实验成绩纳入课程成绩评价体系，团队成员为学生提供全面、细致的教学指导服务。团队成员不断收集用户反馈，对实验项目进行优化、完善和提升，进一步拓展实验功能。

主持/参与的教学研究工作：“材料制备与加工工程”新工科专业建设探索与实践，教育部新工科建设项目（2018）；基于信息化技术与创新理论的新冶金工程专业建设与实践，苏州大学教改重点课题（2018）；“钢铁是怎样炼成的”，苏州大学 3I 新生研讨课程（2016）。

学术研究情况：主持国家自然科学基金面上项目 2 项，参与国家基金重点项目 1 项，承担产学研课题 15 项，发表高水平论文 150 余篇，出版著作 2 部，申请发明专利 35 件，获省部级以上科技奖励 8 项。

教学表彰/奖励：指导学生获第三届全国大学生科技竞赛特等奖 1 项（2020）；指导学生获得全国 TRIZ 杯大学生创新方法大赛特等奖 1 项（2016）；获江苏省首届微课教学比赛二等奖 1 次（2015），苏州大学教学成果二等奖 1 次（2014）。

注：必要的技术支持人员可作为团队主要成员；“承担任务”中除填写任务分工内容外，请说明属于在线教学服务人员还是技术支持人员。

### 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）实验的必要性及实用性

**1. 冶金过程虚拟仿真实验是培养学生工程实践和创新能力的载体，符合“新工科”发展方向，也是冶金学科践行“立德树人”理念的重要体现**

在新经济发展背景下，智能制造、互联网+、大数据、云计算等新技术不断涌现，新一轮产业革命对工科类专业建设提出了新要求，“新工科”应运而生。“新工科”改革的两大方向是：新兴工科专业建设和依托工程教育框架的传统工科专业升级改造。新工科的本质是培养创新型人才，核心目标是培养伟大的工程师。因此，如何提升工科学生工程实践能力和创新创业能力是新工科建设的核心要务。

与此同时，我国工科教育存在工程能力与创新能力缺位的现象，以冶金工程专业为例，课程教育以理论教学为主，课程知识陈旧，前沿性、实践性、创新性内容严重不足，制约了优秀工程创新人才的培养。为了响应教育部“新工科”号召，全面践行“学生中心、产出导向、持续改进”的质量理念，构建适应新经济发展要求的冶金工程“新工科”专业势在必行。

在冶金工程专业升级改造过程中，探索学生工程实践和创新能力协同提升的新途径，形成贯穿全程的冶金工程实践能力和创新能力协同培养新模式是最核心的任务。转炉炼钢是钢铁生产最核心的工序，选择其进行虚拟仿真实验，通过巧妙设计，使实验涵盖设计性、流程性、操作性、创新性等所有要素，可以成为培养学生工程实践能力和创新能力的重要载体。同时，将“立德树人”和“思政育人”有效融入教学全过程，采用情景体验式教学新方法，不仅使学生感受到我国钢铁事业在国家经济发展中的重要地位，而且能潜移默化地激发学生投身于国家建设的情怀和使命感，也是虚拟仿真实验教学的重要任务。

**2. 转炉炼钢属于高危、高耗能、高成本的工业生产过程，依托虚拟仿真手段开展实验是最好的选择**

钢铁工业是国民经济和国防建设的支柱产业，钢铁材料是应用最广泛的工程材料。在可以预见的未来，没有任何一种材料可以完全代替钢铁材料。1996年起，我国钢铁产量已跃居世界第一，到2019年，我国粗钢产量达9.9亿吨，占世界粗钢总产量的53.3%，已成为名副其实的钢铁大国。

钢铁生产工序复杂，流程长，规模庞大，设备密集，是典型的高危行业。2012年2月14日，财政部、安全监管总局印发了《企业安全生产费用提取和使用管理办法》，将冶金纳入9个高危行业之一。转炉炼钢是钢铁生产“长流程炼钢”（矿石→铁水→钢水→连铸坯→钢铁产品）最重要、最核心的工序，是将铁水和废钢冶炼成高温钢水的过程，起着承上启下的作用，直接决定了钢铁生产的效率和产品质量，其主要特点是：高温（1400~1650℃），高危易爆（尾气中CO含量高达50%以上），高能耗（吨钢能耗为700kg标准煤），高成本（普通碳钢成本为2200元/t），实际转炉炼钢为不可逆过程，采用全密闭、不可视操作。

综上，转炉炼钢实验教学存在巨大困难：①工序复杂，设备昂贵，高温、高压、高产导致实验成本极高，无法真实呈现或还原；②课堂和实验教学无法真实展现炼钢全过程，知识碎片化严重，学生感知性差，只能靠主观想象来理解基本知识和原理（包括转炉内化学反应、流体流动、气体迁移、物质交换等），极大地降低了学生的学习热情；③实验教学只能通过搭建简单常温物理模型来实现操作，设计性和操作性均有显著欠缺，制约了学生工程实践能力和创新能力的培养。而基于现代信息技术构建虚拟仿真实验可以很好地解决以上难题。

### **3. 开展高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验契合冶金工程专业本科生培养方案升级改造**

冶金工程是研究从矿石等资源中提取金属及其化合物、并制成具有良好加工和使用性能材料的工程技术专业。本专业旨在培养熟练掌握冶金工程学科基础知识和理论，了解冶金工程领域新工艺及前沿技术，具备较强创新意识、工程实践能力和科技开发能力的复合型人才。《钢铁冶金学》是冶金工程专业的骨干课程，是提高学生理论与工程实践能力的重要途径，也是深入实施“卓越工程师培养计划”的重要组成部分。本虚拟仿真实验课程重点针对《钢铁冶金学》中的“转炉炼钢冶炼工艺”部分而展开，能够让学生身临其境地了解转炉炼钢相关设备设施，掌握相关工艺参数的设计依据，并在虚拟环境中亲自动手完成炼钢过程操作，全面、真实地了解高端钢铁材料转炉冶炼工艺，更加深刻地理解和掌握相关知识点，提升自身的工程实践能力和创新能力。

## (2) 教学设计的合理性

转炉炼钢是目前我国最主要的炼钢方法，是长流程炼钢的核心工序，对炼钢的能耗指标和钢水质量有至关重要的影响；同时转炉炼钢也是危险系数最高的环节，涉及高温、高压、易爆等多重危险源，难以向学生真实呈现转炉炼钢过程，所以本团队选取转炉炼钢这一典型工序作为虚拟仿真对象。

在教学设计中，本项目坚持以学生为中心的实验教学理念，构建了基于真实炼钢环境的虚拟仿真实验场景，并采用目标导向、交互反馈的实验设计方法。

首先通过视频教学的方式，向学生直观展示转炉炼钢设备的详细功能、内部构造、布置方式和装配关系；然后学生可以进入“实景漫游模式”，置身转炉炼钢车间，自主观察和操作转炉炼钢的相关设备。

在熟悉转炉炼钢设备的基础上，学生进入目标设计环节，自主选择拟冶炼的高端钢铁材料种类，获取虚拟仿真实验中转炉炼钢的目标成分和目标温度；为了丰富实验的探究性，学生还可以自主选择炼钢的原料，并根据炼钢原料的不同和目标钢种的不同，计算炼钢所需的氧气、石灰、白云石、矿石、合金等辅料的消耗量，并设计出合理的炼钢氧枪操作工艺、造渣工艺和出钢合金化工艺，力求用最少的原辅料消耗，获得成分温度合格的钢水。

为了让学生了解转炉内部的高温反应状态，本项目将“抽象问题形象化”，利用最新的钢水成分温度预测模型，实时显示炉内钢水的成分、温度和炉渣的泡沫化状态，帮助学生建立操作参数与炉内状态之间的关系概念，充分体现教学性。

## (3) 实验系统的先进性

### 1. 实验内容涵盖转炉炼钢领域的最新技术

在实现“碳达峰、碳中和”伟大目标的时代背景下，将  $\text{CO}_2$  作为资源循环利用于炼钢过程是具有重大意义的。本项目将  $\text{CO}_2$  炼钢这一前沿技术融入虚拟仿真实验，学生可自主选择  $\text{CO}_2$  作为转炉炼钢的顶吹气体和底吹气体，并检验  $\text{CO}_2$  喷吹量对冶炼目标达成率的影响。

除  $\text{CO}_2$  炼钢之外，本项目还将石灰石 ( $\text{CaCO}_3$ ) 炼钢这一最新技术融入虚拟仿真实验，学生可使用石灰石 ( $\text{CaCO}_3$ ) 替代石灰 ( $\text{CaO}$ ) 作为转炉炼钢的造渣辅料，自主设计石灰石的加入量和加入时机，检验转炉内部的炉渣熔化效果和杂质去除效果。



为了准确展示转炉内部的高温反应状态，本项目将最新研究的钢水成分温度预测模型融入虚拟仿真实验作为底层数学模型，该模型已在实际转炉上得到工程应用，复杂工况下的碳温双命中率超过 90%，可以比较准确地反映出学生操作与炉内状态之间的作用关系，为学生优化操作和深化理解提供有力帮助。

## **2. 实验系统高度还原真实场景和操作模式，涵盖机械设计、自动化控制和工艺模型预测等学科内容，充分体现学科交叉优势**

转炉炼钢是一个复杂系统，包括大量的机械设备、自动化控制和工艺模型，本项目高度还原转炉炼钢的真实场景，并为学生提供高度仿真的操作画面，加深学生对于工程实际的了解，体会学科交叉的工程内涵，帮助学生开拓解决专业问题的思路，培养学生的创新能力和实践能力。

## **3. 软件开发技术的先进性**

本系统是基于 B/S 架构设计的虚拟仿真实验教学平台。系统采用轻量化的开发语言和模块化设计方案，部署简单、使用方便。系统支持分布式部署方案，可随使用情况动态扩充容量，基于容器化部署还可实现自动扩容，无需人为干预。

实验采用 WebGL 图形技术、3D 仿真技术等手段对转炉炼钢的相关设备和场景进行建模，真实度高，运行流畅，视觉效果美观。

### **3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）**

本实验依据冶金工程专业核心课程《钢铁冶金学》教学大纲及关键知识点，结合先进高端钢铁材料制造的应用背景，以“冶炼符合规定要求的高端钢种”为实验任务，构建了基于真实炼钢生产的虚拟仿真实验场景。实验旨在培养学生探究式思维方式和解决复杂工程问题的能力，教学目标包括：

1. 在设备认知环节，让学生身临其境地感知转炉炼钢生产场景，帮助学生了解炼钢车间布置和炼钢设备组成，掌握转炉炼钢主体设备的内部构造和装配关系，熟悉真实场景下的炼钢设备动作模式。

2. 在冶炼参数设计环节，学生以“冶炼目标钢种”为导向，自主设计工艺路线和工艺参数，熟悉各炼钢工序的冶金功能，了解不同铁水和废钢的冶炼特性，掌握转炉吹炼参数和脱氧合金化参数的计算方法。

3. 在实训练钢环节，学生自主设计供氧制度、造渣制度和底吹制度，探究吹炼工艺制度和冶炼过程平稳性（是否返干、喷溅）、冶炼终点达成率（钢水成分、

温度)之间的内在关联,深刻理解供氧、造渣和底吹对转炉炉内反应规律的影响;出钢及合金化过程,让学生了解转炉终点控制的重要性,并掌握出钢过程脱氧合金化的操作方法。

4. 实验结束后,学生对实验方案和实验结果进行归纳总结,建立起原料条件、过程操作和熔池成分温度变化之间的内在关联,深刻理解转炉炼钢的气-渣-金三相反应机制,熟练掌握炼钢工艺制度的设计依据,能够根据原料条件和目标钢种设计出合理的吹炼工艺制度,具备较强的工程实践能力和自主创新能力。

### 3-3 实验课时

- (1) 实验所属课程课时: 72 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)

本实验包括 3 个目标明确、逻辑清晰的实验环节,共 4 个学时,对应《钢铁冶金学》、《钢铁厂设计原理》课程大纲的 13 个关键知识点,如图 1 所示。

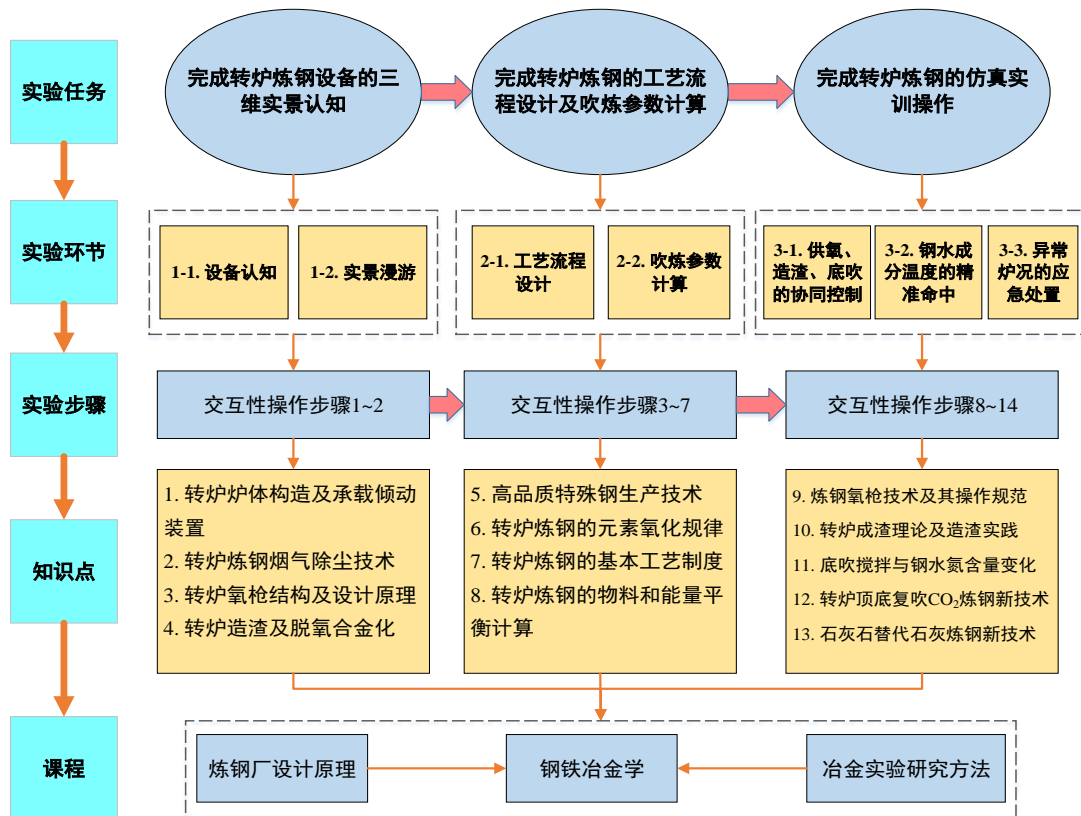


图 1 本项目的总体框架图

开始实验后，学生首先需要了解高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验背景和考核要求，并简单学习转炉炼钢理论知识；然后，学生置身于转炉炼钢车间的三维立体虚拟环境中，以实景漫游模式近距离感知转炉炼钢的主要设备组成及其装配关系，了解设备的功能属性，并参与完成可运动设备的动态控制。

实验系统中，为学生提供了多个高端钢种和多种炼钢主原料，学生可自由选择 and 搭配，然后学生需要根据所选目标钢种的成分和性能特点完成工艺路线设计，根据所选炼钢主原料的特点完成转炉操作流程设计和转炉吹炼参数计算，计算结果将为转炉炼钢的仿真实训操作提供后台运行数据。最后，学生进入转炉炼钢仿真实训环节，废钢和铁水等原料被加入转炉炉内，在吹氧炼钢过程中，学生需要根据原料条件、吹炼时间、炉况信息、目标钢种等因素来动态调整氧枪操作、造渣操作、底吹操作、合金化操作，以完成转炉冶炼任务。本项目自主开发的后台模型可根据学生操作和吹炼参数实时预报钢水成分、温度、炉渣（FeO）含量以及炉气中 CO 含量等数据，针对返干、喷溅等异常工况给出提示和报警信息，为学生动态调整操作参数提供指导。

## **（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）**

本实验采用 WebGL、3D 仿真技术等手段建立了转炉炼钢车间的虚拟场景，利用钢结构搭建厂房骨架，转炉、除尘、供氧、造渣、加料等主体设备的外形尺寸、内部构造、安装位置均依据某钢厂 150 吨转炉炼钢车间的设计图纸而确定。

对于可运动的设备，学生可以通过按钮进行控制，真实呈现该设备的运动规律，掌握各设备之间的装配关系和动作关系。

本实验的炼钢操作画面与实际转炉操作画面高度仿真，学生可以实时调节顶吹供氧参数、底吹搅拌参数、造渣参数以及出钢合金化参数，炼钢过程中的吹炼时间、供氧比例、炉气成分、炉渣（FeO）含量等辅助参数均直观地显示在操作画面，为学生操作提供参考。

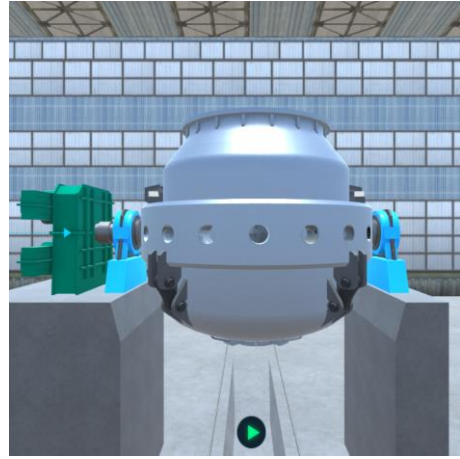
更重要的是，本实验将最新研究的钢水成分温度预测模型融入虚拟仿真实验作为底层数学模型，该模型可以根据原料条件和过程操作实时预测转炉炉内的钢水成分温度和炉渣泡沫化状态，并以曲线和动画的形式直观呈现在操作画面上，为学生操作提供指导。此外，该模型还可以预测出返干、喷溅等事故工况，以动

画形式展示事故场景，并给出报警信号。该模型不仅应用于本实验的仿真项目，也已在实际转炉上得到工程应用。

本实验涉及仿真模型的虚实对比如下图所示。



(a) 实际转炉



(b) 虚拟仿真实验中的转炉



(c) 实际氧枪



(d) 虚拟仿真实验中的氧枪



(e) 实际氧枪喷头剖面



(f) 虚拟仿真实验中的氧枪喷头剖面



(g) 实际加废钢过程



(h) 虚拟仿真实验中的加废钢过程



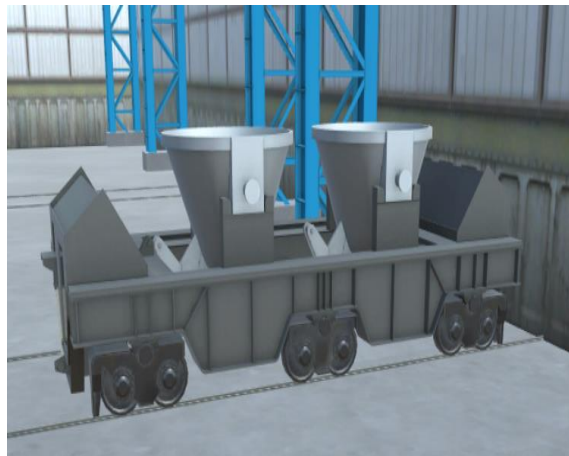
(i) 实际兑铁水过程



(j) 虚拟仿真实验中的兑铁水过程



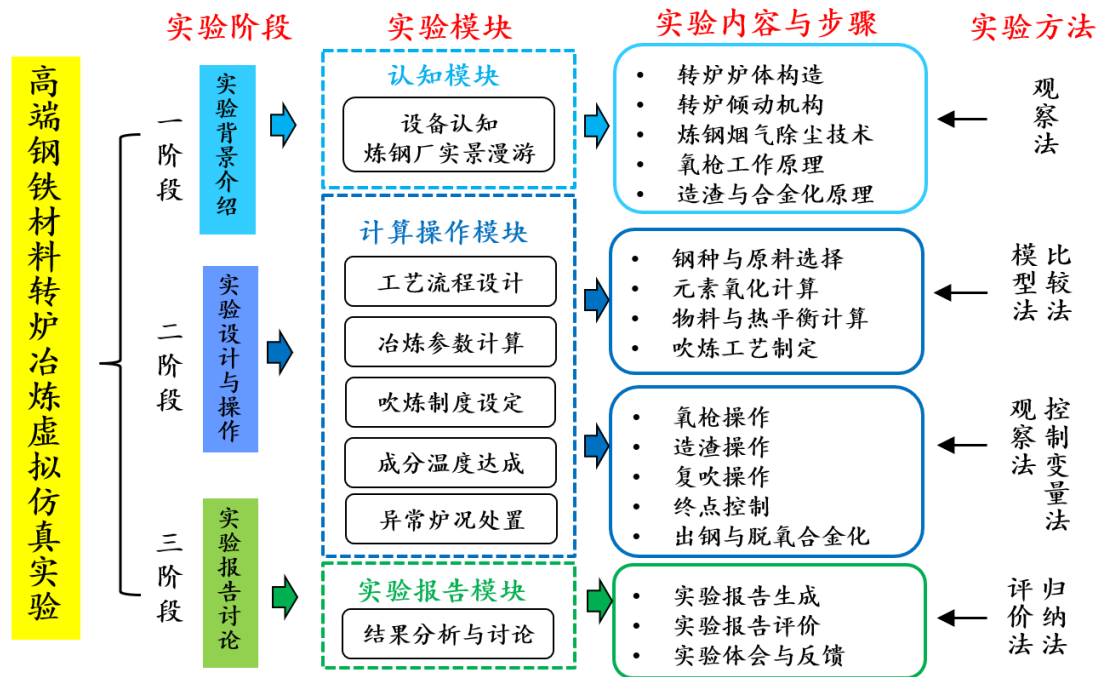
(k) 实际渣罐车



(l) 虚拟仿真实验中的渣罐车

图 2 通过虚拟仿真技术实现虚实结合

### 3-5 实验教学过程与实验方法



#### (1) 实验教学过程

本实验坚持以学生为中心的教学理念，采用线上线下“交互式”教学模式，最大限度地发挥学生学习自主性，教学过程中采用启发式、案例式教学，引导学生发现问题，启发学生运用所学理论知识分析问题，并将形成的解决方案在虚拟仿真平台中有效解决，形成问题发现到解决的闭路循环，如图3所示，

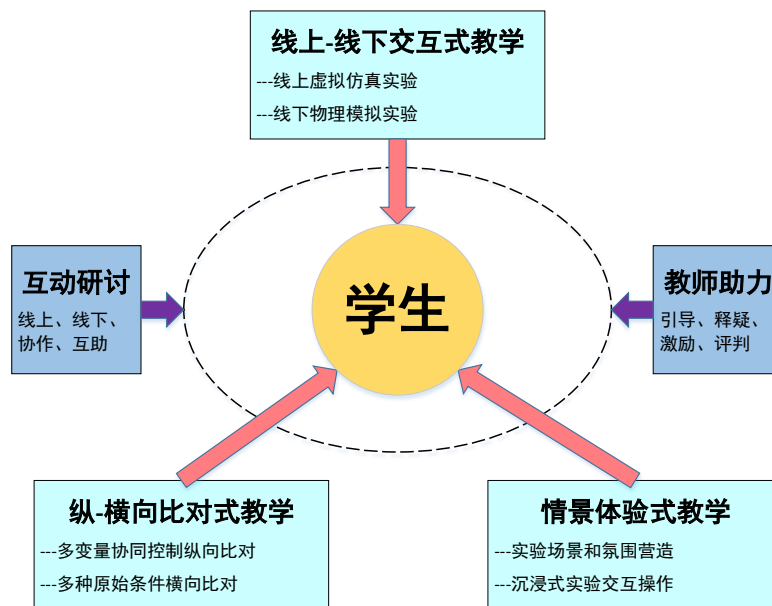


图3 以学生为中心的实验教学方法

将现代信息技术融入实验教学过程，提高实验的趣味性和吸引力，学生应用手机扫码方式获取实验信息；实验过程利用文字、多彩动态图片、无线传送视频方式等展示实验操作；开发专门的实验 APP 和公众号，供学生线上提交实验报告、查询实验成绩和与教师互动交流等，加强学生参与和过程管理。

采用纵-横向比对式教学法。如：对于转炉炼钢炉内反应机理的实验探究，不仅可以实现不同氧枪操作制度、不同造渣制度对炉内反应状态影响的纵向对比，还可以实现吹炼不同铁水及废钢的横向对比。这种课堂教学、物理模拟和虚拟仿真实验互相协同和促进教学方法以及典型反应器纵横向比对式教学法能够使学生对钢铁生产过程有更深入的了解。

在实验教学中，强调“以学生为本，让学生受益”的实验教学理念，以学生自己学习为主，教师指导为辅，教师尊重学生的想法，鼓励、引导学生主动学习，可以有效调动学生的学习积极性，提高实验教学的有效度。

通过有趣的交互式学习，促使学生掌握转炉炼钢的工艺原理，深刻认识冶金过程中普遍存在的冶金传输现象，进一步巩固了从教科书中所学的基础理论。极大地拓展学生的学习资源和空间，特别是可以弥补高温密闭冶金反应器内冶金现象不可见条件下难以开设此类实验课程的不足，有利于拓展实验课程的深度与时空范围。通过对学术前沿问题的讨论，可以引导学生继续读研深造。

## **(2) 实验方法**

本项目综合采用了自主设计法、容错探究法、观察法和类比法等实验方法，培养学生自主探究式的思维方式和解决复杂问题的综合能力。

本项目的虚拟仿真实验教学平台以计算机仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托，采用面向服务的软件架构开发，集实物仿真、创新设计、智能指导、虚拟实验结果自动批改和教学管理于一体，是具有良好的自主性、交互性和可扩展性的虚拟实验教学平台。利用本项目的虚拟仿真教学平台，配合线下物理模拟实验，引导学生充分认识转炉炼钢生产过程，深刻理解转炉炼钢的冶金反应机理。

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 14 步**

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	掌握转炉炼钢设备的动作模式	300 秒	在实景漫游中，完成“打开挡火门，向前倾动转炉，转炉回正，降下烟罩，将氧枪插入转炉炉内”五个动作，每完成一个动作得 20 分，全部完成得满分	100	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 教师评价报告
2	掌握高端钢铁材料的成分要求和性能特点	300 秒	查阅钢种信息，选出目标钢种，获得满分；跳过此步骤不得分	100	
3	掌握目标钢种的生产工艺路线	300 秒	三次以内完成正确的工艺路线设计，获得满分；每增加一次扣 20 分	100	
4	掌握不同炼钢主原料的特点和冶炼注意事项	300 秒	自主搭配铁水和废钢，获得满分；跳过此步骤不得分	100	
5	掌握转炉炼钢的具体操作流程	300 秒	三次以内完成正确的操作流程设计，获得满分；每增加一次扣 20 分	100	



6	掌握转炉炼钢的吹炼参数计算方法	600 秒	三次以内输入正确结果（计算结果允许偏差±20%），获得满分；每增加一次扣 20 分	100		
7	掌握脱氧及合金化参数计算方法	600 秒	三次以内输入正确结果（计算结果允许偏差±20%），获得满分；每增加一次扣 20 分	100		
8	掌握合理的供氧制度设计方法	300 秒	氧气流量在合理范围(26000~40000Nm <sup>3</sup> /h)，获得 50 分；每超限一次扣 10 分。 过程枪位始终在合理范围内(1100~3000mm)，获得 50 分；每超限一次扣 10 分。	100		
9	掌握合理的造渣制度设计方法	300 秒	开始吹氧 60 秒内加入造渣料，得 30 分；每延迟 30 秒扣 10 分。 开始吹氧 900 秒之后不再加入任何造渣料，得 30 分；每加一次扣 10 分。 各种造渣料的实际加入量都在合理范围内（理论值 60~140%），得 40 分；一种造渣料超出范围，扣 10 分。	100		

10	掌握合理的底吹制度设计方法	180 秒	开始吹氧 720 秒内将“底吹 N <sub>2</sub> ”切换成“底吹 Ar”或“底吹 CO <sub>2</sub> ”，获得满分；每延迟 30 秒，扣 10 分	100
11	掌握喷溅、返干等异常炉况的出现原因和处置方法	1200 秒	“小返干”每出现一次扣 10 分。 “中返干”每出现一次扣 20 分。 “大返干”每出现一次扣 30 分。 “小喷溅”每出现一次扣 10 分。 “中喷溅”每出现一次扣 20 分。 “大喷溅”每出现一次扣 30 分。	100
12	掌握转炉出钢时机，了解转炉出钢的动作模式	120 秒	点击“出钢”按钮时，如果碳含量超出目标范围（0.01~0.05%），每超限 0.02%扣 10 分；如果出钢磷含量高于 0.025%，每高 0.005%扣 10 分；如果出钢温度超出目标范围（1630~1670℃），每超限 10℃扣 10 分	100

13	掌握钢水的脱氧及合金化方法	120 秒	碳、硅、锰、铝、硫等合金元素达到目标要求，获得满分；一个元素不合扣 20 分	100
14	掌握转炉溅渣护炉的基本原理和操作方法	120 秒	利用氧枪喷吹 N <sub>2</sub> ，获得满分；否则不得分。	100

## (2) 交互性步骤详细说明

下面结合虚拟仿真实验界面，介绍本项目的操作步骤、实验方法和实验要求。开始实验：

如图 4 所示，在浏览器中输入网址(<http://steelsim.ssis.suda.edu.cn/exp/1.html>)，即可打开本实验项目，在线完成所有实验操作。

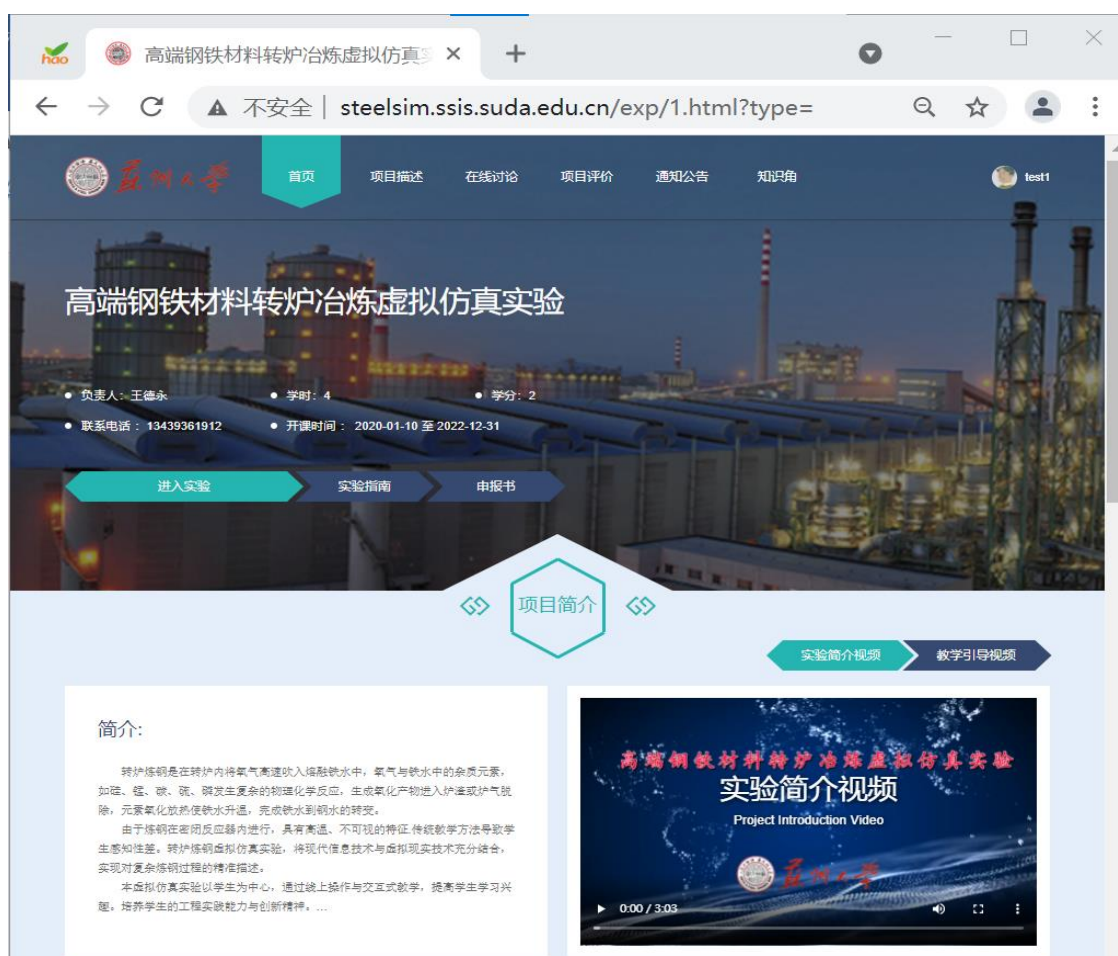


图 4 本实验项目网站

进入实验前，学生可以在线查看本项目的实验简介和引导视频，并通过在线知识角（图 5）中的文献和视频资料，对本实验相关知识点进行自主学习。实验过程中，学生遇到任何困难，可以随时与课程顾问老师联系。

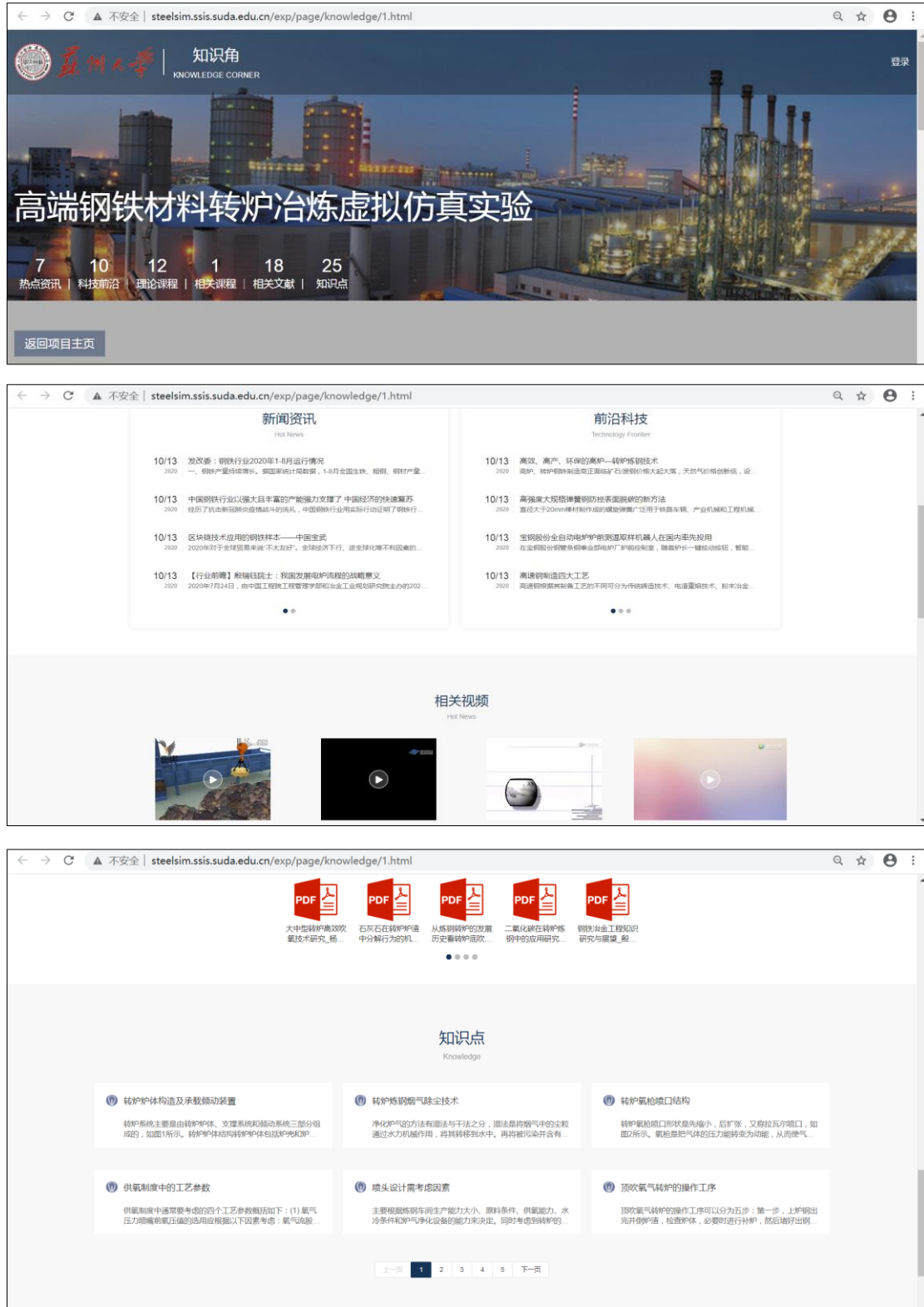


图 5 本项目在线知识角

学生交互性操作步骤数量：14步。

### 步骤 1. 学习炼钢设备组成，操作设备完成指定动作

通过“三维演示”学习转炉炼钢的设备组成，了解主体设备的结构、功能以及各设备之间的装配关系，观察转炉炼钢车间的框架结构和空间布局，了解转炉炼钢各类原辅物料的储存方式和加入方式。

进入“实景漫游”模式，通过键盘的 W（前进）、A（向左）、S（后退）、D（向右）按键和鼠标切换观察位置和观察角度，自主查看转炉炼钢的所有设备，沉浸式感知转炉炼钢车间。

根据系统提示，完成“打开挡火门，向前倾动转炉，转炉回正，下降烟罩，将氧枪插入转炉炉内”等设备动作，掌握转炉炼钢主体设备的动作模式。



图 6 实景漫游及设备动作检验

## 步骤 2. 自主选择拟冶炼的高端钢铁材料

进入实验系统后，学生首先需要选择目标钢种，本项目提供了高铁轴承钢、高强度汽车板钢、石油管线钢和高级别船板钢四种典型高品质特殊钢，并给出了钢种的用途、性能和成分要求，学生可自主选择某一个钢种作为冶炼目标。



图 7 选择拟冶炼的高端钢铁材料

## 步骤 3. 目标钢种的生产工艺路线设计

完成钢种选择之后，学生需要根据所选钢种的成分要求和性能要求设计其生产工艺路线，系统给出了待选工序及其功能简介，学生需从中选择并正确排序。



图 8 目标钢种选择及工艺路线设计

## 步骤 4. 炼钢主原料选择

完成目标钢种的选择之后，学生需要选择转炉炼钢的主原料，不同的原料条件对应不同的操作要点。本项目提供了常规铁水、高硅铁水、低硅铁水和高磷铁水四种铁水条件，以及重型废钢、轻型废钢和打包废钢三种废钢条件，学生可自由选择并搭配铁水和废钢，了解不同原料条件所对应的铁水成分、温度、加入量和废钢成分、温度、加入量，以及不同原料条件冶炼的注意事项。



图 9 炼钢主原料选择

## 步骤 5. 转炉炼钢操作流程设计

在开始转炉炼钢仿真实训之前，学生需要完成转炉炼钢操作流程的设计，系统随机提供转炉炼钢的操作步骤，学生需要对操作步骤进行筛选和排序，直至完成正确的转炉操作流程，在后续的仿真实训中流程步骤将自动切换。



图 10 转炉炼钢操作流程设计

## 步骤 6. 转炉炼钢吹炼参数计算

完成目标钢种和原料条件的选择之后，学生需根据系统提供的理论公式进行转炉吹炼参数计算，主要包括供氧量、石灰加入量、白云石加入量等，学生将计算结果填入表格，后台模型校验计算结果的准确性，为模拟炼钢提供数据参考。



图 11 转炉炼钢吹炼参数计算



## 步骤 7. 脱氧及合金化参数计算

除了吹炼参数的计算之外，学生还需根据系统提供的理论公式进行脱氧及合金化参数设计计算，包括增碳剂、硅铁、锰铁等合金的加入量，学生将计算结果填入相应表格，后台模型自动校验计算结果的准确性，为模拟炼钢提供数据参考。

2、脱氧及合金化参数计算

高铁轴承钢

碳C (%)	硅Si (%)	锰Mn (%)	铬Cr (%)	磷P (%)	硫S (%)	氮N (%)
0.95-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	1.40-1.65	≤0.015	≤0.002	≤0.003

合金加入量 (kg) :  $W_{i, \text{合金}} = 150 \times 1000 \times (\omega_{i, \text{目标}} - \omega_{i, \text{钢液}}) / \omega_{i, \text{合金}} / \eta_i$

式中,  $\omega_{i, \text{目标}}$  为目标钢种中元素的含量;  $\omega_{i, \text{钢液}}$  为出钢钢液中元素的含量;  $\omega_{i, \text{合金}}$  为合金中元素的含量;  $\eta_i$  为元素的收得率。

合金主要成分及收得率:

- (1) 增碳剂, 选取石墨粉, 含碳量约为95%, 碳元素的收得率约为50%。
- (2) 硅铁合金, 硅含量约为90%, 硅元素的收得率约为98%。
- (3) 锰铁合金, 选取低碳锰铁, 锰含量约为83%, 锰元素的收得率约为95%。

计算结果

理论计算值		理论计算值	
氧气总量		矿石总量	
氧气流量		增碳剂	
石灰总量		硅铁合金	
白云石总量		锰铁合金	

结果仅供参考, 以最低消耗实现冶炼目标为最优。

图 12 脱氧及合金化参数计算

完成上述步骤后，学生点击“实训练钢”，系统进入转炉炼钢仿真实训。

## 步骤 8. 转炉炼钢供氧制度设计

供氧是转炉炼钢的核心操作，直接影响到炉内元素氧化和熔池升温，学生需根据所选原料条件和目标钢种，结合转炉炼钢基本原理，自主设计供氧制度，在表格中填写不同吹炼时刻所对应的氧枪枪位、氧气流量和二氧化碳流量，随后系统将根据预设参数自动执行吹氧炼钢程序，检验预设供氧制度的合理性。

对于供氧制度设计，如有不解之处，可点击右上角的“？”按钮，系统提供相关的帮助文档。



### 【供氧制度设计】

#### 一、表格填写说明

请在表格中填写拟设定的供氧制度，包括吹炼时间、氧枪枪位、氧气流量和二氧化碳流量。

表格第一行的“吹炼时间”为 0，表示吹氧开始时刻，请设定开始吹氧时的氧枪枪位、氧气流量或二氧化碳流量。“吹炼时间”是从吹氧开始计时的，请在随后的表格中输入多组“吹炼时间”和“氧枪枪位”、“氧气流量”或“二氧化碳流量”，系统将在吹氧炼钢过程中自动执行您所设计的供氧制度，即在设定时刻将供氧参数调整为设定值。您可根据需要自主设计供氧制度，无需将表格全部填满。

举例说明：如果表格填写内容如下，说明开始吹氧时，氧枪枪位为 2000 mm，氧气流量为 32000 Nm<sup>3</sup>/h，二氧化碳流量为 0，按照此参数吹炼至 60 秒时，氧枪枪位调整为 1600 mm，氧气流量调整为 30000 Nm<sup>3</sup>/h，二氧化碳流量调整为 2000 Nm<sup>3</sup>/h，系统将按照此参数一直吹炼下去，直到您点击“出钢”按钮，结束吹氧。

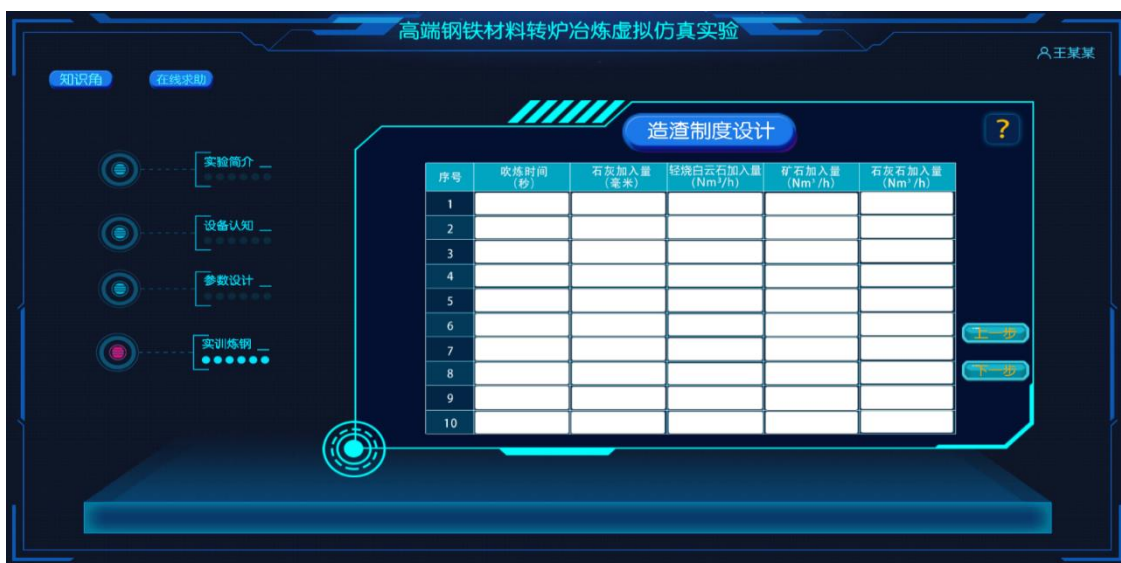
序号	吹炼时间 (秒)	氧枪枪位 (毫米)	氧气流量 (Nm <sup>3</sup> /h)	二氧化碳流量 (Nm <sup>3</sup> /h)
1	0	2000	32000	0
2	60	1600	30000	2000
3				
4				

图 13 转炉炼钢的供氧制度设计

## 步骤 9. 转炉炼钢造渣制度设计

造渣也是转炉炼钢的关键操作，直接影响磷、硫等杂质元素的脱除，学生需根据所选的原料条件和目标钢种，结合转炉炼钢基本原理，自主设计造渣制度，在表格中填写不同吹炼时刻需要加入的造渣料重量，随后系统将根据预设参数自动执行加料操作，检验预设造渣制度的合理性。

对于造渣制度设计，如有不解之处，可点击右上角的“？”按钮，系统提供相关的帮助文档。



### 【造渣制度设计】

#### 一、表格填写说明

请在表格中填写拟设定的造渣制度，包括吹炼时间、石灰加入量、轻烧白云石加入量、矿石加入量和石灰石加入量。

“吹炼时间”是从吹氧开始计时的，在表格中填入“吹炼时间”和“石灰加入量”、“轻烧白云石加入量”、“矿石加入量”、“石灰石加入量”，系统将在吹炼过程中自动执行您所设计的造渣制度，即，在设定时刻向转炉内加入设定量的造渣物料。您可根据需要自主设计造渣制度，无需将表格全部填满。

举例说明：如果表格填写内容如下，表示在开始吹氧 30 秒时，向转炉内一次性加入 3000kg 石灰、2000kg 白云石、2000kg 矿石；然后在开始吹氧 300 秒时，向炉内一次性加入 2000kg 石灰、500kg 白云石、1000kg 矿石。

序号	吹炼时间 (秒)	石灰加入量 (千克)	白云石加入量 (千克)	矿石加入量 (千克)	石灰石加入量 (千克)
1	30	3000	2000	2000	0
2	300	2000	500	1000	0
3					
4					
5					

#### 二、造渣制度设计注意事项

造渣是炼钢的一项重要操作。造渣制度是确定合适的造渣方法、渣料的种类、

图 14 转炉炼钢的造渣制度设计

## 步骤 10. 转炉炼钢底吹制度设计

底吹也是转炉炼钢的关键操作，直接影响炉内动力学条件和钢水氮含量，学生需根据所选的原料条件和目标钢种，结合转炉炼钢基本原理，自主设计底吹制度，在表格中填写不同吹炼时刻所对应的底吹流量、底吹介质，随后系统将根据预设参数自动执行底吹操作，检验预设底吹制度的合理性。

对于供氧制度设计，如有不解之处，可点击右上角的“？”按钮，系统提供相关的帮助文档。



### 【底吹制度设计】

#### 一、表格填写说明

请在表格中填写拟设定的底吹制度，包括吹炼时间、氮气流量、氩气流量和二氧化碳流量

“吹炼时间”是从吹氧开始计时的，在表格中填入“吹炼时间”和“氮气流量”、“氩气流量”、“二氧化碳流量”，系统将在吹氧炼钢过程中自动执行您所设计的底吹制度，即，在设定时刻将底吹参数调整为设定值。您可根据需要自主设计底吹制度，无需将表格全部填满。

举例说明：如果表格填写内容如下，说明开始吹氧时，底吹介质为氮气，底吹流量为 300 Nm<sup>3</sup>/h，按照此参数吹炼至 720 秒时，底吹介质切换为氩气，底吹流量为 300 Nm<sup>3</sup>/h，系统将按照此参数一直吹炼下去，直到您点击“出钢”按钮。

序号	吹炼时间 (秒)	氮气流量 (Nm <sup>3</sup> /h)	氩气流量 (Nm <sup>3</sup> /h)	二氧化碳流量 (Nm <sup>3</sup> /h)
1	0	300	0	0
2	720	0	300	0
3				
4				
5				

#### 二、底吹制度设计注意事项

用于转炉底吹的气体介质主要包括氮气、氩气和二氧化碳，目前最常用的是

图 15 转炉炼钢的底吹制度设计

完成供氧制度、造渣制度和底吹制度设计之后，学生进入炼钢演示界面。开始炼钢后，系统按照预设参数自动吹氧炼钢，过程无法人为干预。但是，吹炼终点需自主判断，手动点击【出钢】按钮，并在出钢过程中完成钢水的脱氧合金化。

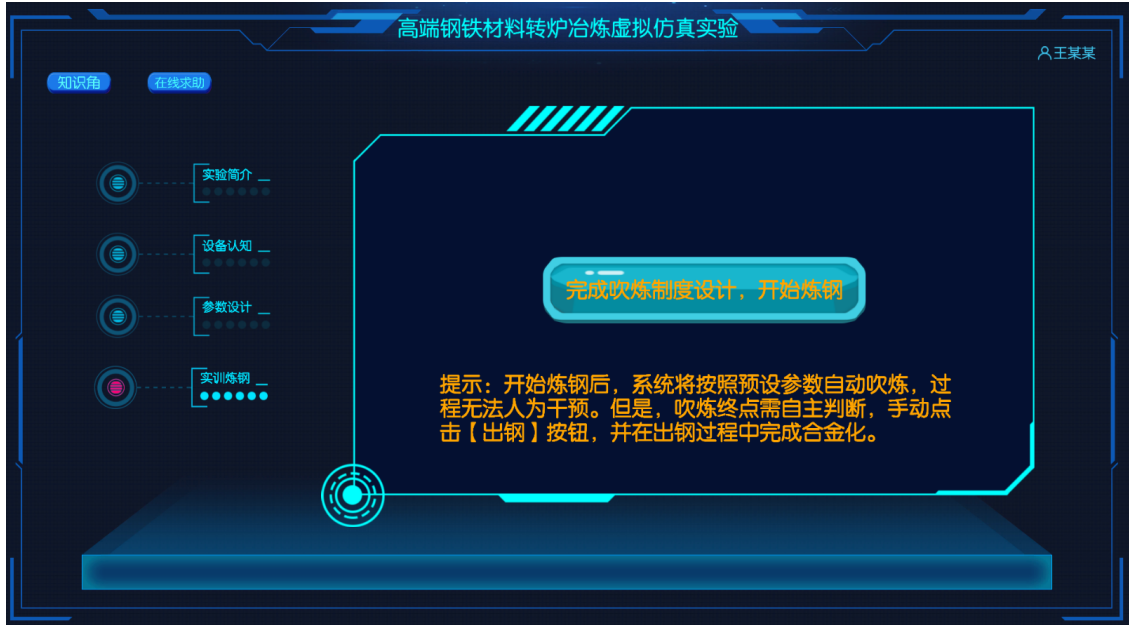


图 16 进入炼钢演示界面的重要提示

### 步骤 11. 吹氧炼钢过程中的异常炉况处置

在冶炼过程中，如果出现炉渣喷溅和返干等异常炉况，学生需要记录异常炉况的出现时间，并分析异常炉况的出现原因，在下次实验中优化吹炼工艺制度。

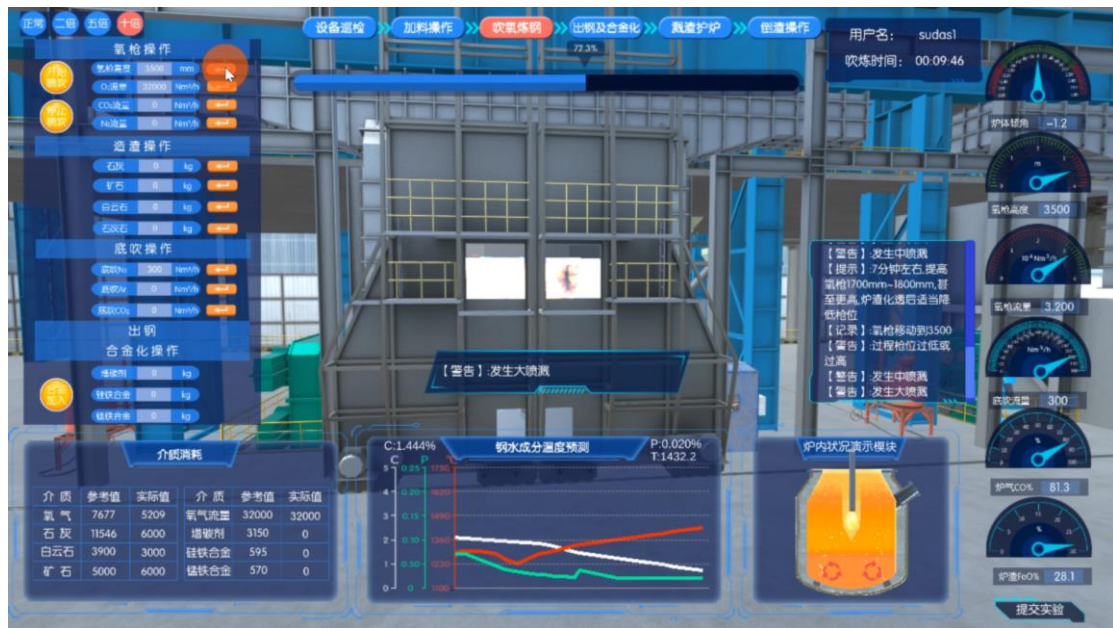


图 17 吹氧炼钢过程中的异常炉况提醒和演示

## 步骤 12. 吹炼终点控制及出钢操作

在转炉冶炼末期，学生需要密切关注钢水成分、温度的变化趋势，自主判定出钢时机，点击【出钢】按钮，争取获得成分温度都合格的目标钢水。

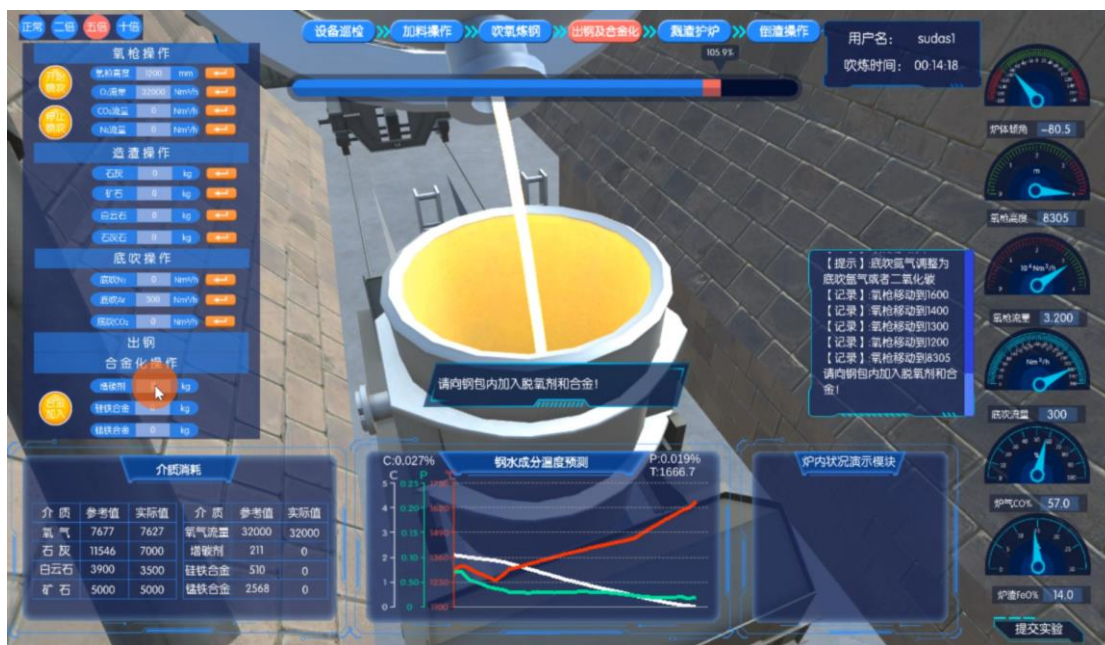


图 18 转炉出钢过程

## 步骤 13. 脱氧及合金化操作

脱氧及合金化是实现目标钢种成分合格的重要步骤，学生需要在转炉出钢过程中，根据目标钢种的成分要求，将适量的增碳剂、硅铁合金、锰铁合金等加入钢包内，合金加入量以理论计算结果为参考。

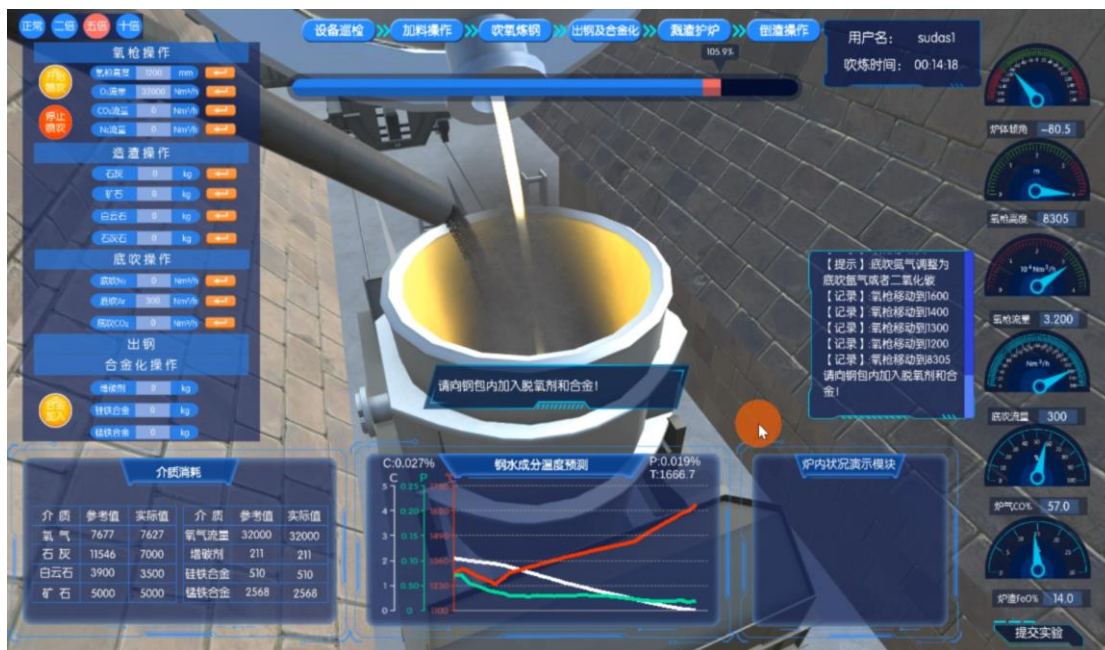


图 19 出钢过程的脱氧及合金化操作

## 步骤 14. 溅渣护炉操作

出钢完成后，系统自动进入溅渣护炉步骤，学生需要利用氧枪喷吹  $N_2$ ，并动态调整氧枪高度，利用高速  $N_2$  气流将转炉内的炉渣溅射至炉衬的不同位置，实现对转炉炉衬的保护。

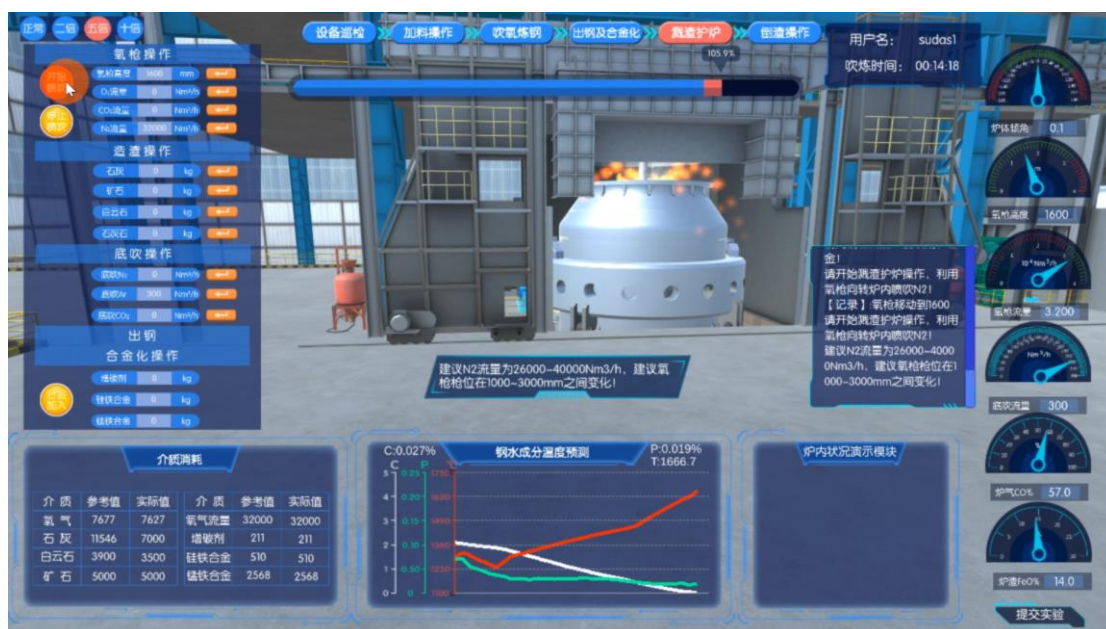


图 20 氧枪喷吹  $N_2$  进行溅渣护炉

实验完成后，学生点击“提交实验”，系统自动弹出评分细则表，显示学生的总得分，以及各操作步骤的具体扣分、得分情况。

评分细则						
高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验						
考生姓名		sudasl		实验总得分	90	
项目	内容	说明	评分项	扣分	得分	合计得分
工艺参数设计计算 (20分)	钢种生产工艺路线设计 (5分)	三次以内完成正确的工艺路线设计	每增加一次扣分	0	5	20
	转炉炼钢流程设计 (5分)	三次以内完成正确的转炉炼钢流程设计	每增加一次扣分	0	5	
	转炉吹炼参数计算 (5分)	三次以内输入正确结果 (计算结果允许偏差 $\pm 20\%$ )	每增加一次扣分	0	5	
	脱氧及合金化参数计算 (5分)	三次以内输入正确结果 (计算结果允许偏差 $\pm 20\%$ )	每增加一次扣分	0	5	
氧枪操作	氧枪流量操作合理 (26000-40000)		每超限一次扣分	0		
	过程枪位操作合理 (1100-3000)		每超限一次扣分	0		

图 21 提交实验后的评分细则表

然后，学生点击“撰写实验报告”，系统自动将学生操作记录和实验结果整理成实验报告，并在线显示，学生查阅实验报告后需在“实验体会”一栏中撰写自身感受，随后点击“生成实验报告”，相关数据传输至实验平台并被整理成文档。

## 实验报告

姓名：\_\_\_\_\_ 总成绩：\_\_\_\_\_

### 一、实验目的和要求

实验旨在帮助学生系统掌握转炉炼钢基础理论、工艺流程和设备工作原理，要求学生完成典型目标钢种和典型原料条件的工艺参数设计计算，编制合理的供氧操作制度、造渣操作制度和底吹操作制度，安全、平稳地冶炼得到成分温度合格的钢水。

### 二、实验内容

实验内容主要包括三部分：（1）转炉炼钢设备认知；（2）目标钢种选择和工艺参数设计计算；（3）转炉冶炼制度设计及实训练钢操作。

### 三、实验步骤

- 观看“设备认知”动画视频。
- 自主漫游，打开挡火门，向前倾动转炉，然后回正，降下烟罩，将氧枪插入转炉炉内。
- 目标钢种选择\_\_\_\_\_。
- 目标钢种的生产工艺路线：高炉铁水→\_\_\_\_\_→\_\_\_\_\_→\_\_\_\_\_→\_\_\_\_\_→铸坯
- 炼钢主原料选择\_\_\_\_\_。
- 转炉炼钢操作流程：\_\_\_\_\_→\_\_\_\_\_→\_\_\_\_\_→\_\_\_\_\_→\_\_\_\_\_。
- 计算转炉吹炼参数

氧气总量 (Nm <sup>3</sup> )	氧气流量 (Nm <sup>3</sup> /h)	石灰总量 (千克)	白云石总量 (千克)	矿石总量 (千克)

- 计算脱氧合金化参数

增碳剂 (千克)	硅铁合金 (千克)	锰铁合金 (千克)

- 出钢成分温度：

出钢时的钢水C含量，%	出钢时的钢水P含量，%	出钢时的钢水温度，℃

### 五、实验体会（限200字）

图 22 实验报告模板



**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）

**可能产生的实验结果与结论包括：**

（1）在规定时间内冶炼得到成分、温度都合格的目标钢水，吹炼过程平稳，无返干、喷溅等事故炉况出现，且原辅料消耗在合理范围内，学生完成度优秀。

（2）冶炼时间超出规定要求，或原辅料消耗超标，但仍可以平稳冶炼获得成分、温度合格的目标钢水，学生完成度良好。

（3）没有在规定时间内冶炼得到成分温度合格的钢水，但吹炼过程平稳，无返干、喷溅等事故炉况出现，学生完成度基本合格。

（4）在规定时间内冶炼得到成分温度合格的钢水，但吹炼过程出现了大返干、大喷溅等事故炉况，说明操作存在较大安全隐患，学生完成度不合格。

### **3-8 面向学生要求**

（1）专业与年级要求

冶金工程专业二年级及以上的本科学生和研究生

（2）基本知识和能力要求

在进行本虚拟仿真实验项目之前，学生需要掌握钢铁冶金学、冶金传输原理、冶金物理化学等课程的相关知识，并具有一定的实践能力。

### **3-9 实验应用及共享情况**

（1）本校上线时间：2019年1月5日（上传系统日志）

（2）已服务过的学生人数：本校 108 人，外校 460 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：冶金工程，

教学周期：2，学习人数：108

（4）是否面向社会提供服务：是 否

（5）社会开放时间：2020年9月1日

（6）已服务过的社会学习者人数：193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

本团队以最新的科研和教学成果为基础，遵照“能实不虚、虚实结合”的原则，自主研发了高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验项目。具备以下特征：1) 将立德树人融入教学全过程，学生通过自主学习、自主设计、自主操作，掌握高端钢铁材料的生产冶炼方法，通过情景体验式的实验教学过程，深刻认识钢铁制造在国防建设的重要价值，潜移默化地激发学生投身国家冶金行业发展和国防建设的情怀和使命感。2) 坚持以学生为中心的教学理念，实验情景与炼钢生产现场高度接近，为学生提供临场感、交互感、满足感的教学氛围，有利于激发学生主动学习的兴趣和热情。3) 本实验通过巧妙设计，涵盖认知性、设计性、操作性、创新性等基本要素，可代替真实实验，具有提高教学能力、丰富教学内容、拓展实践领域等优点，可以成为培养学生工程实践能力和创新能力的重要载体。

### 2. 教学方法创新

教学方法的创新主要有两个方面：1) 将实验任务融入情景教学，使学生能将课堂上学到的理论知识与工程任务紧密联系，通过虚拟仿真操作，迅速掌握实验目的和考核要求。2) 本实验教学项目引导学生开展自主式、容错式探究的自主学习方法，学生通过自主学习、自主设计、自主操作，掌握高端钢铁材料的生产冶炼方法。学生在探究式学习过程中形成了对知识的自主构建，培养了探究式思维方法，极大地提高了对工程问题的认知和解决问题的思路。

### 3. 传统教学的延伸与拓展

转炉炼钢实验一直以来都是冶金专业实验教学的难点，由于实验室无法模拟转炉炉况，只能采用简化的方法代替，不管是高温感应炉实验还是常温物理模拟实验，都与实际的转炉炼钢过程差异极大。此外，高温实验危及学生安全，带来很大的安全隐患。本实验将转炉炼钢过程以虚拟仿真的方式呈现给学生，真实再现了炼钢生产过程，让学生具有极强的临场感，有效拓展了传统实验教学的范围。此外，通过虚拟仿真实验的持续建设和改进，将高端钢铁材料冶炼技术的最新研究成果转化为教学内容，让学生通过仿真实验掌握本领域最前沿技术，也是传统实验教学无法实现的目标。

## 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) 6 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 10 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)

带宽要求：20M 下行对等带宽。

经测试客户机，带宽在 20M 以上时，能够有较快的加载速度和较好的交互体验。

本次测试基于主流配置计算机，模拟学生在校内校外不同的使用环境，最大限度地还原用户上网学习虚拟仿真实验的需求。

测试一：物理连接链路测试。测试目的：测试客户机和虚拟仿真实验项目网站的延迟和丢包情况；测试方法：客户机对本次虚拟仿真实验项目网站进行 PING 操作。

测试二：网络质量测试。测试目的：测试不同网络环境访问本虚拟仿真实验页面的加载情况。测试方法：通过 IP 代理，测试客户机在不同地域环境下打开虚拟仿真实验项目网页的速度。

测试结果：

当客户机带宽小于 20M 时，丢包情况严重、网络延时都很高，部分环境延时可以达到 20ms 以上，丢包率超过 5%；

当客户机带宽小于 20M 的时候，在不同 IP 对本虚拟仿真实验网页打开的测试中，网页打开速度较慢，特别是课件加载卡顿现象也常有发生，访问效果不理想。

基于以上测试结果，我们推荐客户机的带宽应大于 20M。

(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）

本虚拟仿真项目的服务器最佳响应并发数为 300。

我们模拟用户访问虚拟仿真项目网站首页、用户登录和加载课件等操作。

经测试，当用户数量在 300 以下时，各项服务均能在 0.2s 内做出响应，服务器负载处于较低水平，课件加载也很快。当用户数达到 2000，服务响应时间维持在 0.8s 以内，但课件加载速度下降严重。当用户数达到 6000 时，服务响应时间超过 1s，服务器负载也超过了 80%。

基于以上测试结果，我们认为本虚拟仿真实验教学项目的服务器最佳响应并发数为 300。

#### 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

计算机操作系统为 Windows7、Windows8、Windows10

Deepin15.7（国产 Linux 系统）

(2) 其他计算终端操作系统和版本要求

无

(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)

学生需要在 Windows7、Windows8、Windows10 系统环境下,使用以下浏览器打开:

浏览器类型	支持 WebGL	不支持 WebGL
Mozilla Firefox 52 及以上版本	支持	
Google Chrome 57 及以上版本	支持	
Apple Safari 11 及以上版本	支持	
MS Edge 16 及以上版本	支持	
360 浏览器	基于 (Chrome) 内核, 并且开启极速模式、智能开启硬件加速情况下支持 存在右键划线问题, 属于浏览器自身设置原因, 关闭浏览器鼠标手势即可	基于 (IE) 内核, 不支持

浏览器: Google Chrome

下载地址: [http://dl.hdmoool.com/tools/chrome\\_x64.exe](http://dl.hdmoool.com/tools/chrome_x64.exe)

#### 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

Web 端 用户硬件要求

处理器: Intel (R) Core (TM) i5

主频: 2.4GHz

内存: 8GB

显卡: NVIDIA GeForce GTX GT740 2G

(2) 其他计算终端硬件配置要求

无特殊要求, 满足能上网功能即可。

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：

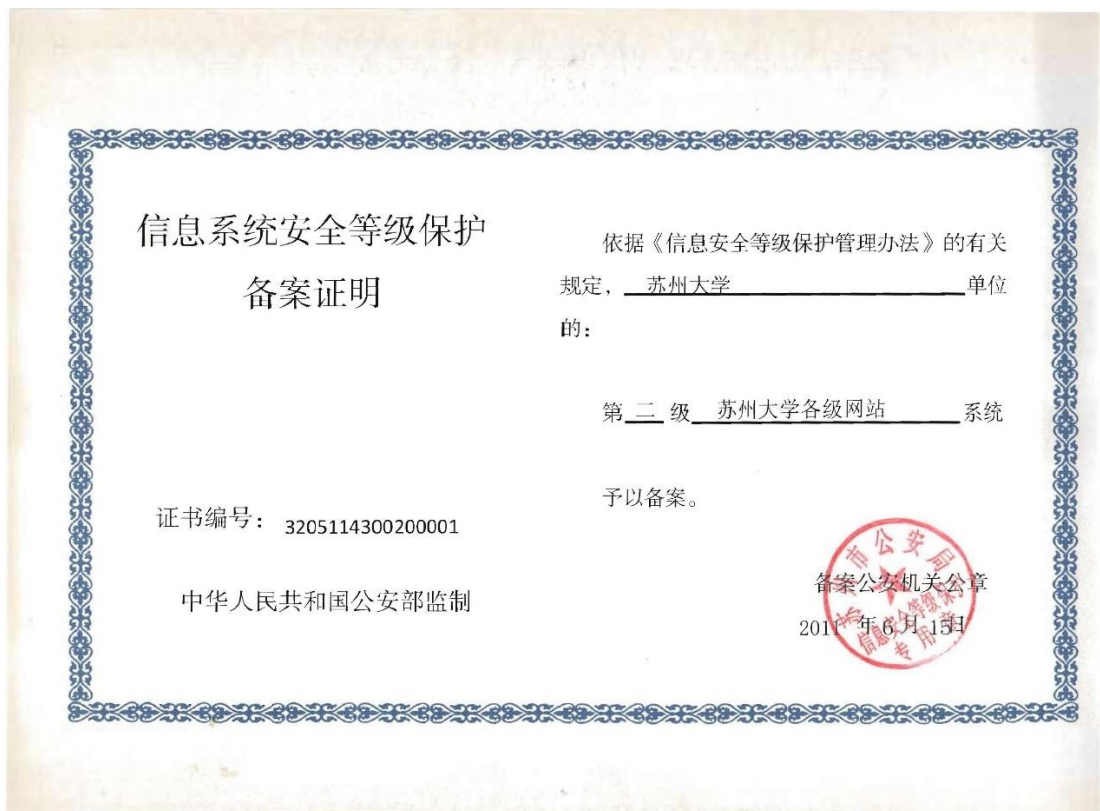
无

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：

3205114300200001

(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
<p style="text-align: center;"><b>系统架构图及简要说明</b></p>	<p>本系统是基于 B/S 架构设计的虚拟仿真实验教学平台。系统采用轻量化的开发语言和模块化设计方案，部署简单、使用方便。系统支持分布式部署方案，可随使用情况动态扩充容量，基于容器化部署还可实现自动扩容，无需人为干预。</p> <p>系统包含实验实训、实验报告、实验指南、数据统计、考试系统、帮助中心、收费系统、安全中心、资源中心、协同服务、学问系统和知识角等功能模块。系统除支持虚拟仿真实验外还可上传视频和其它文档资料，支持系统化课程体系学习。系统可对学生实验、学习数据做详细记录并分析每个学生的学习情况和整体学生知识掌握情况，实验报告系统可对学生提交的实验报告进行自动批阅也可由教师人工批阅或学生相互阅评。</p> <p>系统用户可分为教师和学生两种角色。教师可发布实验资源、建设实验课程、设置课程共享信息、可查看发布课程的学习情况、可批阅学生实验报告和考试。学生可报名参与课程，可观看报名课程的视频操作课程的实验资源，可查看个人的学习情况，可评价学习课程、参与课程讨论，可参与实验报告互评等。</p>

实验 教学	<p>开发技术</p>	<p><input checked="" 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</p> <p><input type="checkbox"/>HTML5</p> <p><input type="checkbox"/>其他</p>
	<p>开发工具</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/>Unity3D <input checked="" type="checkbox"/>3D Studio Max <input checked="" type="checkbox"/>Maya</p> <p><input type="checkbox"/>ZBrush <input type="checkbox"/>SketchUp <input type="checkbox"/>Adobe Flash</p> <p><input type="checkbox"/>Unreal Development Kit <input type="checkbox"/>Animate CC</p> <p><input type="checkbox"/>Blender <input type="checkbox"/>Visual Studio</p> <p><input type="checkbox"/>其他</p>



	<p>运行环境</p>	<p><b>服务器</b></p> <p>CPU <u>16</u> 核、内存 <u>32</u> GB、磁盘 <u>1000</u> GB、 显存 <u>16</u> GB、GPU 型号 <u>NVIDIA GRID K1</u></p> <p><b>操作系统</b></p> <p><input type="checkbox"/>Windows Server <input checked="" type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他</p> <p>具体版本：centos7</p> <p><b>数据库</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle</p> <p><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）</p> <p>是否支持云渲染：<input type="radio"/>是 <input 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>	<p>单场景模型总面数：40 万三角面</p> <p>贴图分辨率：512*512</p> <p>每帧渲染次数：30fps</p> <p>动作反馈时间：1/90s</p> <p>显示刷新率：60HZ</p> <p>分辨率：4K</p>

## 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	通过在线服务和课堂沟通，了解学生的用户体验，收集实验数据和反馈信息，对实验内容、互动方式、评价体系等进行持续完善。
第二年	优化虚拟仿真试验系统的功能性和体验感，形成线上线下互动教学新模式。
第三年	进一步提升实验的创新性和前瞻性，利用项目团队的最新科研成果对虚拟仿真实验底层模型进行持续优化，提高底层模型的预测精度和响应速度。
第四年	收集并总结转炉炼钢领域的最新前沿技术，将其融入虚拟仿真实验，增加实验的广度和深度。
第五年	对实验内容的难度进行分级处理，使其适用于不同的用户属性，满足非本专业人员的科普需求、本专业学生的教学需求和本专业技术人员的技能演练需求，提升本实验的实用价值。

其他描述：

逐步开发铁水预处理、钢水精炼、钢水连铸等工序的虚拟仿真实验，打通从铁水到铸坯的炼钢全流程工序，为学生提供系统全面的炼钢全流程虚拟仿真实验平台。与此同时，逐步搭建并完善炼钢全流程的物理模拟平台，形成线上仿真和线下模拟相结合的实验教学新模式，深化学生对炼钢原理的理解。

### (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	1	100	1	100
第二年	2	200	2	200
第三年	2	200	2	200
第四年	3	300	2	200
第五年	3	300	2	200

其他描述：

探索高校间合作机制，将虚拟仿真与物理模拟实验交互式实验教学平台建设经验向行业其他高校推广，探索、建立高校间钢铁生产全流程工序单元操作实验成绩互认、学分转换机制。本项目将向兄弟高校持续免费开放，与兄弟高校携手共建更高水平、更深层次、更广范围的钢铁冶金生产全流程虚拟仿真教学实验平台，为冶金工程专业、金属材料类专业的学生提供更好的线上教学服务。

本项目将持续面向社会推广应用，尤其是面向钢铁企业，帮助生产技术人员了解转炉炼钢的设备组成和冶炼工艺，熟悉转炉炼钢的生产操作，降低现场实操风险。

## 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	高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真教学实验
是否与课程名称一致	<input checked="" type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否
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，可自行增加著作权人填写栏进行填报。	
著作权人	著作权人类型
苏州大学	<input checked="" type="radio"/> 课程所属学校 <input type="radio"/> 企业 <input type="radio"/> 课程负责人 <input type="radio"/> 学校团队成员 <input type="radio"/> 企业人员 <input type="radio"/> 其他
权利范围	全部
软件著作权登记号	2020SR1510326
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。	
受理流水号	

中华人民共和国国家版权局  
计算机软件著作权登记证书

证书号： 软著登字第6311298号

软件名称： 高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真教学实验系统  
[简称： 高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真教学实验]  
V1.0

著作权人： 苏州大学

开发完成日期： 2020年09月10日

首次发表日期： 未发表

权利取得方式： 原始取得

权利范围： 全部权利

登记号： 2020SR1510326

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。



No. 06589836




2020年10月14日

## 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06月08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。）

### “高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”课程 政治审查意见

经审查，“高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”课程内容及上传的申报材料无危害国家安全、涉密及其他不适宜公开传播的内容，价值取向正确，没有对我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等的错误理解和表述，没有对国家主权、领土表述及标注错误的情况。

该课程团队负责人王德永及主要成员屈天鹏、胡绍岩、盛敏奇、王慧华，政治表现良好，遵纪守法，无违法违纪行为，不存在师德师风问题、学术不端等问题，五年内未出现过重大教学事故。

中国共产党苏州大学委员会

2021年6月8日

## 《高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验》 虚拟仿真实验项目政治审查意见

耿庆功，男，1987年8月，群众，山东枣庄人，钢铁仿真产品线经理，程序开发岗位，工作年限11年。

雷康康，男，1996年7月，群众，甘肃庆阳人，程序开发岗位，工作年限3年。

张川，男，1989年2月，中共党员，安徽亳州人，程序开发岗位，工作年限11年。

上述3位同志为苏州大学《高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验》虚拟仿真实验教学项目团队成员。经审查，该3位同志拥护党的领导，坚持正确的政治方向和价值取向，积极弘扬社会主义核心价值观；遵循职业道德准则，遵守法纪法规，认真贯彻党的方针政策，爱岗敬业，无任何违法乱纪行为，无任何不良记录。

中共山东星科智能科技股份有限公司支部委员会

2021年5月24日



## 《高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验》 虚拟仿真实验项目政治审查意见

经审查，吴元山、梁树宝、蒋法成三位同志为苏州大学  
《高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验》实验项目教学团队成员，经审查，该三位同志拥护党的领导，坚持正确的政治方向和价值取向，积极弘扬社会主义核心价值观；遵循职业道德准则，遵守法纪法规，认真贯彻党的方针政策，爱国敬业，无任何违法乱纪行为，无任何不良记录。

南京恒点信息技术有限公司

2021年5月28日



## 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。]

### “高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”

#### 学术性评价意见

转炉炼钢是长流程炼钢过程中最重要、最核心的工序，具有高温、易爆、高能耗、高成本的特点。实验教学成本极高，无法真实呈现或还原，学生感知性差。“高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”重点针对《钢铁冶金学》中的“转炉炼钢冶炼工艺”部分而展开，能够让学生身临其境地了解转炉炼钢相关设备设施，掌握相关工艺参数的设计依据，并在虚拟环境中亲自动手完成炼钢过程操作，全面、真实地了解高端钢铁材料转炉冶炼工艺，更加深刻地理解和掌握相关知识点，提升自身的工程实践能力和创新能力。

本项目坚持以学生为中心的实验教学理念，构建了基于真实炼钢环境的虚拟仿真实验场景。采用目标导向、交互反馈的实验设计方法。注重知识能力素质的有机融合，培养学生解决炼钢生产过程中复杂问题的综合能力和高级思维。实验内容涵盖炼钢工艺理论与应用的前沿，难易程度适当，并具备一定的挑战度。

实验课程已经上线运行，并为东北大学、武汉科技大学、沙钢集团等冶金高校学生和企业职工提供了虚拟实验教学服务，取得良好社会反响。

鉴于“高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”课程的优秀表现，推荐认定“高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”为虚拟仿真实验教学一流本科课程。



### 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。）

#### 应用证明

项目名称	高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验		
应用单位	东北大学		
应用起止时间	2019年3月至2019年9月		
单位地址	辽宁省沈阳市和平区文化路三巷11号	邮编	110819
联系人	赵青	联系方式	15140048687
应用推广情况及产生的社会效益： <p>2019年3月起，我校将苏州大学研制的“高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”项目应用于冶金学院冶金工程专业《钢铁冶金学》课程中转炉炼钢工艺相关的实验教学。至今已有130名学生完成该虚拟仿真实验项目的学习。</p> <p>该实验系统为学生提供了多个高端钢种和多种炼钢主原料，学生可自由选择 and 搭配。根据所选目标钢种的成分和性能特点完成工艺路线设计，根据所选炼钢主原料的特点完成转炉操作流程设计和转炉吹炼参数计算，计算结果将为转炉炼钢的仿真实训操作提供后台运行数据。最后，学生进入转炉炼钢仿真实训环节，废钢和铁水等原料被加入转炉炉内，在吹氧炼钢过程中，学生可以根据原料条件、吹炼时间、炉况信息、目标钢种等多重因素来动态调整氧枪操作、造渣操作、底吹操作、合金化操作，以完成转炉冶炼并获得成分温度合格的钢水为目标。系统真实再现了转炉炼钢的实际生产过程，对学生掌握理论知识具有很好的指导意义。</p> <p>苏州大学开发的“高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”坚持以学生为中心的教學理念，系统设计借鉴了冶金前沿科学知识，基于问题导向和任务驱动实验创新性强，挑战度高，有利于培养学生探究式的思维 and 解决复杂问题的综合能力。实验具有较强的趣味性，学生体验感强。同时在线网站具有丰富的理论知识和视频资源供学生学习，整体教学效果良好。</p>			

东北大学(盖章)  
2020年九月十二日

## 应用证明

项目名称	高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验		
应用单位	武汉科技大学		
应用起止时间	2019年4月至2019年9月		
单位地址	湖北省武汉市青山区和平大道 947号	邮编	430081
联系人	程常桂	联系方式	18986255793
应用推广情况及产生的社会效益：			
<p>钢铁生产工序复杂，流程长，规模庞大，设备密集，是典型的高危行业。为了满足我校冶金工程专业《钢铁冶金学》课程实验教学需求，苏州大学于2019年4月起为武汉科技大学免费开放了独立开发的“高端钢铁材料转炉冶炼虚拟仿真实验”系统。</p> <p>本项目依据冶金工程专业核心课程《钢铁冶金学》教学大纲及关键知识点，结合先进高端钢铁材料制造，以“冶炼符合规定要求的高端钢种”为实验任务，构建了基于真实炼钢生产的虚拟仿真实验场景。可以培养学生探究式思维方式和解决重大复杂工程问题的能力。通过对转炉炉体装配、原料选择、工序选择实验环节，帮助学生掌握转炉基本构造、转炉冶炼原理、实验要点及操作原理，探究炼钢生产中转炉冶炼方法，使学生掌握转炉炼钢的基本步骤，分析、判断、调整转炉冶炼参数的能力。通过转炉冶炼操作环节，帮助学生掌握转炉冶炼氧枪枪位、流量设定，底吹参数设定、造渣制度选择、出钢与合金化操作等动作，探究冶炼不同高端钢种的工业解决方案，使学生具备根据工程任务需求解决实际问题的创新能力。通过冶炼过程动态变化环节，帮助学生掌握影响转炉终点的关键参数，以及根据非正常炉况（喷溅和返干）的动态参数修正能力，培养和提升学生的工程实践能力。该实验系统基于问题导向和任务驱动实验创新性强，并且实验具有较强的趣味性，学生有很强的的代入感和体验感。目前已有180名学生完成该虚拟仿真实验项目的学习，整体教学效果良好。</p>			
 <p>单位：武汉科技大学(盖章) 日期：2020年9月17日</p>			