



## 基于 Unity3D 的高压磨料射流破岩 仿真设计与实现

李乃良, 王利军\*, 刘常松, 王凤超

(中国矿业大学 低碳能源与动力工程学院, 徐州 221116)

**摘要:** 针对高压磨料射流破岩实验教学安全风险高、学习体验不佳的现状, 利用 Unity3D 的可视化功能和脚本驱动技术开发了仿真孪生模型、数据交互组件及流程逻辑算法, 构建了高压磨料射流冲击破岩虚拟仿真实验平台。该系统旨在构建以安全发展观为导向的磨料射流破岩教学培训模式, 面向学生和教师用户提供可视化交互式教学体系, 具有还原度高、交互性好、安全可靠的特点, 能够打破教学中的时空壁垒, 将教学场景从物理空间迁移到信息空间, 提升了学生学习的灵活性和安全性, 有利于实践创新能力的培养。

**关键词:** 实验教学; 虚拟仿真; 磨料射流; 射流冲击; Unity3D

中图分类号: TE89

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240168

## Design and Implementation of High-Pressure Abrasive Jet Rock Breaking Simulation Based on Unity3D

LI Nailiang, WANG Lijun\*, LIU Changsong, WANG Fengchao

(School of Low-carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In response to the current situation of high safety risks and poor learning experience involved with the high-pressure abrasive jet rock breaking experimental teaching, the teaching content system and objectives were reconstructed based on application requirements. A simulation twin model, data interaction components, and flow logic algorithms were developed using the visualization function and script-driven technology of Unity3D. A virtual simulation experimental platform for high-pressure abrasive jet rock breaking was constructed. The system aims to build an abrasive jet rock breaking teaching and training model guided by the concept of safe development. Targeting teachers and student users, this system provides a visual interactive teaching mode. It is characterized by high fidelity, good interactivity, and safety and reliability, which can break down the barriers of time and space in teaching, transferring teaching scenes from physical space to information space. This system enhances the flexibility and safety of students' learning, which is beneficial for the cultivation of practical innovation ability.

**Key words:** experimental teaching; virtual simulation; abrasive jet; waterjet impact; Unity3D

由于中厚煤层和厚煤层煤炭资源日渐减少, 薄煤层的开发利用得到越来越多的关注和重视。薄煤层覆盖国内 79% 以上的矿区, 可采规模超过 59 亿吨, 约为煤炭可利用总量的五分之一<sup>[1]</sup>。但由于煤层厚度小, 导致作业空间狭窄, 大型采掘设备难以利用<sup>[2]</sup>。不仅如此, 由于断层等复杂地质构造的存在, 导致煤层硬度大, 常规采掘工具易磨损失效, 因此, 急需新的破岩技术。

磨料浆体射流破岩技术具有能量密度高、切割效果好的优点, 用于辅助传统机械刀具破岩是实现特殊地质构造煤岩快速高效掘进的有效方法<sup>[3]</sup>。高压射流切削破岩原理复杂, 工程实践应用亟需高校高质量人才的产出作为技术支撑<sup>[4]</sup>。实践教学是培养学生创新意识和动手能力的有效途径, 可帮助学生完成从理论计算到实践创新的能力转变。文献 [5] 开发了水射流碎岩教学模型, 能

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(52104150); 中国矿业大学教学研究项目(2023ZDKT04-209); 中国矿业大学实验技术研究与开发一般项目(S2024Y005)。

作者简介: 李乃良, 博士, 副教授, 主要从事流动过程仿真与控制方面的研究。E-mail: linailiang@cumt.edu.cn

\*通信作者: 王利军, 博士, 教授, 主要从事能源动力科学与工程方面的教育及研究。E-mail: wanglijun@cumt.edu.cn

够满足液体射流冲击力值的测试；文献 [6] 开发了等离子体射流实验教学平台，可辅助射流功率测试及聚合物改性实验。然而，由于高压射流实验教学危险系数高，当前大多仍以科研成果展示为主，缺少专用的实验资源，无法对射流过程进行系统的展示。

虚拟仿真实验是现代信息技术驱动的教学新形态，是教育向数字化转型的重要载体，对形成教育新质生产力具有重要作用<sup>[7-8]</sup>。为主动适应教育数字化转型需求，开发了高压磨料射流破岩虚拟仿真实验平台，为高危系数实验教学和工艺培训提供案例参考。

## 1 磨料射流破岩教学现状

磨料射流破岩方式繁多，根据入射角度与煤岩纹理之间的关系，可将射流冲击方式分为自由冲击、逆纹理冲击和顺纹理冲击，如图 1 所示。目前射流实验教学常采用逆纹理横向冲击方式。

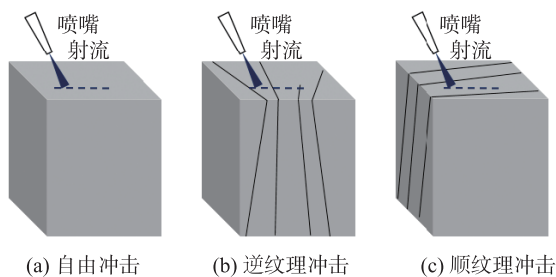


图 1 射流冲击方式示意图

磨料射流破岩的实验工艺步骤多、实践性强，有利于提升学生的实践能力和创新意识。然而，实验的安全性和综合性也限制了线下实验的实施。高压磨料射流线下实物实验教学存在如下不足。

### 1) 实验风险较大

为提高射流能量密度，要求射流的最大压力高于 35 MPa，存在高压隐患。此外磨料溅射也导致安全系数低，防护要求高，课前需投入大量时间用于安全培训和安全防护。

### 2) 学习体验不佳

为降低安全风险，教学常以实验视频代替动手操作，学生参与感低，导致原理解不透、工艺认识不清，教学效果无法达到预期。

### 3) 能力培养不足

射流冲击及辅助刀具切割破岩技术涵盖工程流体力学、岩石力学等不同专业知识，实验参数

关联耦合性强，线下实验学时短，无法有效培养学生解决复杂问题的能力。

仿真驱动的虚拟实验通过还原现实将真实场景进行重构，具有成本低的特点，可以突破时空约束多次学习，对于尺度大、安全风险高的能动类专业实验而言应用性强<sup>[9-10]</sup>。针对实验教学资源不足的问题，本文根据教学现状重构了知识架构，融合压力射流辅助刀具切削破岩的科研示范成果与工程应用案例，基于虚拟现实技术将工业流程仿真和数字孪生技术深度融合，构建了高压磨料射流破岩虚拟仿真实验教学平台。

## 2 知识架构与教学目标

本文结合中国矿业大学办学定位和工程实际应用对人才培养的需求，梳理并设计高压磨料射流破岩虚拟仿真实验教学的知识架构与教学目标。

### 2.1 知识架构

#### 1) 基本概念模块

包括磨料射流概念与分类、浆体磨料类型与物性、射流工艺和流程共 3 个知识单元。该模块使学生了解磨料射流的概念、磨料射流的分类和常见应用，掌握常见高聚物和磨料的选择依据和物性参数，理解耦合高压磨料射流截割煤岩的技术优势和应用前景，树立节能环保和安全生产的工程意识。

#### 2) 喷嘴设计模块

包括喷嘴分类与选型、喷嘴结构设计与校核 2 个知识点。该模块使学生了解射流喷嘴的 3 种常见类型，掌握喷嘴直径、壁厚、收缩角等关键结构参数的计算与校核原则，最终使学生通过人机互动深刻掌握射流喷嘴的设计原理及设计方法。

#### 3) 射流形态模块

包括射流形态结构和冲击参数分析 2 个知识点。该模块使学生了解高压磨料射流形态结构的 3 个分区，掌握射流光滑区和射流粗糙区分界点计算方法，以及高聚物质量浓度、出口压力、冲击角度、靶距、射流时间等冲击参数对射流形态的影响规律。

#### 4) 破岩过程模块

包括水力破岩过程、破岩效率评价和强化抽采共 3 个知识点。该模块使学生了解磨料耦合对煤岩体的冲击、剪切和拉伸作用，以及煤岩体破

碎失效过程的 4 个阶段, 掌握破岩效率的衡量指标和评价方法, 最终使学生在情景漫游和人机互动体验中掌握高压磨料射流强化瓦斯抽采的工艺、设备以及工程应用。

### 2.2 教学目标

#### 1) 建立射流截割硬质煤岩技术认知

通过对破岩过程及瓦斯抽采过程的真实再现, 引导学生全面认知磨料浆体射流截割硬岩在复杂地质薄煤层开采领域的技术优势。

#### 2) 掌握高压磨料射流破岩工艺

熟悉高压水射流、高压磨料水射流、高压浆体射流及射流辅助机械切削破岩的工作流程和操作方法, 并能实践操作, 了解磨料和浆体物性参数、射流冲击方式对纹理煤岩和非纹理煤岩的破碎效率。

#### 3) 掌握射流喷嘴结构选型和设计方法

掌握锥直形喷嘴、圆弧形喷嘴、圆柱形喷嘴等常用喷嘴的选型依据、设计与校核方法, 具备高压磨料射流关键装置的设计能力。

#### 4) 形成解决工程实际问题的能力

通过高度还原现实的 3D 虚拟场景漫游及交互操作实践, 培养受训者具备综合运用现代测试技术及方法进行燃气轮机掺烧矿井乏风的实践能力, 以及开展燃气轮机状态诊断的工程实践能力。

## 3 仿真实验教学平台设计

### 3.1 设计原则

根据水力射流破岩虚拟仿真实验教学需求, 设计软件系统架构, 运用虚拟现实、系统仿真、“互联网+”等技术开发配套软件, 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、在线批阅和教务管理于一体, 通过各模块数据接口的无缝衔接, 增加开放度与适应性, 最终达到实验教学的自主性、交互性和可扩展性。

### 3.2 实施路径

基于高压磨料射流破岩虚拟实验建设目标, 开发了服务器-客户机架构的线上仿真平台, 设计框图如图 2 所示。平台支持多个异构数据库, 具有良好的扩展性, 方便移动和分布式学生使用。各层功能任务介绍如下。

#### 1) 虚拟映射层

将实验设备与环境等物理实体映射到虚拟空间, 实现磨料射流装置及实验场景的重构和还原, 满足学生体验的感官需求。

#### 2) 信息服务层

加载学生个人信息及学生在映射层设置的实验参数, 主要用于数据的存储和调用, 利用映射层的数据驱动仿真体的任务。

#### 3) 功能扩展层

面向教师和学生用户提供基础功能和扩展功能支持, 主要包括任务发布、报告提交、进度查看、成绩上传等。

#### 4) 虚拟操作层

对实验设备物理基体的孪生参数进行空间动态映射, 支持学生的场景漫游和信息交互, 从而实现实验过程的人机交互功能仿真, 是仿真实验平台的关键模块。

#### 5) 业务应用层

仿真平台设有冲击破岩瓦斯抽采认知与高压射流辅助刀具切削破岩实验两个应用业务, 针对学生操作需求设计终端界面, 利用 Unity3D 强大的封装功能输出虚拟操作层的结果, 在虚拟空间中完成人机交互及过程的可视化操作。

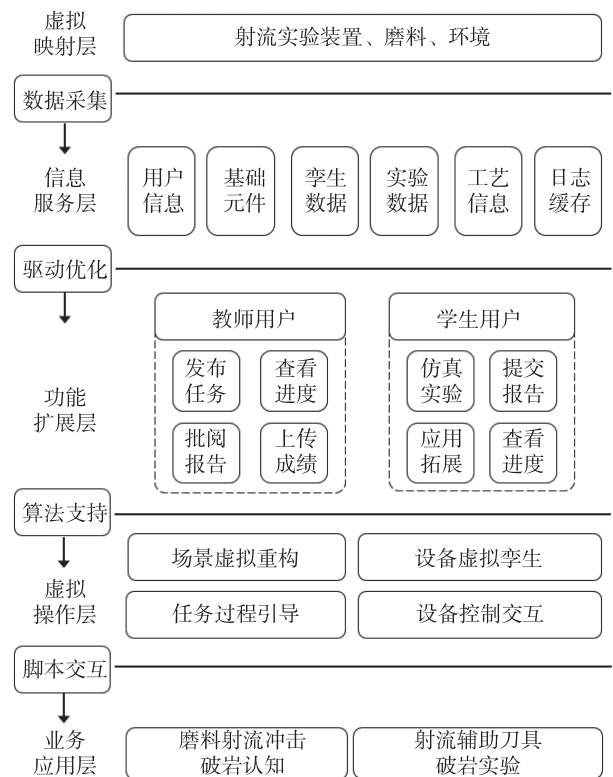


图 2 高压磨料射流破岩仿真实验平台设计框图

### 3.3 实验流程

高压磨料射流破岩实验教学装置包括高压泵、水箱、蓄水槽、磨料罐、切割台和控制台, 如图 3 所示。混合腔的进料包括高压水和磨料颗

粒，固液两相工质通过混合腔的扰动实现混合，在增压泵的作用下经过射流喷嘴加速喷出。高压水环路由水箱、高压泵、旁路及截止阀等组成，通过高压泵的加压作用提供高压浆体；磨料路径主要包括磨料罐、控制阀。装置启动时，射流流束的高速运动造成混合腔部分真空，磨料颗粒在真空的抽吸下进入混合腔，经过磨料喷嘴加速后喷出，形成磨料射流。在射流冲击下，煤岩静应力受到改变，形成损伤，导致裂纹出现，继续增大射流冲击速度，煤岩体最终会破碎。



图 3 实体实验装置图

由于射流冲击岩石形成的破碎坑深度对薄煤层层的截割效率起决定作用，因此可基于破碎坑深度表征射流破岩效率由式(1)可得：

$$I_d = \frac{D}{E} \quad (1)$$

式中： $I_d$  为破岩效率，单位 mm/J； $D$  为破碎坑最大深度，单位 mm； $E$  为磨料射流的动能，单位 J。 $E$  由式(2)可得：

$$E = \frac{(m_s + C_1^2 m_a) PT}{\rho_s} \quad (2)$$

式中： $m_s$  和  $m_a$  分别为浆体射流和磨料颗粒的质量流量，单位 kg/s； $\rho_s$  为浆体射流的密度，单位  $\text{kg/m}^3$ ； $P$  为射流压力，单位 MPa； $T$  为冲击时间，单位 s； $C_1$  为浆体射流对磨料颗粒加速的相关系数，取 0.76。

## 4 关键开发技术

### 4.1 模型创建

在高压磨料射流破岩的虚拟仿真系统中，确保虚拟实验设备和可视化交互功能的高度一致性对于模拟真实实验场景至关重要。本研究采用 Blender 和 ProE 平台构建虚拟实验设备，并利用 Unity3D 强大的封装工具创建真实感强的实验场

景，从而达到物理实体在映射空间中的时空动态交互。

模型构建过程涵盖 3 个阶段。首先，任务分解，基于磨料射流破岩工艺流程，将设备整体分为液体增压单元、磨料制备单元、浆体合成单元、射流破岩单元及结构支撑单元。其次，通过解析每个模块图纸的具体测量数据，基于 Blender 和 ProE 软件的合并、阵列、对齐、延展及环切等建模手段完成子模块虚拟结构建模。为进一步提升模型的逼真度，根据装置功能属性运用碰撞监测、边缘分割和镜面反射优化模型的运动形态。根据部件运动关系确立各模型之间的层级关系，以便在虚拟环境中正确表现它们的相互作用。最后，为增强沉浸式体验效果，利用材质球修饰器设定模型的皮肤，通过精细分层和渲染处理增强模型的质感。

主要的实验装置模型如图 4 所示。图 4(a)为减压阀，用于压力调节；图 4(b)为压力表，主要包括表壳、盘面、指针、波登管、波纹管；图 4(c)为增压泵，包括电机、泵体、叶轮、轴承等。实验漫游场景及主要装置实物和建模对比图如图 5 所示。

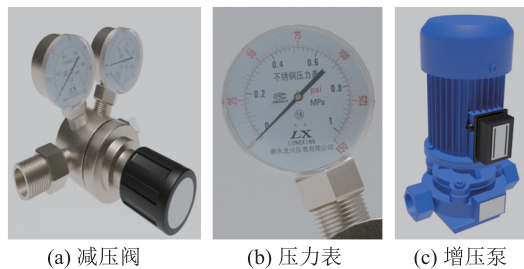


图 4 主要实体构建的模型图



图 5 实验漫游场景及主要装置实物和建模对比图

射流形态是虚拟仿真实验中的主要实验现象,由于线下实验存在的高压隐患,学生常常无法直观地观察到射流流束的形态。为此,根据线下实验拍摄的高速摄像图片,利用Unity3D和Blender强大的可视化功能对射流流速进行了建模,以确保学生仿真的体验,射流实验照片与建模结果对比如图6所示。

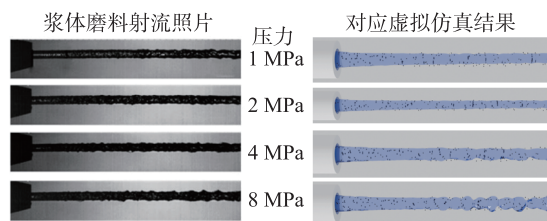


图6 射流实验照片与建模结果对比图

#### 4.2 功能仿真

实现设备仪器实物构件在虚拟信息空间的构建后,还需基于物理基体的运动特性和特殊运动功能属性,给模型定义明确的物理参数及运动规则,以便达到构件的功能仿真及实验过程的真实重现。

利用Unity3D的“模型-视图-控制器”架构模式为实验设备添加属性<sup>[11]</sup>。以射流实验中磨料速度调节广泛使用的截止阀为例,说明模型物理属性的添加方法。首先,采用添加面和反向拓扑等技术对创建的模型进行前处理,保证形位公差;其次,根据真实物理基体的质量、扭矩及转动角度约束条件编写脚本,并将其挂载到模型组件中;再次,为截止阀添加碰撞边界,满足截止阀手柄与阀体之间的相对转动关系,确保虚拟操作与实际操作保持一致的物理响应;最后,根据实验工艺流程和装置的功能定义模型的运行逻辑。主要实现方法为基于装置实体的行为规则和实验的流程原理创建作业脚本,使用Unity3D引擎进行绑定和挂载,从而实现对实验中物料与装置工艺参数的仿真。

水箱中的水通过高压泵的加压作用形成高压水,最终在喷嘴加速并形成射流。喷嘴内部流道结构对射流形态和结构具有重要影响,合理选择喷嘴类型和设计喷嘴直径、收缩角等结构参数可以有效降低能量损失和提高破岩效率<sup>[12]</sup>。其中,高压射流喷嘴在工作时承受较大的压力和冲击作用,接下来,将以射流喷嘴结构的壁厚为例,说明设计与校核功能仿真的实现方法。

1) 选取适当的材料,根据喷嘴耐压试验,采用式(1)对喷嘴的壁厚进行计算:

$$\delta \geq \frac{p_y d_w}{2.3\sigma_b/n_s - p_y} \quad (3)$$

式中: $\delta$ 是喷嘴壁厚,单位mm; $p_y$ 为喷嘴耐压试验最大压力,单位MPa,一般取决于喷嘴最大工作压力 $p_w$ ;  $d_w$ 为出口直径,单位mm; $\sigma_b$ 为材料的抗拉强度,单位MPa; $n_s$ 是安全系数,通常为5<sup>[13]</sup>。

2) 根据喷嘴内部最大工作压力 $p_w$ ,对喷嘴壁厚的计算结果进行校核,以保证喷嘴工作的安全性。

$$p_w \leq 0.35 \frac{\sigma_s (d_{w1}^2 - d_w^2)}{d_w^2} \quad (4)$$

式中: $p_w$ 为喷嘴最大工作压力,单位MPa; $d_{w1}$ 为喷嘴外径,单位mm。

3) 喷嘴爆裂压力 $P_E$ 应满足式(5),以避免喷嘴壁面产生塑性形变:

$$P_E \leq (0.35 \sim 0.4) P_{rL}, P_{rL} \leq 2.3\sigma_s \lg \frac{d_{w1}}{d_w} \quad (5)$$

式中: $P_{rL}$ 和 $P_E$ 分别为喷嘴壁面的塑性变形压力和喷嘴爆裂压力,单位MPa。其中, $P_E$ 应远大于耐压试验压力 $p_y$ ,即:

$$P_E = 2.3\sigma_b \lg \frac{d_{w1}}{d_w} > p_y \quad (6)$$

经校核,当喷嘴壁厚同时满足式(3)~式(5)时,所设计的喷嘴能够满足承压和抗冲击要求。

基于上述设计和校核过程,通过Unity3D引擎的addcomponent挂载喷嘴的单元组件,加载喷嘴材料的抗拉强度、安全系数等参数,得到喷嘴计算单元的计算组件,对该组件进行调用和计算实现对喷嘴结构设计和校核过程的仿真模拟。

#### 4.3 工艺仿真

学生通过虚拟映射空间虚拟仿真操作,其本质是基于既定任务完成操作流程,使虚拟装置功能组件实现状态响应<sup>[14]</sup>,如改变截止阀开度调节压力,通过控制温度调节浆体粘度。可见,工艺流程仿真是人机交互的主体,对还原实验过程至关重要。

基于逻辑判断及流程控制实现实验流程和虚拟操作的仿真。以磨料制备工艺为例简要介绍虚拟流程的内在逻辑。首先,学生根据任务列表,针对实验要求选取磨料粒径,通过平台进行数据交互,完成参数;其次,基于射流压力进行对充填罐磨料充填压力设置,充填罐模型基于对话框

接收的参数进行逻辑判断，确定操作的合理性；最后，启动加压泵及出料阀，缓慢升高射流压力至工艺要求。基于分级递阶模型开发了虚拟分散控制系统，挂载在实验平台的过程监测控件下，如图 7 所示。该系统支持学生监控虚拟就地仪器的运行状况，如查看工艺流程、动力设备启停。

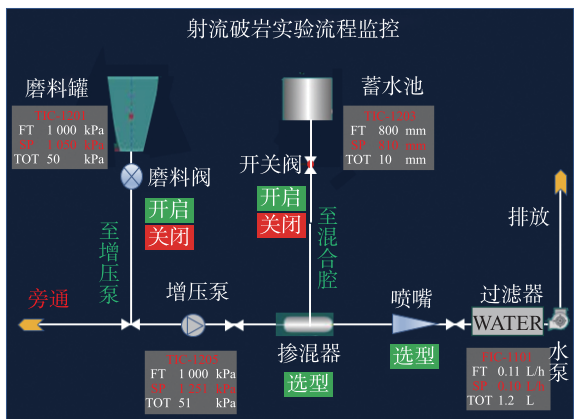


图 7 虚拟分散控制系统图

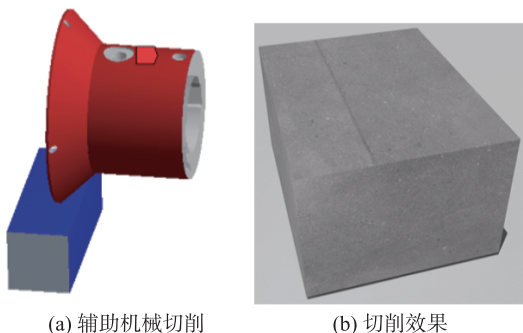
### 5 使用与评价

平台将角色控制脚本添加到摄像机上，学生使用终端设备登录实验平台后，能够以第一人视角进行场景漫游，利用鼠标实现视角的移动和转换。为培养学生的安全实验意识，平台要求学生在实验前自学安全提示符与应急应对措施。虚拟仿真平台的学生界面如图 8 所示，学生通过点击相应控件可阅读实验的原理、实验方法、预案措施。

高压磨料射流破岩虚拟仿真实验设计了高压射流辅助机械切削破岩实验、磨料破岩抽采瓦斯认知等应用服务。以射流辅助机械切削为例，实验前需对滚刀和岩石分别赋予钢和混凝土材料属性，并添加滚刀与岩石摩擦接触条件，图 9 以碟形滚刀为例展示了射流辅助机械切削破岩的仿真实验效果。



图 8 虚拟仿真平台的学生界面



(a) 辅助机械切削

(b) 切削效果

图 9 射流辅助机械切削破岩仿真效果图

利用过程控制系统，学生可以直观地掌握整体流程，监控实验进程，还可利用指向设备操作界面设置喷嘴类型、混合腔结构、磨料尺寸、射流压力等关键参数，喷嘴选型的操作界面如图 10 所示。

提高实验过程评价的科学性和合理性是激发学习的兴趣、强化学习的效果的有效措施<sup>[15]</sup>。高压磨料射流破岩虚拟仿真实验建立了全过程跟踪评价体系，采用综合性评价方法考核实验中所涉

及的理论和实践能力。实验过程的考核由过程性评价和终结性评价组成, 其比例可视需要设置, 侧重实验过程的完整性、设计方案的新颖性和正确性。过程性评价主要包括在线的时长、实验用时、拓展案例学习数量, 终结性评价主要由实验报告和试卷组成。其中, 试卷是在实验环节结束后, 由随机抽选的选择题和判断题组成, 整体评价方法如表 1 所示。

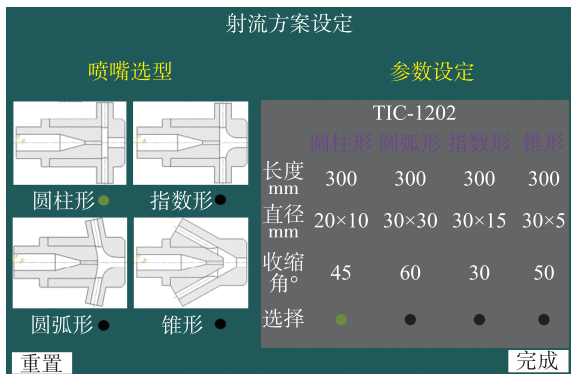


图 10 喷嘴选型操作界面

表 1 虚拟仿真实验的评价方法

评价方式	评价内容	评价依据	占比/%
过程性评价	完成度	实验数量	10
	出勤率	在线时长	5
	拓展度	拓展案例数量	5
	预习	预习题正误	10
	安全操作	操作的规范性	10
终结性评价	理论知识	选择题正误	10
	实践能力	判断题正误	10
	设计方案	合理性	20
	实验报告	完整性	20

## 6 结束语

为解决水力射流破岩教学实训危险性高、教学资源匮乏的问题, 在 Unity3D 环境中开发了高压磨料射流破岩仿真实验系统, 实现了对实验场景和流程的充分还原。该系统基于逻辑判断和进程控制实现实验过程及虚拟操作的仿真, 通过人机数据交互实现实验流程的模拟和监测, 确保学生的沉浸式漫游体验。

虚拟仿真实验教学资源将实验教学与创新应用相结合, 构建以安全发展观为导向的高压磨料

射流破岩教学培训模式, 在安全操作环境下为学生创建了还原度高、交互性好的实验培训方式, 具有安全可靠、成本低的优点。通过人机交互促进学生的知识迁移与能力培养, 在教学中能够打破时空壁垒, 将教学场景从物理空间迁移到信息空间, 满足多场景融入式教学的需求。

## 参考文献

- [1] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. “双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 1-8.
- [2] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 146-156.
- [3] 魏建平, 蔡玉波, 刘勇, 等. 非刀具破岩理论与技术研究进展与趋势[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 801-832.
- [4] 张金良, 杨风威, 曹智国, 等. 大线速度下超高压水射流破岩试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 615-623.
- [5] 唐崇茂. 切缝辅助滚刀破岩临界间距试验及预测模型研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1131-1137.
- [6] 张莹莹, 张家良, 王奇, 等. 基于等离子体射流的实验教学项目设计与实践[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(5): 68-71.
- [7] 蔡伟华, 李倩, 李浩然, 等. 基于流体力学多尺度实验课的卓越人才创新意识培养分析[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(13): 115-117.
- [8] 张宇菲, 孙强, 岳中文, 等. 工程爆破虚拟仿真实验教学资源建设[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(5): 135-142.
- [9] 朱燕群, 何勇, 俞自涛, 等. 新时代“双碳”背景下能动专业“五位一体”实验教学改革与实践[J]. 高等工程教育研究, 2023(S1): 141-144.
- [10] 王军, 董成斌. 工程流体力学课程虚拟仿真实验[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(6): 85-88.
- [11] 王凤超, 刘应科, 张利瑶, 等. 淹没射流冲击煤体应力模型及破煤临界条件研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 122-130.
- [12] 齐燕冲, 吕旦, 贺飞, 等. 水刀辅助破岩技术的搭载及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(8): 1404-1412.
- [13] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [14] 熊安亚, 王芹, 徐是. 基于虚拟现实的人机交互视觉目标感知仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2): 237-240.
- [15] 李乃良, 王利军, 韩东太, 等. OBE 理念驱动的流体力学实验教学研究与实践[J]. 中国电力教育, 2023(10): 93-94.

编辑 王燕