

中文引用格式:丁超,张向轲,王琨,等. 基于VR技术的施工安全教育效果认知试验[J]. 中国安全科学学报,2025,35(1):84-93.

英文引用格式:DING Chao, ZHANG Xiangke, WANG Kun, et al. Cognitive test of construction safety education effect based on VR technology[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(1):84-93.

基于VR技术的施工安全教育效果认知试验*

丁超^{1,2}副教授,张向轲^{1,2},王琨³副教授,宋紫薇^{1,2},郭晓文^{1,4}讲师

(1 内蒙古科技大学 土木工程学院,内蒙古 包头 014010;2 内蒙古自治区高校智能建造与运维工程研究中心,内蒙古 包头 014010;3 包头铁道职业技术学院 建筑工程系,内蒙古 包头 014060;
4 香港科技大学 工程学院,香港 999077)

中图分类号:X925

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.0181

资助项目:内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023QNJS169)。

【摘要】 为弥补虚拟现实(VR)技术在安全教育中理论支撑和实际效果检验的不足,以影响工程安全教育效果的相关影响因素为切入点,采用结构方程模型(SEM)构建安全教育影响因素分析框架,并开展认知试验以评估实际效果。结果表明:教育频率、教育方式、个体主动性、内容趣味性以及过程舒适性是影响施工安全教育效果的主要因素;"VR+讲授"的混合模式是试验效果最好的教育方式,但使用VR技术仍需要人员辅助;教育频率的最佳周期建议 ≤ 30 天;趣味性、舒适性和教育效果呈显著正相关,但结合VR技术的施工安全教育应用中,舒适性更为重要。

【关键词】 虚拟现实(VR)技术; 施工安全教育; 教育效果; 认知试验; 结构方程模型(SEM); 影响因素

Cognitive test of construction safety education effect based on VR technology

DING Chao^{1,2}, ZHANG Xiangke^{1,2}, WANG Kun³, SONG Ziwei^{1,2}, GUO Xiaowen^{1,4}

(1 School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 2 Intelligent Construction and Operation Engineering Research Center at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou Inner Mongolia 014010, China;
3 Department of Architectural Engineering, Baotou Railway Vocational & Technical College, Baotou Inner Mongolia 014060, China; 4 School of Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In order to make up for the deficiency of VR technology in safety education theory support and practical effect tests, the relevant influencing factors affecting the effect of engineering safety education were taken as the entry point. SEM was used to establish an analytical framework for the influencing factors of safety education and the cognitive experiments were carried out to test the effect. The results show that the frequency of education, the mode of education, individual initiative, fun and comfort are the main factors affecting the effectiveness of construction safety education. The hybrid mode of "VR + lecture" is the most effective educational method at present, but the use of VR technology still requires personnel assistance. The optimal frequency of education is recommended to be less than 30 days. The main factors of fun, comfort are significantly positively correlated with educational effect, but comfort is more important

in the application of construction safety education with VR technology.

Keywords: virtual reality (VR) technology; construction safety education; education effect; cognitive test; structural equation modeling (SEM); impact factors

0 引言

在建筑行业中,施工人员安全意识不足、风险意识不强是造成事故频发的重要原因之一^[1]。适当的安全教育可以提高建筑行业的整体安全性,但传统的安全教育方式较僵化,学习者的主观能动性较低、兴趣不足,学习效果常常不佳^[2]。因此,提高施工安全教育的有效性,有助于提高施工人员安全意识,从而预防事故的发生。

近年来,建筑信息模型(Building Information Model, BIM)^[3]、虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术^[4]等被引入安全教育,如 MESSNER 等^[5]使用 VR 技术和四维计算机辅助设计建模开展安全教育;WANG Peng 等^[6]认为 VR 技术可提高建筑施工培训的效果;张文胜^[7]、何江^[8]等利用 VR 开展施工安全教育,发现其能克服传统培训中实际操作困难、场景复杂和成本高等问题;SNEH^[9]将 VR 嵌入施工安全教育,发现有助于提升学习效果、缩短培训时间并提高培训效率;方恩权等^[10]利用地铁多人 VR 安全体验系统,提高了培训内容的趣味性,较好地提升了施工人员安全意识;张俊等^[11]将 VR 技术和建筑防火设计课程内容相结合,开发的 VR 演练系统可增强学生的实训体验。然而,VR 在实际应用中仍存在一些不足:①现阶段对 VR 技术应用于安全教育的研究大都停留在理论层面,缺少实际应用效果的研究。②缺少与 VR 技术特点匹配的安全教育组织模式以及针对 VR 技术效果的影响因素分析框架和有效性试验验证。

鉴于此,笔者将以安全教育相关影响因素为切入点,建立分析框架,构建结构方程模型(Structural Equation Model, SEM),针对使用 VR 技术的不同的安全教育模式,采用问卷调查法开展认知试验检验,以期为 VR 的使用方式设计提供理论支撑,提高 VR 应用于施工安全教育的效果。

1 基于 SEM 的施工安全教育影响因素分析

1.1 影响因素筛选

通过中国知网、万方、维普等数据库,以施工安

全教育或培训、VR 技术、安全教育或教育效果、施工教育影响因素等为关键词,检索 2014—2023 年间的文献,结合文献引用并剔除篇幅过短的文献,最终从文献中筛选出主要影响因素,见表 1。

表 1 文献筛选出的主要影响因素

Table 1 Key influences on literature screening

影响因素	频数	频率/%
教育方式 ^[12-24]	13	32.50
个体主动性 ^[13, 15-16, 18, 20, 25-26]	7	17.50
内容趣味性 ^[13-15, 17, 19, 22, 27]	7	17.50
教育频率 ^[20, 22, 24, 26, 28]	5	12.50
过程舒适性 ^[15, 22, 27-28]	4	10.00
考核 ^[13, 19, 22]	3	7.50
成本 ^[19]	1	2.50

注:教育方式主要指安全教育不同的组织形式;个体主动性主要指学习者的主观能动性、学习积极性;内容趣味性主要指内容的丰富性,形式的多样性,是否新颖有趣;过程舒适性主要指学习过程中身体和心理的舒适性。

1.2 各因素对安全教育效果的影响作用假设

合并具有相同含义的因素,选取累计占比约 90% 的 5 个因素为主要影响因素,分别为教育频率、教育方式、个体主动性、过程舒适性(简称为舒适性)以及内容趣味性(简称为趣味性)。各因素对安全教育效果的影响作用结构^[29]如图 1 所示,提出以下假设:

1) H_1 : 加大施工安全教育频率会对提高施工安全教育的效果。

2) H_2 : 教育方式的不同会对施工安全教育的效果产生显著影响。

3) H_3 : 提高培训过程中个人的主动性会对施工安全教育的效果产生影响。

4) H_4 : 增加培训内容的趣味性会对施工安全教育的效果产生影响。

5) H_5 : 提高培训过程中个人的舒适性会对施工安全教育的效果产生影响。

6) H_6 : 增加施工安全教育的频率会对个体主动性产生影响。

7) H_7 : 不同的教育方式对个体主动性产生显著影响。

8) H_8 : 培训内容趣味性的增加会对个体主动性

产生影响。

9) H_9 : 培训过程中个人舒适性的提高会对个体主动性产生影响。

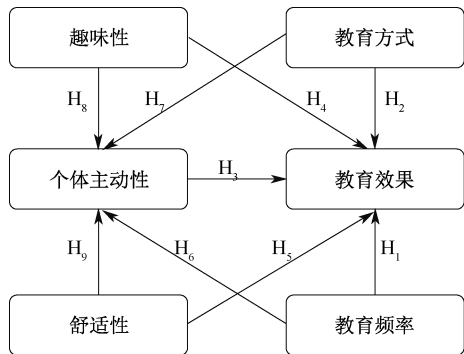


图 1 施工安全教育影响因素对教育效果的关系假设

Fig.1 Hypothesis on the relationship between factors influencing construction safety education on the effectiveness of education

1.3 SEM 构建与检验

1.3.1 数据来源

基于 1.1 中筛选的主要影响因素设计问卷。共发放问卷 200 份,剔除 18 份无效问卷,最终有效问卷为 182 份,有效回收率为 91%。调研对象中,建筑企业管理人员约占 10%,从事相关研究的高校教师约占 15%,施工现场人员约占 60%,经过专业实习的大四学生约占 15%。除学生群体外,调研对象均具备 5 年以上的建筑领域从业经验。调研对象中,男性 114 人(62.64%),女性 68 人(37.36%);在年龄分布上,30 岁以下 60 人(32.97%),30~39 岁 63 人(34.62%),40~49 岁 44 人(24.17%),50 岁及以上 15 人(8.24%);在教育背景上,初高中学历占比为 54.6%,本科及以上学历占比为 45.4%。

1.3.2 信效度检验

采用 SPSSAU 软件检验数据,教育频率、教育方式、个体主动性、趣味性、舒适性以及教育效果的克隆巴赫系数均大于 0.8,表明问卷符合信度要求,且各个测量题项一致性较好。此外,模型各潜变量的平均变异数萃取量值均大于 0.5,分别为 0.613、0.667、0.614、0.690、0.672 和 0.584,组合信度值均高于 0.7,分别为 0.887、0.909、0.888、0.917、0.910 和 0.806,标准化因子载荷均大于 0.7,表明问卷具有较好的收敛效度。

1.3.3 SEM 整体适配度检验

使用 SPSS AMOS 26.0 软件绘制 SEM 路径图,根据指标修正后的 SEM 路径系数如图 2 所示。

SEM 的拟合优度指标值见表 2,大部分拟合优

度指标达到通用标准,故模型拟合较好。

表 2 SEM 的拟合优度指标

通用指标	评判标准	取值	拟合结果
卡方自由度比	<3	1.172	良好
近似误差均方根	<0.08	0.031	良好
拟合优度指数	>0.90	0.872	可接受
增值拟合指数	>0.90	0.982	良好
塔克-刘易斯指数	>0.90	0.979	良好
比较拟合指数	>0.90	0.982	良好
相对拟合指数	>0.90	0.875	可接受
规范拟合指数	>0.90	0.889	可接受
不规范拟合指数	>0.50	0.788	良好

1.4 假设检验结果

假设检验结果见表 3,除 H_6 外假设均成立。

表 3 假设检验结果和模型路径系数

假设	路径	标准路径系数	p 值
H_1	教育频率→教育效果	0.259	***
H_2	教育方式→教育效果	0.253	**
H_3	个体主动性→教育效果	0.228	**
H_4	趣味性→教育效果	0.158	*
H_5	舒适性→教育效果	0.197	*
H_6	教育频率→个体主动性	0.021	0.806
H_7	教育方式→个体主动性	0.234	**
H_8	趣味性→个体主动性	0.216	*
H_9	舒适性→个体主动性	0.229	*

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$; *** 表示 $p < 0.001$ 。

2 基于 VR 技术的施工安全教育效果认知试验

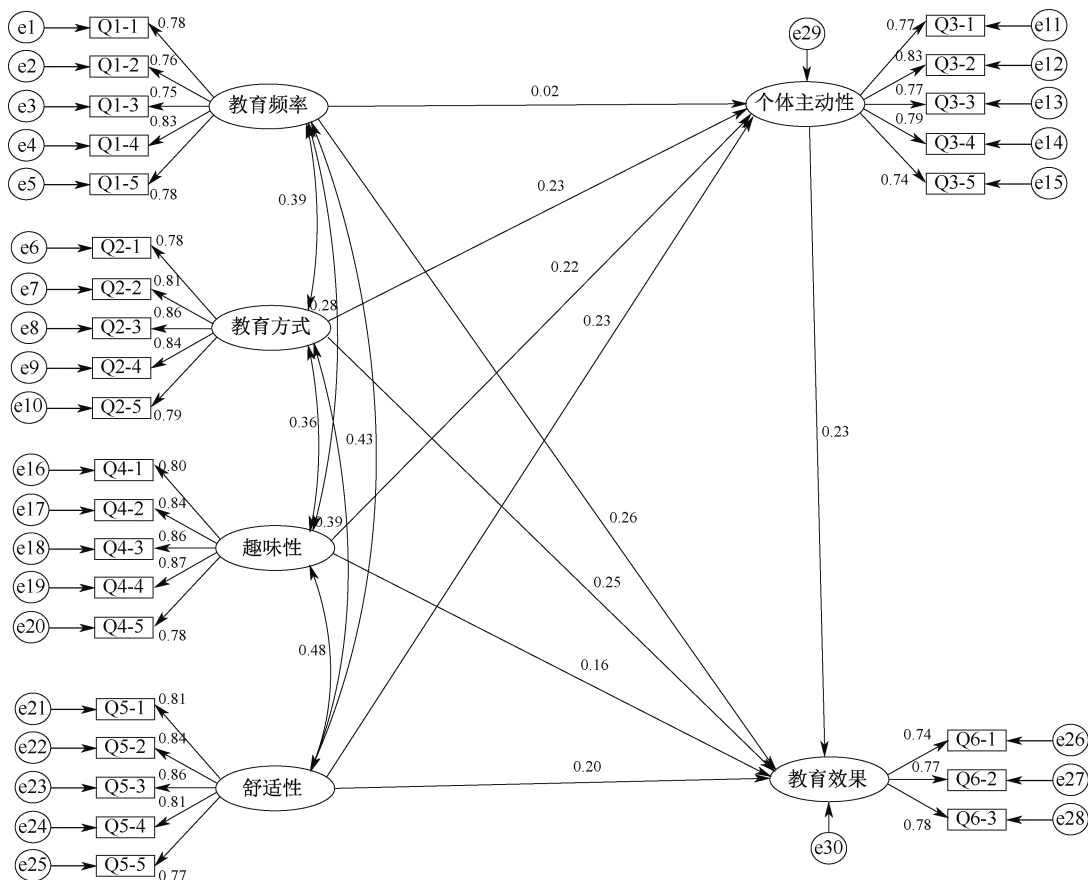
在识别主要影响因素后,需进一步验证认知结果与实际情况之间的一致性,同时试验验证 VR 技术应用中的最佳组织方式以及最优教育频率。

2.1 认知试验整体框架

根据 VR 与传统安全教育的结合程度,共设计 3 种模式的试验,分别为 VR 模式、混合模式和传统模式。构建 4 个典型施工现场风险场景,分别为高处坠落、脚手架坍塌、塔吊坠物和触电伤害^[30]。3 种模式覆盖的安全知识点完全相同,每种模式的培训内容均划分为 4 个模块,分别对应上述 4 种风险场景,且各模块包含的知识点数量相同。

2.2 认知试验流程设计

试验分为 4 个阶段,分别为试验前准备阶段、试



注:Q1-1~Q1-5、Q2-1~Q2-5、Q3-1~Q3-5、Q4-1~Q4-5、Q5-1~Q5-5、Q6-1~Q6-3 分别为基于五级量表,针对教育频率、教育方式、个体主动性、趣味性、舒适性、教育效果设置的测量题项;e1~e28 表示各问题对应结果的误差项。

图 2 施工安全教育影响因素模型路径系数

Fig. 2 Path coefficient diagram of construction safety education influencing factor model

验阶段、试验后评价以及试验后测试阶段,如图 3 所示。

2.2.1 试验前准备阶段

被试听讲解培训流程约 4 min,然后参与施工安全知识预测试(满分 100,耗时 6 min)。

2.2.2 试验阶段

将被试随机分组,进入不同模式下的试验流程。

1) VR 模式。培训前询问每位被试健康状况,排除对 VR 体验有不适应的个体。随后,每位被试按照每个场景中提供的操作提示作出相应的移动操作,并在体验过程中模拟触发伤害效果。每个场景结束后,系统生成事故原因分析报告,并辅以现实中的实际安全事故案例展示,每个场景的体验时间为 6 min,整个培训过程共计 24 min。测试完成后,被试需返回等待区,且测试期间禁止讨论。

2) 混合模式。流程基本与 VR 模式一致,不同之处在于:在第 1 步虚拟事故现场体验环节,安排教师指导被试的虚拟操作;在第 3 步安全事故回顾环节,教师将详细讲解安全知识,并总结正确的安全操

作方法。

3) 传统模式。采用视频及 PPT 的方式讲解每个场景的安全知识点,每个场景预计用时 4 min,整个讲解环节共计 16 min。讲解结束后,进行案例分析与讨论,耗时 8 min。

2.2.3 试验后评价阶段

安全知识测试结束后,3 组被试填写培训评价报告。3 种模式下的评价报告均由 3 个指标构成,分别为舒适性、趣味性和主动性。每个指标均采用李克特五级量表评分。

2.2.4 试验后测试阶段

试验结束后,被试休息 5 min,然后立即进行安全知识测试。测试满分为 100 分,预计耗时 6 min。此外,被试在试验后的第 7、20、30、90 天重复进行安全知识测试。

2.3 施工安全教育效果的量化

试验采用安全知识测试分值代表不同模式下施工安全教育的效果,共 2 套试卷、6 次测试,2 套试卷

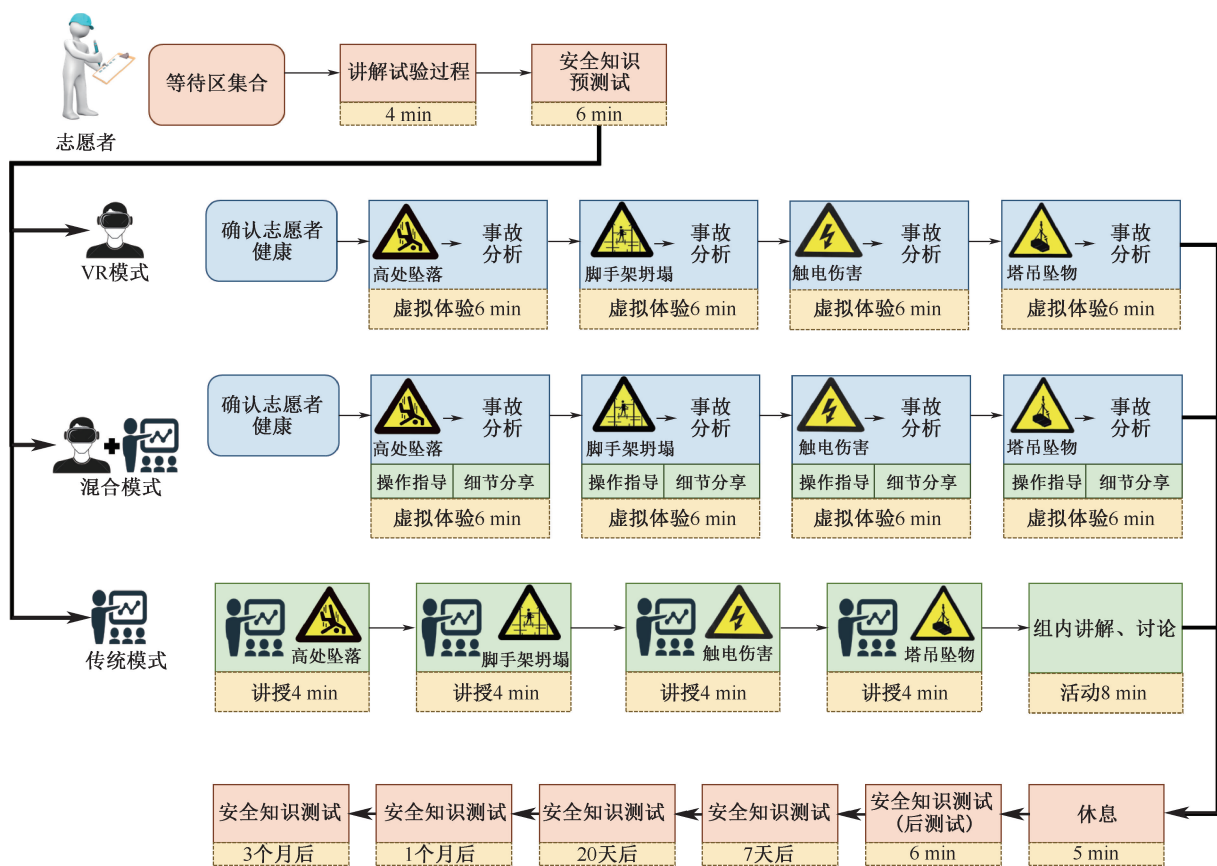


图3 3种安全教育模式的试验流程

Fig.3 Flowchart of experiment of three safety education methods

在题型、知识点覆盖以及难度上保持一致。预测试使用第1套试卷测试1次,试验后测试及后续周期测试使用第2套试卷测试5次,第2套试卷的题目顺序将随机排列。

2.4 认知试验人员招募及分组

2.4.1 试验人员招募

试验自2023年3月—2023年5月,历时3个月,并于2024年6月补充试验1次。共招募72名被试,其基本信息见表4。

表4 施工安全教育试验人员基本情况(样本量 n=72)

Table 4 Basic information of construction safety education experimenters (sample size n=72)

被试特征	选项	频数	频率/%
性别	男性	47	65.28
	女性	25	34.72
年龄/岁	16岁以下	0	0.00
	16~24岁	57	79.17
	25~30岁	15	20.83
	大于30岁	0	0.00
学历情况	高中及以下	54	75.00
	大学本(专)科	18	25.00
	大学本(专)科以上	0	0.00

续表 4

被试特征	选项	频数	频率/%
专业情况	建筑行业	50	69.44
	非建筑行业	22	30.56
是否有施工现场经验(包括实习经验)	是	10	13.89
	否	62	86.11

试验主要考察参与人员在不同安全教育模式下对安全知识接受的增量情况,与其自身的其他知识水平与经验无关^[31]。这些被试本身不具备相关专业知识,确保参与者最初知识水平大致相同。此外,虽然这些被试的个人学习能力可能高于实际建筑工人,但由于试验中所有被试的学历水平基本一致,因此,他们对知识接受的增量影响基本可以忽略。

2.4.2 试验分组

每位使用VR设备的被试预计耗时45 min,由于VR试验设备数量的限制,试验时间过长可能导致不可控因素增多。因此,将72名被试按照不同培训模式随机分为10组,即VR模式1~4组,每组6人;混合模式1~4组,每组6人;传统模式1~2组,每组12人。

3 认知试验结果与影响因素分析

3.1 组间检验与预测试结果

3.1.1 组间检验

各小组结果的方差分析 (Analysis of Variance, ANOVA) 见表 5, 各组成绩不具有显著性, 后续合并处理各小组数据。

表 5 各组预测试 ANOVA 结果

Table 5 Results of pre-test ANOVA for each group

分析项	项	均值±标准差	F 值	p 值
预测试成绩	VR1 组 (n=6)	48.50±5.09	0.803	0.507
	VR2 组 (n=6)	51.17±5.34		
	VR3 组 (n=6)	47.83±4.40		
	VR4 组 (n=6)	47.00±4.82		
	总计 (n=24)	48.63±4.86		
	混合 1 组 (n=6)	47.50±3.62	0.997	0.414
	混合 2 组 (n=6)	50.17±5.23		
	混合 3 组	51.33±3.01		
	混合 4 组	49.83±3.54		
	总计 (n=24)	49.71±3.94		
	传统 1 组 (n=6)	50.92±5.79	4.555	0.054
	传统 2 组 (n=6)	46.25±4.88		
	总计 (n=24)	48.58±5.76		
	VR 组 (n=24)	48.63±4.86	0.405	0.668
	混合组 (n=24)	49.71±3.94		
	传统组 (n=24)	48.58±5.76		

3.1.2 预测试结果

预测试结果经方差检验, 各组间并未呈现出显著性 (图 4), 表明在安全教育培训前, 各组被试的安全知识水平基本相同。各组被试对高处坠落、脚手架坍塌、塔吊坠物和触电伤害有一定了解, 但相对浅显, 平均得分约为 50。

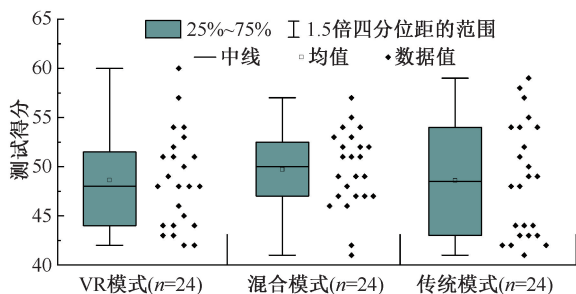


图 4 各组安全知识预测试结果

Fig. 4 Pre-test results on safety knowledge for each group

3.2 不同教育方式的效果

以安全知识得分增量 (后测试成绩-预测试成

绩) 评估不同模式的培训效果。由图 5 可知: 培训后, 3 种不同模式下的安全知识增量均得到较大增长, 其中 VR 组增长 30.16 ± 8.3 , 混合组增长 34.62 ± 10.22 , 传统组增长 25.42 ± 12.41 。ANOVA 结果 (表 6) 表明: 这 3 种模式结果呈现显著性, 因此, 这 3 种模式均是有效的, 且效果排序为混合组 > VR 组 > 传统组。

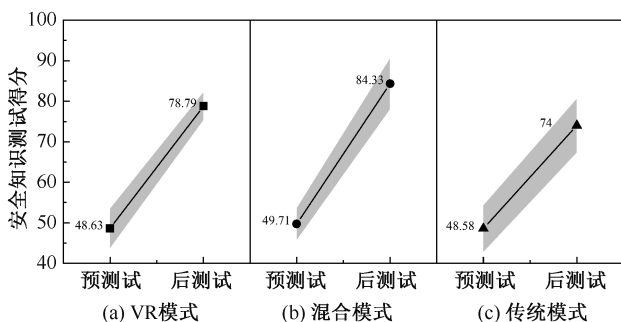


图 5 不同培训方式下安全教育的效果

Fig. 5 Effectiveness of safety education under different training methods

表 6 各组后测试结果的 ANOVA

Table 6 ANOVA of post-test results by group

分析项	项 (n=24)	均值±标准差	F 值	p 值
后测试成绩	VR 模式	78.79±3.44	20.154	***
	混合模式	84.33±6.28		
	传统模式	74.00±6.65		
	总计 (n=72)	79.04±6.95		

注: *** 表示 $p < 0.001$ 。

测试结果进一步验证了“教育方式”因素对培训效果的影响。虽然 VR 技术相较于传统模式在施工安全教育中展现出更显著的知识增量效果, 但最有效的教学形式是“VR+讲授”的混合模式, 表明 VR 设备仍需要人员辅助才能发挥更大的效果。

3.3 不同教育评率的效果

为维持施工人员的安全知识和安全意识在较高水平, 周期性培训必不可少。因此, 确定适宜的培训频率十分重要。频率过高会增加成本, 过低会削弱效果。不同教育模式的记忆保留效果是确定教育频率的重要参考依据。3 种教育模式下安全教育的记忆保留效果如图 6 所示。

3 种模式均表现出记忆遗忘曲线的特点^[32]。在 7 天后的测试中, 3 组成绩呈现不同程度的下降。VR 组和混合组由于 VR 技术提供的感官刺激, 可能具有一定记忆优势, 因此成绩下降较慢。相比之下, 传统组的知识记忆下降较为明显, 特别是被试脱离培训环境后, 成绩快速下降。20 和 30 天后的测试

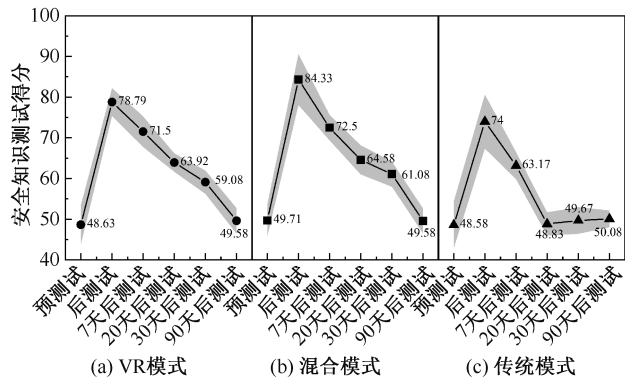


图6 不同培训方式下施工安全教育记忆保留效果

Fig. 6 Memory retention effect of construction safety education under different training methods

结果表明:VR组和混合组的施工安全知识水平虽然下降较多,但仍保留了一定效果,而传统组的效果已基本消失。90天后的测试结果显示,VR组、混合组以及传统组没有显著差异性(表7),表明所有模式的效果均已丧失。

表7 培训后7、20、30、90天测试成绩的组间ANOVA

Table 7 Between-group ANOVA results for test scores at 7, 20, 30, and 90 days post-training

分析项	项	样本量	平均值	标准差	F值	p值
7天后测试	VR模式	24	71.50	3.78	53.597	***
	混合模式	24	72.50	3.13		
	传统模式	24	63.17	3.34		
	总计	72	69.06	5.36		
20天后测试	VR模式	12	63.92	2.27	108.521	***
	混合模式	12	64.58	3.60		
	传统模式	12	48.83	2.86		
	总计	36	59.11	7.81		
30天后测试	VR模式	24	59.08	2.87	93.119	***
	混合模式	24	61.08	3.12		
	传统模式	24	49.67	3.28		
	总计	72	56.61	5.83		
90天后测试	VR模式	12	49.58	3.15	0.127	0.882
	混合模式	12	49.58	3.09		
	传统模式	12	50.08	2.07		
	总计	36	49.75	2.74		

注:***表示 $p < 0.001$;下同。

因此,对比3种教育模式,混合模式的记忆保留效果相对更好。教育频率的周期不超过30天,有助于人员的安全知识维持在较高水平。

3.4 趣味性与舒适性的作用

VR模式和混合模式均使用VR技术,组织形式、穿戴和学习内容类似,因此,将这2组的评价报

告合并,结果见表8。

表8 趣味性和舒适性得分的ANOVA

Table 8 ANOVA test for fun and Comfort scores

影响因素	均值±标准差		F值	p值
	VR(n=48)	传统模式(n=24)		
趣味性	4.13±0.79	2.92±1.18	26.771	***
舒适性	2.44±0.94	3.08±1.28	5.865	*

注:*表示 $p < 0.05$ 。

由表8可知:与传统模式相比,VR技术使被试感到更加新奇和有趣。在舒适性方面,传统模式表现平平,被试并无特别的舒适感或抵触感。相反,由于VR设备需佩戴眼镜,部分被试反映头晕、佩戴不舒服以及影响自身原有眼镜佩戴等问题,造成了较强的不适感。

SEM分析结果表明:趣味性和舒适性直接或间接影响教育效果,试验结果也证实了这一点,趣味性、舒适性和教育效果呈显著正相关,见表9。但是,具体到VR技术的应用,舒适性相对于趣味性更重要,可能因为VR技术的特点使得被试感到更新奇和有趣,导致趣味性水平整体上移,但在成绩差异性上未体现。VR技术使用过程的舒适性直接影响使用者的感受,眼镜佩戴是否舒适、虚拟画面是否引起眩晕、长时间使用是否带来不适等,这些因素都会影响最终成绩。因此,对于使用VR技术的培训内容,目前可能不用过多考虑趣味性,而应更加注重使用的舒适性问题。

表9 趣味性和舒适性与测试成绩的相关性

Table 9 Correlation between Fun and Comfort and test scores

分类		后测试成绩	趣味性	舒适性	
后测试成绩	相关系数	1	0.343	0.347	
	p值	—	**	**	
	样本量	—	72	72	
VR	趣味性	相关系数	0.120	1	-0.247
		p值	0.415	—	0.091
		样本量	48	—	48
	舒适性	相关系数	0.437	-0.247	1
		p值	**	0.091	—
		样本量	48	48	—
传统	趣味性	相关系数	0.078	1	0.062
		p值	0.718	—	0.772
		样本量	24	—	24
	舒适性	相关系数	0.800	0.062	1
		p值	***	0.772	—
		样本量	24	24	—

注:**表示 $p < 0.01$ 。

4 结 论

1) 影响施工安全教育效果的主要因素包括教育频率、教育方式、个体主动性、内容趣味性以及过程舒适性。

2) VR 技术相较于传统模式,在施工安全教育中展现出更显著的增量效果。最有效的 VR 应用形式是结合讲授的混合式教学模式,即“VR+讲授”。

此外,VR 设备仍需要人员辅助才能发挥更佳效果。

3) 在 3 种模式中,混合模式的记忆保留效果更好。初行者的教育频率的最佳周期建议不大于 30 天。

4) 趣味性、舒适性和教育效果呈显著正相关,但在 VR 的应用中,舒适性相较于趣味性对教育效果的影响更为关键。因此,目前 VR 技术应用应更多地关注舒适性问题,而对于内容的趣味性则不必过分强调。

参 考 文 献

- [1] 康梦月, 祁神军, 陈梅. 精神支持与物质支持对建筑工人不安全行为影响对比[J]. 中国安全生产科学技术, 2022,18(3): 143-148.
KANG Mengyue, QI Shenjun, CHEN Mei. Comparison of the effects of moral support and material support on construction workers' unsafe behaviors [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022,18(3):143-148.
- [2] 王永刚,王慧莹. 安全教育对机务维修人员违规行为的影响路径研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023,19(7): 192-197.
WANG Yonggang, WANG Huiying. A study of the path of safety education on the influence of violation behavior of machine maintenance personnel [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023,19(7):192-197.
- [3] LU Ying, GONG Peizhen, TANG Yunchun, et al. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects[J]. Automation in Construction, 2021,124:DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103553.
- [4] AHMED S. A review on using opportunities of augmented reality and virtual reality in construction project management[J]. Organization, Technology and Management in Construction, 2019,11(1):1 839-1 852.
- [5] WHISKER V, YERRAPATHRUNI S, MESSNER J, et al. Using virtual reality to improve construction engineering education[C]. 2003 Annual Conference, 2003: DOI: 10.18260/1-2-11970.
- [6] WANG Peng, WU Peng, WANG Jun, et al. A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018,15(6): DOI: 10.3390/ijerph15061204.
- [7] 张文胜,岳康. 基于 VR 的驾驶仿真及安全教育系统开发[J]. 计算机工程与应用, 2022,58(23): 278-284.
ZHANG Wensheng, YUE Kang. Development of driving simulation and safety education system based on VR [J]. Computer Engineering and Applications, 2022,58(23): 278-284.
- [8] 何江,蒙泳君,赵庚亮,等. 基于 VR 的地铁基坑施工安全教育系统设计与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2021,17(8): 124-129.
HE Jiang, MENG Yongjun, ZHAO Gengliang, et al. Design and application of VR-based subway pit construction safety education system [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021,17(8):124-129.
- [9] SNEH B, BEHZAD E. State of the art review of virtual reality environment applications in construction safety[J]. American Society of Civil Engineers, 2015,17:DOI: 10.1061/9780784479070.040.
- [10] 方恩权,郭杰,张伟. 基于 VR 虚拟现实技术的地铁施工多人 VR 安全体验系统研究与应用[J]. 工业安全与环保, 2019,45(12):58-61.
FANG Enquan, GUO Jie, ZHANG Wei. Research and application of multiplayer VR safety experience system for subway construction based on VR virtual reality technology [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019,45(12): 58-61.
- [11] 张俊,刘彬,杨立兵,等. 基于 VR 的建筑防火设计课程教学实训方法研究[J]. 工业安全与环保, 2023,49(5): 23-28.
ZHANG Jun, LIU Bin, YANG Libing, et al. Research on teaching practical training methods of building fire protection

- design course based on VR [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2023,49(5):23-28.
- [12] 郑霞忠,王毓,陈云,等. 建筑施工安全培训信息呈现方式学习效果评价[J]. *中国安全科学学报*, 2023,33(5):96-102.
ZHENG Xiazhong, WANG Yu, CHEN Yun, et al. Evaluation of the learning effectiveness of information presentation for building construction safety training [J]. *China Safety Science Journal*, 2023,33(5):96-102.
- [13] 李超,郭慧敏,成连华. 煤矿企业安全培训存在的问题及对策分析[J]. *煤矿安全*, 2019,50(6):281-284.
LI Chao, GUO Huimin, CHENG Lianhua. Analysis of problems and countermeasures of safety training in coal mining enterprises [J]. *Safety in Coal Mines*, 2019,50(6):281-284.
- [14] 牛达钰,祁神军,吴国来,等. 基于情景模拟的沉浸式建筑工人安全教育培训[J]. *工程管理学报*, 2020,34(5):37-41.
NIU Dayu, QI Shenjun, WU Guolai. A immersive safety education and training for construction workers based on scenario simulation [J]. *Journal of Engineering Management*, 2020,34(5):37-41.
- [15] 周迎雪,严小丽,吴颖萍,等. VR 安全教育培训情境下建筑工人培训意愿研究[J]. *武汉理工大学学报:信息与管理工程版*, 2021,43(3):210-217.
ZHOU Yingxue, YAN Xiaoli, WU Yingping, et al. Study on the training willingness of construction workers in the context of VR safety education and training [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering*, 2021,43(3):210-217.
- [16] 余凯华. 排水泵站巡检安全教育培训中 VR 技术的应用[J]. *中国给水排水*, 2024,40(4):93-98.
YU Kaihua. Application of VR technology in safety education and training of drainage pumping station inspection [J]. *CHINA Water & Wastewater*, 2024,40(4):93-98.
- [17] 邢志祥,王安可,钱辉. 企业在线安全培训模式的研究进展[J]. *安全与环境工程*, 2018,25(2):115-120.
XING Zhixiang, WANG Anke, QIAN Hui. Research progress of enterprise online safety training mode [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018,25(2):115-120.
- [18] 许立强,付明琴,王程程. 装配式建筑安全管理中 BIM 技术的应用研究[J]. *建筑经济*, 2021,42(4):53-56.
XU Liqiang, FU Mingqin, WANG Chengcheng. Research on the application of BIM technology in safety management of assembled buildings [J]. *Construction Economy*, 2021,42(4):53-56.
- [19] 蒋旭刚,杨俊燕,李杜风. 我国煤矿安全培训体系构建及发展趋势探讨[J]. *矿业安全与环保*, 2015,42(1):116-119.
JIANG Xugang, YANG Junyan, LI Dufeng. Discussion on construction and development trend of coal mine safety training system in our country [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2015,42(1):116-119.
- [20] 刘凯,金旭东,侯敬伟. 装配式项目建筑工人参与安全教育主动性综合评价[J]. *建筑经济*, 2022,43(增1):804-810.
LIU Kai, JIN Xudong, HOU Jingwei. A comprehensive evaluation of construction workers' participation in safety education initiatives on assembly projects [J]. *Construction Economy*, 2022,43(S1):804-810.
- [21] 赵平,邓如玉,李志飞,等. 基于改进 DEMATEL 的输电线路跨越施工安全影响因素研究[J]. *安全与环境学报*, 2022,22(1):36-43.
ZHAO Ping, DENG Ruyu, LI Zhifei, et al. Study on safety influencing factors of transmission line crossing construction based on improved DEMATEL [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022,22(1):36-43.
- [22] 许建飞,韩豫. 建筑工人参与安全教育主动性的影响因素研究[J]. *工程管理学报*, 2020,34(3):109-114.
XU Jianfei, HAN Yu. A study on the influencing factors of construction workers' participation in safety education [J]. *Journal of Engineering Management*, 2020,34(3):109-114.
- [23] 王艺芳,陆嘉宜,王静,等. 基于 VR 全景的实验室安全教育的设计与实践[J]. *实验室研究与探索*, 2022,41(3):304-307,312.
WANG Yifang, LU Jiayi, WANG Jing, et al. Design and practice of laboratory safety education based on VR panorama [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2022,41(3):304-307,312.
- [24] 唐琳瑶,祁神军,牛达钰. 基于 BIM+VR 的沉浸体验式建筑工人安全培训及效果评价[J]. *工程管理学报*, 2023,37(1):130-134.
TANG Linyao, QI Shenjun, NIU Dayu. Immersive experience construction worker safety training and effect evaluation

based on BIM+VR [J]. *Journal of Engineering Management*, 2023,37(1): 130-134.

- [25] 王新成,孙继德,张召普,等. 企业提供与建筑工人参加安全培训的博弈研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(7): 159-164.
WANG Xincheng, SUN Jide, ZHANG Zhaopu, et al. A model for game between safety training provision of firm and worker' attendance to it in construction industry [J]. *China Safety Science Journal*, 2018,28(7):159-164.
- [26] 李文婷. 建筑施工企业安全成本研究综述[J]. *工业安全与环保*, 2017,43(5): 85-89.
LI Wenting. Research of the safety cost for construction enterprises [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2017,43(5):85-89.
- [27] 牛永宁,蔡庸亨,牛新可. 英国建筑安全教育培训分析与借鉴[J]. *建筑安全*, 2015,30(11): 7-9.
NIU Yongning, CAI Yongheng, NIU Xinke. Analysis and reference of building safety education and training in Britain[J]. *Building Safety*, 2015,30(11):7-9.
- [28] 郝人毅,叶春明. 学习遗忘效应在工程项目进度计划中的应用[J]. *上海理工大学学报*, 2019,41(5): 433-440.
HAO Renyi, YE Chunming. The application of learning forgetting effect in engineering project schedule planning [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2019,41(5):433-440.
- [29] YANG Fan, MIANG G Y. VR and MR technology for safety management education: an authentic learning approach[J]. *Safety Science*, 2022,148: DOI:10.1016/j.ssci.2021.105645.
- [30] WENDER Y, KUNCHI W, HSIENTANG W. Empirical comparison of learning effectiveness of immersive virtual reality-based safety training for novice and experienced construction workers[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2022,148(9): DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002337.
- [31] MAZWIN M E, HANIM O M, SUKRI S M. The level of competency knowledge in safety training among construction personnel[J]. *Journal of Construction in Developing Countries*, 2019,24(2):157-172.
- [32] DE LAVENNE A, ANDRÉASSIAN V, CROCHEMORE L, et al. Quantifying multi-year hydrological memory with catchment forgetting curves[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022,26(10): 2 715-2 732.



作者简介: 丁超 (1984—),男,河南南阳人,博士,副教授,主要从事建筑工程安全管理方面的研究。E-mail:dckinger@imust.edu.cn。