

人机交互视角下的压缩氧自救器设计

梁浩¹, 廖小菊^{1*}, 黄绍帅², 张怡娟³

(1.天津科技大学 艺术设计学院, 天津 300222; 2.北京理工大学 设计与艺术学院, 北京 100081;
3.北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

摘要: **目的** 为提升压缩氧自救器的舒适性和交互效率, 从人机交互视角探析压缩氧自救器的创新设计路径。**方法** 构建压缩氧自救器创新设计流程。通过文献搜集产品的人机交互问题, 经德尔菲法评估后构建设计因素体系, 梳理出穿戴方式、识别度、操作方式三层次的内容。基于 AHP 与 DEMATEL 方法调查专家意见, 量化设计因素的综合权重、因果关系并获取其优先级。以穿戴方式为核心, 提出“三角背带式”压缩氧自救器设计方案, 运用量表评分和操作计时测试调查方案的满意度。**结论** 通过 AHP-DEMATEL 法确定设计因素并开展创新设计, 设计方案使产品更舒适和便捷, 具有良好的人机使用特性, 为压缩氧自救器人机交互研究提供了新的方法和建议。

关键词: 产品设计; 压缩氧自救器; 人机交互; AHP; DEMATEL

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)18-0035-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.005

Design of Compressed Oxygen Self-rescuer from the Human Computer Interaction Perspective

LIANG Hao¹, LIAO Xiao-ju^{1*}, HUANG Shao-shuai², ZHANG Yi-juan³

(1.Art and Design College, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2.School of Design & Art, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3.Beijing Zhenxing Metrology and Testing Institute, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the innovative design path of compressed oxygen self-rescuers, so as to improve the comfort and interaction efficiency of compressed oxygen self-rescuers. The innovative design process of compressed oxygen self-rescuers was constructed and the product human-computer interaction problems were collected through literature. After these problems were evaluated by the Delphi method, the design factors system was constructed, and three levels of content were sorted out, namely, the way of wearing, the degree of recognition and the way of operation. Based on AHP and DEMATEL methods, the expert opinions were investigated to quantify the comprehensive weight and causality of design factors, and finally obtain their priority. With the wearable way as the core, the innovative design scheme of "triangle back strap wearable" compressed oxygen self-rescuers was proposed. And the scale scoring and the operation timing test were used to investigate the satisfaction of the scheme. The mixed use of the AHP and DEMATEL method can identify factors and output design schemes that are comfort, convenience, and have good man-machine characteristics. The work provides new methods and suggestions for the study of human-computer interaction of compressed oxygen self-rescuers.

KEY WORDS: product design; compressed oxygen self-rescuer; human-computer interaction; AHP; DEMATEL

煤矿产业对能源资源的贡献始终处于难以撼动的地位, 是当今时代最具经济贡献的行业之一^[1]。同时, 煤矿资源的开采也伴随着不确定性事故风险, 给

人员、行业、经济带来巨大冲击^[2]。压缩氧自救器作为个人防护呼吸设备, 是煤矿业工人必备的自救设备之一。该设备能对窒息或有毒气体环境中人员的逃生

产生影响。针对如何使压缩氧自救器更大幅度地帮助煤矿工人应对突发事故这个课题, PELDERS 等^[3]评估了女性矿工自救器腰部佩戴的情况, 指出自救器不适应女性人体测量尺寸, 存在设备笨重、佩戴有痛感等问题; GYAWU 等^[4]以矿工为中心, 通过场景调查自我逃生障碍, 指导自救器原型设计; 马云龙^[5]查看国内外自救器技术和执行标准, 指出了我国煤矿用自救器存在的装置落后、自救器佩戴性能欠缺考察等问题; 何廷梅^[6]利用仿人呼吸试验平台对影响自救器使用时长的因素进行分析, 提出了长时自救器的结构设计方案; 仇式鹏^[7]从用户视角研究了自救器的体验问题, 提出了自救器的省力携带方式和造型设计方案。主流压缩氧自救器产品始终存在佩戴不舒适、使用不便捷、可用时长较短、使用温度较高等问题, 是影响煤矿产业安全管理的障碍之一。

上述研究虽然在自救器开发迭代、性能改进、痛点归纳等方面取得了诸多成果, 但针对压缩氧自救器人机交互问题提出的研究和解决方案较少, 而用户、矿井环境、压缩氧自救器三者间的协调是实现自救器舒适、便捷和安全的重要条件。基于相关研究, 本文梳理并筛选了压缩氧自救器的人机交互设计因素。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 能分析因素间相对重要性, 而决策实验室分析法 (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL) 则能辨别因素间影响和被影响关系。本文利用 AHP-DEMATEL 方法计算人机交互设计因素的综合权重。针对权重较高的因素提出创新设计方案, 应用量表评分和操作计时测试评估设计方案, 丰富个人防护设备人机交互设计研究框架。

1 压缩氧自救器创新设计流程构建

压缩氧自救器设计需满足高效、安全的人机要求, 提升产品可用性和交互体验。因煤矿开采作业的复杂性, 压缩氧自救器使用前均与用户、矿内环境之间存在交互关系, 创新设计需关注用户在携带和使用压缩氧自救器的整个交互过程因素。设计因素筛选是实现创新设计的第一步, AHP 法^[8]能精准地将因素权重定量化和定性化, 建立所有因素层次关系, 但不具备对因素相互关系的处理能力。DEMATEL 法^[9]可将产品复杂系统的重要因素筛选出来, 并解决因素间的相互关联效应, 但该方法要依靠因素间相互关系输出权重值, 不能考虑判断过程中的相对权重。当前, DEMATEL 法被广泛地应用于复杂信息系统核心因素的识别等方面^[10]。相关文献常将两种工具结合使用, 既能满足等值权重的层次计算, 也能弥补 AHP 法不能处理因素间内在关系不足的问题。本文引入 AHP 与 DEMATEL 方法, 构建压缩氧自救器创新设计流程, 见图 1。

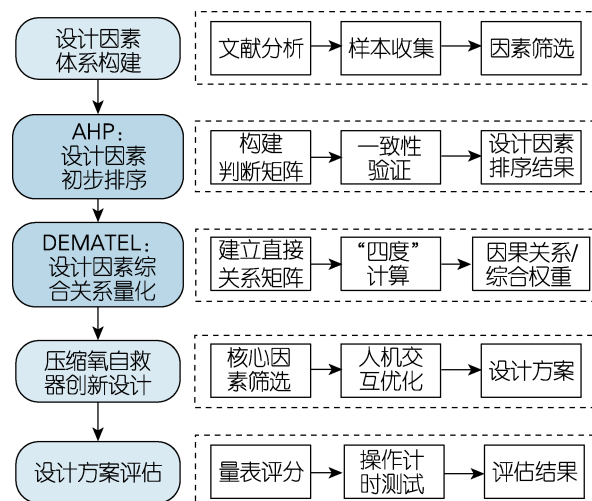


图1 压缩氧自救器创新设计流程

Fig.1 Innovative design process of compressed oxygen self-rescuers

通过文献分析搜集压缩氧自救器在人机交互中给用户带来的不便, 构建人机交互设计因素体系, 并利用德尔菲法剔除相似因素; 运用 AHP 构建设计因素层次结构模型, 通过专家打分的方式构建判断矩阵, 获取因素相对重要性并进行初步排序; 运用 DEMATEL 法建立设计因素直接关系矩阵, 通过计算中心度与原因度以评估因素相互关系; 基于压缩氧自救器设计因素综合排序, 从人机交互视角提出创新设计方案。通过量表评分和操作计时测试验证设计方案的合理性。

2 压缩氧自救器人机交互设计因素分析

2.1 人机交互设计因素体系构建

在分析了压缩氧自救器的使用情景并梳理了文献提出的人机交互问题后, 总结呈现频次较高的内容, 得到人机交互设计因素体系, 见表 1。

邀请设计学者基于德尔菲法对设计因素进行讨论, 去掉相似内容 4 项。最终获得 3 项一级设计因素, 11 项二级设计因素, 见表 2。

2.2 人机交互设计因素体系构建

压缩氧自救器人机交互设计因素优先级可通过 AHP 计算因素权重获取, 具体步骤如下。

2.2.1 构建判断矩阵并计算相对权重

采用问卷调查的方式搜集专家评价, 邀请 21 名煤矿矿业研究员、设计师与用户对同层次因素进行两两比较。利用几何平均法聚合专家意见, 建立判断矩阵 A 。矩阵 A 由各个标度值构成, 元素 a_{ij} 为因素 A_i 相对因素 A_j 的重要标度值, n 为矩阵中因素的数量。通过方根法将矩阵 A 归一化处理, 得到权重向量, 用 W_i 表示。 W_i 的值即为压缩氧自救器人机交互设计因素权重。

表 1 人机交互设计因素体系
Tab.1 Human-computer interaction design factor system

人机交互设计因素	参考文献
鼻夹易脱落	李维翔 ^[11] 、仇式鹏 ^[7]
穿戴不省力	马云龙 ^[5] 、SINGH 等 ^[1] 、赵睿等 ^[12] 、李维翔 ^[11] 、王建豪等 ^[13] 、周越 ^[14] 、PELDERS 等 ^[3]
开盖不便捷	赵睿等 ^[12] 、李维翔 ^[11] 、仇式鹏 ^[7] 、周越 ^[14]
气囊状态识别不易	REUTER 等 ^[15]
不具备警示音	SINGH 等 ^[1] 、REDDY 等 ^[16]
色彩较单调	李长录 ^[17] 、李维翔 ^[11] 、仇式鹏 ^[7]
背带较单薄	仇式鹏 ^[7]
穿戴不稳固	ONIFADE ^[18] 、马云龙 ^[5] 、SINGH 等 ^[1] 、赵睿等 ^[12] 、李维翔 ^[11] 、仇式鹏 ^[7] 、王建豪等 ^[13] 、周越 ^[14] 、PELDERS 等 ^[3]
压力表不便于观察	REUTER 等 ^[15] 、REDDY 等 ^[16]
限制语言交流	ONIFADE ^[18] 、赵青云等 ^[19] 、ONIFADE 等 ^[18]
佩戴流程繁琐	李维翔 ^[11] 、仇式鹏 ^[7]
造型较机械	李长录 ^[17] 、仇式鹏 ^[7]
鼻夹佩戴不适	李维翔 ^[11] 、仇式鹏 ^[7]
外壳不具指示功能	ONIFADE ^[18] 、李长录 ^[17] 、李维翔 ^[11] 、REUTER 等 ^[15] 、REDDY 等 ^[16] 、毛欣 ^[20]
穿戴不便捷	马云龙 ^[5] 、SINGH 等 ^[1] 、赵睿等 ^[12] 、李维翔 ^[11] 、王建豪等 ^[13] 、周越 ^[14]

表 2 人机交互设计因素
Tab.2 Human-computer interaction design factors

一级设计因素	二级设计因素	相关说明
穿戴方式 A_1	穿戴不省力 A_{11}	长期穿戴产生不适，穿戴受力不均匀
	穿戴不稳固 A_{12}	考虑矿井环境下的行为，避免自救器晃动
	背带较单薄 A_{13}	背带较简陋，增加了人体接触面受力
识别度 A_2	外壳不具备指示功能 A_{21}	可见度低时，产品方向不易区分
	色彩较单调 A_{22}	色彩较单调，具有紧张感
	造型较机械 A_{23}	造型较机械，具有严肃感
	压力表不便于观察 A_{24}	可见度低时，不易估量氧气余量
操作方式 A_3	开盖不便捷 A_{31}	开盖步骤繁琐，灰尘和可见度会影响效率
	限制语言交流 A_{32}	口具使用期间，队员间相互交流不易
	不具备警示音 A_{33}	不具备手动或者自动的警示音
	鼻夹易脱落 A_{34}	鼻夹因灰尘或汗水而滑落

2.2.2 一致性验证与数据分析

定义 C_1 为一一致性验证指标， $\lambda_{\max}$ 为矩阵 A 的最大特征根，相关计算见式（1）—（2）。

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \times W_i}{4W_i} \tag{1}$$

$$C_1 = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \tag{2}$$

一致性比率 C_R 的计算，见式（3）。

$$C_R = C_1 / R_1 \tag{3}$$

式中： R_1 数值可通过查看平均随一致性指标表^[21]获得。

经过式（2）—（3）的计算，得到一致性比率 C_R ，结果 <0.1 ，一致性验证通过。压缩氧自救器人机交互设计因素的相对权重 W_i' 和初步排序见表 3。在

表 3 设计因素相对权重
Tab.3 Relative weights of design factors

一级设计因素	权重 (W_i)	二级设计因素	权重 (W_i)	相对权重 (W_i')	初步排序
A_1	0.506 2	A_{11}	0.284 0	0.143 8	3
		A_{12}	0.590 1	0.298 7	1
		A_{13}	0.125 8	0.063 7	6
A_2	0.108 6	A_{21}	0.339 0	0.036 8	7
		A_{22}	0.243 4	0.026 4	9
		A_{23}	0.238 0	0.025 9	10
		A_{24}	0.179 5	0.019 5	11
		A_{31}	0.344 1	0.132 6	4
A_3	0.385 2	A_{32}	0.186 4	0.071 8	5
		A_{33}	0.765 6	0.029 5	8
		A_{34}	0.392 8	0.151 3	2

一级设计因素中,穿戴方式(A_1)的权重更高;在二级设计因素中,穿戴不省力(A_{11})、穿戴不稳固(A_{12})、开盖不便捷(A_{31})是最重要的三个方向。

2.3 基于 DEMATEL 的设计因素关系量化

为增加权重的客观性,弥补方法的主观性,结合调研数据和 DEMATEL 方法进一步厘清设计因素间的因果关系。计算步骤如下。

2.3.1 构建直接影响关系矩阵

邀请 10 名设计师、用户、煤矿业安全管理研究员,利用 0~5 标度评估所有设计因素间的相互影响关系。聚合专家矩阵问卷的评估结果,获得直接影响关系矩阵 B ,元素 b_{ij} 为因素 B_i 对因素 B_j 的影响度, m 为设计因素数量,具体见式(4)。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mm} \end{bmatrix}$$

(4)

2.3.2 矩阵计算

定义 I 为单位矩阵,通过式(5) — (7) 求解规范化直接影响矩阵 C 和综合影响矩阵 H ,见式(5) —

(7)。

$$x = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^m b_{ij}$$

(5)

$$C = \frac{B}{x}$$

(6)

$$H = C(I - C)^{-1}$$

(7)

2.3.3 计算“四度”与综合权重

设计因素的影响度(D_i)、被影响度(E_i)、中心度(F_i)、原因度(G_i)即为“四度”。 D_i 的值为矩阵 H 第 i 行元素之和; E_i 的值为矩阵 H 第 j 列元素之和; F_i 为 D_i 和 E_i 之和; $G_i = D_i - E_i$ 。为降低结果的主观性,通过式(8)计算设计因素综合权重 K_i ,计算结果见表 4。

$$K_i = \frac{W'_i F_i}{\sum_{i=1}^m W'_i F_i} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

(8)

将 F_i 与 G_i 分别作为横、纵坐标,绘制设计因素因果关系图,见图 2。不具备警示音(A_{33})、限制语言交流(A_{32})、压力表可视性(A_{24})的重要性较低。

表 4 创新设计因素综合权重
Tab.4 Comprehensive weight of innovative design factors

二级 设计因素	影响度 (D_i)	被影响度 (E_i)	中心度 (F_i)	原因度 (G_i)	相对权重 (W'_i)	综合权重 (K_i)	综合排序
A_{11}	0	1.902	1.902	-1.902	0.143 8	0.147 8	3
A_{12}	1.292	0.709	2.001	0.583	0.298 7	0.322 9	1
A_{13}	1.074	0.238	1.312	0.836	0.063 7	0.045 2	6
A_{21}	1.966	0.389	2.355	1.577	0.036 8	0.046 8	5
A_{22}	1.56	0.472	2.032	1.088	0.026 4	0.029 0	11
A_{23}	1.69	1.519	3.209	0.171	0.025 9	0.044 9	7
A_{24}	0.355	0.333	0.688	0.022	0.019 5	0.007 2	9
A_{31}	0.66	1.908	2.567	-1.248	0.132 6	0.183 9	2
A_{32}	0	0.744	0.744	-0.744	0.071 8	0.028 9	8
A_{33}	0.094	0.262	0.356	-0.168	0.029 5	0.005 7	10
A_{34}	0.734	0.951	1.685	-0.217	0.151 3	0.137 7	4

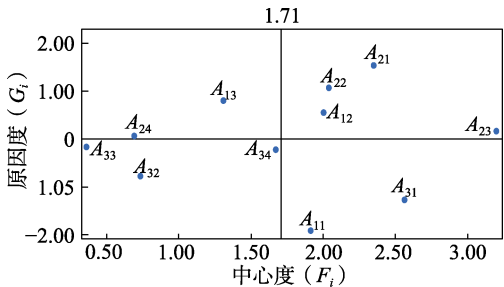


图 2 设计因素因果关联图
Fig.2 Causal correlation diagram of design factors

对比相对权重和综合权重排序结果可知,穿戴不省力(A_{11})、穿戴不稳固(A_{12})和背带较单薄(A_{13})的排名没有变化,但其余因素优先级均发生改变,AHP-DEMATEL 法使最终结果更合理。其中,穿戴不稳固(A_{12})、开盖不便捷(A_{31})、穿戴不省力(A_{11})和鼻夹易脱落(A_{34})是综合权重较高的 4 项。而压力表可视性(A_{24})和不具备警示音(A_{33})的综合权重极低,且图 2 也显示其重要性低,故在设计实践中不予考虑。

3 压缩氧自救器创新设计

3.1 设计分析与方案呈现

以人机工程学和上述计算结果为指导开展创新设计实践,提升自救器便捷性、舒适性,协调人、机、环境从而缩短佩戴时间,促进用户在紧急自救中心理、生理,以及行为的合理性。

3.1.1 穿戴方式

传统穿戴方式有系腰式、单肩和斜挎式。系腰式便捷、稳固但缺乏省力优势;单肩式虽妨碍活动,但方便自救器挂在颈部使用;斜挎式相对省力,但未解决稳固性问题。本文借鉴它们的优势并改善其不足,提出一种“三角背带式”压缩氧自救器方案,如图 3 所示。产品有三个方向的受力,能稳固在用户背上,且不易晃动。肩带上红色卡扣为穿戴开关,解开卡扣可切换为单肩穿戴,方便将自救器挂在颈部使用。背带由立体气囊和气垫组成,分散肩部受力。



图 3 创新设计方案
Fig.3 Innovative design scheme

3.1.2 识别度

根据人机工程学中色彩的心理暗示相关知识可知,通过赋予产品恰当的色彩能给予用户积极情绪和良好的视觉效果,从而避免操作失误。本设计方案强调圆润的造型和警示的颜色,黄色传递温度感和协调感。外壳箭头指示开盖方向,黄色区域贴上蓄光膜,

从而使得即便在可见度低的环境下也能快速识别外壳信息。

3.1.3 操作方式

能让用户以最快的速度获取氧气是自救器的关键。本文通过改善操作方式提出了对应的解决方案。设计方案将外壳中黄色箭头作为开关按钮,可单手捏住并按下按钮,同时上提盖子实现开盖,如图 4 所示。

盖子采用圆润的弧形边缘,与手握工具的习惯和身体比例相适应。呼吸设备采用贴合面部的口罩,便于工作人员间的交流,又避免了口鼻区域落入灰尘。方案的使用流程图画说明见图 5。



图 4 开盖方式
Fig.4 Uncovering mode

3.2 设计方案评估

为验证“三角背带式”压缩氧自救器穿戴方式的舒适度和效率,以及其是否符合人的操作习惯,邀请 10 位矿井工作人员依据设计因素对方案进行打分,可给予-3、-2、-1、0、1、2、3 分,分别表示非常不满意、比较不满意、一般不满意、中立、一般满意、比较满意、非常满意,通过 10 位矿井工作人员满意度平均值评估设计方案满意度。结果显示设计因素评估分数均超过 2 分。

再邀请 5 位矿井工作人员分别依次佩戴系腰式、单肩式、斜挎式,以及“三角背带式”自救器,且每款持续佩戴 30 min。依据上述打分方式,统计 5 位矿井工作人员对四类自救器稳固性和省力性的评分。对 5 位矿井工作人员在昏暗环境下使用四类自救器进行计时,计算每类自救器的平均操作时间,测试结果见表 5。与设计前相比,设计后的自救器操作用时较短,稳固性与省力性的表现均为最佳。



图 5 压缩氧自救器使用流程
Fig.5 Use process of compressed oxygen self-rescuers

表 5 压缩氧自救器设计前后操作步骤和测试情况
Tab.5 Comparison of compressed oxygen self-rescuer operation steps before and after design

时期	款式	操作步骤					操作 计时	评分	
		1	2	3	4	5		稳固性	省力性
设计前	系腰式	自救器移 前方	系带挂颈部	开锁扣	拿盖子	咬住口具 戴上鼻夹	24.6 s	5	2
	单肩式		拿下挂颈部	开锁扣	拿盖子	咬住口具 戴上鼻夹	22.2 s	2	3
	斜挎式	自救器绕头 取出	拿下挂颈部	开锁扣	拿盖子	咬住口具 戴上鼻夹	25.3 s	3	4
设计后	“三角背带 式”	按下红色 卡扣	拿下挂颈部		按下按钮同 时拿盖子	取出口罩 并戴上	21.9 s	5	5

4 结语

为保证矿井环境下压缩氧自救器的使用效率和可靠性，本文分析了压缩氧自救器人机交互问题，通过梳理文献总结出人机交互设计因素。利用 AHP-DEMATEL 方法量化设计因素权重与关系，以“三角背带式”压缩氧自救器设计实例构建了问题解决方案，结果表明了设计路径的可行性。主要结论如下。

1）文章从人机交互视角总结了压缩氧自救器的设计因素，运用 AHP-DEMATEL 法得到更为客观的设计因素综合权重与优先级排序，以此指导自救器人机交互设计和评估。

2）该设计路径以达到人、机、环境三者间的协调和提升交互体验为目的，改善了压缩氧自救器人机交互研究的匮乏现状。深入地挖掘了人机交互中穿戴方式、识别度和操作方式三个设计层次，从而提升了压缩氧自救器的舒适性和用户体验，增加了矿井事故中工作人员的自救生存率，并为同类自救器人机交互设计提供了解决思路。

参考文献：

[1] SINGH N, GUNJAN V K, CHAUDHARY G, et al. IoT enabled HELMET to Safeguard the Health of Mine Workers[J]. Computer Communications, 2022, 193: 1-9.

[2] ONIFADE M, GENC B, SAID K O, et al. Overview of Mine Rescue Approaches for Underground Coal Fires: A South African Perspective[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2022, 122(5): 213-226.

[3] PELDERS J, DIDDER J H. Assessment of the Ergonomic Design of Self-contained Self-rescuer (SCSR) Devices for Use by Women in Mining[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2020, 120(5): 307-312.

[4] GYAWU E. Miner-centered Approach to Understanding

Technology Needs for Self-escape in Underground Coal Mine Emergencies[C]// MINEXCAHNGE 2022 SME Annual Conference & EXPO, Salt Lake City:SME, 2022: 422-425.

[5] 马云龙. 煤矿用自救器及呼吸器检测检验技术现状与建议[J]. 煤矿安全, 2022, 53(8): 139-144.
MA Yun-long. Current Status and Suggestions of Detection and Inspection Technology of Self-rescue Apparatus and Breathing Apparatus in Coal Mine[J]. Coal Mine Safety, 2022, 53(8): 139-144.

[6] 何廷梅. 隔绝式压缩氧长时自救器的设计及试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 102-106.
HE Ting-mei. Design and Experimental Study of Isolated Compressed Oxygen Long Time Self-rescue Device[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 102-106.

[7] 仇式鹏. 矿用压缩氧式自救呼吸器的人性化设计研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
QIU Shi-peng. Research on Humanized Design of Compressed Oxygen Self-rescue Breathing Apparatus for Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[8] LI Min, HSIAO T C, CHEN Chi-cheng. Exploring the Factors of Cooperation between Artists and Technologists in Creating New Media Art Works: Based on AHP[J]. Sustainability, 2020, 12(19): 8049.

[9] ZHANG Jing, YANG Dong, LI Qiang, et al. Research on Sustainable Supplier Selection Based on the Rough DEMATEL and VIKOR Methods[J]. Sustainability, 2021, 13(1): 88.

[10] ZHENG Qian, SHEN Shui-long, ZHOU AN-nan, et al. Inundation Risk Assessment Based on G-DEMATEL-AHP and Its Application to Zhengzhou Flooding Disaster[J]. Sustainability Cities and Society, 2022, 86: 104138-104138.

[11] 李维翔. 供氧型安全气囊在煤矿突出事故中的应用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.

- LI Wei-xiang. Application Research of Oxygen Supply Airbag in Coal Mine Outburst Accident[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [12] 赵睿, 项光辉, 何艺华. 可接力型隔绝式自救器的设计及试验研究[J]. 江西煤炭科技, 2019, 161(1): 176-179.
- ZHAO Rui, XIANG Guang-hui, HE Yi-hua. Design and Experimental Study of Relay Isolated Self-rescue Device[J]. Jiangxi Coal Science and Technology. 2019, 161(1): 176-179.
- [13] 王建豪, 李震, 傅贵. 煤矿井下炸药自燃事故不安全动作原因研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(3): 225-227.
- WANG Jian-hao, LI Zhen, FU Gui. Study on the Cause of Unsafe Action of Explosive Spontaneous Combustion Accident in Underground Coal Mine[J]. Coal Mine Safety, 2016, 47(3): 225-227.
- [14] 周越. 煤矿用自救器的应用现状与发展趋势[J]. 中国高新科技, 2020(14): 138-139.
- ZHOU Yu. Application Status and Development Trend of Self-rescue Apparatus in Coal Mine[J]. China High and New Science and Technology, 2020(14): 138-139.
- [15] REUTER F, FICHTNER A, BRUNNER B, et al. Entwicklung und Validierung eines Kurskonzepts zur medizinisch-taktischen Rettung unter Tage[J]. Medizinische Klinik - Intensivmedizin und Notfallmedizin, 2022, 117: 531-541.
- [16] REDDY A H, KALYAN B, MURTHY C S. Mine Rescue Robot System - A Review[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 11: 457-462.
- [17] 李长录. 煤矿井下紧急避险关键装备的数值模拟分析与研制[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- LI Chang-lu. Numerical Simulation Analysis and Development of Key Equipment for Emergency avoidance in Underground Coal Mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.
- [18] ONIFADE M. Towards an Emergency Preparedness for Self-rescue from Underground Coal Mines[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 946-957.
- [19] 赵青云, 田培刚, 刘林等. 矿山应急救援自身防卫实用技术研究及应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(6): 242-244.
- ZHAO Qing-yun, TIAN Pei-gang, LIU Lin, et al. Research and Application of Self-defense Practical Technology in Mine Emergency Rescue[J]. Coal Mine Safety, 2017, 48(6): 242-244.
- [20] 毛欣. 压缩氧自救器存在的问题分析及解决方案[J]. 煤炭科技, 2020, 41(1): 39-41.
- MAO Xin. The Problem Analysis and Solution of Compressed Oxygen Autorescuer[J]. Coal Science and Technology, 2020, 41(1): 39-41.
- [21] 王朝侠, 廖小菊. 基于用户需求的车载疲劳预警产品交互设计[J]. 包装工程, 2022, 43(14): 90-99.
- WANG Zhao-xia, LIAO Xiao-ju. Interactive Design of Vehicle Fatigue Warning Products Based on User Requirements[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(14): 90-99.

责任编辑: 蓝英侨