

基于改进 LEC 法的金矿采空区 隐蔽致灾安全评价研究

宋宇^{1,2,3},裴宁波⁴,王志成⁵,谢超^{1,2,3*},曹立^{1,2,3},殷毅^{1,2,3}

(1. 山东省应急管理厅非煤矿山隐蔽致灾评估与防控重点实验室,山东 济南 250104;2. 山东省重点行业领域事故防范技术研究中心,山东济南 250104;3. 山东省煤田地质规划勘察研究院,山东济南 250104;
4. 烟台市卫生健康职业学院,山东 烟台 264000;5. 烟台市土地储备和利用中心,山东 烟台 264000)

摘要:采空区隐蔽致灾安全的科学评价对指导矿山安全生产具有重要意义。本文在排查胶东某金矿采空区隐蔽致灾因素的基础上,基于传统地质评价方法和传统 LEC 法在金矿采空区隐蔽致灾风险评价中的不足,通过引入人员素质、安全管理等 2 个风险评价因子,提出了顾及风险补偿因子的 LEC 法,建立了顾及风险补偿因子的现实风险评价指标体系及评分标准。通过矿山实例,对改进 LEC 法的具体实施和评价结果的应用进行了详细的阐述,通过对比 2 种方法在采空区隐蔽致灾评价结果,并采用地面调查、物探和钻探等手段对采空区危险性进行了验证,结果表明改进 LEC 法能够更精确有效地评估金矿采空区隐蔽致灾因素。

关键词:隐蔽致灾;风险补偿因子;改进 LEC 法;采空区;金矿;胶东

中图分类号:X936

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.10.007

0 引言

矿山开采因作业环境的隐蔽属性、开采技术与地质条件的复杂特性,加之作业活动与施工机械的多样特征,导致开采过程中致灾因素显著增多。采空区隐蔽致灾因素是诱发矿山事故的主要原因之一^[1-4]。山东胶东金矿开采历史悠久,开采方法多样,采空区隐蔽致灾因素复杂且尚未完全查清,致灾因素隐蔽,严重制约了矿山企业安全及高效运行^[5-9]。采空区引发相关灾害已成为地下矿山主要灾害之一^[10]。

近年来,采空区隐蔽致灾评价常用数值模拟法^[11-12]、力学分析法^[10,13]、综合判别法^[14]、规范评价法和赋值打分法^[2]等。这些评价方法只是针对地质因素,缺少人为等因素对采空区的影响,本文引入 LEC 法融合地质和人为因素进行综合评价。国内利用改进的 LEC 法在公路隧道施工^[15-16]、建筑施工^[17]等领域进行了应用,效果较好。但在金矿隐蔽

致灾领域,尝试较少,主要集中在矿山水害评价和危险性预判等方面。本文以胶东某金矿为例,借鉴前人研究成果,通过改进的 LEC 法对矿山生产过程中采空区隐蔽致灾因素的危险性进行安全风险评价,精准划分危险等级,通过验证有效指导矿山安全生产工作。

1 矿山开采现状及存在隐蔽致灾因素

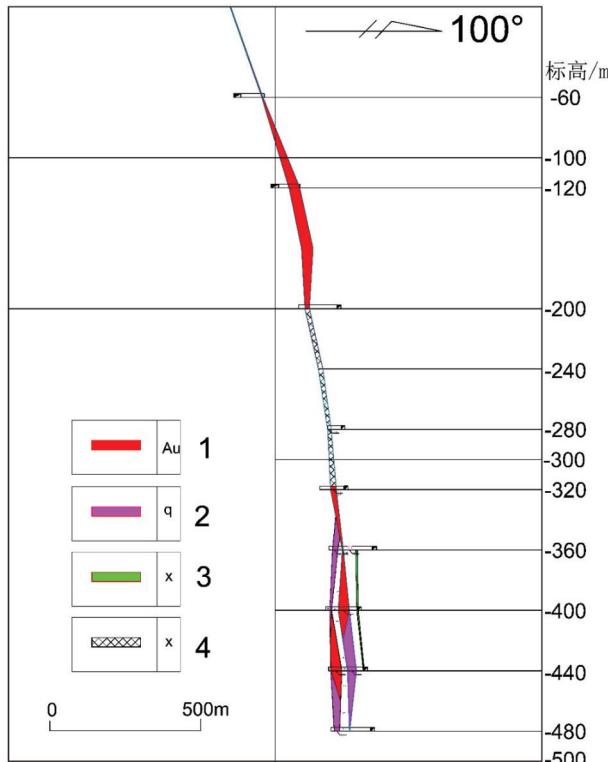
1.1 矿山开采现状

胶东某金矿验证区位于华北板块苏鲁造山带胶南-威海隆起区,胶东三大矿集区之一的牟平-乳山金成矿带中部^[18-19]。矿区围岩为燕山期二长花岗岩,该金矿采用竖井开拓方式。该矿山的主要控矿构造为 NNE 向金牛山断裂,此断裂位于矿山西部,纵贯全区。区内共圈定矿体 14 个,其中 16-1、13-2、2-1、3-2 为扩大规模矿体,16-1 矿体为主矿体(图 1),走向 5°~10°,倾向 SE,倾角 74°~87°,赋存标高 +192 m~+485 m,最大斜深 693 m。

收稿日期:2024-06-14;修订日期:2025-05-06;编辑:武昕普

作者简介:宋宇(1990—),男,山东威海人,高级工程师,主要从事水工环地质工作;E-mail:songyu2020@126.com

*通信作者:谢超(1992—),男,山东济宁人,工程师,主要从事地质灾害防治与研究工作;E-mail:958296701@qq.com



1—矿体;2—含金石英脉;3—煌斑岩;4—采空区。

图1 胶东某金矿矿体剖面图

1.2 隐蔽致灾因素

地下开采金矿主要隐蔽致灾因素为采空区、地质构造、水源与通道、地压活动、火区/高温异常区等。本文主要针对金矿最广泛存在的采空区致灾因素开展分析评估。

采空区隐蔽致灾因素普查的常用方法有：资料查阅、现场排查和综合分析研究。资料查阅，收集分析矿山地质报告、生产资料、设备物资、资质证照及规章制度等资料；现场排查，包括空中勘查、地面排查、井下调查和周边金矿调研等；综合分析，采用理论分析、数值模拟等手段确定隐蔽致灾类型及分布特征并提出防治措施。

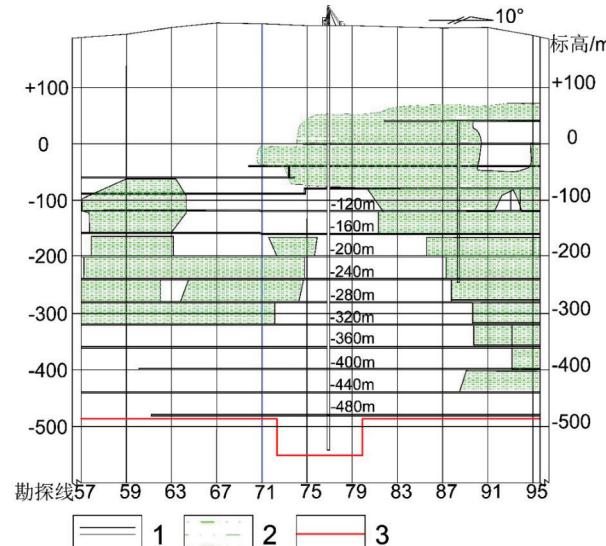
2 采空区分布及风险评估

2.1 采空区分布情况

20世纪80年代，浅地表由于民采形成了老采空区，现已治理消除隐患。

目前，矿山开采方式为地下开采，开采方法为上向水平分层采矿法，矿山此前主要对-440m水平以上的矿体进行开采，目前共形成13个开采中段，

中段高度为40m，形成单体采空区长度在25~35m，高3m，宽度一般2~3m之间，顶板暴露面积一般小于1000m²，并在相邻采场间浇筑混凝土隔墙，隔墙厚0.8~1.0m，见图2。经资料查阅分析，矿山采空区总体积为563 025 m³。



1—平巷、穿脉；2—已充填采空区；3—矿权边界。

图2 胶东某金矿采空区垂直纵投影图

矿山采用废石、尾砂对采空区进行充填，结合采空区充填台账，由充填前的采空区体积与充填后的充填料体积计算，采空区综合充填率平均为94.89%，见表1。

表1 胶东某金矿采空区充填情况表

矿体名称	分布标高/m	形态	充填率/%
2-1	100~215	不规则	94.54
3-2	75~175	近长方形	94.36
13-2	100~400	长方形	95.66
16-1	73~400	不规则	94.99
合 计			94.89

2.2 采空区危险源辨识

大范围采空区失稳是典型的矿山重大危险源，且在这其中，大范围采空区失稳存在辨识难度大、情况相对复杂的问题^[20]。

大范围采空区失稳存在地质条件和开采技术两类危险源。地质条件危险源主要包括矿体厚度、矿体倾角、埋藏深度、结构面产状对开挖工程是否有利、节理间距、节理条件、岩体质量指标值、上覆岩层弹性模量、上覆矿层单轴抗压强度、矿石的单轴抗压强度、地应力场中的主应力差、地应力方向、地下水状态等；开采技术危险源主要包括开采面积、空区体

积、矿柱面积比、矿柱宽高比、采矿方法、顶板支护情况、爆破方式、复杂采动次数、历史大范围采空区失稳情况等^[21]。

2.3 传统 LEC 评价法

本文采用 LEC 评价法对采空区稳定性进行评价,该方法由美国的 K.J. 格雷厄姆(Keneth.J.Graham)和 G.F. 金尼(Gilbert .F .K vinney)研究提出。

LEC 评价法是一种简单易行定量评价方法,它是对人员在具备潜在危险环境中作业时的危险性、危害性进行评价,一般适用于施工生产活动中存在的风险因素评价,指标体系及取值标准见表 2^[22-25]。影响危害性的主要因素有:事故或危险事件发生的可能性;人员暴露于该危险环境的频率;事故发生可能产生的后果。

表 2 传统 LEC 法指标体系及取值标准

数值 L	风险概率	数值 E	风险频率	数值 C	可能结果
10	完全会被预料到	10	连续暴露于潜在危险环境	100	大灾难,许多人死亡
6	相当可能	6	逐日在工作时间内暴露	40	灾难,数人死亡
3	不经常,但可能	3	每周一次或偶然地暴露	15	非常严重,1 人死亡
1	完全意外,极少可能	2	每月暴露一次	7	严重,严重伤害
0.5	可以设想,但高度不可能	1	每年几次出现在潜在危险环境	3	重大,致残
0.2	极少可能	0.5	非常罕见地暴露	1	引人注目,需要救护

LEC 法计算公式见式(1):

$$D = L \times E \times C \quad (1)$$

式中:D 为作业条件的危害性;L 为事故或危险条件发生的可能性;E 为人员暴露于危险环境的频率程度;C 为发生事故或危险条件的后果。

传统的 LEC 评价法原理简明,方法成熟,在矿山等施工项目安全评价中得到广泛应用^[22-24]。但由于金矿地下开采施工过程复杂,风险要素较多,传统 LEC 评价法在金矿地下开采矿山实际应用中存在不足:未考虑作业人员素质在安全评价中的作用,作业人员的技术水平、工作经验、安全意识、工作状态等都会对安全风险造成影响;未考虑作业管理单位的安全管理措施、对风险因素的控制能力和处置能力,安全管理制度健全、经验丰富能够有效遏制或抵消安全风险的危害。

2.4 顾及风险补偿因子的 LEC 法

2.4.1 风险评价体系构建

胶东某金矿采空区风险影响评价是在传统 LEC 评价法的基础上,考虑生产矿山现场的实际情况,参考煤矿瓦斯灾害重大危险源评价指标体系^[24],建立胶东某金矿采空区风险指标评价体系和评价模型(图 3)。该风险评价体系包含固有风险指标和风险补偿指标两部分,固有风险指标主要指的是传统 LEC 评价指标。风险补偿指标包含作业人员因素(M_1)、单位管理因素(M_2)。

生产矿山采空区现实风险通过固有风险和风险

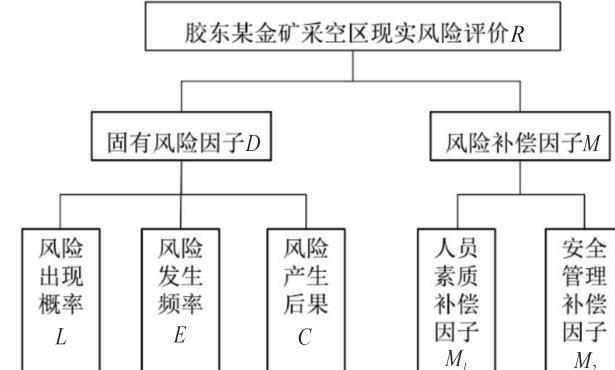


图 3 现实风险评价指标体系

补偿指标综合得出,得到涉及风险补偿因子的胶东某金矿采空区安全评价计算公式,见式(2)~(5):

$$R = D \times M = L \times E \times C \times M \quad (2)$$

$$M = M_1 + M_2 \quad (3)$$

$$M_1 = M_{11}W_1 + M_{12}W_2 + M_{13}W_3 + M_{14}W_4 + M_{15}W_5 \quad (4)$$

$$M_2 = M_{21}W_6 + M_{22}W_7 + M_{23}W_8 + M_{24}W_9 + M_{25}W_{10} \quad (5)$$

式中:R 为顾及风险补偿因子的作业条件的危害性; W_i ($i=1,2,\dots,10$) 为风险补偿因子指标的权重。

2.4.2 风险补偿因子

风险补偿因子包括人员素质补偿因子和安全管理补偿因子。人员素质直接关系到安全意识的强弱和个人安全能力高低,人员素质补偿因子的确定由人员的可靠性表示;安全管理能力对于胶东某金矿安全影响较大,安全管理好,事故风险发生的概率就越小。风险补偿因子指标体系及评分标准见表 3。

表3 风险补偿因子指标体系及评分标准

类型	子类型	评价指标	评分标准				
			3分	5分	7分	8分	10分
风险 补偿 因子 M	人员 素质 补偿 因子 M ₁	从业人员资质 M ₁₁	正高级职称及以上	高级职称	中级职称	初级职称	无职称
		安全素质 M ₁₂ (文化程度、安全证书、培训证书)	M ₁₂ ≥90 分	90 分>M ₁₂ ≥80 分	80 分>M ₁₂ ≥70 分	70 分>M ₁₂ ≥60 分	M ₁₂ <60 分
		从业人员年龄 M ₁₃	M ₁₃ ≥20 a	20 a>M ₁₃ ≥10 a	10 a>M ₁₃ ≥5 a	5 a>M ₁₃ ≥3 a	M ₁₃ <3 a
		无事故工作时间 M ₁₄	M ₁₄ ≥5 a	5 a>M ₁₄ ≥4 a	4 a>M ₁₄ ≥3 a	3 a>M ₁₄ ≥2 a	M ₁₄ <2 a
		身体状况 M ₁₅	很健康	健康	较健康	一般健康	其他
	安全管理 补偿 因子 M ₂	安全机构、专职安全员设置情况 M ₂₁	设置很完整 职责很明确	设置较完整 职责较明确	设置完整 职责明确	设置不完整 职责不明确	无
		安全管理制度、培训教育落实情况 M ₂₂	很健全 落实很好	较健全 落实好	健全 有落实	不健全 欠落实	无
		安全防护设备、资金落实情况 M ₂₃	很健全 落实很好	较健全 落实好	健全 有落实	不健全 欠落实	无
		安全检查落实及整改情况 M ₂₄	检查整改很好	检查整改较好	检查整改一般	检查整改较差	无
		应急救援机制及演练等落实情况 M ₂₅	针对性、可操作性很全面	针对性、操作性全面	针对性、可操作性较全面	针对性、可操作性不全面	无

2.4.3 风险评价标准

胶东某金矿采空区现实风险评价是在传统 LEC 评价法的基础上,增加人员因素和管理因素两种风险补偿因子而进行综合评价。结合矿山实际情况及专家打分意见确定各影响因子分值及权重情况,按照传统 LEC 法和改进(顾及风险补偿因子) LEC 法评价公式分别进行计算风险值,风险值计算评价标准及风险等级见表 4。

表4 风险评价标准值及危险等级

传统 LEC 法 (D 值)	改进 LEC 法 (R 值)	危险程度	危险等级
>320	>5760	极其危险,不能继续作业	V
160~320	2400~5760	高度危险,需要立即整改	IV
70~160	840~2400	显著危险,需要整改	III
20~70	160~840	可能危险,需要注意	II
<20	<160	稍有危险,或许可以接受	I

2.5 现实风险评价

根据风险补偿因子指标体系及评分标准,结合矿山实际及专家赋分,矿山风险补偿因子赋分结果见表 5。

分别运用传统 LEC 法和改进的 LEC 法对地下采空区安全进行风险评价,结果见表 6。

由表 6 可知:按照传统 LEC 法进行危险因素风险评价,该矿山采空区风险等级为 II 级;按照改进 LEC 法进行危险因素风险评价,该矿山采空区风险等级为 II 级。但改进 LEC 法 R 值更接近风险等级

I 级,风险值更低,采空区发生危害的概率更低,改进 LEC 评价结果更符合实际。

表5 风险补偿因子赋分结果

评价指标	矿山情况	评价分数	权重(W)	权重赋分
M ₁₁	高级职称	5	0.2	1
M ₁₂	85 分	5	0.2	1
M ₁₃	22a	3	0.2	0.6
M ₁₄	22a	3	0.2	0.6
M ₁₅	很健康	3	0.2	0.6
M ₁				3.8
M ₂₁	设置很完整职责很明确	3	0.2	0.6
M ₂₂	很健全落实很好	3	0.2	0.6
M ₂₃	很健全落实很好	3	0.2	0.6
M ₂₄	检查整改很好	3	0.2	0.6
M ₂₅	针对性、可操作性很全面	3	0.2	0.6
M ₂				3.0
合计				6.8

表6 风险评价结果

单元	L	E	C	D	风险等级	M	R	风险等级
采空区	0.2	6	40	48	II	6.8	326.4	II

分析可知,引入人员因素和管理因素 2 个风险影响因子,共有 10 个影响因素的风险概率呈现下降趋势。结果表明,顾及风险补偿因子的综合作用,可以降低作业条件的危险性;在胶东某金矿采空区作业,选择高素质、高水平的施工队伍,重视施工人员的安全教育,加强现场安全管理、采用科学、合理的施工方法等一系列的风险控制措施,可以控制重大风险的发生。

3 采空区验证及成效

采空区调查手段主要有实地调查、物探、钻探等手段^[25~28],本文采用现场调查、可控源音频大地电磁法、钻探取心3种手段对胶东某金矿采空区治理情况进行验证。通过对矿山地表的调查,未发现地面塌陷、地裂缝等不良地质现象。在地表共设置了9个监测点对地表的沉降进行了持续1年的监测,在地表移动带范围以内最大下沉量为4 mm,最大水平变形为6 mm,属于稳定变形范围。

采用可控源音频大地电磁法对该矿山采空区充填验证,通过对电阻率断面图相对低阻的区域,结合地表踏勘、矿区垂直纵投影图及井上井下工程对照图,推测该低阻异常为采空区充填物引起的。低阻异常区内视电阻率值变化均匀,色标颜色由深色逐渐变浅,无突变,说明剖面对应位置处采空区充填物与上盘围岩空隙很小或是基本上没有空隙(图4)。

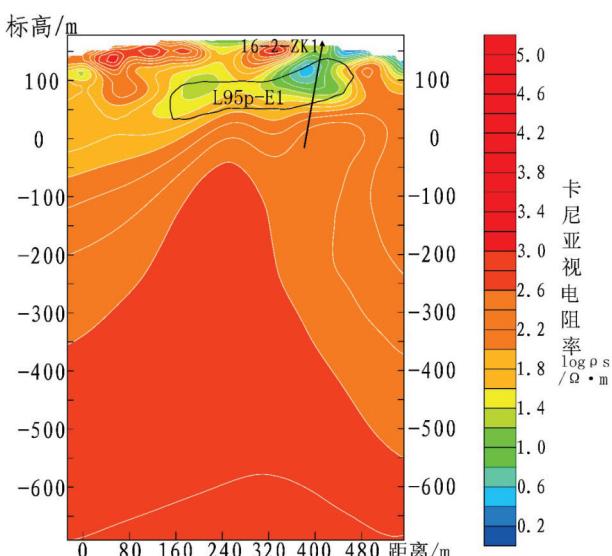


图 4 反演电阻率等值线断面图(CSAMT 法)

钻探工程对物探低阻异常进行验证,通过钻探钻进过程中掉钻深度判定采空区充填质量情况。共施工了3个验证钻孔,钻孔编号为2-1-ZK1、3-2-ZK1、16-2-ZK1,钻孔参数见表7。

采空区充填调查钻探验证工作施工3个钻孔,从钻孔施工揭露情况看,2-1-ZK1孔深在224.8 m发生钻孔漏水及掉钻现象,掉钻深度0.27 m;3-2-ZK1孔深在157.0 m发生钻孔漏水及掉钻现象,掉钻深度0.35 m;16-2-ZK1孔深在179.0 m发生钻孔漏水及掉钻现象,掉钻深度0.2 m。

表 7 验证钻孔参数表

钻孔编号 C	倾角/(°)	孔深/m	验证情况
2-1-ZK1	85	230	已充填
3-2-ZK1	85	155	已充填
16-2-ZK1	80	185	已充填

结合矿山资料,掉钻深度为采空区的空顶高度,采空区整体充填率较高,安全性较高。验证结果同采空区风险评价结果吻合。

4 结论

(1)针对传统 LEC 法在胶东某金矿采空区风险评估中的不足,引入人员素质和安全管理 2 个风险因子,提出了改进 LEC 法,并建立了胶东某金矿采空区现实风险评价指标体系和评价模型。

(2)基于 LEC 评价法对考虑到作业人员的采空区进行了直观有效风险分析,并采用地面调查、物探、钻探对采空区充填情况进行了验证,评价结果与验证结果吻合。

(3)将本文提出的改进 LEC 法应用到胶东某金矿采空区安全风险评价中,评价结果表明,引入风险补偿因子后,危险源的风险水平呈现降低趋势,评价结果更符合实际情况,改进 LEC 法是胶东某金矿采空区安全评估的有效方法。

参考文献:

- 吴敏杰,王相业,张金贵,等.神北矿区庙梁煤矿隐蔽致灾因素探查与分析[J].中国煤炭,2023,49(1):35~43.
- 程凤,焦玉国.泰安市历史形成责任灭失非煤矿山采空区现状及稳定性评价[J].山东国土资源,2020,36(4):61~67.
- 吕宝平,刘海平,王经.胶东地区废弃金矿采空区改造含水层方法探讨:以文登市大时家废弃银金矿为例[J].山东国土资源,2019,35(1):84~88.
- 聂子淇,周侃,潘启勇.煤矿常见隐蔽致灾因素及其探查技术分析[J].矿产勘查,2020,11(11):2573~2579.
- 杨志杰,王能伟.胶东半岛金矿采空区调查评价方法及应用[J].世界有色金属,2019(17):53~55.
- 张扬,王璐,刘智慧,等.多物探方法在胶东某金矿采空区勘查中的应用研究[J].地质与勘探,2019,55(3):809~817.
- 柳玉明,柳楠,勇国栋.胶东金青顶金矿深部采矿地压形成机理及预防措施[J].矿产勘查,2013,4(3):323~328.
- 杨素俊,赵兴东,张洪波,等.沂南金矿地压规律监测技术研究[J].采矿技术,2011,11(1):23~25.
- 王田龙,陈从新,夏开宗,等.陡倾结构金属矿山采空区围岩破坏机制研究[J].岩土力学,2023,44(5):1487~1500.
- 王中秋.采空区矿柱-顶板体系变形特征及其稳定性分析[D].

秦皇岛:燕山大学,2012.

- [11] 刘艳彪,刘子涵,王瑞强,等.基于 DEMATEL-ISM 的采空区稳定性模糊评价[J].黄金科学技术,2025,33(1):149-158.
- [12] 王庆兵,杨全城.济南市燕翅山铁矿采空区稳定性分析评价[J].山东国土资源,2013,29(9):74-77.
- [13] 康彦.采空区地表变形规律及地基稳定性评价[J].煤矿开采,2018,23(2):65-67.
- [14] 孟婷婷,马鹏.平邑县安泰石膏矿采空区稳定性综合评价方法[J].山东国土资源,2018,34(7):73-77.
- [15] 刘辉,孙世梅.基于改进 LEC 法的公路隧道施工安全评价研究[J].现代隧道技术,2015,52(1):26-32.
- [16] 光辉,曹立梅,邹强.顾及风险影响因子的 LEC 法在公路隧道施工安全评价中应用研究[J].公路工程,2016,41(5):151-155.
- [17] 李艺彤,郭永成,司马艳,等.基于改进 LEC 评价法的高层建筑施工危险源评估与管控[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(4):55-59.
- [18] SONG M C, LI S Z, SANTOSH M, et al. Types, Characteristics and Metallogenesis of Gold Deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 612-625.
- [19] LI X H, FAN H R, YANG K F, et al. Pyrite Textures and Compositions from the Zhuangzi Au Deposit, Southeastern North China Craton : Implication for Ore - Forming Processes [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2018, 173(9):73.
- [20] 郭鹏文,陈兴峰.瞬变电磁法及大功率激电测深在矿山采空区调查中的应用研究[J].世界有色金属,2020(5):26-27.
- [21] 罗一忠.大面积采空区失稳的重大危险源辨识[D].长沙:中南大学,2005.
- [22] 张健.LEC 评价法在非煤矿山安全评价中的应用[J].安全,2017,38(3):29-30.
- [23] 王卸云.浅谈 LEC 法在非煤矿山安全评价中的应用[J].金属矿山,2008(1):110-113.
- [24] 孙林辉,尚康,袁晓芳.基于 LEC 法的煤矿掘进作业岗位安全风险评价研究[J].煤矿安全,2019,50(12):248-252.
- [25] 周逸文,张涛,段隆臣,等.我国矿山采空区综合治理研究综述[J].安全与环境工程,2022,29(4):220-230.
- [26] 姚改委.矿山采空区调查中的地质工作流程和方法[J].地质与资源,2014,23(3):301-304.
- [27] 姚改委,李柳昊,王亚明.矿山采空区调查的地质工作程序及手段和方法[J].采矿技术,2013,13(2):57-58,69.
- [28] 林惠立.房采采空区危险源辨识及治理技术[J].矿业安全与环保,2016,43(1):100-103.

Study on Hidden Disaster Safety Evaluation of Gold Mined-out Areas Based on Improved LEC Method

SONG Yu^{1,2,3}, PEI Ningbo⁴, WANG Zhicheng⁵, XIE Chao^{1,2,3}, CAO Li^{1,2,3}, YIN Yi^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Hidden Disaster Assessment and Prevention in Non Coal Mines of Shandong Provincial Department of Emergency Management, Shandong Jinan 250104, China; 2. Shandong Provincial Key Industry Accident Prevention Technology Research Center, Shandong Jinan 250104, China; 3. Shandong Coalfield Geological Planning and Surveying Institute, Shandong Jinan 250104, China; 4. Yantai Health Vocational College, Shandong Yantai 264000, China; 5. Yantai Land Reserve and Utilization Center, Shandong Yantai 264000, China)

Abstract: The scientific evaluation of hidden disaster safety in mined-out areas is of great significance in guiding mine safety production. Based on the investigation of hidden disaster causing factors in a gold mine goaf in Jiaodong, the LEC method that takes into account risk compensation factors by introducing two risk assessment factors, namely personnel quality and safety management has been put forward. Based on the shortcomings of traditional geological evaluation methods and traditional LEC methods in the risk assessment of hidden disaster causing factors in gold mined-out area. A realistic risk assessment index system and scoring standards that take into account risk compensation factors have been established. A detailed explanation is given on the specific implementation and evaluation results of the improved LEC method through a mining example. By comparing the evaluation results of two methods for hidden disasters in goaf, by using ground investigation, geophysical exploration and drilling methods, the hazards of mined-out area have been verified. It is showed that the improved LEC method can more accurately and effectively evaluate the hidden disaster factors in gold mined-out areas.

Key words: Hidden disaster; risk compensation factor; improved LEC Method; mined-out areas; gold deposit; Jiaodong area