

中文引用格式:齐庆杰,刘英杰,孙祚,等.地震诱发煤矿次生灾害类型与评估方法[J].中国安全科学学报,2024,34(4):167-174.

英文引用格式:QI Qingjie, LIU Yingjie, SUN Zuo, et al. Types and evaluation methods of secondary disasters in coal mines induced by earthquake[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(4):167-174.

地震诱发煤矿次生灾害类型与评估方法*

齐庆杰¹教授,刘英杰¹研究员,孙祚^{**1,2}助理研究员,佟瑞鹏²教授

(1 煤炭科学研究总院有限公司 应急科学研究院,北京 100013;

2 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院,北京 100083)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1362

基金项目:国家自然科学基金资助(52174188);中国煤炭科工集团科技创新创业资金专项项目(2022-QN001)。

【摘要】为解决煤矿承灾体受地震灾害影响易发生次生灾害风险的问题,首先,调查和分析典型案例,归纳总结煤矿次生灾害类型与破坏特征,并基于人、机、环、管全要素,构建地震诱发煤矿次生灾害风险评估三级指标体系;然后,提出风险等级和隐患重要度评估方法;最后,以河北省某市煤矿为例开展实际应用。结果表明:地震诱发煤矿次生灾害类型按照承灾体分为6类;地震诱发煤矿次生灾害发生可能性评估主要考虑煤矿所在区域地震灾害等级、煤矿次生灾害危险性、煤层瓦斯赋存致灾性、矿井水文地质条件致灾性、承灾体设防水平、防灾减灾能力6方面,后果严重性评估主要考虑灾害可能造成的伤亡人数和经济损失2方面;该市煤矿抗震设防薄弱环节为通风系统、井筒支护系统、排水系统,应有针对性地提高抗震设防等级。

【关键词】地震;煤矿次生灾害;灾害类型;风险评估;隐患重要度

Types and evaluation methods of secondary disasters in coal mines induced by earthquake

QI Qingjie¹, LIU Yingjie¹, SUN Zuo^{1,2}, TONG Ruipeng²

(1 Emergency Science Research Institute, CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing

100013, China; 2 School of Emergency Management and Safety Engineering, China

University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of secondary disaster risk in coal mines affected by earthquake disasters, firstly, typical cases have been investigated and analyzed, and the types and damage characteristics of secondary disasters in coal mines have been summarized. Based on the comprehensive elements of "man-machine-environment-management", a three-level indicator system for earthquake-induced secondary disaster risk assessment in coal mines has been constructed. Then, the evaluation method of risk level and importance of hidden danger has been proposed. Finally, a coal mine in a city in Hebei Province was used as an example for practical application. The results show that the types of secondary disasters induced by earthquakes in coal mines can be divided into 6 categories according to the disaster-bearing body. The assessment of the possibility of earthquake-induced coal mine secondary disasters mainly considers six aspects: the earthquake disaster level in the area where the coal mine is located, the risk of coal mine secondary disasters, the hazard of coal seam gas occurrence, the hazard of

* 文章编号:1003-3033(2024)04-0167-08; 收稿日期:2023-12-21; 修稿日期:2024-01-20

** 通信作者:孙祚(1990—),男,山东枣庄人,博士研究生,助理研究员,主要研究方向为灾害风险评估与预警、应急管理等。E-mail: sun_zuo6@163.com。

hydrogeological conditions in the mine, the level of fortification of the disaster-bearing body, and the ability to prevent and mitigate disasters. The assessment of the severity of the consequences mainly considers two aspects: the number of casualties and economic losses that may be caused by disasters. The weak links in seismic fortification of coal mines in this city are ventilation system, shaft support system, and drainage system, which should be targeted to improve seismic fortification level.

Keywords: earthquake disaster; earthquake-induced secondary disasters in coal mine; disaster types; risk assessment; importance of hidden dangers

0 引言

地震因其具有突发性和巨大破坏力等特点,被列为自然灾害之首^[1]。煤矿作为承灾体,受地震灾害影响极易发生次生灾害^[2-3]。因此,总结归纳地震诱发煤矿次生灾害的类型与特征,提出评估风险和隐患重要度的方法,查明煤矿地震设防薄弱环节,对提高煤矿地震灾害预防水平具有重要意义。

针对自然灾害诱发的次生灾害,国内外学者开展了相关研究。谢自莉等^[4]分析了城市地震次生灾害发生机制,建立城市地震次生灾害演化过程的系统动力学模型,分析不同防震抗灾能力下,城市地震次生灾害可能造成的损失情况,为城市防震救灾工作提供参考。魏利军等^[5]利用事故链模型分析了化工园区地震次生灾害的演化过程,并基于贝叶斯网络探究应急救援及遏制化工事故发生的关键节点对地震次生灾害的影响程度,提出针对性的应对措施。张东妮等^[6]以我国某沿海化工园区企业二甲苯储罐为例,按照灾害链的方法模拟储罐受地震影响下的泄漏与扩散过程,定量评估季节和发震时刻对二甲苯扩散风险的影响。刘大山等^[7]分析地震灾害下化工园区的致灾特征,理清化工园区的主要承灾体类型,并基于层次分析法提出了综合考虑地震灾害与工业事故耦合灾害的风险评估方法。刘振亮等^[8]分析地震对公路桥梁网络韧性的影响,提出韧性评估方法并对其进行验证,结果表明桥梁网络性能受震动和次生突发灾害的相互作用。王伟等^[9]基于因素空间理论,探讨了承灾体、承灾体指标、隐患、事故间的关系,建立自然灾害次生事故隐患空间网络,提出自然灾害次生事故隐患分析方法。SUN Zuo 等^[10-11]基于灾害风险科学理论,针对洪水灾害诱发煤矿水害事故,提出基于投影寻踪聚类分析、三角模糊评价的风险评估方法,并应用于贵州遵义煤矿。齐庆杰等^[12]提出了地震诱发煤矿次生灾害隐患排查方法,以煤矿生命线系统为主线,构建地震诱发煤矿次生灾害隐患排查体系。上述研究多聚

焦地震对危险化学品和城市生命线的影 响,而针对煤矿仅开展了次生灾害隐患方面的研究,未系统提出次生灾害类型和评估方法,导致评估方法缺失。

鉴于此,笔者拟针对地震诱发煤矿次生灾害的问题,通过典型案例调查和分析,归纳总结出煤矿次生灾害的类型与特征,构建风险评估三级指标体系,提出风险等级和隐患重要度评估方法,定量评估地震诱发煤矿次生灾害风险等级,以期查明地震设防薄弱环节,提升煤矿地震灾害预防水平提供科学依据。

1 诱发煤矿次生灾害特征与类型

通过查阅唐山大地震震后煤矿各环节震害调查的文献资料^[13-14],结合全国自然灾害综合风险普查煤矿承灾体调查等工作,分析并总结归纳矿井立井井筒、井底车场、硐室、大巷、采区巷道、回采工作面等承灾体的次生灾害类型与特征。

1.1 承灾体破坏特征

1) 立井井筒。①井壁斜向或环形裂缝甚至断裂错位:井筒破坏部位距地表较浅,多在井筒下 50 m 以内。断裂多发生在第 4 系冲积层内的井壁施工接茬处和开有孔洞的薄弱部位。由于井壁断裂,使井筒中心线错位,导致井筒断裂处罐道和罐道梁弯曲。②井壁竖向裂缝:裂缝往往处于井颈以下,一般是上部多,下部少,多处于冲积层,位于坚硬岩层的较少。裂缝较多处往往呈现井壁剥落,井筒装备受损、弯曲,甚至部分装备坠落井底。③井壁 X 形交叉裂缝。④井壁喷水冒砂。

2) 井底车场。井底车场是井下运输枢纽,交叉点比较集中,巷道断面较大,震害较轻,未发现严重错动。其破坏特征主要为:井筒与井底车场连接部分、交叉点、变断面以及边坡处出现变形、裂缝、剥落、膨底,个别地方局部有脱顶现象。

3) 硐室。硐室受震害影响较轻。其破坏特征主要为:硐室拱顶弯曲下沉,裂缝、淋水增加、表层剥落、局部脱顶、裂缝、内鼓、剥落、局部倒塌以及底鼓等。

4) 大巷。大巷震害较轻,多数大巷选在坚硬岩

层中,受压影响小。据统计,大部分大巷完好,无显著震害,但局部地段出现拱顶裂缝、下沉、剥落、挤裂、脱顶,墙体内鼓、开裂和底鼓现象。

5) 采区巷道。震害主要发生在工作面回风巷、运输巷和集中巷的联络巷道等处。采区巷道震害特征表现为巷道挤压变形、局部剥落、脱顶与底鼓等。

6) 回采工作面。回采工作面震后被破坏的程度较轻,未发现大面积冒顶现象。但局部呈现木支柱断裂、金属支柱下沉,液压支架受压严重、前斜后仰和漏液变形等特征。此外,部分工作面受次生水害影响,导致设备被淹受损。

7) 电气设备与系统。①电力输电线路受震害影响较轻,主要表现为:杆塔拉线松弛、杆塔基础下沉、杆身倾斜。②主电力变压器受震害影响较重,主要表现为:内部发生故障,变压器被烧毁;高压一次套管错位、漏油;低压侧二次套管拉断、错位、漏油。③高压电气设备受震害影响严重,主要表现为:瓷件断裂,其中瓷件中高大、细长的设备损坏比较严重;多油设备的瓷套管错位、漏油;操作箱、配电箱等设备会因墙壁倒塌被砸坏。

8) 排水系统。震后矿井涌水急剧增加,增长2~5倍,具体表现为:各含水层的涌水量普遍增加,采空区积水流入井巷,井下水位迅速上涨。同时,地震造成电源停电,排水管路变形、折断,导致排水系

统瘫痪,巷道被淹。此外,矿井水害可导致瓦斯异常积聚和电气事故等链生灾害。

1.2 地震诱发煤矿次生灾害类型与特征

通过地震诱发煤矿次生灾害典型案例分析,针对6大煤矿生产系统,归纳了6类煤矿承灾体,并列出了承灾体的具体构筑物及设备清单,见表1。针对6类煤矿承灾体,归纳出6类煤矿次生灾害类型,如图1所示。

表1 煤矿地震灾害承灾体分类

Tab.1 Classification of coal mine earthquake disaster-bearing bodies

煤矿生产系统	煤矿承灾体	承灾体主要构筑物及设备
井巷系统	井筒、巷道	井筒、硐室、大巷、采区巷道等
采掘系统	采掘工作面、采掘设备及附属系统	采掘工作面、采煤机、掘进机、支护设备等
通风系统	通风设备、通风构筑物、瓦斯抽采系统	通风机、通风构筑物、瓦斯抽采管路等
机电系统	供配电系统、通信系统	供配电线路、井下变电站所、通信设备等
给排水系统	供水系统、排水系统	中央水泵房、水仓、排水管路等
运输提升系统	运输设备、提升设备	井底车场、罐笼、输送机、矿车、提升机等

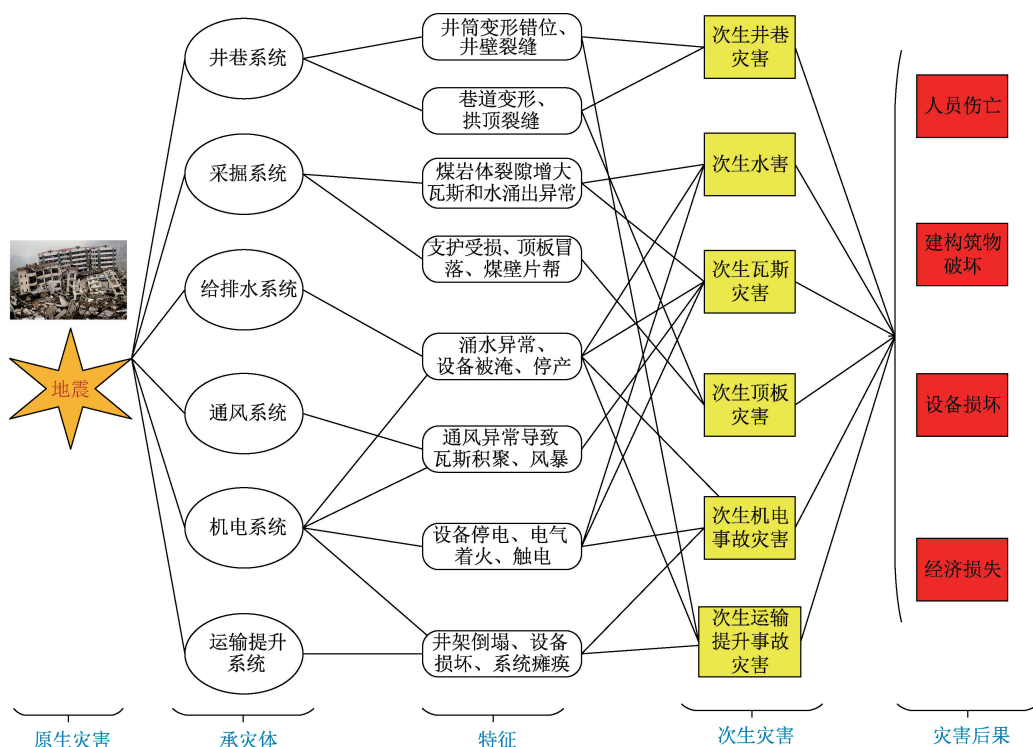


图1 地震诱发煤矿次生灾害类型

Fig.1 Types of secondary disasters induced by earthquake in coal mine

2 煤矿次生灾害风险评估指标体系

为评估地震诱发煤矿次生灾害风险,首先需要调查煤矿承灾体,获取致灾因子、致灾环境、设防水

平、防灾减灾能力等基本信息。参考相关标准规范和法律法规中涉及煤矿地震设防的关键影响要素,提出煤矿地震设防技术要求,构建地震诱发煤矿次生灾害调查表^[12],见表2。

表2 地震诱发煤矿次生灾害调查

Tab.2 Questionnaire of secondary disasters in coal mines induced by earthquakes

大类	小类	调查内容
致灾因子与煤矿致灾环境	所在区域地震灾害等级	矿井所在区域地震基本烈度、地震动峰值加速度等
	煤矿开拓与采掘布局	矿井地理位置、矿区范围、开拓方式、采掘布置等
	地质构造与水文情况	地质构造、水文地质类型等
	煤矿灾害复杂程度	矿井瓦斯等级、矿井绝对瓦斯涌出量、煤层自然发火等级、冲击地压等
	煤矿次生灾害危险性	地震诱发煤矿次生灾害发生次数
承灾体设防水平	井筒支护抗震设防	地震烈度6、7度时,立井井筒地表以下30m以内、斜井或平硐埋深20m以内是否采用钢筋混凝土结构支护;地震烈度8度及以上时,立井井筒地表以下50m以内、斜井或平硐埋深30m内是否采用钢筋混凝土结构支护
	安全出口抗震设防	矿井安全出口的梯子间是否采用折返式布置;作为安全出口的立井井筒是否每隔200m设置一个休息点
	提升系统抗震设防	是否设有应急提升交通罐设备及应急电源;提升机房的桥式起重机是否设有防坠落措施
	通风和抽采系统抗震设防	通风机的基础与电动机基础是否为整体式;通风机房起重机是否设有防坠落措施;瓦斯储罐的进出口管道是否设置切断阀门
	排水系统抗震设防	井下主排水泵房是否预留水泵的位置;是否配置有独立供电系统和排水能力不小于矿井最大涌水量的潜水泵
	供配电系统抗震设防	煤矿电源线路及向重要电力设施供电的架空线路(电缆)路径、变电站是否避开地裂、地层错位等地段;2回供电线路是否沿不同路径架设;不同电源线路之间的距离是否大于倒杆距离;煤矿35kV及以上电压等级的配电装置是否采用室外式配电装置
防灾减灾能力	监测预警与应急演练	与地方地震监测预警系统联网情况、应急预案编制及演练情况
	人员结构与经济投入	最大在岗人数、人员密度、人员地震防范意识、煤矿产能、固定资产投入、安全生产费用占比
	矿山救援与医疗队伍	应急救援队伍、医疗救护队伍、应急物资储备等

根据灾害风险科学理论^[15],围绕地震灾害环境系统、煤矿生产系统和人员管理系统,基于矿井人、机、环、管全要素,构建地震诱发煤矿次生灾害评估三级指标体系,如图2所示。

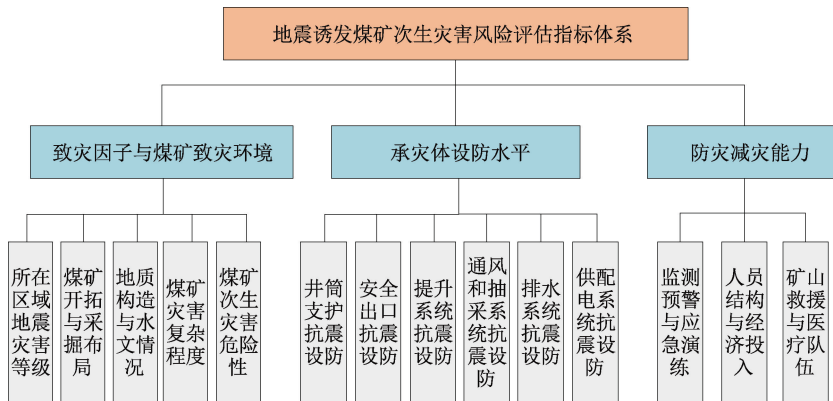


图2 地震诱发煤矿次生灾害评估指标体系

Fig.2 Evaluation index system of earthquake-induced secondary disasters in coal mines

3 煤矿次生灾害风险评估方法

风险矩阵法是风险评估的常用方法,按照风险发生的可能性及后果的严重程度,将风险绘制在矩阵图中,可以直观、便捷地评估风险大小。文中采用风险矩阵法评估震诱发煤矿次生灾害的可能性及后果的严重性,建立地震诱发煤矿次生灾害风险等级矩阵,按其分值评估出对应的风险等级。

3.1 次生灾害发生可能性评估

地震诱发煤矿次生灾害的可能性评估,主要考虑煤矿所在区域地震灾害等级 L_1 、煤矿次生灾害危险性 L_2 、煤层瓦斯赋存致灾性 L_3 、矿井水文地质条

件致灾性 L_4 、地震灾害承灾体设防水平 L_5 、防灾减灾能力 L_6 等6方面。其中,每种因素对地震诱发煤矿次生灾害的可能性划分为基本不可能、较不可能、较可能、很可能4个等级,结合专家意见,对各指标赋值,赋值区间按照灾害发生的可能性由小到大赋值为1~4。因此,发生可能性等级值 L 按下式计算:

$$L = \sum (k_i \cdot L_i) (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

式中: L_i 为各因素发生可能性的等级值,数值越大,发生可能性越大; k_i 为各因素所占的权重值。由历史灾害分析法、层析分析法、专家赋值法等综合确定,即有 $k_1+k_2+\dots+k_6=1$ 。发生可能性等级划分及赋值见表3。

表3 发生可能性等级划分及赋值

Tab.3 Occurrence possibility grade division and assignment

指标	权重值	释义	分级	可能性	赋值 N
L_1	k_1	从煤矿所在区域地震基本烈度得出等级值	9度及以上	很可能	4
			8度	较可能	3
			7度	较不可能	2
			6度	基本不可能	1
L_2	k_2	从地震诱发煤矿次生灾害历史发生次数得出等级值	建矿以来发生过3次及以上	很可能	4
			建矿以来发生过2次	较可能	3
			建矿以来发生过1次	较不可能	2
			建矿以来从未发生	基本不可能	1
L_3	k_3	从矿井煤层瓦斯赋存条件得出等级值	煤与瓦斯突出矿井	很可能	4
			高瓦斯矿井,绝对瓦斯涌出量 $>40 \text{ m}^3/\text{min}$	较可能	3
			高瓦斯矿井,绝对瓦斯涌出量 $\leq 40 \text{ m}^3/\text{min}$	较不可能	2
			低瓦斯矿井	基本不可能	1
L_4	k_4	从矿井水文地质类型得出等级值	水文地质类型为极复杂	很可能	4
			水文地质类型为复杂	较可能	3
			水文地质类型为中等	较不可能	2
			水文地质类型为简单	基本不可能	1
L_5	k_5	从矿井地震灾害承灾体设防隐患情况得出等级值	5项及以上隐患	很可能	4
			3~4项隐患	较可能	3
			1~2项隐患	较不可能	2
			无隐患	基本不可能	1
L_6	k_6	从矿井地震灾害应急救援体系和救护能力得出等级值	未编制地震灾害应急预案,无矿山救护队	很可能	4
			未编制地震灾害应急预案,外聘矿山救护队	较可能	3
			编制地震灾害应急预案,兼职矿山救护队	较不可能	2
			编制地震灾害应急预案,专职矿山救护队	基本不可能	1

3.2 次生灾害后果严重性评估

地震诱发煤矿次生灾害的后果严重性评估,主要考虑灾害可能造成的伤亡人数 D 和可能造成的经济损失 E ,后果严重性从低到高分小、一般、大、很大4个等级,并分别赋值1、2、3和4。因此,后果严重性等级值 S 按下式计算:

$$S = w_D \cdot D + w_E \cdot E \quad (2)$$

式中: S 为后果严重性等级值,数值越大,后果越严重,包含可能造成的人员伤亡 D 、可能造成的经济损失 E ; w_D 和 w_E 为各因素所占的权重值,由历史灾害分析、层次分析法、专家赋值法等综合确定,即有 $w_D+w_E=1$ 。后果严重性等级划分及赋值见表4。

表 4 后果严重性等级划分及赋值

Tab. 4 Consequence severity grade division and assignment table

指标	权重值	释义	分级	严重性	赋值
D	w_D	地震诱发煤矿次生灾害可能造成的伤亡人数	$D \geq 1000$	很大	4
			$600 \leq D < 1000$	大	3
			$200 \leq D < 600$	一般	2
			$0 \leq D < 200$	小	1
E/亿元	w_E	地震诱发煤矿次生灾害可能造成的经济损失	$E \geq 15$	很大	4
			$8 \leq E < 15$	大	3
			$3 \leq E < 8$	一般	2
			$0 \leq E < 3$	小	1

3.3 地震诱发煤矿次生灾害风险等级确定

采用风险矩阵法建立地震诱发煤矿次生灾害风险等级矩阵,按其分值评估出对应的风险等级。风

险等级划分为4级:特别重大(Ⅰ级)、重大(Ⅱ级)、较大(Ⅲ级)、一般(Ⅳ级),见表5。

表 5 风险等级矩阵

Tab. 5 Risk level matrix

地震诱发煤矿次生灾害风险等级		后果严重性等级值			
		[1, 1.5)	[1.5, 2.5)	[2.5, 3.5)	[3.5, 4]
发生可能性等级值	[1, 1.5)	一般(Ⅳ)	一般(Ⅳ)	较大(Ⅲ)	较大(Ⅲ)
	[1.5, 2.5)	一般(Ⅳ)	较大(Ⅲ)	较大(Ⅲ)	重大(Ⅱ)
	[2.5, 3.5)	较大(Ⅲ)	较大(Ⅲ)	重大(Ⅱ)	特别重大(Ⅰ)
	[3.5, 4]	较大(Ⅲ)	重大(Ⅱ)	特别重大(Ⅰ)	特别重大(Ⅰ)

3.4 煤矿次生灾害隐患重要度

为评估各类次生灾害隐患的影响程度,根据煤矿地震灾害承灾体设防水平和防灾减灾能力的分析结果,将其等级值、权重相乘和隐患数量相乘,得出该煤矿各类次生灾害隐患的重要度,计算过程如下:

$$J = \sum (n_i \cdot x_i \cdot N_i) \quad (3)$$

式中: J 为煤矿次生灾害隐患重要度; n_i 为次生灾害隐患的数量; x_i 为承灾体设防水平权重、防灾减灾能力权重; N_i 为承灾体设防水平等级值、防灾减灾能力等级值。

通过对各类次生灾害隐患的影响重要度排序,合理确定隐患治理的重点与次序,为隐患治理提供科学依据。

4 应用实例

某市位于河北省东部,地处环渤海湾中心地带,南临渤海,北依燕山,东西长约130 km,南北宽约150 km,总面积17 040 km²。该市大规模煤炭开采已有100多年,煤炭保有量62.5亿t,是国内焦煤的重要产区,主要赋存在4个含煤构造盆地石炭二叠系地层中,即开平构造盆地、荆各庄构造盆地、车轴山构造盆地、蓟玉构造盆地。该市地处环太平洋地

震带,一直是国家地震灾害重点监控区^[16]。

该市现有正常生产煤矿6座,核定产能2 250万t。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015),该市抗震设防烈度主要为Ⅶ度和Ⅷ度区,地震危险性比较高^[17]。

4.1 隐患重要度评估结果

根据表2调查该市6座生产煤矿,共查出承灾体设防和防灾减灾能力隐患13条,采用专家评估法,确定承灾体设防水平权重为0.75、防灾减灾能力权重为0.25。隐患分布及重要度统计结果见表6和图3。

表 6 隐患分布及重要度统计

Tab. 6 Hidden danger distribution and importance statistics

承灾体类型	隐患数量	J
井筒支护	3	6.75
安全出口	1	1.5
提升系统	1	1.5
通风系统	4	9
排水系统	3	6.75
供配电系统	1	1.5

根据地震诱发煤矿次生灾害隐患重要度评估结果可知:煤矿通风系统、井筒支护系统、排水系统是该市煤矿抗震设防的薄弱环节,这与该地区矿井建

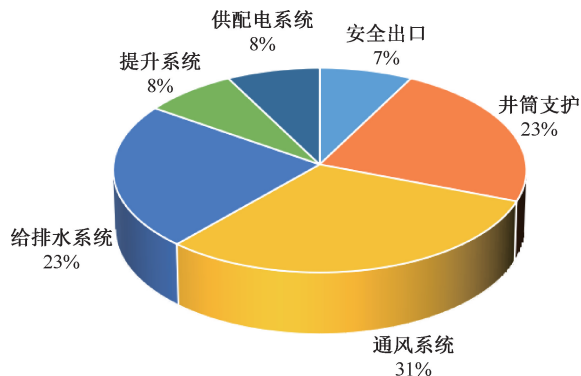


图 3 隐患分布

Fig. 3 Hidden danger distribution

设年代比较久远以及当时抗震设防要求比较低有关。因此,该市煤矿应按照现行设防技术要求提高设防等级和水平。

4.2 风险评估结果

根据第 3 章提出的风险评估方法和隐患排查结果,得到该市所属 6 座煤矿地震诱发煤矿次生灾害风险等级,见表 7。主要因为该区域地震动峰值加速度为 0.2g,抗震设防烈度为Ⅷ度,3 座风险大的煤矿建矿时间为 20 世纪 50—80 年代,比较久远,抗震设防水平低。

表 7 风险评估结果

Tab. 7 Risk assessment results

煤矿编号	L	S	风险等级
煤矿 1	2.45	3.25	一般
煤矿 2	1.8	3	一般
煤矿 3	2.05	2	一般
煤矿 4	2.05	3.75	较大
煤矿 5	2.5	2.75	较大
煤矿 6	2.5	3.75	重大

将评估结果采用地理信息系统工具可视化,得到该市 6 座煤矿地震诱发煤矿次生灾害风险等级的空间分布图,如图 4 所示。

5 结论

1) 通过归纳分析煤矿次生灾害典型案例,得出

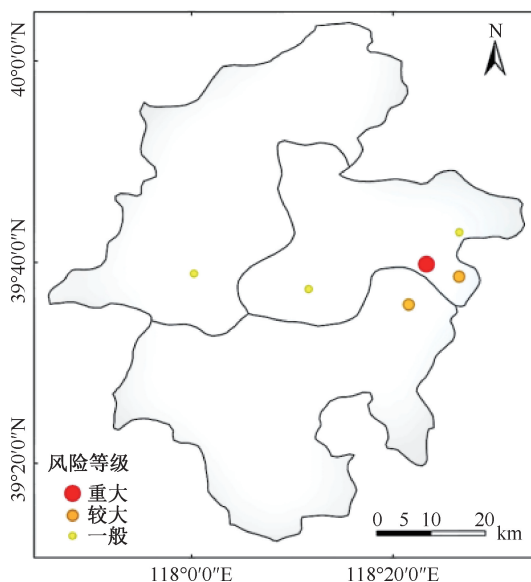


图 4 风险等级分布

Fig. 4 Risk level distribution map

地震诱发煤矿次生灾害类型按照承灾体分为 6 类,包括次生井巷灾害、次生水害、次生瓦斯灾害、次生顶板灾害、次生机电事故灾害以及次生运输提升事故灾害。

2) 地震诱发煤矿次生灾害风险评估包括发生可能性和后果严重性评估。其中,发生可能性评估主要考虑煤矿所在区域地震灾害等级、煤矿次生灾害危险性、煤层瓦斯赋存致灾性、矿井水文地质条件致灾性、承灾体设防水平、防灾减灾能力 6 方面;后果严重性评估主要考虑灾害可能造成的伤亡人数和经济损失 2 方面。

3) 煤矿在日常生产中,应定期开展地震诱发煤矿次生灾害风险评估工作,并将地震灾害预防纳入安全管理体系之中,编制地震灾害专项应急预案,定期进行演练,从而提高抵御地震诱发煤矿次生灾害的能力。

4) 研究地震诱发煤矿次生灾害机制,揭示地震灾害与煤矿承灾体之间的动力学作用机制及复合链生灾害关系,对于地震诱发煤矿次生灾害防治具有重要科学价值,在未来需要进行深入研究。

参考文献

[1] 陈永强,吴志鹏,杨湘娟,等. 区域地震分析软件研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9):126-136.
CHEN Yongqiang, WU Zhipeng, YANG Xiangjuan, et al. Review on regional seismic analysis software[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9):126-136.

[2] 开滦奇迹,回顾 1976 年唐山大地震中的开滦煤矿干部职工的感人自救[EB/OL]. (2022-11-09). <https://www.>

- 163.com/dy/article/HLNECPBJ05532G91.html.
- [3] LEE C F. Performance of underground coal mines during the 1976 Tangshan earthquake[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1987, 2(2):199-202.
- [4] 谢自莉,马祖军. 城市地震次生灾害演化机理分析及仿真研究[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(3):155-163.
XIE Zili, MA Zujun. Analysis and simulation of evolution mechanism of urban seismic secondary disasters[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(3):155-163.
- [5] 魏利军,王向阳,罗艾民,等. 基于贝叶斯网络的化工园区地震次生灾害情景分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(12):73-78.
WEI Lijun, WANG Xiangyang, LUO Aimin, et al. Scenario analysis on secondary disasters of earthquake in chemical industry park based on Bayesian network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(12):73-78.
- [6] 张东妮,孟耀斌,马海关,等. 地震 NaTech 中时间因素对化学品安全风险的影响[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(11):183-188.
ZHANG Dongni, MENG Yaobin, MA Haiguan, et al. Effect of time factor on safety risk of chemical leakage in seismic NaTech events[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(11):183-188.
- [7] 刘大山,陈晓春,多英全,等. 化工园区地震 Na-Tech 事件快速风险评估方法[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(2):127-134.
LIU Dashan, CHEN Xiaochun, DUO Yingquan, et al. Rapid risk assessment method for chemical industry park earthquake Na-Tech event[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(2):127-134.
- [8] 刘振亮,苑淑,李素超. 地震及次生突发灾害下公路桥梁网络韧性评估[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(8):176-184.
LIU Zhenliang, YUAN Wei, LI Suchao. Resilience assessment of highway bridge networks subjected to both earthquakes and earthquake-induced secondary emergencies[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(8):176-184.
- [9] 王伟,齐庆杰,刘文岗. 自然灾害次生事故隐患空间网络研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(10):152-158.
WANG Wei, QI Qingjie, LIU Wengang. Study on space network of potential secondary accidents of natural disasters[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(10):152-158.
- [10] SUN Zuo, LIU Yingjie, QI Qingjie, et al. Risk assessment of coal mine flood disasters based on projection pursuit clustering model[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18):DOI:10.3390/su14181131.
- [11] SUN Zuo, QI Qingjie, LIU Yingjie. Vulnerability assessment of mine flooding disaster induced by rainstorm based on Tri-AHP[J]. *Sustainability*, 2022, 14(24):DOI:10.3390/su142416731.
- [12] 齐庆杰,刘文岗,王安虎,等. 地震诱发煤矿次生灾害隐患排查体系构建[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1):134-141.
QI Qingjie, LIU Wengang, WANG Anhu, et al. Construction of hidden danger investigation system of coal mine earthquake disaster bearing body[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1):134-141.
- [13] 煤炭工业部规划设计院. 唐山地震开滦煤矿井巷工程的震害[J]. *地震工程与工程振动*, 1982, 2(1):67-76, 87.
Coal Mines Planning and Design Institute, Ministry of Coal Industry. Damage to structures and installations in the underground excavations of the kailuan colliery during the tangshan earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 1982, 2(1):67-76, 87.
- [14] 苗军. 煤矿井下工程抗震的探讨[J]. *石河子科技*, 1997(2):16-18.
- [15] 史培军. *灾害风险科学*[M]. 北京:北京师范大学出版集团, 2016: 56-65.
- [16] 张孝奎. 防灾减灾视角下的城市空间布局规划研究:以唐山市为例[J]. *灾害学*, 2018, 33(1):89-95.
ZHANG Xiaokui. Study on urban spatial layout planning from the perspective of disaster prevention and disaster reduction: Tangshan [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(1):89-95.
- [17] 张孝奎. 极罕遇地震在防灾减灾规划中的应用研究:以唐山市建筑抗震易损性分析为例[J]. *四川建筑科学研究*, 2018, 44(5):8-14.
ZHANG Xiaokui. Research on the application of very rare earthquake in disaster prevention and mitigation plan-taking the seismic vulnerability analysis of Tangshan city as an example[J]. *Sichuan Building Science*, 2018, 44(5):8-14.

作者简介: 齐庆杰 (1964—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,主要从事灾害风险评估与监测预警、应急救援技术与装备等方面的研究。E-mail: qi_qingjie@163.com。