# 多矿柱群破坏机理与灾变动态分析研究*

彭府华[1,2]，张沈平[1,3]，胡润泽[1]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012；
3.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012）

**摘要**：为揭示矿柱群破坏机理与灾变动态演化规律，解决缓倾斜矿体开采中矿柱群失稳引发的采空区大面积垮塌问题，采用PFC2D数值模拟方法，对3个不同强度的试样开展并联单轴加载试验模拟，分析多矿柱破坏力链与裂纹演化特征，揭示了多矿柱链式失稳机理，提出了基于触发矿柱、断链矿柱和临界矿柱的关键矿柱理论及关键矿柱识别方法，并利用Fetr6铬铁矿案例对该方法进行验证。研究表明：矿柱群失稳遵循链式破坏规律，矿柱按其强度由低到高的顺序依次破坏，触发矿柱为链式破坏过程中最先失稳的薄弱矿柱，断链矿柱可终止矿柱群链式破坏蔓延，临界矿柱决定矿柱群系统整体失稳临界状态；提出的关键矿柱识别方法可精准识别链式动态失稳中的关键矿柱。经Fetr6铬铁矿案例验证，当矿柱承载面积损失率达到0.523时，可判定矿柱群系统整体失稳。研究成果为矿山矿柱群稳定性评估与灾害防控提供了理论依据和技术支撑。

**关键词**：矿柱群；链式失稳；关键矿柱；PFC模拟

**中图分类号**：TD325.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)09-0155-12

## Study on Failure Mechanism and Dynamic Catastrophe Analysis of Multiple Pillar Groups

*Peng Fuhua*[1,2], *Zhang Shenping*[1,3], *Hu Runze*[1]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China)

**Abstract**: To reveal the failure mechanism and dynamic catastrophe evolution law of pillar group and solve the problem of large-area goaf collapse caused by pillar group instability in gently inclined orebody mining, the PFC2D numerical simulation method was adopted to conduct parallel uniaxial loading test simulations on three specimens with different strengths. The failure force chain and crack evolution characteristics of multiple pillars were analyzed, the chain instability mechanism of multiple pillars was revealed, and a key pillar theory based on trigger pillars, chain-breaking pillars, and critical pillars as well as a key pillar identification method were proposed. The method was verified by using the Fetr6 chromite mine case. The research shows that the instability of pillar group follows the law of chain failure, and pillars fail sequentially in the order of their strength from low to high. The trigger pillar is the weakest pillar that fails first during the chain failure process. The chain-breaking pillar can stop the propagation of chain failure in the pillar group. The critical pillar determines the critical state of overall instability of the pillar group system. The proposed key pillar identification method can accurately identify key pillars in the chain dynamic instability process. Verified by the Fetr6 chromite mine case, when the pillar bearing area loss rate reaches 0.523, the pillar group system can be judged as overall unstable. The research results provide a theoretical basis and technical support for the stability assessment and disaster prevention and control of pillar group in mines.

**Key words**: Pillar group, Chain instability, Key pillar, PFC simulation

---

* **收稿日期**：2026-03-11

**基金项目**：中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ03)；中国五矿集团有限公司科技专项计划“揭榜挂帅”项目(2025ZXA01)

**作者简介**：彭府华(1987—)，男，江西井冈山人，博士研究生，高级工程师，主要从事矿山岩土灾害防治研究工作。E-mail：fuhuapeng@126.com

## 0 引言

留矿柱的全面采矿法是最为常用的缓倾斜矿体开采方法,采用这种采矿方法的矿山因受历史开采的影响,往往存在大量的未治理的连片采空区,依靠矿柱群来维护采空区的稳定。在长期的开采扰动、自然风化等因素影响下,矿柱群发生失稳,从而导致采空区大面积垮塌的事故时有发生[1-4]。如广西省大厂井田高峰金属矿 1993 年 3 月 19 日发生采空区大冒落,此后又陆续发生十余起采空区冒落型矿震;湖南省涟源市青山硫铁矿采用多层不规则房柱法开采,1996 年 7 月 1 日发生大面积采空区垮塌,并诱发 2.6 级矿震;山东省枣庄市峄城石膏矿区 2002 年 5 月 20 日发生大面积冒顶塌陷事件,引发 3.6 级矿震,矿震波及到周围 4 个矿井,并在地面形成 14.47 万 $km^2$ 的塌陷区;2005 年 11 月 6 日,河北省邢台尚汪庄石膏矿发生采空区大面积坍塌事故,形成一个长约 300 m、宽约 210 m、面积约 5.3 万 $km^2$ 的塌陷区,造成 37 人死亡;2015 年 12 月 25 日,山东省临沂市万庄矿区发生采空区大面积垮塌,诱发 9 次 0.9～3.5 级矿震,形成的地面坍塌区域东西长约 1 220 m、南北宽约 660 m,涉及万庄、玉荣、保太三个石膏矿,面积约为 0.61 $km^2$;2022 年 9 月 17 日,湖南省益阳市安化县湘安钨业矿区采空区发生大面积冒落,诱发 3.0 级矿震。这类事故是由矿柱发生失稳引起采空区大面积垮塌导致的,造成的人员伤亡和经济损失往往较大,因此,矿柱群稳定性问题是这类矿山安全管理需要重点关注的问题。

国内外学者在矿柱稳定性研究方面开展了大量工作,如 Grgic D 等[5]采用 FLAC2D 数值计算方法,分析了法国洛林地区房柱式开采铁矿山的矿柱群流变性能;Ai Heib M 等[6]评价了法国 Senonian 石膏矿矿柱群的载荷分布情况,并采用 FLAC3D 数值模拟方法,分析了水位、岩层完整性及岩性对矿柱群塑性区分布的影响;Salmi E F 等[7]考虑了劣化作用对矿柱载荷和强度的影响,优化了矿柱强度的计算公式,分析了劣化作用对矿柱群长期稳定性的影响;周子龙等[8]对双矿柱体系进行了变形破坏及承载特性试验研究,利用颗粒流离散元软件 PFC2D 研究了矿柱群连锁失稳的动态过程,以及矿柱安全系数、诱发位置、顶板刚度对矿柱群连锁失稳的影响,基于 Monte-Carlo 模拟方法评价不同的安全系数标准下的矿柱群系统稳定性;管永伟等[9]针对浅埋房柱式采空区,采用有限元数值模拟方法研究关键层厚度对关键层-岩柱系统应力场的影响,发现关键层-岩柱系统发生了应力重分布,应力集中主要位于岩柱的帮角、关键层跨中表面及岩柱正上方的关键层上表面;刘建新等[10]采用两体相互作用理论和 RFPA 对煤岩组合模型的变形与破裂过程进行了理论分析和数值试验研究,得到了组合试样的应力-应变曲线和破裂过程中应力场和声发射的分布规律;朱得福等[11]采用重整化群方法将煤柱群划分为基本单元并建立一维、二维元胞模型,将煤柱失稳概率密度函数表示为威布尔函数分布形式并给出不动点方程,进一步求解煤柱失稳的临界概率;冯国瑞等[12-13]、白锦文等[14-15]提出了遗留煤柱群的最弱失稳致灾模式,分析了关键煤柱局部失稳的诱灾机理,提出了遗留煤柱群失稳的关键柱理论。

针对矿柱稳定性问题,国内外学者主要围绕矿柱强度、承载力及作用机理[16-17]等方面开展研究。与单个矿柱破坏机理不同,多矿柱群在力学上存在显著的相互作用与协同效应,其破坏过程表现出动态演化特征。本文通过开展多矿柱破坏的数值模拟,分析多矿柱破坏失稳演化特征,揭示多矿柱群失稳破坏机理,为矿山灾害防控提供理论依据与技术支撑。

## 1 多矿柱失稳破坏演化特征

为研究多矿柱失稳破坏演化特征,利用 PFC2D 对多矿柱并联系统加载破坏过程进行数值模拟。根据一般硬岩矿山矿柱分布特征,大多数矿柱高径比为 2 左右,跨度约为矿柱直径大小,确定本次模拟的试样尺寸直径为 50 mm、高度为 100 mm,试样间距为 50 mm,加载速率为 0.002 mm/s,设计的 3 块试样并联矿柱单轴加载模拟系统如图 1 所示。考虑到实际矿山多个矿柱之间强度和刚度的差异性,共设计了两组试验,第一组试样的强度不同,但刚度相同;第二组试样的强度相同,但刚度不同。参考香炉山钨矿矿柱岩体的强度特

性,选取试样的强度参数。第一组 3# 试样的单轴抗压强度取一般硬岩矿山矿柱岩体的抗压强度,2# 试样的单轴抗压强度为 3# 试样的 1.2 倍,1# 试样的单轴抗压强度为 3# 试样的 1.5 倍;第二组 3# 试样的弹性模量取一般硬岩矿山矿柱岩体的弹性模量,2# 试样的弹性模量为 3# 试样的 1.2 倍,1# 试样的弹性模量为 3# 试样的 1.5 倍。矿柱颗粒之间的接触本构模型采用平行黏结模型,模型的参数选取见表 1。

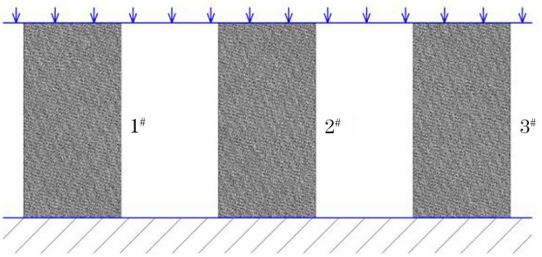



**图 1 并联矿柱数值模拟模型**

**Fig.1 Numerical simulation model of parallel pillars**

**表 1 并联矿柱模型的参数**

**Table 1 Parameters of farallel pillar model**

| 试样 | 最小粒径/mm | 粒径比 | 颗粒接触模量/GPa | 颗粒刚度比 | 颗粒摩擦因数 | 黏结模量/GPa | 黏结刚度比 | 黏结摩擦因数 | 黏结抗拉强度/MPa | 黏结黏聚力/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 0.35 | 1.66 | 35.0 | 2.0 | 0.47 | 35.0 | 2.0 | 30 | 27.3 | 27.3 |
| 2# | 0.35 | 1.66 | 35.0 | 2.0 | 0.47 | 35.0 | 2.0 | 30 | 21.0 | 21.0 |
| 3# | 0.35 | 1.66 | 35.0 | 2.0 | 0.47 | 35.0 | 2.0 | 30 | 15.0 | 15.0 |

### 1.1 多矿柱破坏力链演化特征

试样破坏过程中各试样的轴向压力与时步的关系如图 2 所示,不同加载时步的接触力链演化特征如图 3 所示。从模拟结果可以看出:加载前,1#、2# 和 3# 矿柱有密集的接触力链网络,如图 3(a)所示;随着荷载逐步增大,在加载到 0～80 000 时步时,1#、2# 和 3# 矿柱的承载力基本一致,并呈现线性增长,3 条矿柱的接触力链密集程度均出现细微的减小,且 3# 矿柱的承载力减小更为明显,1# 和 2# 矿柱基本一致,如图 3(b)所示;当加载时步增加到 80 000～100 000 时,1#、2# 和 3# 矿柱的承载力仍基本一致,3# 矿柱的接触力链进一步破坏,并逐渐产生贯通性破坏区域,如图 3(c)和图 3(d)所示;当加载时步增加到 110 000 时,3# 矿柱的轴向压力达到其峰值强度后,承载力快速下降,并联矿柱体系整体承载力也快速下降,接触力链出现大范围的贯通性破坏,上部呈“X”形破坏,2# 矿柱上方局部接触力链开始出现细微的减小,1# 和 2# 矿柱的承载力基本一致,并继续线性增加,如图 3(e)所示;当加载时步增加到 120 000 时,2# 矿柱接触力链进一步加速破坏,开始出现主破坏面,1# 矿柱内部接触力链基本不变,如图 3(f)所示;当加载时步增加到 150 000 时,2# 矿柱受力达到其峰值强度时,并联矿柱体系整体承载力达到最大值 309 kN,1#、2# 和 3# 矿柱的峰值强度之和为 431 kN,整体最大承载力是各矿柱峰值强度之和的 71.7%,之后承载力快速下降,2# 矿柱接触力链出现 45°贯穿性剪切破坏面,1# 矿柱的承载力继续线性增加,如图 3(g)所示;当加载时步增加到 170 000～175 000 时,2# 和 3# 矿柱均已破坏,并联矿柱的承载力即为 1# 矿柱的承载力,随着压力的增加,1# 矿柱接触力链破坏愈发明显,并出现贯穿性主破坏面,并联矿柱体系整体发生破坏,如图 3(h)和图 3(i)所示。

从并联矿柱破坏力链演化过程可知,并联矿柱接触力链的破坏、发展与贯通最先发生在强度最低的矿柱,待其失稳破坏后,强度由低到高的矿柱随后依次发生失稳破坏,最终引发整个并联矿柱系统整体失稳。

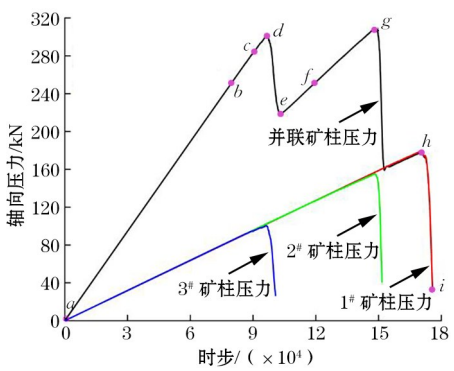



**图 2 试样破坏过程中的轴向压力-时步曲线**

**Fig.2 Axial pressure-time step curves during the failure process of specimens**

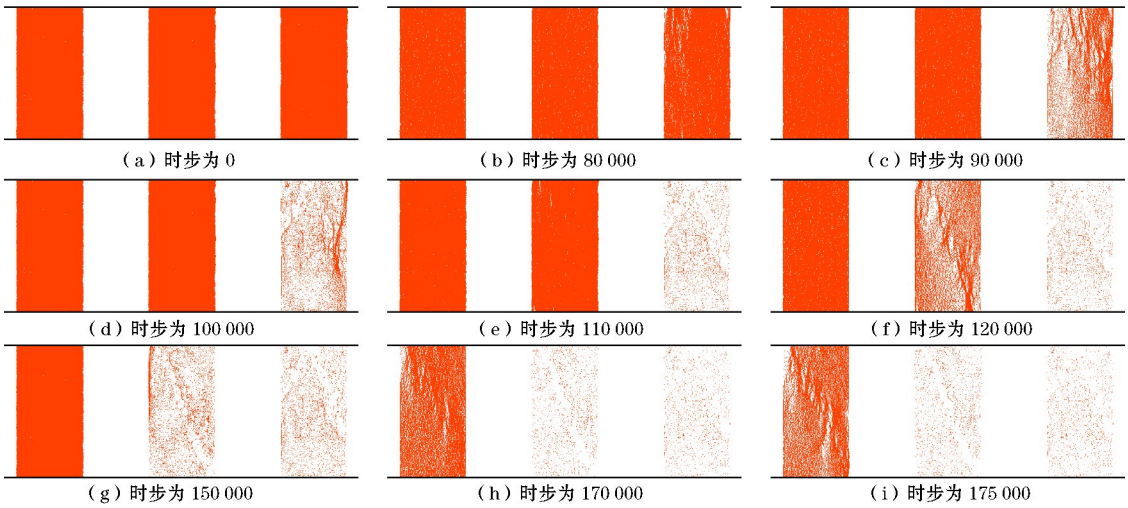



图 3 试样破坏过程接触力链演化特征

Fig.3 Evolution characteristics of contact force chains during the failure process of specimens

## 1.2 多矿柱破坏裂纹演化特征

在试样加载过程中,不同时步下 1#、2#、3# 矿柱和并联矿柱的总裂纹、拉裂纹和剪裂缝数量见表 2,1#、2# 和 3# 矿柱裂纹数随加载时步的变化如图 4 所示,不同时步下 1#、2# 和 3# 矿柱裂纹扩展形态如图 5 所示。

表 2 试样破坏过程中裂纹数量的统计结果

Table 2 Statistical results of the number of cracks during the failure process of specimens

| 时步 | 1# 矿柱 | | | 2# 矿柱 | | | 3# 矿柱 | | | 并联矿柱 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 总裂纹/条 | 拉裂纹/条 | 剪裂纹/条 | 总裂纹/条 | 拉裂纹/条 | 剪裂纹/条 | 总裂纹/条 | 拉裂纹/条 | 剪裂纹/条 | 总裂纹/条 | 拉裂纹/条 | 剪裂纹/条 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 80 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | 0 |
| 90 000 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 96 | 85 | 11 | 98 | 87 | 11 |
| 95 000 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 210 | 182 | 28 | 214 | 186 | 28 |
| 100 000 | 0 | 0 | 0 | 7 | 6 | 1 | 2 582 | 2 281 | 301 | 2 589 | 2 287 | 302 |
| 110 000 | 1 | 1 | 0 | 20 | 19 | 1 | 3 225 | 2 862 | 363 | 3 246 | 2 882 | 364 |
| 120 000 | 3 | 3 | 0 | 50 | 44 | 6 | 3 233 | 2 870 | 363 | 3 286 | 2 917 | 369 |
| 130 000 | 5 | 5 | 0 | 99 | 84 | 15 | 3 235 | 2 872 | 363 | 3 339 | 2 961 | 378 |
| 135 000 | 9 | 5 | 0 | 574 | 481 | 93 | 3 236 | 2 873 | 363 | 3 819 | 3 359 | 456 |
| 140 000 | 15 | 14 | 1 | 3 005 | 2 647 | 358 | 3 239 | 2 876 | 363 | 6 259 | 5 537 | 722 |
| 150 000 | 34 | 30 | 4 | 3 009 | 2 651 | 358 | 3 241 | 2 878 | 363 | 6 284 | 5 559 | 725 |
| 160 000 | 68 | 59 | 9 | 3 010 | 2 652 | 358 | 3 243 | 2 880 | 363 | 6 321 | 5 591 | 730 |
| 170 000 | 135 | 113 | 22 | 3 010 | 2 652 | 358 | 3 244 | 2 881 | 363 | 6 389 | 5 646 | 743 |
| 175 000 | 1 952 | 1 665 | 287 | 3 010 | 2 652 | 358 | 3 244 | 2 881 | 363 | 8 206 | 7 198 | 1 008 |
| 180 000 | 2 556 | 2 235 | 321 | 3 010 | 2 652 | 358 | 3 245 | 2 882 | 363 | 8 811 | 7 769 | 1 042 |

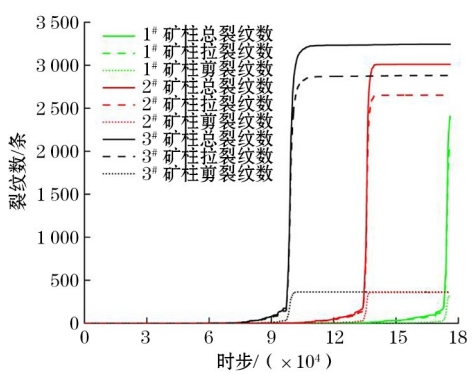



图 4 试样破坏过程裂纹数量随加载时步的变化

Fig.4 The variation of the number of cracks with the loading time step during the failure process of specimens

由模拟结果可知,在时步为 0~80 000 的加载过程中,1#、2# 和 3# 矿柱均未出现裂纹。当加载时步大于 80 000 时,3# 矿柱开始出现拉裂纹。当加载时步为 90 000 时,3# 矿柱的裂纹继续少量发展,以拉裂纹为主,开始出现剪切裂纹。加载到时步 95 000 时,3# 矿柱的裂纹快速发展,总裂纹增加到 210 条。当加载时步 100 000 时,3# 矿柱裂纹急剧增加到 2 582 条,并出裂纹现贯通,呈“X”形,2# 矿柱内部也出现了少量裂纹。当加载时步为 110 000 时,3# 矿柱的裂纹数达到了最大,说明已经完全破坏,2# 矿柱内部的裂纹开始增加。当加载时步为 120 000 时,2# 矿柱的裂纹继续增加,裂缝分布较为

均匀,主要以拉裂纹为主。继续加载到 140 000～150 000 时步时,2# 矿柱的裂纹数快速增加到最大值,裂缝呈 45°贯通,说明此时 2# 矿柱已失稳破坏,同时 1# 矿柱的裂纹也开始增加。当加载到 180 000 时步,1# 矿柱的裂纹快速发展并贯通,呈 45°破坏,至此,整个并联矿柱群系统整体失稳破坏。

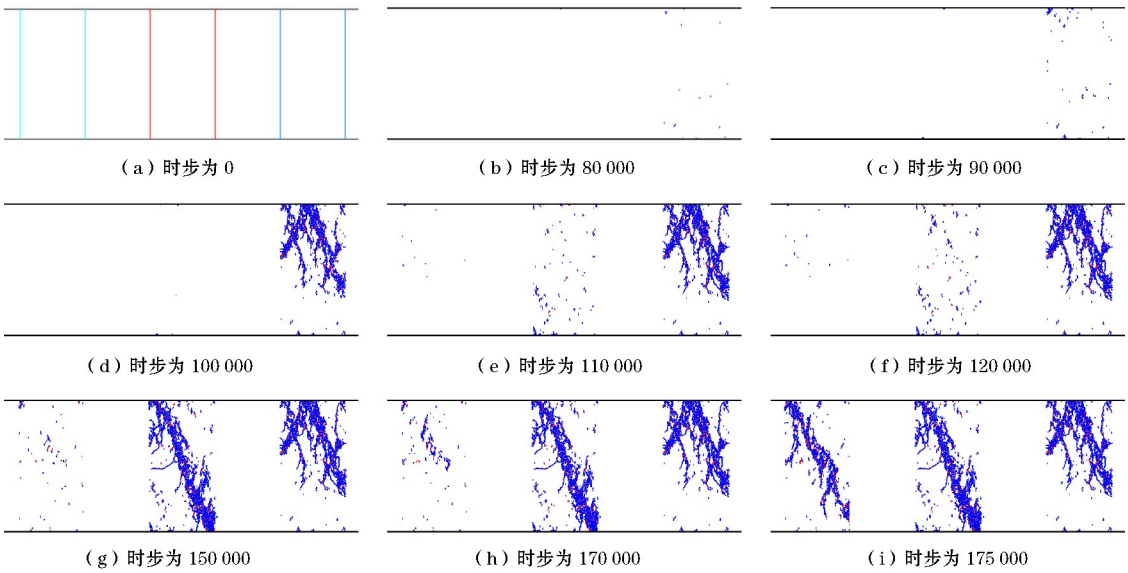



**图 5 试样破坏过程裂纹扩展形态**

**Fig.5 Crack propagation pattern during the failure process of specimens**

### 1.3 多矿柱破坏失稳演化特征

综合多矿柱破坏力链和裂纹演化特征可以看出,多矿柱并联系统破坏分为以下几个阶段。

阶段Ⅰ:在 3# 矿柱承载力达到峰值强度前,1#、2# 和 3# 矿柱承载力基本一致,且均为并联矿柱体系的主要承载矿柱,当 3# 矿柱承载力达到其峰值强度时,并联矿柱整体承载力达到第一个极大值。

阶段Ⅱ:3# 矿柱承载力在达到峰值强度后开始快速减小,1# 和 2# 矿柱的载荷一样大且逐渐增大,由于 3# 矿柱承载力的降幅大于 1# 和 2# 矿柱承载力的增幅,并联矿柱整体承载力逐渐下降,阶段Ⅱ的主要承载矿柱为 1# 和 2# 矿柱。

阶段Ⅲ:随着 1# 和 2# 矿柱的承载力增大,并联矿柱整体承载力逐步增加,1# 和 2# 矿柱为该阶段的主要承载矿柱,当 2# 矿柱承载力达到峰值强度时,并联矿柱整体承载力达到第二个极大值。

阶段Ⅳ:2# 矿柱承载力达到峰值强度后快速减小,1# 矿柱的载荷逐渐增大,由于 2# 矿柱承载力的降幅大于 1# 矿柱承载力的增幅,并联矿柱整体承载力逐渐下降,该阶段的主要承载矿柱为 1# 矿柱。

阶段Ⅴ:随着 1# 矿柱的承载力逐渐增加到峰值强度,并联矿柱整体承载力也达到第三个极大值,该阶段的主要承载矿柱为 1# 矿柱。

阶段Ⅵ:1# 矿柱承载力在达到其峰值强度后快速下降,整个并联矿柱体系的整体承载力也快速下降,该阶段并联矿柱系统整体失去承载力。

由此可知,对于并联矿柱系统而言,在加载破坏过程中,整体承载力演化过程为:增加→第一个极大值→下降→增加→第二个极大值→下降→增加→第三个极大值→下降→无。主要承载矿柱的演化过程为:1#、2#、3# 矿柱→1#、2# 矿柱→1# 矿柱→无。矿柱失稳破坏顺序依次为:3# 矿柱→2# 矿柱→1# 矿柱→并联矿柱整体。多矿柱并联系统失稳呈现“链条式”失稳特征,称之为链式失稳。

## 2 多矿柱群链式失稳机理

### 2.1 多矿柱群失稳致灾模式

矿柱群作为采空区覆岩荷载的核心承载体系,其失稳致灾遵循“局部单点触发→应力重分布传递→失稳范围渐进扩展→整体体系崩溃”的链式失稳演化规律,结合失稳的空间规模、演化阶段和致灾特征,可将其致灾模式划分为如下 4 种。

#### 2.1.1 单一矿柱单点失稳

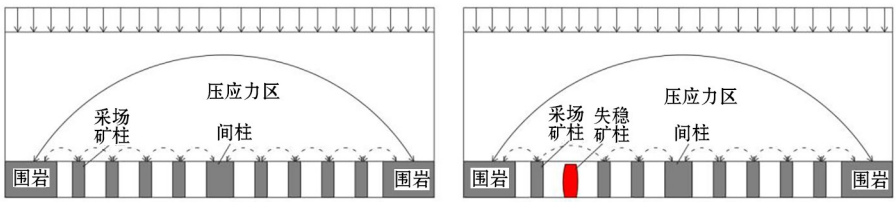
这是矿柱群失稳的起始阶段,也是最基础的矿柱群失稳模式,指单个矿柱因自身缺陷或局部扰动发生失稳,是后续大规模失稳的诱发点,也是矿山最

易防控的失稳模式,如图 6 所示。

触发原因:在自身缺陷、局部应力集中、外部扰动等因素影响下,单矿柱的承载能力低于外部荷载。

应力演化:失稳矿柱的荷载快速向相邻矿柱转移,形成局部应力升高区,但剩余矿柱群的整体承载体系未被破坏,应力调整后可通过周边矿柱重新达到平衡。

致灾后果:多表现为单一矿柱的压溃、劈裂或崩落,伴随局部采空区顶板小范围冒落,无大范围地压显现。




(a) 矿柱失稳前 (b) 矿柱失稳后

**图 6 单一矿柱单点失稳模式示意**

**Fig.6 Sketch of single-point instability mode of single pillar**

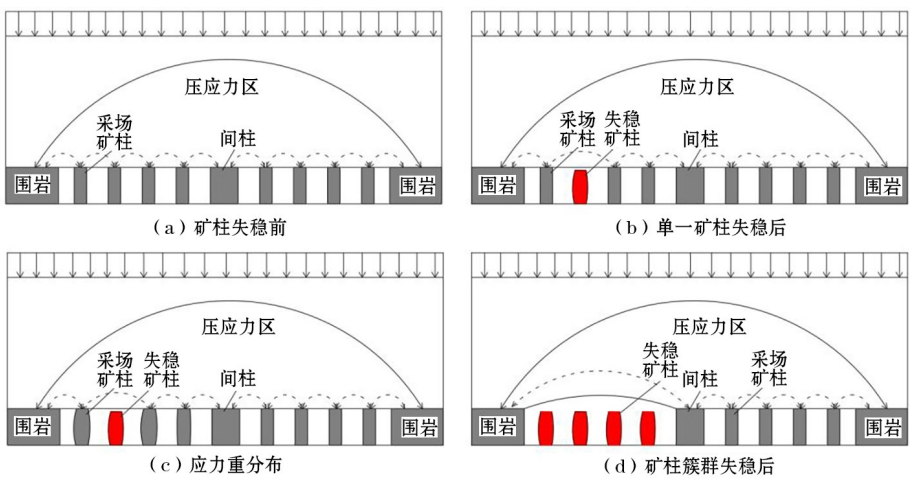
2.1.2 矿柱簇群局部失稳

矿柱簇群是指空间上几何相连、应力相互耦合的矿柱组。由单一矿柱失稳引发相邻数个矿柱依次失稳,形成小范围的矿柱群失稳,是初始失稳向大规模失稳发展的关键过渡阶段,如图 7 所示。

触发原因:单一矿柱失稳后,应力重分布,导致相邻矿柱的荷载超过其承载极限,形成“失稳-应力转移-再失稳”的局部连锁反应。

应力演化:失稳范围从单点扩展为局部面状,应力向簇群外的矿柱进一步传递,形成更大范围的应力扰动区,剩余矿柱群的承载体系开始出现局部破损,但整体仍能承担覆岩荷载。

致灾后果:簇群矿柱整体压溃或崩落,对应区域采空区顶板中等范围塌落,矿压显现加剧,可能伴随小范围岩爆或微震,对局部采场的设备、人员造成危害。




(a) 矿柱失稳前 (b) 单一矿柱失稳后

(c) 应力重分布 (d) 矿柱簇群失稳后

**图 7 矿柱簇群局部失稳模式示意**

**Fig.7 Sketch of local instability mode of pillar cluster**

2.1.3 矿柱群区域连锁失稳

矿柱失稳从局部簇群突破为跨区域、跨采场的大范围连锁失稳,失稳范围覆盖整个采区或多个相邻采场的矿柱群,是矿柱群承载体系濒临崩溃的前兆,也是矿山地压灾害防控的临界阶段,如图 8 所示。

触发原因:局部群簇失稳后,应力持续向更远的矿柱传递并形成应力叠加,采空区几何形态不规则导致应力传递无明显阻隔,最终形成跨区域的失稳连锁通道。

应力演化:失稳范围从局部面状扩展为区域带状,剩余矿柱仅能形成零散的承载孤岛,覆岩荷载开始向矿井的巷道、隔离矿柱等非设计承载结构转移,整体应力平衡彻底被打破,无法通过自身调整重建应力平衡状态。

致灾后果：区域采空区顶板大面积塌落，形成垮落区，矿压显现极其强烈，伴随中大规模矿震、岩爆。

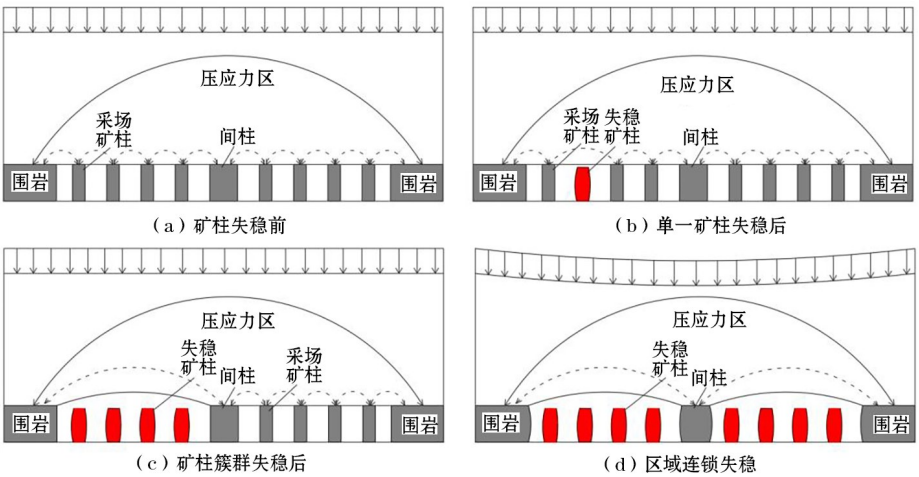



**图 8　矿柱群区域连锁失稳模式示意**

**Fig.8　Sketch of regional chain instability mode of pillar group**

2.1.4　矿柱群整体系统失稳

这是矿柱群失稳的终极阶段，指整个矿柱承载体系完全崩溃，无法再承担覆岩整体荷载，是矿山最严重的地压灾害模式，如图 9 所示。

触发原因：区域连锁失稳持续扩展，零散的承载孤岛矿柱相继失稳，最终无有效承载结构支撑覆岩。

应力演化：整个采空区范围内的应力完全释放，覆岩发生整体下沉、垮落。

致灾后果：采空区大面积覆岩垮落，形成特大规模的地压灾害，伴随强烈矿震，全矿井矿生产系统彻底瘫痪，造成重大人员伤亡和巨额财产损失，甚至导致矿井永久闭坑。

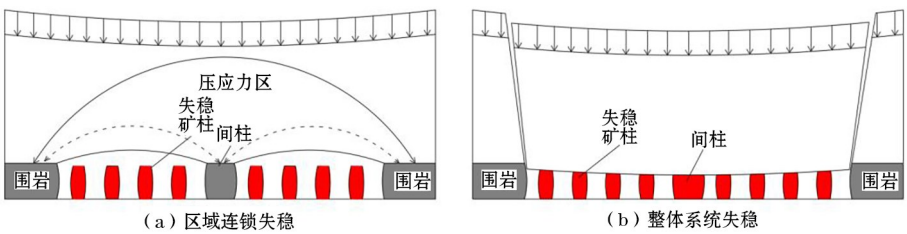



**图 9　矿柱群整体系统失稳模式示意**

**Fig.9　Sketch of overall system instability mode of pillar group**

## 2.2　多矿柱群链式失稳关键矿柱理论

矿柱群链式失稳机理如图 10 所示。虽然矿柱群有多种失稳致灾模式，但存在一个共同点，即局部矿柱先发生破坏，再诱发其他矿柱先后发生渐进式破坏，这种失稳致灾模式称为多矿柱链式失稳。先发生破坏的局部矿柱，称为多矿柱链式失稳的触发矿柱，触发矿柱破坏是并联矿柱系统整体失稳的必要条件，但不是充分必要条件。也就是说，触发矿柱破坏是并联矿柱系统整体失稳的前提，触发矿柱破坏后，可能会诱发其他矿柱再次发生破坏，直至整个矿柱系统整体破坏。也有可能存在某些矿柱在经过应力调整和重分布后不再发生破坏，链式失稳链条断开，即多矿柱链式失稳停止，这种矿柱称为断链矿柱；反之，在整个链式破坏失稳过程中，一旦某些矿柱破坏，就会触发整个矿柱群系统发生失稳，那么这种矿柱可称为临界矿柱。

多矿柱并联系统在破坏过程中，局部矿柱先发生破坏，再诱发其他矿柱先后发生链式破坏；触发矿柱是多矿柱并联系统中稳定性最差的矿柱，也是整个链式失稳过程最先发生破坏的矿柱，是多矿柱链式失稳的必要条件；断链矿柱是决定链式破坏过程停止，对系统稳定性起到控制性主导作用的关键矿柱，是系统失稳的止损关键；临界矿柱是决定多矿柱并联系统发生整体破坏的关键矿柱，其稳定性可用来评价系统的整体稳定性。触发矿柱、断链矿柱和临界矿柱统称为关键矿柱。

与前期研究成果相比,定义的关键矿柱不仅是矿柱群中稳定性最差的矿柱,而是在整个矿柱群动态失稳过程中,控制矿柱群链式破坏开始、停止和结束的几个关键节点的矿柱。

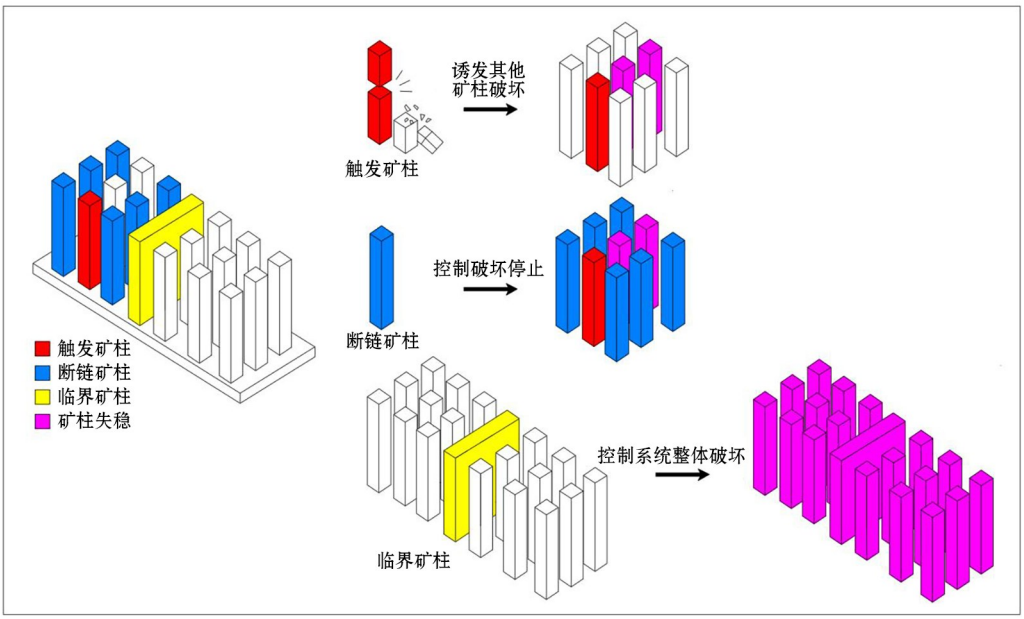



**图 10 矿柱群链式失稳机理示意**

**Fig.10 Sketch of chain instability mechanism of pillar group**

## 3 多矿柱群链式失稳关键矿柱识别方法

### 3.1 单矿柱稳定性评价方法

最常用的单个矿柱稳定性评价方法为安全系数法,矿柱安全系数为矿柱强度与应力的比值。Bunting 等多位学者根据实践经验和现场调查统计数据,总结出了多个典型的矿柱强度计算公式,其中,Bieniawski 于 1981 年提出的矿柱强度计算公式见式(1)[18]。

$$S_P=\sigma_c\left(0.64+0.36\frac{W_P}{h}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中:$S_P$ 为矿柱强度,MPa;$\sigma_c$ 为矿柱岩石单轴抗压强度,MPa;$W_P$ 为矿柱宽度,m;$h$ 为矿柱高度,m;$\alpha$ 为常数,主要取决于矿柱宽高比,当矿柱宽度比大于 5 时,$\alpha$ 取 1.4,否则 $\alpha$ 取 1.0。

最常用的矿柱应力计算方法为面积承载方法,矿柱所承受的载荷是其所支撑的顶板范围内直至地表的上覆岩柱的重力。对于布置规则的矿柱,面积分摊较为容易,对于布置不规则的矿柱,可采用 Voronoi 图法,将矿柱视为 Voronoi 图中的离散点,再根据 Voronoi 划分准则圈定各离散点的从属面积。为了便于计算,选取矿柱截面内切圆的圆心作为 Voronoi 图的离散点,如图 11 所示。

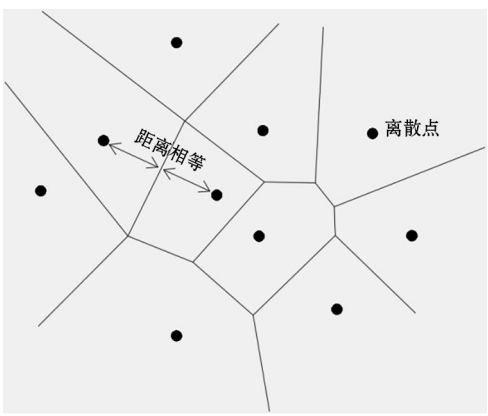



**图 11 矿柱承载面积划分 Voronoi 方法示意**

**Fig.11 Schematic of Voronoi method for pillar bearing area division**

这种方法对于矿柱截面相对规则的矿柱较为适用,但在矿柱截面不规则或极不规则的情况下,这种方法很难确定矿柱 Voronoi 图的离散点。因此在该方法基础上进行改进,对矿柱截面形成的不规则多边形边界进行等距采样,生成离散点集,将这些采样点作为 Voronoi 图的离散点,构建全局 Voronoi 图。然后再将同一矿柱的所有离散点从属的多边形进行合并,合并后的多边形面积即为该矿柱的承载面积。采用 Python 语言将优化后的方法进行编程,可实

现矿柱承载面积的快速划分。

本文利用 Bieniawski 公式计算矿柱强度，同时，利用改进后的 Voronoi 图法计算出矿柱承载面积，由此可得到矿柱的安全系数 $F_s$ 计算公式：

$$F_s=\frac{\sigma_c\left[0.64+0.36\left(\frac{W_P}{h}\right)\right]^{\alpha}}{\gamma z\times\frac{S_{岩}}{S_{矿}}} \tag{2}$$

式中：$\gamma$ 为岩石容重，kN/m$^3$；$z$ 为矿柱上覆岩层厚度，m；$S_{岩}$ 为矿柱承载面积，m$^2$；$S_{矿}$ 为矿柱截面积，m$^2$；$\alpha$ 取值 1.0。当 $F_s<1$ 时，矿柱失稳。

### 3.2　链式动态失稳过程关键矿柱识别方法

根据多矿柱群破坏机理分析可知，矿柱群破坏为链式动态破坏，当出现不稳定矿柱，该矿柱先发生破坏，并触发链式破坏，这个矿柱即识别为触发矿柱。触发矿柱破坏后会进行应力调整和重分布，这个过程可能会诱发其他矿柱发生破坏，直至矿柱群达到新的应力平衡而出现新的矿柱群稳定状态，使矿柱群系统链式失稳不继续发生的矿柱可判断为断链矿柱。矿柱群整体系统失稳的核心特征为大量矿柱破坏，诱发采空区顶板大面积垮塌，这种过程中失稳矿柱的数量越多，说明灾害越严重。为评判矿柱群是否发生系统性失稳，引入矿柱承载面积损失率这一指标，为灾变过程中垮塌矿柱的面积之和与矿柱总承载面积的比值（$\eta_A$），其表达式为：

$$\eta_A=S_i/S_n \tag{3}$$

式中：$S_i$ 为灾变过程中第 $i$ 个矿柱达到新的平衡后，所有垮塌矿柱的承载面积之和；$S_n$ 为失稳前所有矿柱承载面积之和。$\eta_A$ 的取值范围为(0，1]，$\eta_A$ 越大，意味着矿柱群系统失稳风险越高。

矿柱群系统的安全系数与矿柱群总承载能力、矿柱群总承载面积均成正比关系，矿柱群总承载面积减小使得矿柱群总承载能力下降，导致矿柱群系统安全系数降低。假设失稳前矿柱群系统安全系数为 $F_n$，灾变过程中第 $i$ 个矿柱达到新的平衡后的矿柱群系统安全系数为 $F_i$，当 $F_i=1$ 时，矿柱群系统达到失稳的临界状态，此时矿柱承载面积损失率为：

$$\eta_{A临}=1-1/F_n \tag{4}$$

矿柱群系统失稳前的安全系数 $F_n$ 可视为系统的设计安全系数，设计安全系数越大，设计矿柱的总承载面积冗余量越大，在达到失稳临界状态前允许的矿柱面积损失率也越大。如某矿山矿柱群整体设计安全系数为 1.5，那么当失稳矿柱面积损失率达到 0.333 时，矿柱群系统达到失稳临界状态。由此，判断矿柱群系统失稳灾变的计算分析步骤如图 12 所示。

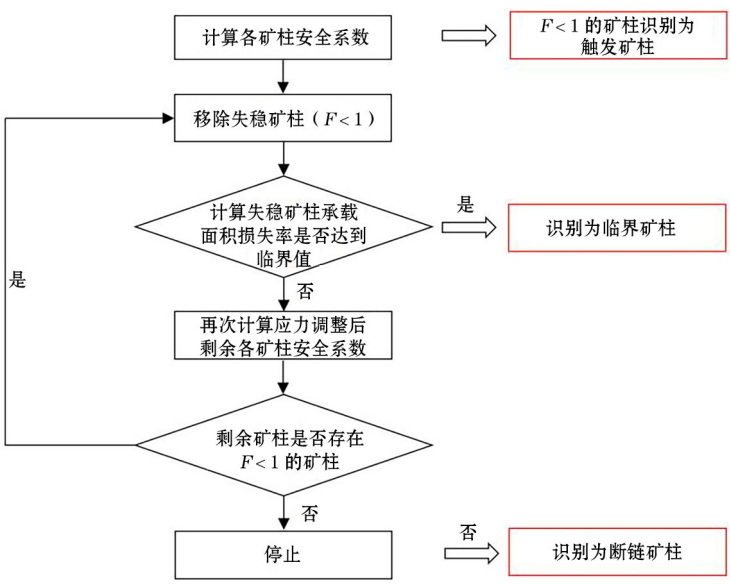



**图 12　关键矿柱识别流程**

**Fig.12　Flowchart for identification of key pillars**

（1）首先根据矿山的工程地质条件与矿柱参数，计算各矿柱的安全系数；

（2）将安全系数小于 1 的矿柱识别为触发矿柱；

（3）移除识别出的触发矿柱，计算矿柱的承载面积损失率 $\eta_A$；

（4）判断 $\eta_A$ 的大小是否达到矿柱群系统失稳临界值 $\eta_{A临}$，如果 $\eta_A\leqslant\eta_{A临}$，则判断矿柱群系统失

稳,步骤 3 中移除的矿柱即为临界矿柱;

(5) 如果 $\eta_A > \eta_{A临}$,再次计算各剩余矿柱的安全系数,若存在安全系数小于 1 的矿柱,则再次重复步骤(3)和(4);

(6) 若不存在矿柱安全系数小于 1 的情况,则上述步骤中移除的矿柱及其周边的矿柱可判别为断链矿柱。

## 4 案例分析

Faryab 铬铁矿是伊朗主要的铬铁矿床,也是全球重要的铬铁矿床之一。开采该矿床矿山有 6 座露天矿和 3 座地下矿,其中 Fetr6 矿是规模最大的地下矿山。Fetr6 矿采用房柱法开采,2008 年,在矿柱回采过程中发生了由局部矿柱失稳诱发的矿柱群失稳,最终导致 4 000 $m^2$ 的采区在几分钟内坍塌。由于相关资料、数据记录详细,这次采区垮塌成为经典的矿柱群动态失稳分析案例。本文以伊朗 Fetr6 铬铁矿采空区失稳为例[19-20],对本文提出链式失稳关键矿柱理论和识别分析方法进行验证。

图 13 为 Fetr6 矿的矿柱分布图,该垮塌区域内布置了几何形态各异的 19 根矿柱,根据改进后的 Voronoi 图法划分的矿柱群承载断面如图 14 所示,各矿柱的特性参数及失稳定前的安全系数见表 3。

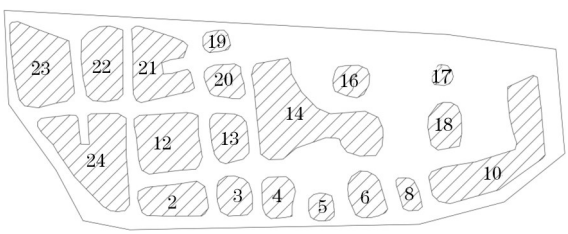



**图 13 Fetr6 铬铁矿垮塌区域的矿柱分布**

**Fig.13 Pillar distribution in the collapse area of Fetr6 Chromite Mine**

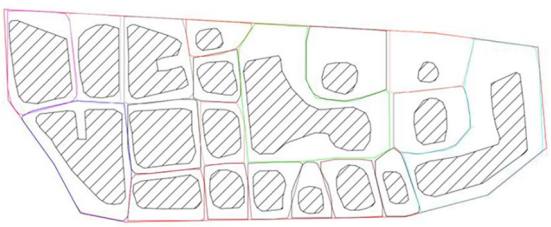


**图 14 Fetr6 铬铁矿垮塌区域矿柱承载面积的划分**

**Fig.14 Division of pillar bearing area in the collapse area of Fetr6 Chromite Mine**

**表 3 矿柱的特性与安全系数**

**Table 3 Characteristic parameters and safety factors of the pillars**

| 矿柱编号 | 面积/$m^2$ | 等效宽度/m | 高度/m | 矿柱强度/MPa | 矿柱应力/MPa | 安全系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 63 | 7.9 | 12 | 19.1 | 8.9 | 2.15 |
| 3 | 36 | 6.5 | 12 | 19.8 | 10.2 | 1.94 |
| 4 | 36 | 6.3 | 12 | 19.8 | 9.8 | 2.02 |
| 5 | 19 | 4.5 | 12 | 20.7 | 15.7 | 1.32 |
| 6 | 42 | 7.0 | 12 | 19.6 | 9.2 | 2.13 |
| 8 | 18 | 4.2 | 12 | 20.8 | 14.6 | 1.42 |
| 10 | 166 | 9.2 | 12 | 17.9 | 10.1 | 1.77 |
| 12 | 108 | 10.8 | 12 | 18.5 | 7.1 | 2.61 |
| 13 | 50 | 7.7 | 12 | 19.4 | 9.5 | 2.04 |
| 14 | 213 | 11.7 | 12 | 17.7 | 9.2 | 1.92 |
| 16 | 30 | 6.0 | 12 | 20.1 | 25.0 | 0.80 |
| 17 | 10 | 3.3 | 12 | 21.6 | 42.0 | 0.51 |
| 18 | 40 | 6.7 | 12 | 19.7 | 20.0 | 0.99 |
| 19 | 15 | 4.0 | 12 | 21.0 | 20.0 | 1.05 |
| 20 | 35 | 6.4 | 12 | 19.9 | 10.0 | 1.99 |
| 21 | 100 | 8.0 | 12 | 18.5 | 8.0 | 2.31 |
| 22 | 86 | 9.6 | 12 | 18.7 | 8.0 | 2.34 |
| 23 | 130 | 11.8 | 12 | 18.3 | 7.0 | 2.61 |
| 24 | 170 | 10.5 | 12 | 17.9 | 7.0 | 2.56 |

根据表 3 计算结果可知,在矿柱群系统失稳前,16 号、17 号和 18 号矿柱安全系数小于 1,这 3 根矿柱成为整个链式破坏的触发矿柱,最先发生破坏。根据关键矿柱识别分析方法再次对剩余矿柱承载面积进行计算,并根据承载面积损失率及矿柱稳定性进行计算,结果见表 4。16 号、17 号和 18 号触发矿柱破坏后,诱发了整个采区矿柱群的链式破坏,整个矿柱链式破坏路径为:16、17、18→10→14、8→6、19、20→3、4、5、13→2、12→21→22、24。从承载面积损失率来看,当链式破坏发展到 13 号矿柱时,矿柱群系统承载面积损失率达到 0.523,超过失稳临界值 0.5,此时,可认为采区矿柱群系统整体已经发生系统性破坏,13 号矿柱即为该采区矿柱群链式失稳破坏的临界矿柱。因此,在矿山矿柱群灾害防治中,应重点考虑几个方面:一是优先加固触发矿柱,以降低初始失稳概率,预防发生链式失稳,如在 Fetr6 铬铁矿应重点加固 16 号、17 号和 18 号矿柱,阻止触发矿柱失稳;二是预留或强化断链矿柱,以阻断链式破坏蔓延,在本次案例中,可考虑对链式失稳第 2 步至第 4 步中失稳的矿柱进行强化加固,以切断可能发生的链式破坏;三是监控临界矿柱,以预警系统失稳风险,可有效避免采空区大面积垮塌事故。

表 4 矿柱群承载面积损失率及矿柱稳定性

Table 4 Loss rate of bearing area of pillar group and its stability

| 计算步骤 | 链式破坏路径 | 承载面积损失率 | 失稳临界值 | 系统失稳状态 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 16、17、18 | 0.059 | 0.500 | 否 |
| 2 | 16、17、18→10 | 0.182 | 0.500 | 否 |
| 3 | 16、17、18→10→14、8 | 0.351 | 0.500 | 否 |
| 4 | 16、17、18→10→14、8→6、19、20 | 0.419 | 0.500 | 否 |
| 5 | 16、17、18→10→14、8→6、19、20→3、4、5、13 | 0.523 | 0.500 | 是 |
| 6 | 16、17、18→10→14、8→6、19、20→3、4、5、13→2、12 | 0.648 | 0.500 | 是 |
| 7 | 16、17、18→10→14、8→6、19、20→3、4、5、13→2、12→21 | 0.721 | 0.500 | 是 |
| 8 | 16、17、18→10→14、8→6、19、20→3、4、5、13→2、12→21→22、24 | 0.910 | 0.500 | 是 |

## 5 结论

(1) 矿柱群系统破坏呈现显著的链式失稳特征,矿柱破坏顺序遵循强度由低到高的规律:强度最低的矿柱最先破坏,随后中等强度和高强度的矿柱依次发生破坏,最终可能引发整个矿柱群系统整体失稳。基于失稳的空间规模、演化阶段和致灾特征,明确提出矿柱群链式失稳的 4 种致灾模式,分别为单一矿柱单点失稳、矿柱簇群局部失稳、矿柱群区域连锁失稳和矿柱群整体系统失稳,其中单一矿柱单点失稳为初始触发模式,矿柱群整体系统失稳为终极灾害模式,可导致采空区大面积覆岩垮塌。

(2) 建立了基于触发矿柱、断链矿柱和临界矿柱的关键矿柱理论,明确了三类关键矿柱的核心作用与量化特征:触发矿柱为系统中稳定性最差的矿柱,是链式失稳的起始点;断链矿柱可通过承接转移应力阻止链式失稳蔓延,是系统失稳的止损关键;临界矿柱破坏对应矿柱群系统整体失稳的临界状态,其判定阈值为矿柱承载面积损失率达到临界值,此时系统达到失稳临界状态。

(3) 提出了链式动态失稳过程关键矿柱识别方法,通过迭代计算矿柱安全系数与承载面积损失率,可动态追踪识别链式失稳过程中的关键矿柱。利用伊朗 Fetr6 铬铁矿采区垮塌的案例对该方法进行验证,成功识别出 16 号、17 号、18 号矿柱为触发矿柱,13 号矿柱为临界矿柱,当链式破坏发展至 13 号矿柱时,矿柱群承载面积损失率达到 0.523,超过失稳临界值 0.5,此时判定系统整体失稳;同时明确了该案例中链式破坏路径为 16、17、18→10→14、8→6、19、20→3、4、5、13→2、12→21→22、24。伊朗 Fetr6 铬铁矿的案例验证了该方法具备良好的工程适用性。

**参考文献(References):**


[1] 李铁,蔡美峰,张少泉,等.我国的采矿诱发地震[J].东北地震研究,2005,21(3):1-26.
Li Tie, Cai Meifeng, Zhang Shaoquan, et al. Mining-induced seismicity in China[J]. Seismological Research of Northeast China,2005,21(3):1-26.

[2] 童琼,童迎世,康承旭.湖南矿山地震特征分类[J].地震地磁观测与研究,2023,44(4):41-47.
Tong Qiong, Tong Yingshi, Kang Chengxu. Feature categorization of mining induced tremor in Hunan Province[J]. Seismological and Geomagnetic Obseavation and Research,2023,44(4):41-47.

[3] 王管宝.石膏矿冒顶引发冲击地压机理及防治措施研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
Wang Guanbao. Study on rock burst induced by roof falling and its control methods in gypsum mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2006.

[4] 闻军,勾宪斌,赵京轶.邢台石膏矿矿震孕育过程及警示[J].地震地磁观测与研究,2007,28(4):36-40.
Wen Jun, Gou Xianbin, Zhao Jingyi. The gestation process and the caution of the Xingtai gypsum mine subsidence[J]. Seismological and Geomagnetic Obseavation and Research, 2007,28(4):36-40.

[5] Grgic D, Homand F, Hoxha D. A short-and long-term rheological model to understand the collapses of iron mines in Lorraine France[J]. Computers and Geotechnics,2003,30(7):557-570.

[6] Ai Heib M, Duval C, Theoleyre F, et al. Analysis of the historical collapse of an abandoned underground chalk mine in 1961 in Clamart(Paris France)[J]. Bulletin of Engineering Geology and Environment,2015,74(3):1001-1018.

[7] Salmi E F, Nazem M, Karakus M. The effect of rock mass gradual deterioration on the mechanism of post-mining subsidence over shallow abandoned coal mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2017,91:59-71.

[8] 周子龙,陈璐,赵源,等.双矿柱体系变形破坏及承载特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(2):420-428.
Zhou Zilong, Chen Lu, Zhao Yuan, et al. Experimental study on failure mechanism and bearing characteristic of double-pillar system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(2):420-428.

[9] 管永伟,魏义强,杨振江,等.基于数值模拟的房柱式采空区关键层-岩柱系统破坏机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):59-63.
Guan Yongwei, Wei Yiqiang, Yang Zhenjiang, et al. Failure mechanism of the key strata-pillar system in room and pillar goaf based ona numerieal simulation[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2017,28(4):59-63.

[10] 刘建新,唐春安,朱万成,等.煤岩串联组合模型及冲击地压机理德研究[J].岩土工程学报,2004,26(2):276-280.
Liu Jianxin, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. Rock-coal model for studying the rockburst[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(2):276-280.

[11] 朱德福,屠世浩,王方田,等.浅埋房式采空区煤柱群稳定性评价[J].煤炭学报,2018,43(2):390-397.
Zhu Defu, Tu Shihao, Wang Fangtian, et al. Stability evaluation on pillar system of room and pillar mining in goaf at shallow depth seam[J].Journal of China Coal Society, 2018,43(2):390-397.

[12] 冯国瑞,白锦文,史旭东,等.遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论及其应用展望[J].煤炭学报,2021,46(1):164-179.
Feng Guorui, Bai Jinwen, Shi Xudong, et al. Key pillar theory in the chain failure of residual coal pillars and its application prospect [J].Journal of China Coal Society,2021,46(1):164-179.

[13] 冯国瑞,朱卫兵,李竹,等.浅埋深蹬空底板煤柱群动态失稳机理及防治[J].煤炭学报,2022,47(1):200-209.
Feng Guorui, Zhu Weibing, Li Zhu, et al. Dynamic collapse mechanism and prevention of shallow-buried pillar group underlying working seam floor in mined-out area[J].Journal of China Coal Society,2022,47(1):200-209.

[14] 白锦文,宋诚,王红伟,等.遗留群柱中关键柱判别方法与软件[J].煤炭学报,2022,47(2):651-661.
Bai Jinwen, Song Cheng, Wang Hongwei, et al. Identification method and software of key pillar in the residual pillar system [J].Journal of China Coal Society,2022,47(2):651-661.

[15] 白锦文.复合残采区遗留群柱失稳致灾机理与防控研究[D].太原:太原理工大学,2019.
Bai Jinwen. Study on catastrophic mechanism and prevention of residual pillar group instability in complex residual mining areas[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2019.

[16] 彭府华,李庶林,冷修宁,等.降雨入渗对浅埋采场稳定性影响的微震监测分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):4154-4163.
Peng Fuhua, Li Shulin, Leng Xiuning, et al. Study of influence of rainfall permeation on shallow stope stability by microseismic Monitoring [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(Suppl.2):4154-4163.

[17] 董航宇.多矿柱载荷传递与失稳破坏特征研究[D].沈阳:东北大学,2021.
Dong Hangyu. Study on load transfer and instability failure characteristics of multiple pillars[D]. Shenyang: Northeastern University,2021.

[18] 黄敏,Kulatilake P H S W,罗嗣海,等.传统矿柱安全系数计算公式优化研究[J].矿冶工程,2020,40(4):32-37.
Huang Min, Kulatilake P H S W, Luo Sihai, et al. Optimization of traditional calculation formula for safety factor of pillars[J].Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(4):32-37.

[19] Dehghan S, Shahriar K, Maarefvand P, et al. 3-D numerical modelling of Domino failure of hard rock pillars in Fetr6 Chromite Mine, Iran, and comparison with empirical methods [J]. Journal of Central South University,2013,20:541-549.

[20] 蔡鑫,黄涯帅,周子龙,等.基于矿柱失稳风险分析的采空区关键矿柱重定义与辨识[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):216-225.
Cai Xin, Huang Yashuai, Zhou Zilong, et al. Redefinition and identification of critical pillars in goaf based on the risk analysis of pillar instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(1):216-225.