基于SRP全域相图的巷道冲击地压蝶形致灾机理与防控

赵志强[1,2],张盼栋[1,2],马念杰[1,2],郭晓菲[1,2]
(1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083;2. 煤炭行业巷道支护与围岩控制工程研究中心,北京, 100083)

摘要: 冲击地压是煤炭开采中典型的动力灾害,其孕育演化涉及复杂的"应力-介质"非线性耦合机制. 为揭示其致灾机理并实现精准防控,引入拓扑流形理论,基于蝶形破坏力学模型,构建了巷道围岩稳定性演化的SRP全域相图(Stress-Rock-Plasticity Global Phase Diagram),提出了基于几何奇异性的冲击地压机理与立体防控体系. 首先,建立了包含塑性区最大深度(R_{max})、环境应力(P_1,P_3)与介质属性(C,φ)的五维拓扑流形模型,划分了围岩稳定性的稳态区、过渡区与非稳态区,识别出表征系统状态突变的几何临界脊线. 其次,推导了跨越脊线时的动力学演化方程,揭示了冲击地压的时间压缩效应:在临界脊线附近的高敏感邻域内,微小的外部扰动或介质劣化可导致塑性区扩展速率呈指数级爆发,引发围岩的瞬态几何扩容与能量瞬时释放;研究表明,相较于黏聚力,高偏应力环境下内摩擦角的衰减对诱发动力失稳具有主控作用. 再次,基于相图几何特征,提出了稳定性度量指数(SMI),建立了通用的四级风险分区准则. 最后,构建了涵盖源头布局规避、过程耗散结构与末端吸能适应的"空间-时间-物质"立体协同防控体系,为矿井动力灾害安全治理提供了理论和方法论依据.

关键词: 冲击地压;SRP全域相图;蝶形破坏;几何奇异性;立体协同防控
中图分类号: TD 353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2026)03-0719-17

Butterfly-shaped disaster mechanism and prevention of roadway rockburst based on the global SRP phase diagram

ZHAO Zhiqiang[1,2], ZHANG Pandong[1,2], MA Nianjie[1,2], GUO Xiaofei[1,2]
(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Research Center of Roadway Support and Surrounding Rock Control Engineering in Coal Industry, Beijing 100083, China)

Abstract: Rockburst is a typical dynamic hazard in coal mining, the incubation and evolution of which involve complex nonlinear coupling between in situ stress and rock mass properties. To elucidate the disaster mechanism and enable precise prevention and control, topological manifold theory was introduced. Based on a butterfly-shaped mechanical model of failure, a stress-rock-plasticity (SRP) global phase diagram for the stability evolution of the surrounding rock in the roadway was

收稿日期: 2026-01-06 **修回日期:** 2026-02-05 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250614
基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U22A20165,U24A2086)
第一作者: 赵志强(1986—),男,山东省滨州市人,副教授,博士生导师. E-mail:caikuangren@126.com
通信作者: 张盼栋(1999—),男,陕西省渭南市人,博士研究生. E-mail: zpdznhy@163.com
引用格式: 赵志强,张盼栋,马念杰,等.基于SRP全域相图的巷道冲击地压蝶形致灾机理与防控[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):719-735.
ZHAO Zhiqiang, ZHANG Pandong, MA Nianjie, et al. Butterfly-shaped disaster mechanism and prevention of roadway rockburst based on the global SRP phase diagram[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 719-735.

constructed, and a mechanistic interpretation and three-dimensional prevention and control framework grounded in geometric singularities were proposed. First, a five-dimensional topological manifold model incorporating the maximum plastic-zone depth (R_{max}), principal stresses (P_1, P_3), and material properties (C, φ) was established. The surrounding rock stability was partitioned into a stable regime, a transitional regime, and an unstable regime, and the geometric critical ridge line characterizing state bifurcation was identified. Second, a dynamic evolution equation across the ridge line was derived, revealing a time-compression effect in rockburst: within the highly sensitive neighborhood near the critical ridge line, minor external disturbances or material degradation can trigger an exponential surge in the plastic-zone expansion rate, leading to instantaneous geometric dilation and rapid energy release from the surrounding rock. The results indicate that, compared with cohesion, degradation of the internal friction angle plays a dominant role in inducing dynamic instability under high deviatoric stress conditions. Third, a stability metric index(SMI) is proposed based on the phase diagram geometry, and a universal four-level risk zoning criterion is developed. Finally, a "space-time-material" coordinated three-dimensional prevention and control system is established, covering source-layout avoidance, process-stage dissipative structures, and terminal-stage adaptive energy absorption, providing a theoretical and methodological basis for the safe control of dynamic disasters in mines.

Key words: rockburst; SRP global phase diagram; butterfly-shaped failure; geometric singularity; three-dimensional coordinated prevention and control

冲击地压是煤炭开采面临的主要动力灾害之一,具有突发性强、破坏性大、致灾机理复杂的特点[1-2]. 随着开采深度的增加,地应力环境与围岩介质属性日益复杂,冲击地压呈现出显著的"低指标致灾"与"无征兆突发"特征,严重制约了矿井的安全高效生产[3].

针对冲击地压的发生机理与防治技术,国内外学者进行了长期的探索,建立了多维度的理论体系. 煤体夹持理论[4-5]在早期强度理论[6]的基础上进行了修改,可定量得出煤岩系统极限平衡状态下的复杂压应力. 刚度理论[7-8]认为围岩系统的刚度小于煤柱结构的刚度时会导致冲击地压. 能量理论[9]则指出煤岩系统破坏时消耗能量小于释放能量会引发冲击地压. 文献[10]认为破坏岩体和周围岩体所储存的弹性变形能均可视为冲击能量. 剩余能量理论[11]认为围岩发生动力失稳是剩余能导致的. 冲击倾向理论[12]认为煤岩自身力学性质的差异能够影响煤层发生冲击地压的概率. 此外分形理论[13]、流变理论[14]、三准则理论[15]、动静载叠加理论[16-18]、三因素理论[19]、扩容理论[20]、扰动响应失稳理论[21]和冲击地压启动理论[22]等,极大地丰富了对冲击地压的认识,并指导了卸压解危等现场实践.

然而,现有的经典理论多基于线性或准静态力学模型,在解释复杂工况下的非线性动力现象时仍存在局限性. 主要表现在:1)静态阈值与动态演化的非匹配性. 传统方法多依赖临界应力或能量指数等静态阈值进行判别,难以解释在宏观应力未达峰值时,仅因侧向应力微小偏转或介质属性微弱衰减而诱发的瞬间动力失稳[23]. 2)局部特征与全域状态的割裂. 现有研究多关注巷道表面或局部点的应力集中,缺乏对围岩塑性区在全域应力空间下几何演化规律的整体把握. 3)致灾机制解释的非自洽性. 对于低应力区冲击、非冲击倾向性煤层灾变等非典型现象,往往需要引入额外的修正参数,导致理论的普适性不足. 因此,从全域视角揭示"应力-介质"耦合作用下的非线性突变机制,是当前冲击地压研究亟待突破的关键科学问题.

近年来,文献[24]用纯数学的方法推导出巷道围岩稳定性的花瓣预警判据,发现蝶形塑性区(花瓣叶片数为4的情况)对冲击地压的发生极为敏感,"蝶形破坏理论"的提出为解答上述难题提供了新的物理视角[25-27]. 该理论基于弹塑性力学解析解,发现圆形巷道在非均匀应力场下,塑性区形态在特定条件下(如高偏应力)会发生从圆形、椭圆形向蝶形的几何突变,且具有极高的应力敏感性,这一发现揭示了冲击地压潜在的几何扩容机制. 然而,目前的蝶形理论研究多侧重于特定工况下的离散解分析,尚未建立能够涵盖连续应力

状态和介质属性演化的全域统一数学模型.

鉴于此,本文引入数学中的拓扑流形概念,构建巷道围岩稳定性演化的SRP全域相图(Stress-Rock-Plasticity Global Phase Diagram). 该模型将环境应力与介质属性映射为五维状态空间,通过识别系统状态点在相空间中跨越几何奇异性的动力学过程,揭示冲击地压的致灾机理. 本文首先构建SRP拓扑流形模型,划分巷道围岩稳定性的稳态区与非稳态区;其次,推导跨越临界脊线时的动力学演化方程,阐释“时间压缩”效应与“介质-应力”双驱动机制;最后,提出基于稳定性度量指数(*SMI*)的风险分区与“空间-时间-物质”立体协同防控策略,以期为矿井动力灾害的安全治理提供理论依据与方法论指导.

1　巷道围岩稳定性演化的SRP拓扑流形模型

冲击地压的孕育与发生是围岩系统在特定力学环境下发生的非线性动力学失稳过程[28]. 其临界状态并非取决于单一参量的阈值,而是环境应力与介质属性在多维状态空间中耦合作用的结果. 为了从整体上把握这一复杂的非线性演化机制,本章基于弹塑性力学解析理论,引入拓扑流形概念,构建巷道围岩稳定性演化的SRP全域相图模型.

1.1　SRP全域相图的理论架构与数学定义

巷道围岩的塑性区形态是应力场与岩体强度参数共同作用的几何映射. 为表征这一多物理场耦合系统的全域行为,定义“应力-岩性-塑性”(Stress-Rock-Plasticity,简称SRP)五维状态空间. 该模型本质上是一个描述围岩稳定性状态的五维拓扑流形“M”,其数学形式定义为:

$$M=\left\{S_{\text{Stress}}\oplus S_{\text{Rock}}\rightarrow S_{\text{Plasticity}}\right\},\tag{1}$$

其中,包含3个核心向量子空间:

1) 应力驱动空间(S_{Stress}):由垂直主应力P_1和侧向主应力P_3构成,即$S_{\text{Stress}}=(P_1,P_3)\in\mathbf{R}^2$($\mathbf{R}^2$为二维实数空间). 该向量决定了系统的外部驱动势能与偏应力水平,主应力比值$\eta=P_1/P_3$可表征其偏应力状态.

2) 介质属性空间(S_{Rock}):由岩体内摩擦角φ和黏聚力C构成,即$S_{\text{Rock}}=(C,\varphi)\in R^2$. 该向量决定了围岩抵抗剪切破坏的内禀极限.

3) 塑性响应序参量($S_{\text{Plasticity}}$):选取巷道围岩塑性区最大扩展半径$R_{\max}$作为表征系统状态的序参量,$S_{\text{Plasticity}}=R_{\max}\in\mathbf{R}_+$($\mathbf{R}_+$为一维实数空间). $R_{\max}$的数值突变直接对应物理空间中的体积扩容与能量耗散.

基于非均匀应力场中圆形巷道塑性区边界的隐式解析方程(Kastner方程推广形式)[29],系统状态满足隐函数关系:

$$\begin{aligned}&9(1-\eta)^2\left(\frac{R_0}{R_{\text{P}}}\right)^8+\left[-12(1-\eta)^2+6(1-\eta^2)\cos 2\theta\right]\left(\frac{R_0}{R_{\text{P}}}\right)^6+\\&\left[10(1-\eta)^2\cos^2 2\theta-4(1-\eta)^2\sin^2\varphi\cos^2 2\theta-2(1-\eta)^2\sin^2 2\theta-4(1-\eta^2)\cos 2\theta+(1+\eta)^2\right]\left(\frac{R_0}{R_{\text{P}}}\right)^4+\\&\left[-4(1-\eta)^2\cos 4\theta+2(1-\eta^2)\cos 2\theta-4(1-\eta^2)\sin^2\varphi\cos 2\theta-\frac{4C(1-\eta)\sin 2\varphi\cos 2\theta}{P_3}\right]\left(\frac{R_0}{R_{\text{P}}}\right)^2+\\&\left[(1-\eta)^2-\sin^2\varphi\left(1+\eta+\frac{2C}{P_3}\sin\varphi\right)^2\right]=0,\end{aligned}\tag{2}$$

式中:R_0为巷道半径,m;θ为蝶叶偏转角度,(°);R_{P}为塑性区半径,m.

为便于几何特征识别与工程分析,采用降维映射方法,将上述五维流形分解为2个正交的二维子流形进行表征:SRP应力响应曲面与SRP介质敏感性曲面.

式(2)为塑性区边界在极坐标下的隐式方程,其中θ为方位角(蝶叶偏转角),用于刻画蝶形塑性区的展开方位,求解可得到$R(\theta)$. 对于任意给定的应力状态(P_1,P_3)与介质参数(C,φ,R_0),本文在$\theta\in[0,2\pi)$上求解$R(\theta)$,并取其最大值定义为塑性区最大扩展半径:

$$R_{\max}=\max R(\theta).\tag{3}$$

因此,θ已被隐式纳入$R_{\max}$的求解过程相图分区与风险判识,以$R_{\max}$为主表征变量进行降维映射,而不再将θ作为独立维度展开.

1.2　SRP应力响应曲面的几何拓扑特征

固定岩体介质参数(C,φ),构建塑性区最大半径$R_{\max}$随主应力(P_1,P_3)演化的SRP应力响应曲面(如图1所示). 该曲面揭示了外部荷载驱动下的稳定性演化规律.

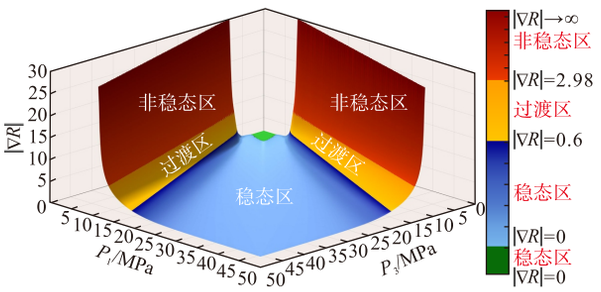


图 1 SRP 应力响应曲面(C=2 MPa, φ=35°, R_0=2 m)

Fig. 1 SRP stress-response surface

定义 SRP 曲面的敏感性梯度算子∇R:

$$\nabla R=\left(\frac{\partial R_{\max}}{\partial P_1},\frac{\partial R_{\max}}{\partial P_3}\right). \tag{4}$$

根据∇R的模量大小及其对应的几何地貌特征,将 SRP 应力响应曲面划分为 3 个具有明确物理含义的拓扑区域.

1) 稳态区——SRP 平原

在此区域内,$\|\nabla R\|\approx 0$,曲面平坦,梯度极小. 围岩处于弹性或微小塑性状态. 塑性区形态为圆形或椭圆形. 此时,系统对外部应力扰动不敏感,即大幅度的应力变化仅引起塑性区半径的微量线性增长,系统处于安全状态.

2) 过渡区——SRP 斜坡

在此区域内,$0<\|\nabla R\|<K$(K为有限常数),曲面呈倾斜状,梯度增加但未发散. 这是连接稳态与灾变的纽带. 此时,塑性区形态发生了拓扑突变,由圆形/椭圆形演化为蝶形. 但蝶形塑性区最大深度$R_{\max}$仍处于准线性增长阶段,系统对扰动表现出一定的敏感性,但并未进入“高敏感状态”. 这一区域是实施“全域主动调控”的最佳时间窗口.

3) 非稳态区——SRP 峭壁

在此区域内,$\|\nabla R\|\to\infty$,曲面近乎垂直,存在数学奇异点. 围岩处于高敏感邻域,微小的应力扰动(如主应力比值η的微降)将被无穷大的几何因子放大,导致$R_{\max}$呈指数级爆发式增长. 塑性区形态为恶性扩展的巨大蝶形,物理上表现为瞬态的动力失稳.

1.3 SRP 介质敏感性曲面的几何拓扑特征

固定地应力状态(P_1,P_3为常数),构建$R_{\max}$随介质参数(C,φ)演化的 SRP 介质敏感性曲面(图 2). 该曲面揭示了岩体劣化对系统稳定性的几何拓扑特征.

1) 内禀敏感性

当围岩处于高偏应力环境时,介质属性(C,φ)的微小退化同样可以将系统状态点从稳态推向非稳态. 这在图中表现为从远端的绿色区域(高强度岩体)向近端的红色区域(低强度岩体)的过渡.

2) 介质-应力的拓扑等价性

介质参数的劣化(C,φ降低)在拓扑几何上等效于偏应力水平的升高. 即在恒定应力场中,软岩环境下的系统状态点可能位于相图的“高敏区”,表现出类似高应力环境下的动力学特征.

SRP 应力响应曲面与介质敏感性曲面互为补充,前者界定了外部驱动的动力边界,后者界定了内部抵抗的强度边界,共同构成了描述巷道围岩全域稳定性的完整物理图像.

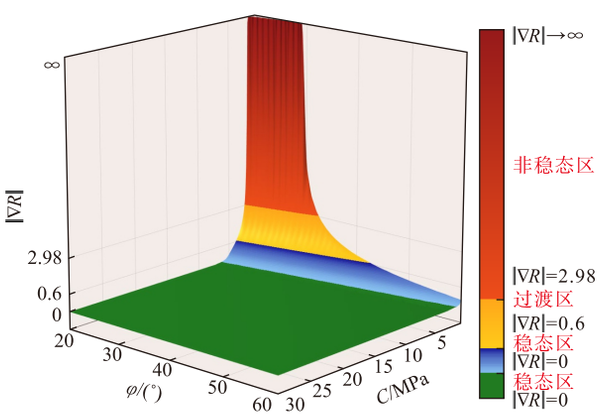


图 2 SRP 介质敏感性曲面(P_1=15 MPa,P_3=5 MPa)

Fig. 2 SRP medium-sensitivity surface

1.4 数学奇异性与物理瞬态扩容的映射

在 SRP 相图中,连接非稳态区所有梯度发散点的轨迹定义为临界脊线. 其数学定义为梯度模量发散的点集:

$$L_{\text{crit}}=\left\{(P_1,P_3)\in S\,\middle|\,\|\nabla R\|\to\infty\right\}, \tag{5}$$

式中:L_{crit}为临界脊线;S为 SRP 曲面可定义域.

临界脊线是系统稳定性的理论边界. 在物理上,它并不代表岩体强度的终结,而是代表几何稳定性的丧失. 当系统状态点越过该脊线(或极度逼近该脊线)时,围岩将失去自我约束能力,必须依靠外部强力支护或卸压干预才能维持平衡.

需要特别指出的是,数学模型中的“奇异性(无穷大)”与工程物理中的“致灾性”存在明确的映射关系. 在数学上,当主应力比值η降至某一临界值时,解析解给出$R_{\max}\to\infty$. 而在物理上,岩体介质并非无限连续,且受限于开采空间,塑性区不可能无限扩展. 所以两者的映射机制为:SRP 模型中的数学奇异性,在物理世界中映射为瞬态几何扩容. 即,当系统状态点逼近相图峭壁区时,塑性区体积V_{p}对时间t的导数$\mathrm{d}V_{\text{p}}/\mathrm{d}t$极高. 因此,SRP 全域相图的核心价值不在于计算具体的$R_{\max}$数值,而在于识别系统状态点相对于临界脊线的位置,从而预判由于几何敏感性引发的动力灾害风险.

2　冲击地压的动力学演化机理

在前述SRP全域相图中，确立了围岩稳定性的静态几何边界．然而，冲击地压本质上是一个能量瞬时释放的非线性动力学过程．利用SRP全域相图的几何特性，建立围岩系统临近或跨越临界脊线时的动力学响应方程，能够揭示冲击地压瞬时爆发与能量释放背后的物理机制．

2.1　冲击地压的物理定义与“四要素”判据

冲击地压是触发事件诱导下，巷道围岩在短时间内发生大范围破坏并释放大量能量的动力现象．基于SRP拓扑流形理论，可将其定义为：围岩系统在触发事件作用下，状态点靠近临界脊线，导致塑性区在极短时间内发生大尺度的蝶形突变，并瞬时释放巨大弹性能的动力学灾变过程．该定义包含4个核心要素，在SRP几何空间中具有明确的映射关系．

1）触发事件：微扰动的几何放大

物理含义：指推动系统状态发生改变的外部诱因，包括环境应力场的变化（主应力增量ΔP）或介质属性的劣化（黏聚力劣化量ΔC，内摩擦角劣化量$\Delta\varphi$）．

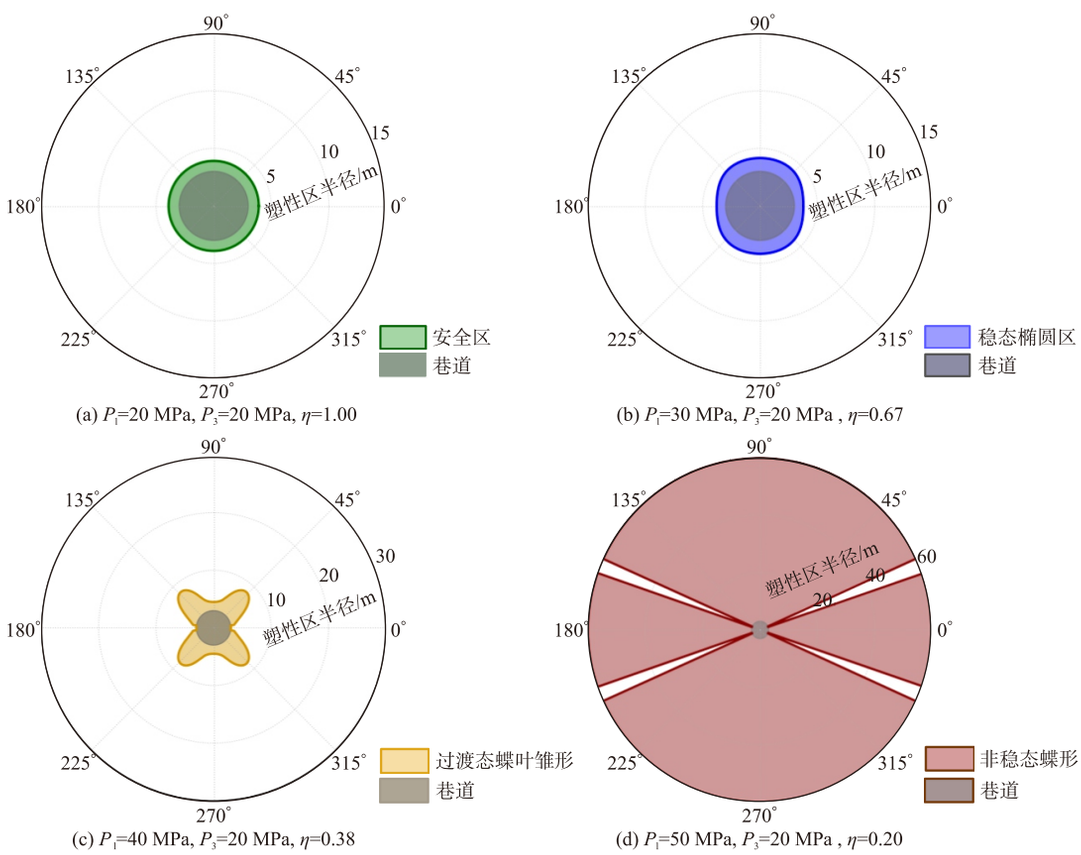
SRP机理：揭示了“敏感性”机制的作用．当围岩处于SRP相图的高敏感区（临界脊线附近）时，无需高能外部载荷，微小的采动卸荷（P_3降低）或岩体强度衰减，即可作为触发阈值，驱动系统状态发生质变．这解释了部分冲击地压发生时无明显强动力源输入的现象．

2）大范围破坏：瞬态几何扩容

物理含义：围岩破坏体积（V_p）必须超过一定临界规模，且伴随显著的体积扩容．

机理阐释：系统状态点逼近临界脊线，塑性区形态发生拓扑突变，演化为大尺度的蝶形．蝶形破坏具备显著的体积放大效应，破坏半径R_{max}随应力变化呈指数级增长．这种非线性几何扩容是冲击地压区别于常规软岩大变形的根本特征．冲击地压的发生并不要求塑性区半径达到数学上的无穷大．只要围岩状态点进入临界脊线附近的高敏感区，塑性区体积就会发生瞬态几何扩容．这种短时间内体积的恶性膨胀，足以释放巨大的破碎功和弹性能．

图3说明，随着主应力比值η的降低，塑性区经历了由“稳态圆形/椭圆→过渡态蝶叶雏形→非稳态蝶形”的拓扑突变过程．蝶叶尖端向围岩深部延伸，形成聚集弹性势能与释放能量的物理通道．



(a) P_1=20 MPa, P_3=20 MPa, η=1.00　(b) P_1=30 MPa, P_3=20 MPa , η=0.67

(c) P_1=40 MPa, P_3=20 MPa, η=0.38　(d) P_1=50 MPa, P_3=20 MPa , η=0.20

图3　塑性区形态从“圆形/椭圆形”向“蝶形”的拓扑突变

Fig. 3　Topological transition of the plastic-zone morphology from circular/elliptical to butterfly-shaped

3) 巨大能量:扩容做功与回弹释放

物理含义:释放的能量必须足以摧毁支护系统并抛出岩体.

机理阐释:蝶形叶瓣不仅是破坏区域,更是能量释放的高速通道.能量来源于两部分,一部分是扩容做功(W_{exp}),即蝶形叶片扩展过程中围岩向临空面膨胀做功;另一部分是弹性回弹,即蝶形扩容导致围岩系统刚度骤降,远场积聚的弹性势能失去约束而向巷道空间释放.瞬态扩容效应导致围岩对支护系统的约束瞬间失效,深部积聚的弹性势能失去平衡,驱动破碎岩体向自由面(巷道空间)高速抛出.因此,冲击地压的致灾机理并非单纯的应力超限,而是几何形态突变引发的体积失控扩容.

4) 极短时间:几何奇点的时间映射

物理含义:破坏过程必须是瞬时的动力过程而非流变过程.

机理阐释:SRP 曲面的梯度决定了演化速率.在临界脊线附近,破坏半径对偏应力的响应速度在数学上趋于无穷大($\nabla R\to\infty$).这种数学上的奇异性映射到物理时间域,即表现为灾害发生的瞬时性.

2.2 动力学奇异性与时间压缩效应

为揭示冲击地压动力显现的物理本质,建立破坏半径 R_{max} 随时间 t 演化的动力学方程.

1) 破坏速率的链式法则

围岩塑性区扩展速率 v_R 可通过全微分链式法则展开:

$$v_R=\frac{\mathrm{d}R_{max}}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial R_{max}}{\partial P}\cdot\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}+\frac{\partial R_{max}}{\partial U}\cdot\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t},\quad(6)$$

式中:P 为广义应力状态变量(对应 P_1 或 P_3);U 为广义介质属性(对应 C 或 φ);$\mathrm{d}P/\mathrm{d}t$ 和 $\mathrm{d}U/\mathrm{d}t$ 为物理过程的演化速率(如采动卸荷速度、岩体蠕变损伤速度),在工程尺度上通常是有限值(a_{Finite});$\partial R_{max}/\partial P$,$\partial R_{max}/\partial U$ 为几何敏感性系数,即 SRP 曲面的切线斜率(梯度).

2) 奇异性与时间压缩效应

图 4 展示了不同垂向应力下塑性区半径 R_{max} 随主应力比值 η 变化的动力学响应特征.

稳态区($\eta>0.6$):曲线斜率 $\mathrm{d}R_{max}/\mathrm{d}\eta\approx0$,表明此时围岩对侧压变化不敏感,塑性区平稳扩展.此时,v_R 主要受控于外界扰动速度,表现为静力变形.

突变点:当 η 降低至某一临界阈值(图中拐点所示)时,出现拓扑突变,曲线斜率瞬间趋向于无穷大($\mathrm{d}R_{max}/\mathrm{d}\eta\to\infty$).数学上表现为梯度爆炸,即:

$$v_R=(-\infty)\cdot(a_{Finite})\to\infty.\quad(7)$$

这意味着,即便外界扰动速率微小,由于敏感性系数趋于无穷大,破坏扩展速率 v_R 也将趋于无穷大.

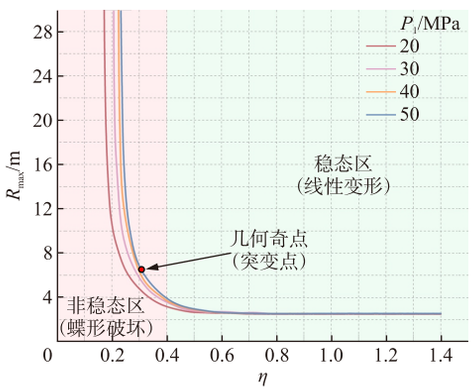


图 4 R_{max} 随 η 变化的动力学突变曲线(P_1=20~50 MPa)

Fig. 4 Kinetic bifurcation curves of the plastic-zone radius R_{max} versus lateral pressure coefficient η

物理诠释:这种数学上的"无穷大"映射到物理现实中,即表现为破坏过程在极短时间($\Delta t\to0$)内完成.将这一现象定义为时间压缩效应.它是冲击地压区别于一般大变形的动力学特征——支护系统尚未响应,围岩已完成破坏.

3) 能量释放功率的爆发

冲击地压的破坏力取决于功率密度.系统的能量释放率 $\dot{E}$ 可近似表示为:

$$\dot{E}\approx P_1\cdot\frac{\mathrm{d}V_p}{\mathrm{d}t}\propto P_1\cdot R_{max}\cdot\frac{\mathrm{d}R_{max}}{\mathrm{d}t}.\quad(8)$$

结合上述速率方程可知,在临界脊线处,由于 $\frac{\mathrm{d}R_{max}}{\mathrm{d}t}\to\infty$,能量释放功率 $\dot{E}$ 将呈现脉冲式爆发.这从动力学层面解释了冲击地压的高功率密度特征,即其本质是由几何敏感性奇点驱动的能量瞬态释放事件.

值得注意的是,SRP 模型中的临界脊线在数学上对应解析解的奇异点($\mathrm{d}R/\mathrm{d}\eta\to\infty$).然而,在工程物理现实中,冲击地压的致灾并不要求状态点完全重合于脊线,基于三方面的考虑:一是数学模型与物理实体的差异,地球介质中不存在无穷大的塑性区.SRP 相图中的脊线在物理上代表了系统的理论失稳极限.二是高敏感邻域致灾,当系统状态点逼近脊线(即进入非稳态区)时,几何敏感性系数虽未达无穷大,但已呈指数级上升.此时,微小的动静载荷扰动即可诱发塑性区形态的

爆发式恶性扩展．三是时间压缩效应，这种几何上的高敏感性映射到时间域，表现为破坏过程在极短时间内完成，支护系统来不及响应，从而形成具有高功率密度的动力灾害．

2.3　“介质-应力”双驱动致灾机制

在实际工程中，不仅应力变化会诱发冲击，岩体介质属性（C，φ）的劣化同样是关键诱因．SRP理论不仅关注应力，也通过SRP介质敏感性曲面揭示了内禀属性的致灾机理．

1）C，φ参数敏感性的非等权特征

基于图5的分析，不同力学参数对系统稳定性的控制权重存在显著差异．内摩擦角φ的主控性：在高偏应力条件下，φ对应的敏感性曲线陡峭，突变点位于衰减率较低区域．这意味着，相较于黏聚力C，内摩擦角φ对塑性区扩展具有更强的主控作用．在高偏应力环境下，φ值的微小衰减（如节理滑移、水浸弱化）更易诱发塑性区的恶性扩展．黏聚力C的辅助性：C的敏感性曲线相对平缓，突变点滞后，表明围岩对C的衰减具有相对较高的物理容忍度．

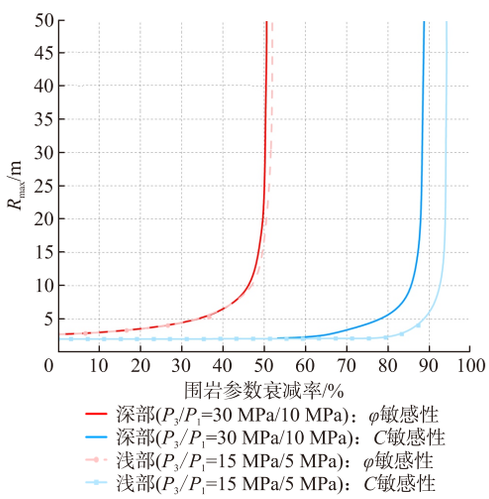


图5　不同地应力水平下围岩参数（C，φ）劣化的动力学突变与敏感性差异

Fig. 5　Kinetic bifurcation and sensitivity differences of surrounding-rock parameter (C, φ) degradation under different in-situ stress levels

2）微扰动致灾与空间随机性

该机制合理解释了冲击地压的空间随机性．在宏观应力场均匀分布区域，局部岩体介质的微小涨落（如微节理带导致φ降低），会被几何非线性机制瞬间放大，驱动该点率先跨越临界阈值，成为能量释放的突破口．

通过动力学方程推导和参数敏感性分析，证明了冲击地压是围岩系统在相空间中跨越几何奇异点时，由“时间压缩”效应和“介质-应力双驱动”机制共同作用引发的必然物理响应．

3　SRP图谱与冲击地压路径演化

冲击地压的孕育与爆发本质上是围岩系统应力状态在特定介质属性下演化的动力学过程．基于前述SRP全域相图理论，将复杂的岩石力学非线性行为映射到可视化的二维应力空间中，构建冲击地压路径规划图谱，以揭示各类冲击现象背后的统一几何演化规律．

3.1　冲击地压的全域相图映射

SRP全域相图模型揭示了冲击地压发生的几何本质是围岩系统状态点接近或跨越了相图中的临界脊线，导致塑性区形态发生拓扑突变．为了工程应用的便捷性与直观性，将三维SRP应力响应曲面投影至P_1-P_3平面，即可获得特定地质条件下的SRP应力响应相图．相图中分为无塑性区、存在塑性区2种情况，对于存在塑性区的情况，基于蝶形破坏理论中主应力比值η对塑性区形态的控制作用，构建了稳定性度量指数（Stability Monitoring Index，*SMI*），实现不同稳定性级别区域的直观呈现图谱．该图谱构成了冲击地压判识和路径规划的“几何底图”．

对于给定的围岩介质，存在2个界定稳态与非稳态的理论临界阈值：下临界阈值η_{cr1}和上临界阈值η_{cr2}．只有当主应力比值处于区间$[\eta_{cr1},\eta_{cr2}]$内时，围岩塑性区才保持相对稳定的圆形/椭圆形或小蝶形形态；一旦η超出此范围（$\eta<\eta_{cr1}$或$\eta>\eta_{cr2}$），状态点将跨越临界脊线，围岩发生指数型突变．为了统一表征低侧压卸荷与高侧压挤压2种极端应力状态下的致灾风险，定义*SMI*为当前应力状态相对于理想稳态与临界突变态的归一化偏离度：

$$SMI=\begin{cases}\dfrac{\eta-\eta_{cr1}}{1-\eta_{cr1}}, & \eta\leqslant 1,\\[2ex] \dfrac{\eta_{cr2}-\eta}{\eta_{cr2}-1}, & \eta>1.\end{cases}\tag{9}$$

η为数值1时代表理想静水压力状态，此时系统最为稳定．*SMI*指数将围岩复杂的非线性演化过程映射为$(-\infty,1]$的无量纲标量，其物理意义明确：当$0<SMI\leqslant 1$时，稳态和过渡态；当$SMI\leqslant 0$时，非稳态，$SMI=0$时，系统状态点精确落在SRP相图的临界脊线．

基于*SMI*指数的物理含义，建立了与工程实践相匹配的冲击地压风险四级图谱．该机制以“零点”作为稳态与非稳态的分水岭，以安全余量δ作为缓冲区，将围岩状态划分为安全区、低风险区、高风险区和蝶形灾变区（如图6所示），建议取$\delta=0.2\sim0.3$，具体值可根据矿井实际地质条件标定．

1）Ⅰ级：安全区（$\delta<SMI\leqslant1$）．物理特征：围岩未进入塑性状态，无塑性区，对应SRP相图中的绿色区域．工程表现：无动力显现风险．防控策略：常规支护维护，保持现有监测频率．

2）Ⅱ级：低风险区（$\delta<SMI\leqslant1$）．物理特征：系统状态点远离临界脊线，围岩处于小范围塑性状态，塑性区呈圆形或椭圆形，对应SRP相图中的蓝色区域．工程表现：巷道围岩变形微小且收敛，支护结构受力均匀，低动力显现风险．防控策略：常规支护维护，保持现有监测频率．

3）Ⅲ级：高风险区（$0<SMI\leqslant\delta$）．物理特征：系统状态点超临界脊线方向移动，虽然尚未发生蝶形突变，但偏应力已处于较高水平，抗扰动能力显著下降．此时围岩对微小的应力波动表现出敏感性，对应SRP相图中的黄色区域．工程表现：巷道变形速率加快，局部可能出现片帮或顶板下沉，微震事件频次增加但能量较低．防控策略：主动干预阶段．应立即启动应力调控措施以使主应力比值向1演化，阻止*SMI*进一步偏离零点．

4）Ⅳ级：蝶形灾变区（$SMI\leqslant0$）．物理特征：系统状态点跨越临界脊线．此时，塑性区不仅呈现蝶形，且处于爆发式扩展阶段（敏感度极高）．微小的应力扰动将导致蝶叶瞬间贯通深部弹性区，对应SRP相图中的红色区域．工程表现：具有极高的冲击地压发生概率．可能伴随巨响、煤炮频繁，支护结构严重损毁，甚至瞬间发生巷道闭合．防控策略：紧急处置阶段．必须采取强力卸压手段（如爆破断顶、水力压裂）大幅削弱最大主应力，同时实施围岩近场密集钻孔及全断面高强吸能支护，防止灾害发生．

通过这一映射，冲击地压的防控问题被转化为了一个清晰的几何问题：即如何通过工程手段，监测并控制围岩应力状态点(P_1,P_3)在图谱中的位置，使其始终驻留于稳态区，或在逼近临界脊线前被强制回调．这一图谱为理解冲击地压机理和制定防控策略提供了统一的导航基准．

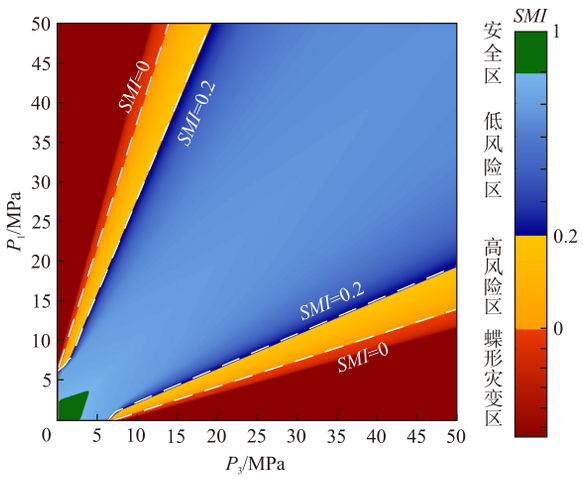


图6 SMI风险性分区云图（四色风险等级，$C=2$ MPa，$\varphi=35^\circ$，$R_0=2$ m）

Fig. 6 SMI risk zoning contour map

3.2 状态点演化轨迹分类

在SRP相图中，基于主应力幅值变化与介质属性演化，导致系统从稳态区进入非稳态区的演化路径可归纳为三类典型的几何矢量运动（图7）．

1）加载型路径（$\Delta P_{max}>0$）

在最小主应力P_{min}相对稳定的条件下，最大主应力P_{max}显著升高．这导致偏应力张量$\boldsymbol{S}_{ij}$增大．状态点在SRP相图中沿P_{max}轴正向移动．随着主应力水平的攀升，状态点向SRP曲面上的临界脊线逼近，系统积聚了极高的弹性势能，处于“高位亚稳态”，对扰动的敏感性呈指数级增强．

2）卸荷型路径（$\Delta P_{min}<0$）

在最大主应力P_{max}相对稳定的情况下，最小主应力P_{min}发生突降．这也导致偏应力张量$\boldsymbol{S}_{ij}$增大，状态点在SRP相图中沿P_{min}轴负向移动（即向坐标轴原点或低围压区移动），该路径使得系统以极快的速率从稳态区跌入非稳态区，直接触发塑性区的瞬态几何扩容．

3）内禀弱化型路径（$\Delta C<0$或$\Delta\varphi<0$）

宏观应力状态（P_{max}，P_{min}）保持不变，但围岩介质的物理力学参数（黏聚力C或内摩擦角φ）发生劣化．这是一种特殊的相对运动，在相图中表现为状态点坐标不变，但SRP曲面本身发生位移与形变（临界脊线主动向状态点扫过）．根据第2.3节的分析，内摩擦角φ的衰减对高应力环境下的稳定性具有主控作用，φ的微小降低即可导致原本处于稳态区的点被纳入非稳态区．

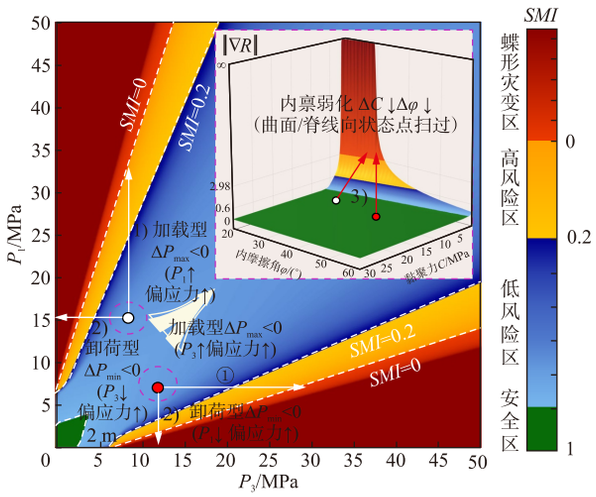


图 7　状态点演化轨迹

Fig. 7　Evolution trajectory of the state point

3.3　典型冲击地压现象的统一几何解释

1) 深部高应力型冲击：高位势能效应

随着开采深度增加，围岩即便在常规应力扰动下也易发生剧烈动力破坏，且往往无明显宏观地质构造诱因. SRP模型解释为：此现象属于典型的高位势能效应. 由图3可知，随着P_1增加（如从20 MPa增至50 MPa），动力学突变曲线的拐点显著右移. 这意味着在浅部处于安全范围的主应力比值（例如$\eta=0.5$），在深部高应力环境下已处于临界脊线附近. 此时，SRP曲面的梯度极大，微小的应力扰动ΔP即可转化为巨大的塑性区扩容ΔR. 因此，深部冲击地压的本质是系统处于高敏感的亚稳态，具有极低的触发阈值和极高的能量释放密度.

2) 构造/采动型冲击：非均匀应力驱动

这类冲击地压多发生于向斜轴部、断层附近或受采动叠加影响区域，具有显著的方向性. SRP模型解释为：此现象源于极端非均匀应力场的驱动. 构造应力或采动应力叠加导致最大主应力P_{max}异常升高，使得主应力比值η严重偏离1.0. 在SRP相图中，表现为状态点被强行置入深红色非稳态区. 此时，围岩塑性区并非渐进式扩展，而是受边界条件强制约束形成蝶形屈服，导致瞬时动力失稳. 因此，此类灾害是几何形态的强制性突变，其主控因素是应力场的高偏应力水平.

3) 坚硬顶板与煤柱型冲击：加卸载耦合效应

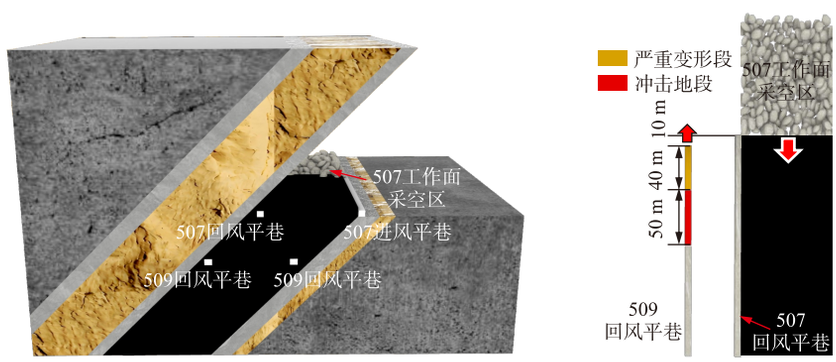
坚硬顶板悬顶导致临近区域压力集中，顶板断裂或煤柱屈服瞬间诱发猛烈冲击. SRP模型解释为：此过程是加载路径与卸荷路径的耦合. 积聚阶段，坚硬顶板悬臂梁作用导致煤柱P_1急剧升高，状态点沿P_1轴爬升，系统积聚大量弹性势能，处于高位临界状态；触发阶段，顶板断裂产生动载扰动，或煤柱边缘屈服导致侧向约束P_3丧失（η骤降）；灾变响应阶段，高P_1叠加瞬态低P_3，状态点以极高的一阶导数$\mathrm{d}\eta/\mathrm{d}t$跨越SRP曲面陡峭段，塑性区发生爆发式蝶形扩容. 因此，坚硬顶板与煤柱型冲击是超高静载荷积聚与瞬时动载卸荷共同作用的结果，几何上表现为状态点在相图中的大跨度跃迁.

通过SRP全域相图，实现了对不同类型冲击地压现象的几何归一化解释. 无论是深部的高势能效应、构造区的极端偏应力，还是坚硬顶板的加卸载耦合，其致灾物理本质是一致的：系统状态点在特定演化路径下，逼近或跨越了拓扑流形的临界脊线，触发了塑性区形态的蝶形突变.

3.4　工程案例验证

3.4.1　工程背景与采动关系

华亭矿主采煤层为煤5层，平均厚度约51 m，509回风平巷位于急倾斜特厚煤层急倾斜区（倾角约45°）. 事故发生阶段507工作面由北向南回采，509巷道向北掘进；两者空间关系表现为：507回采位置与509掘进位置水平投影相距约10 m，且507工作面位于509回风平巷上方、垂直距离约30 m，见图8.



(a) 巷道位置布置关系三维图　　(b) 工作面俯视图

图 8　507工作面与509巷道位置关系示意

Fig. 8　Schematic of the spatial relationship between the 507 working face and the 509 roadway

该近距离“斜上方采动-下伏顶板巷道”耦合关系使509巷道围岩除受巷道开挖扰动外，还叠加了工作面超前支承压力与偏应力重分布影响，具备典型的高偏应力诱发蝶形扩容的工程背景[30-31]. 该事件发生时，工作面回采与巷道掘进呈相向作业，作业间距未满足《防治煤矿冲击地压细则》关于相向采掘距离控制与单工作面作业的要求（例如采掘工作面相距约350 m时需停止其中一个工作面）. 因此，本文仅将其作为已发生事件的复盘案例用于机理与判识方法验证，不对任何处置方式作工程建议. 同时，状态点逼近/跨越临界脊线所对应的冲击显现与细则强调的停采停掘、卸压与防护措施在逻辑上相互印证，体现规范执行的必要性.

3.4.2 状态变量反演与等效孔洞参数确定

基于矿井地质资料及文献[31]各岩层地质力学参数建立大型三维数值模型，上边界施加300 m地层重力对应的垂向应力，主应力比值取平均值1.2，底部固定位移边界；先开挖509巷道并达到平衡，再回采507工作面并再次平衡，获得采动前后509回风巷道应力分布特征（图9）. 结果表明，采动影响后巷道围岩最大水平主应力显著升高，且最大/最小主应力比值$\eta=P_1/P_3$超过2.6，在触发应力作用下，巷道周边瞬态应力场环境突变，$\eta=P_1/P_3$甚至超过3.1，体现出强偏应力驱动特征.

冲击倾向性并非冲击地压发生的充分必要条件，已有研究表明无冲击倾向性煤层在高应力/结构控制条件下仍可发生冲击地压[32-35]. 为与SRP解析模型的孔洞平面应变假设一致，将509巷道矩形断面等效为圆形孔洞，取等效半径$R_0=2.5$；围岩强度参数取$C=2.0$ MPa，$\varphi=35°$. 至此，该案例可由状态向量$\boldsymbol{X}=(P_1,P_3,C,\varphi,R_0)$在SRP相空间中唯一表征，其中序参量取塑性区最大扩展半径R_{max}.

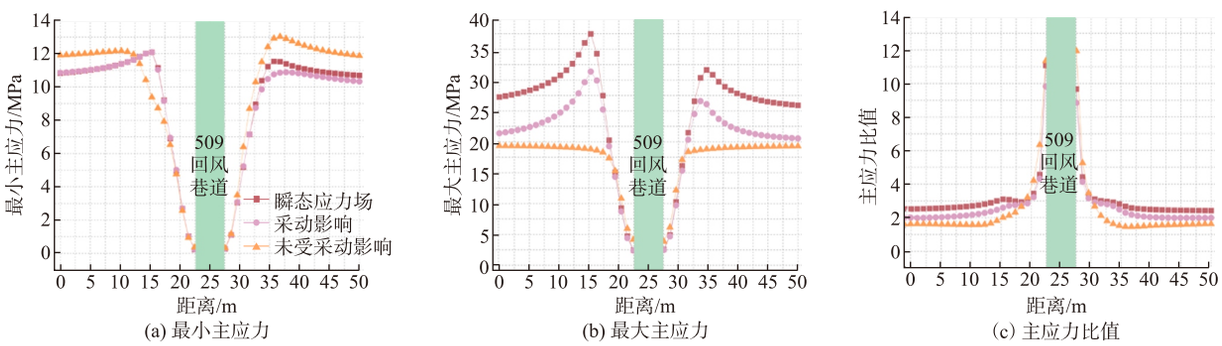


图9 509回风巷道应力分布特征

Fig. 9 Stress distribution characteristics of the 509 return airway

3.4.3 SRP相图定位、临界脊线判识与*SMI*风险判定

基于3.4.2节反演得到的采动影响应力环境，可将509回风平巷围岩应力状态在SRP工程图谱（P_1-P_3投影）中进行定位，并与风险分区进行叠加对照. 采动作用使巷道围岩呈现“最大主应力抬升＋最小主应力相对受限”的偏应力增强特征，状态点在图谱上表现为沿“η增大（P_1/P_3增大）”方向迁移，从而逐步逼近临界敏感邻域.

结合图10所示的四色风险区，将采动过程抽象为3个代表性状态点（S_1～S_3）进行刻画：

1）S_1（采动前/弱扰动）：$P_3=12.09$ MPa，$\eta=1.6$（$P_1=19.34$ MPa），状态点位于蓝色低风险区，按式（9）计算$SMI=0.700$，表明系统与临界敏感区保持较大安全裕度.

2）S_2（采动影响阶段）：位于509回风平巷距离工作面较近的40 m处，该位置$P_3=12.09$ MPa，$P_1=31.38$ MPa（$\eta=2.6$），状态点迁移至黄色高风险区，$SMI=0.202$，说明系统已进入临界脊线高敏感邻域，抗扰动能力显著下降.

3）S_3（瞬态应力扰动/局部劣化叠加）：位于509回风平巷远离掘进头部分（图10），该位置处$P_3=12.09$ MPa，$P_1=37.48$ MPa（$\eta=3.1$），状态点跨入红色蝶形灾变区，$SMI=-0.050$，对应“等效越线”的非稳态状态，具备触发蝶形扩容与动力显现的必要条件.

由此，图10给出了该工程案例“状态定位-风险区归属-跨区演化”的直观证据：509回风平巷在采动加载推动下由低风险区向高风险区逼近，当叠加瞬态扰动后实现跨区进入灾变域，为冲击地压发生提供了清晰的几何判识路径.

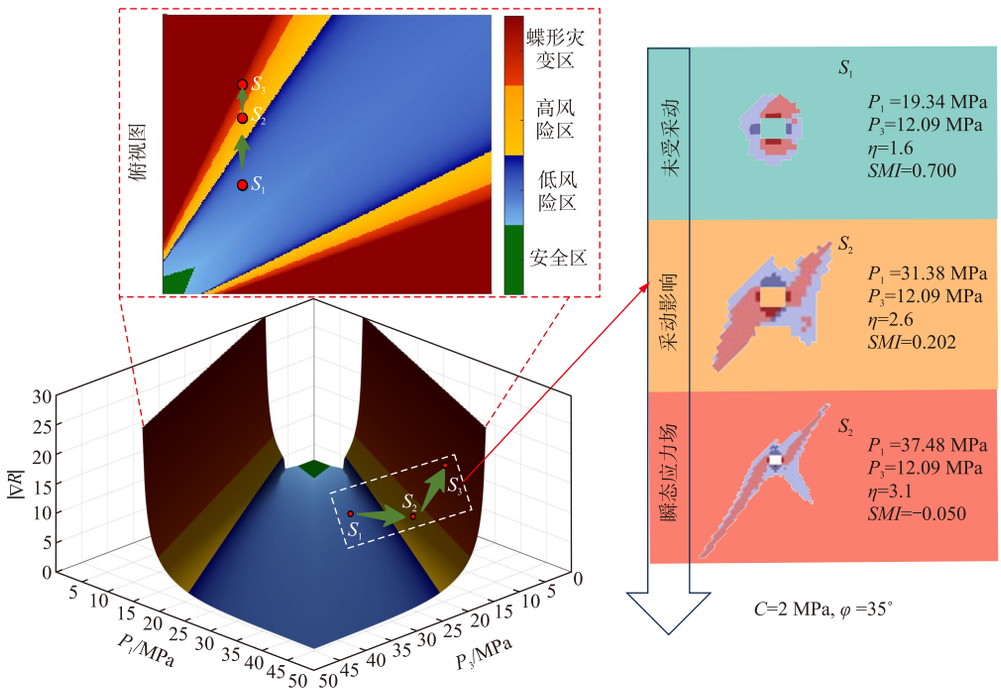


图 10　SRP图谱上采动前后状态点与风险区叠加

Fig. 10　Superposition of state points before and after mining and risk zones on the SRP map

3.4.4　路径机理解释与能量释放对照

从路径演化视角看，本案例属于典型的“斜上方采动-下伏顶板巷道”强耦合扰动情形：工作面回采引起的超前支承压力及偏应力重分布，使巷道围岩最大主应力持续抬升，而最小主应力未能同步提高，导致η快速增大，系统状态点沿图谱向临界敏感区推进.

当状态点进入黄色高风险区(S_2，$SMI\approx0.2$)后，系统对“微扰动/微劣化”的敏感性显著增强：一方面，局部应力波动(如周期来压、局部结构滑移引起的瞬态加载)可进一步推升P_1；另一方面，围岩结构面活化、软化或含水弱化等因素也可能等效降低承载能力，从而加速状态点向红色灾变区跃迁. 最终，状态点跨入红色蝶形灾变域(S_3，$SMI<0$)时，围岩塑性区将发生瞬态几何扩容，深部弹性能沿蝶形通道快速释放，表现为冲击地压的动力破坏与支护失稳. 该“采动推近—扰动触发—跨区致灾”的链条，与案例的工程背景和采动-巷道耦合扰动特征相吻合，从而验证了SRP图谱用于工程风险判识与路径解释的适用性.

4　蝶形冲击地压调控原理与防控

4.1　状态点的“路径干预”机制

基于SRP全域相图的理论框架，冲击地压的孕育与爆发本质上是围岩应力状态点在相空间中急速靠近和跨越临界脊线的动力学过程，高偏应力环境是诱发蝶形突变的外部驱动力. 因此，防控的核心逻辑在于利用工程手段对系统进行逆向干预，即通过人为调节应力状态的分布形式与演化速率，强制修正状态点的轨迹与速度. 在P_1-P_3投影图谱上，这种干预机制可具象化为针对偏应力驱动、侧向约束丧失及能量释放速率这三大致灾要素的定向调控路径.

1) 路径Ⅰ：削峰降荷——降低P_{max}. 物理原理：在SRP相图中，过高的最大主应力P_{max}(通常表现为垂直应力P_1或构造应力)是驱动状态点沿纵轴向上攀升、逼近高敏感区的核心动力. 当偏应力张量达到一定阈值，即便侧向约束尚存，围岩内部积聚的弹性能也足以维持蝶形叶片的恶性扩展. 干预机制：该路径旨在通过“做减法”来消除驱动势能. 其核心在于人为截断应力传递路径或降低区域内的应力集中程度. 相图映射：在图谱上，该操作将驱使状态点沿P_{max}轴负方向(向下)移动. 通过大幅降低偏应力水平，使系统从红色的蝶形突变区或黄色的高风险区回退至蓝绿色的稳态区，从根本上消除引发几何扩容的能量势差.

2) 路径Ⅱ：补短强束——提升P_{min}. 物理原理：蝶形破坏理论揭示，极低的最小主应力P_{min}(通常为侧向应力)是诱发圆形/椭圆形塑性区向蝶形突变的关键“几何开关”，最小主应力P_{min}的降低导

致高偏应力，使状态点横向滑移越过临界脊线．干预机制：该路径旨在通过“做加法”来补偿约束．即通过外部施加主动力或利用天然应力环境，为围岩提供必需的侧向围压，抵抗卸荷效应．相图映射：在图谱上，该操作表现为驱使状态点沿$P_{\min}$轴正方向（向右）移动，或者阻止其向左滑移．这迫使状态点趋向于$\eta=1$的静水压力线，从而在几何拓扑上关闭蝶形叶片张开的触发开关，维持塑性区的闭合形态．

3）路径Ⅲ：降速缓能——调控演化速率．物理原理：冲击地压之所以成为灾害，不仅在于塑性区的范围大，更在于其扩展过程的瞬态性（即$\mathrm{d}R/\mathrm{d}t\to\infty$和弹性能释放率$\mathrm{d}E/\mathrm{d}t\to\infty$）．如果说前2条路径是控制状态点的“空间位置”，那么本路径则是控制状态点的“移动速度”．干预机制：该路径旨在通过“以空间换时间”和“分期释放”策略，平滑应力调整的梯度．通过降低采掘扰动速度或利用支护体的可控变形，延长围岩能量释放的周期．相图映射：在动力学层面上，该操作旨在降低状态点在相空间中的运动速度矢量．将相图中原本陡峭的脉冲式能量释放突变过程拉伸为平缓的准静态变形过程，从而规避因时间压缩效应引发的动力灾害．

4.2 基于SRP的立体防控体系

单纯依赖局部卸压或加强支护的线性治理模式，在面对复杂非线性的动力灾害时往往难以奏效或防控过度．基于上述3种干预路径，构建涵盖源头、过程与末端的“空间-时间-物质”立体协同防控体系，将抽象的SRP状态调控转化为具体的工程干预措施．

1）空间维度：源头布局规避与应力场重构．空间维度的防控策略对应于路径Ⅰ和路径Ⅱ，核心在于解决冲击地压“发生区域”的预测与控制问题．通过合理的空间布局和必要的区域应力场改造，将巷道围岩的状态点强制锁定在SRP相图的稳态平原区（绿色区域）和过渡区（蓝色地带），从而在几何上消除孕育蝶形破坏的高偏应力基础．

具体而言，在矿井设计阶段，应充分利用生产地质基础条件，优化煤层群开采顺序和采掘布局、合理巷道位置、调整采掘时机、优化煤柱尺寸等手段，从几何源头规避SRP相图中的高梯度敏感区．对于优化后仍然必须穿越高敏感区的巷道，则需实施主动的应力场重构．利用大直径钻孔卸压、水力压裂或爆破断顶等技术手段，人为制造弱结构面，改造应力传递路径．这种工程干预在SRP模型中表现为显著降低偏应力水平，促使状态点远离几何突变脊线，大幅扩宽系统的安全裕度，实现源头上的主动防御．

2）时间维度：过程耗散结构与速率调控．时间维度的防控策略对应于路径Ⅲ，侧重于干预冲击地压的触发时机与能量释放速率．当受限于地质和生产条件无法完全规避高偏应力环境时，防控重点则转向时间维度的过程控制，旨在通过构建耗散结构，调控破坏演化速率$\mathrm{d}R/\mathrm{d}t$和能量释放率$\mathrm{d}E/\mathrm{d}t$．

在巷道近场围岩中施工高密度大直径卸压钻孔是构建过程耗散结构的关键措施．从SRP机理层面分析，每个钻孔周围因局部应力集中会诱导产生微小的塑性破坏区．这种微破坏效应一方面将原本可能在巷道失稳瞬间一次性爆发的巨大冲击能量拆解为若干份微小的破坏能量，在钻孔施工与后续蠕变过程中分批次提前释放，实现了能量的时间域离散化；另一方面，钻孔群作为人工缺陷，有效降低了围岩的等效弹性模量与整体刚度．在SRP全域相图中，这一效应表现为显著降低了临界响应曲面的局部梯度．通过改善围岩的几何与物理边界条件，使得系统状态点在演化过程中的切向刚度由负转正，从而避免了因状态变量微小扰动而诱发的非线性动力学失稳．

此外，基于*SMI*指数对回采速度进行动态调控是实现时间维度防控的关键．当系统监测状态逼近临界阈值（黄色或红色风险区）时，应主动降低工作面推进速度以减小外部载荷的加载速率（$\mathrm{d}P/\mathrm{d}t$）．该策略旨在利用岩体的时间相关性流变特性，使围岩内部微裂纹得以渐进扩展并充分耗散积聚的弹性能，从而避免因高应变率加载诱发系统状态点的瞬态失稳．

3）物质维度：末端吸能适应与支护增强．物质维度的防控是体系的最后一道防线，旨在应对不可避免的SRP几何扩容，体现了路径Ⅲ中“以空间换时间”的思想．其核心在于构建具有能量吸纳与适配能力的支护系统．鉴于SRP全域相图揭示的高偏应力环境下围岩塑性区扩展（$R_{\max}$激增）具有几何必然性，传统刚性支护往往因无法适应剧烈的几何扩容而失效．因此，从理念上须采用具有大延伸特性的吸能锚索及防冲液压支架．依据功-能原理（$W=\int F\cdot\mathrm{d}\gamma$，式中$W$为支护系统在围岩变形过程中所做的功，$F$为支护构件提供的支护

阻力，γ为支护构件的延伸率），利用支护构件产生的大延伸γ来主动适应围岩的瞬态几何扩容，并配合高阻力F高效吸收围岩释放的瞬态动能，将其转化为支护体的塑性变形能与热能.

同时，必须客观认识到，受限于当前工程材料与支护技术的极限能力，试图实现对高能级冲击动能的完全封堵与全量吸收是不切实际的. 当前阶段，该维度的核心策略应定位于“有限吸能、降低损害”. 通过采用高韧性支护形式来适应围岩的瞬态扩容，尽可能多地耗散冲击动能，最大程度地保护作业人员，减少对巷道空间及设备的破坏.

综上所述，该体系通过空间上的避强补弱、时间上的降速分流、物质上的吸能让压，实现了对冲击地压从源头阻断到过程控制、再到末端防护的全链条治理，如图11所示.

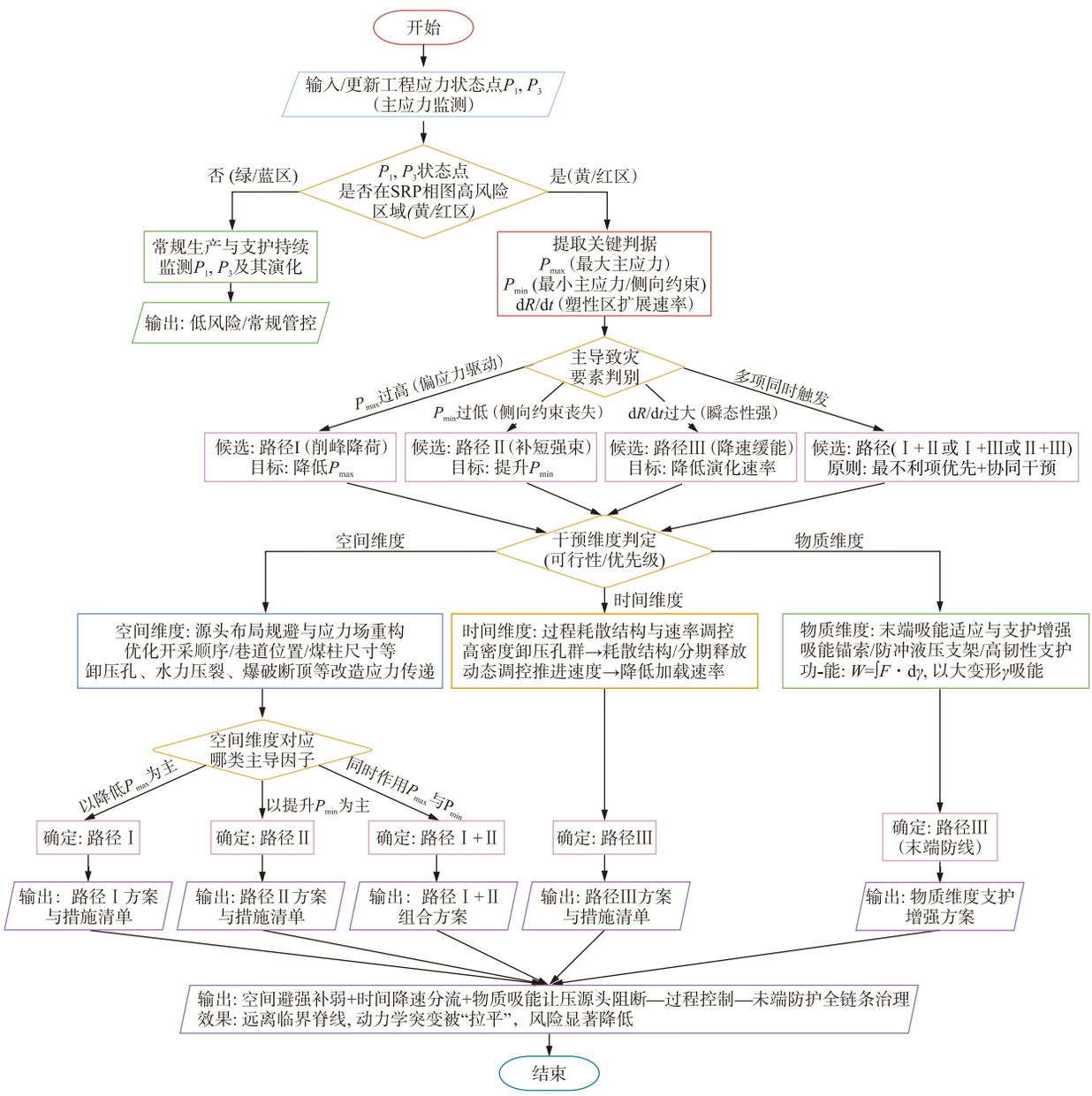


图11　基于SRP的立体防控体系

Fig. 11　SRP-based three-dimensional prevention-and-control system

4.3　SRP-SMI工程应用流程与超前判别方法

SRP-SMI工程应用流程的核心思想是将现场监测/反演得到的(P_1,P_3)以及介质参数(C,φ)映射到SRP相图，得到SMI时序曲线；在此基础上用“阈值＋趋势＋逼近时间”实现超前预警. 具体包括：

1）静态评价（采前/阶段性）：按地质报告与力学试验确定C,φ,R_0，结合原岩应力测量/反演获

取P_1,P_3,在SRP相图中定位状态点并计算SMI,得到初始风险区.

2)动态跟踪(采动过程):在推进过程中,持续更新P_1,P_3(来自钻孔应力、微震/震源机制反演、数值反演或"监测-反演"联合),得到$SMI(t)$.

3)超前判别(是否会跨入红区):当状态点进入黄色高敏感邻域($0<\mathrm{d}SMI/\mathrm{d}t\leqslant\delta$)后,采用2类超前判据.趋势判据:若$\mathrm{d}SMI/\mathrm{d}t<0$且连续若干时窗下降,则判定"向临界脊线逼近";逼近时间判据:用线性外推给出预计越线时间t^*:

$$t^*\approx\frac{SMI(t)}{\left|\mathrm{d}SMI/\mathrm{d}t\right|}. \tag{10}$$

若t^*小于工程控制所需提前量(如一个班次/一个周期来压窗口),则发布"红区跨越预警",并执行路径干预(卸压、减速、支护强化等)使$\eta=P_1/P_3$回归稳态区.

4)处置闭环:预警触发后,按"空间-时间-物质"体系实施措施,并以SMI回升(远离0点)作为效果验证指标,形成闭环.

5 讨 论

5.1 模型的假设边界与工程适用性

本研究构建的SRP全域相图模型基于各向同性、连续介质及理想弹塑性(Mohr-Coulomb准则)假设.在实际工程中,岩体往往具有显著的非均质性、层理各向异性以及复杂的天然裂隙网络,这导致现场实测的塑性区形态可能与理论模型中的理想蝶形存在一定差异,模型计算的塑性区最大深度$R_{\max}$与实际值也可能存在定量偏差.

然而,从非线性动力学的角度分析,这种定量偏差并不影响SRP模型在致灾机理判识上的有效性.根据拓扑等价原理,只要控制方程的非线性特征保持不变,系统的相空间结构即保持稳定.岩体的各向异性或非均质特征主要引起能量曲面临界位置的平移或曲率的局部畸变,并不会消除表征系统失稳的几何奇异性.因此,SRP模型的核心价值在于定性识别围岩系统是否处于向非稳态突变的演化趋势中,而非追求对某一特定点塑性区深度的绝对精确计算.在工程实践中,掌握系统状态点与临界奇异区的相对位置关系对于风险评估具有更实质的指导意义.

5.2 动力灾害的统一解释与防控范式转变

现有研究多针对坚硬顶板型、构造造成型等不同类型的冲击地压建立独立的解释模型[31].SRP全域相图则提供了一种归一化的物理视角:各类冲击显现本质上是围岩-应力系统在相空间中通过不同路径逼近或跨越同一"几何奇异区"的过程.坚硬顶板型冲击是支承压力导致垂直主应力P_1升高,引起高偏应力驱动系统状态点主动向临界脊线移动;构造卸荷型冲击多是侧向约束P_3增加,引起高偏应力使状态点跌入非稳态区.

基于此,冲击地压的防控范式应从应对单一地质因素或高应力因素转向对系统状态轨迹的主动调控.防控的核心在于控制由应力状态(P_1,P_3)和介质属性(C,φ)构成的四维状态矢量与临界奇异面的广义几何距离.无论是优化采掘布局还是实施钻孔卸压,其本质均是通过人工干预改变系统的边界条件,强制扭转系统的演化轨迹,使其始终运行在拓扑流形的稳态区域内.这种基于全域状态控制的思想,为动力灾害的安全治理提供了新的理论视角.

5.3 局限性与研究展望

尽管SRP模型在揭示冲击地压非线性机理方面具有一定优势,但仍存在局限性亟待深入研究.首先,当前模型主要基于平面应变假设,尚未全面量化中间主应力P_2对蝶形叶片扩展的抑制或增强效应,未来需引入三维强度准则(如Mogi-Coulomb或Drucker-Prager)构建三维张量相图;其次,目前的动力学方程侧重于描述跨越临界点时的瞬态突变,对岩体的时间相关性流变行为描述较为简化,下一步需结合黏弹塑性损伤力学,研究滞后型冲击地压的演化路径;最后,SMI风险等级体系的精度依赖于现场监测数据的可靠性,如何利用微震CT、光纤传感等技术精准反演非均质岩体的应力场,是将该理论从定性分析推向定量控制的关键.SRP模型所揭示的临界邻域几何扩容与能量快速释放机理具有一定普适性,未来可作为拓展方向与气体渗流-吸附解吸-应力演化等气固耦合过程结合,形成面向煤与瓦斯突出等动力灾害的几何判识框架,相关扩展与适用性验证将作为后续独立研究工作开展.

6 结 论

1)构建了巷道围岩稳定性演化的SRP全域拓扑模型.定义了包含塑性区最大深度、环境应力与介质属性的五维状态空间,并将其降维映射为可视化的SRP三维相图.该模型在几何上定量划分了围岩变形的稳态区、过渡区与非稳态区,识别

出了表征系统状态突变的临界脊线．研究表明，冲击地压发生的物理本质是围岩系统状态点在非线性演化路径下，逼近或跨越临界脊线而诱发的塑性区由稳态向瞬态几何扩容跃迁的过程．

2）揭示了基于“几何奇异性”的动力学致灾机理．推导了跨越临界脊线时的动力学演化方程，发现位于相图临界区域的围岩系统存在数学奇异性．在此状态下，塑性区扩展速率对侧向应力系数的敏感度呈指数级上升．这种几何放大效应导致了物理过程中的“时间压缩”现象，即围岩破坏在极短时间内完成并瞬时释放大量弹性能，阐释了冲击地压突发性与高功率密度的动力学根源．

3）提出了“介质-应力”双驱动的统一解释框架．利用SRP相图阐明了不同类型冲击地压的内在联系．深部高应力型冲击源于系统的高位势能效应，构造与采动型冲击源于极端偏应力驱动，而坚硬顶板型冲击则是加卸载耦合作用的结果．同时，理论分析证实，在高偏应力环境下，岩体介质属性（尤其是内摩擦角）的微小劣化具有与应力加载同等的致灾权重，为解释低应力区及无征兆冲击现象提供了理论依据．

4）建立了基于稳定性度量指数（*SMI*）的风险分区与立体防控体系．提出了量化系统状态逼近临界阈值程度的*SMI*指数，并据此制定了四级风险分区准则．构建了涵盖源头规避、过程耗散与末端吸能的“空间-时间-物质”立体协同防控策略：通过优化空间布局与应力场重构规避高敏区；通过钻孔卸压构建耗散结构以平滑突变速率；通过吸能支护适应围岩的瞬态几何扩容．该体系实现了从局部被动治理向全域主动状态调控的转变．

参考文献：

[1] 卢志国，高富强，杨　磊，等．深埋巷道动静载叠加诱冲物理模拟试验系统研制与应用[J]．中国矿业大学学报，2025，54(5)：959-970.
LU Zhiguo，GAO Fuqiang，YANG Lei，et al. Development and application of a novel physical simulation test system for deep coal burst roadway with dynamic-static combined loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(5)：959-970.

[2] 钟涛平，李振雷，陈建强，等．近直立特厚煤层应力调控防冲方法及机制[J]．中国矿业大学学报，2024，53(2)：291-306.
ZHONG Taoping，LI Zhenlei，CHEN Jianqiang，et al. Method and mechanism of rock burst prevention in the near-vertical extra-thick coal seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(2)：291-306.

[3] 曹安业，梁颖欣，杨　旭，等．人工智能赋能下的冲击地压监测预警方法研究进展[J/OL]．中国矿业大学学报：1-22[2026-03-18]．https://link.cnki.net/urlid/32.1152.td.20260313.1620.003.
CAO Anye，LIANG Yingxin，YANG Xu，et al. Research progress in rock burst monitoring and early warning methods empowered by artificial intelligence[J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology：1-22[2026-03-18]. https://link.cnki.net/urlid/32.1152.td.20260313.1620.003.

[4] 徐学锋．煤层巷道底板冲击机理及其控制研究[D]．徐州：中国矿业大学，2011.
XU Xuefeng. Research of mechanism and controlling technology of floor burst in coal seam roadway[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2011.

[5] 陈学华．构造应力型冲击地压发生条件研究[D]．阜新：辽宁工程技术大学，2004.
CHEN Xuehua. Research on the occurrence conditions of tectonic stress type of rock burst[D]. Fuxin：Liaoning Technical University，2004.

[6] COOK N G W. A note on rock bursts considered as a problem of stability[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy，1965，65：437-446.

[7] HUDSON J A，CROUCH S L，FAIRHURST C. Soft，stiff and servo-controlled testing machines：A review with reference to rock failure[J]. Engineering Geology，1972，6(3)：155-189.

[8] WAWERSIK W R，FAIRHURST C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts，1970，7(5)：561-575.

[9] BIENIAWSKI Z T，Mechanism of brittle fracture of rocks. Part I，II and III[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，1967，6：395-406.

[10] 佩图霍夫．冲击地压和突出的力学计算方法[M]．段克信，译．北京：煤炭工业出版社，1994.
PETUKHOV I M. Calculation methods in mechanics of rock bursts and outbursts[M]. DUAN Kexin，Trans. Beijing：China Coal Industry Publishing House，1994.

[11] 华安增．地下工程周围岩体能量分析[J]．岩石力学与工程学报，2003，22(7)：1054-1059.
HUA Anzeng. Energy analysis of surrounding rocks

in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1054-1059.

[12] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197-204.
ZHANG Mengtao. Instability theory and mathematical model for coal/rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(3): 197-204.

[13] XIE H, PARISEAU W G. Fractal character and mechanism of rock bursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(4): 343-350.

[14] 黄炳香,张 农,靖洪文,等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3):911-926.
HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911-926.

[15] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业大学学报, 1985, 14(3): 42-48.
LI Yusheng. Rockburst mechanism and its preliminary application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985, 14(3): 42-48.

[16] 窦林名,何 江,曹安业,等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(7): 1469-1476.

[17] 窦林名,白金正,李许伟,等. 基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 1-8.
DOU Linming, BAI Jinzheng, LI Xuwei, et al. Study on prevention and control technology of rockburst disaster based on theory of dynamic and static combined load[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 1-8.

[18] 窦林名,李振雷,何学秋. 厚煤层综放开采的降载减冲原理及其应用研究[J]. 中国矿业大学学报,2018, 47(2): 221-230.
DOU Linming, LI Zhenlei, HE Xueqiu. Principle of rockburst control by weakening static and dynamic loading using top-coal caving in the mining of thick coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 221-230.

[19] 齐庆新,刘天泉. 冲击地压的煤岩层结构破坏与摩擦滑动机理初探[C]//中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会. 第四届全国岩石动力学学术会议论文集. 成都, 1994: 231-235.
QI Qingxin, LIU Tianquan. Study on structural failure and frictional sliding mechanism of coal strata under rock burst[C]//Proceedings of the 4th National Conference on Rock Dynamics. Rock Mechanics and Engineering Society of China, Rock Dynamics Branch Committee. Chengdu, 1994: 231-235.

[20] 潘立友,杨慧珠. 冲击地压前兆信息识别的扩容理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 1): 4528-4530.
PAN Liyou, YANG Huizhu. Dilatancy theory for identification of premonitory information of rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Sup 1): 4528-4530.

[21] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2091-2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091-2098.

[22] 潘俊锋,刘少虹,杨 磊,等. 动静载作用下煤的动力学特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 206-212.
PAN Junfeng, LIU Shaohong, YANG Lei, et al. Experimental study of dynamic characteristics of coal under static and dynamic loads[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 206-212.

[23] 赵志强,马念杰,郭晓菲,等. 煤层巷道蝶型冲击地压发生机理猜想[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2689-2697.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, GUO Xiaofei, et al. Mechanism conjecture of butterfly rock burst in coal seam roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2689-2697.

[24] 乔建永. 采矿工程中的基础数学研究及其工程应用[J]. 中国科学:技术科学, 2023, 53(10): 1747-1762.
QIAO Jianyong. Research on pure mathematical problems in mining engineering and their applications[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2023, 53(10): 1747-1762.

[25] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 969-978.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, et al. A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect[J]. Journal of China

University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 969-978.

[26] 马念杰,李　季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 206-213.
MA Nianjie, LI Ji, ZHAO Zhiqiang, et al. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 206-213.

[27] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等.均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J].煤炭学报, 2016, 41(11): 2679-2688.
MA Nianjie, GUO Xiaofei, ZHAO Zhiqiang, et al. Occurrence mechanisms and judging criterion on circular tunnel butterfly rock burst in homogeneous medium [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2679-2688.

[28] 张汝佩,巩思园,丁小敏,等.大倾角特厚煤层倾斜分层开采底板型冲击地压机制研究[J/OL].煤炭科学技术, 1-17 [2025-12-26]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20251224.1512.005.
ZHANG Rupei, GONG Siyuan, DING Xiaomin, et al. Study on mechanism of floor-type rockburst in inclined slicing mining of large dip angle ultra-thick coal seam [J]. Coal Science and Technology, 1-17 [2025-12-26]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20251224.1512.005.

[29] KASTNER H. 隧道与坑道静力学[M].同济大学《隧道与坑道静力学》翻译组, 译, 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
KASTNER H. Tunnel and shaft statics[M]. Tongji University "Static of Tunnel and Stollenbau" Translation Group, Trans. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1980.

[30] 鞠文君,郑建伟,魏　东,等.急倾斜特厚煤层多分层同采巷道冲击地压成因及控制技术研究[J].采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 280-289.
JU Wenjun, ZHENG Jianwei, WEI Dong, et al. Study on the causes and control technology about the coal bump in multi-layered mining roadway in steep-thick coal seams [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 280-289.

[31] 高　旭.基于蝶形破坏理论的巷道围岩冲击地压能量释放研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2021.
GAO Xu. Study on rock burst energy release of roadway surrounding rock based on butterfly failure theory [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2021.

[32] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.

[33] 李宏艳,莫云龙,孙中学,等.煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术, 2019, 47(1): 62-68.
LI Hongyan, MO Yunlong, SUN Zhongxue, et al. Research status and prospect of coal bumps prevention and control technology [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 62-68.

[34] 董续凯,白俊杰,张俊文,等.复合坚硬顶板工作面末采顶板爆破防冲调控技术[J/OL].岩石力学与工程学报, 1-13 [2025-12-27]. https://link.cnki.net/urlid/42.1397.O3.20251210.1751.001.
DONG Xukai, BAI Junjie, ZHANG Junwen, et al. Roof-blasting control technology for rockburst prevention in the final miningstage with composite hard roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1-13 [2025-12-27]. https://link.cnki.net/urlid/42.1397.O3.20251210.1751.001.

[35] 杨世杰.特厚煤层综放开采动力灾害规律现场测试研究[D].西安:西安科技大学,2007.
YANG Shijie. Field test study on dynamic disaster law in fully mechanized top-coal caving mining of extra-thick coal seam[D]. Xi′an: Xi′an University of Science and Technology, 2007.

(责任编辑　宋　爽)