

# 某铜矿高应力采矿扰动不良围岩巷道 SSG 联合支护技术研究

Research on SSG Combined Support Technology for Disturbed Surrounding  
Rock Roadway in a Copper Mine Deep Well High Stress Mining

李志<sup>1</sup>, 张席芝<sup>2,3</sup>, 吴迪<sup>2</sup>

(1. 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司, 北京 100013; 2. 北京科技大学, 北京 100083;  
3. 金川集团股份有限公司矿山工程分公司, 甘肃 金昌 737100)

**摘要:** 某铜矿深部高应力不良岩层蠕变变形控制难度大和维护成本高, 为降低巷道支护成本, 本文分析深部巷道围岩变形破坏特征以及影响因素, 针对“喷锚+U型钢架+锚注(SUG)”联合支护巷道变形量大、维护成本高的问题, 开展了“喷锚+钢管梁支架+锚注(SSG)”联合支护研究。在确定联合支护结构参数的基础上采用FLAC有限差分分析软件, 进行SUG和SSG支护巷道围岩数值模拟与分析。结果表明: SUG和SSG支护巷道围岩最大变形分别为38.6 mm和25.7 mm, 后者比前者支护围岩最大变形降低33%。相同条件下长50 m巷道, SUG和SSG支护与两年内返修成本分别为155万元和80万元, 后者比前者降低48%。在该矿区1000 m中段不良地层开展SSG支护巷道的现场试验, 并进行长达3~5年的变形监测。结果显示, SSG支护巷道的稳定性好、安全性强和性价比高, 完全满足高应力不良岩层巷道蠕变变形控制要求, 在该矿区深部不良岩层巷道支护与返修工程中得到推广应用。

**关键词:** 深井高应力; 不良岩层; 喷锚网+U型钢拱架+锚注(SUG); 喷锚网+钢管梁+锚注(SSG)

**中图分类号:** TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)05-0016-06

**Abstract:** It is difficult to control the creep deformation of high stress poor roadway in a copper mine and high maintenance cost. In order to reduce the cost of roadway support, this paper analyzes the deformation and failure characteristics of deep surrounding rock and the main influencing factors. Aiming at the problems of large deformation and high maintenance cost of shotcrete anchor + U shaped steel frame + anchor grouting (SUG) combined support, the combined support technology of shotcrete anchor + steel tube beam support + anchor grouting (SSG) is studied. Then, on the basis of determining the two supporting parameters, FLAC finite difference analysis software is used to carry out the numerical simulation of surrounding rock of SUG and SSG supporting roadway. The results show that the maximum deformation of SUG and SSG support rocks is 38.6 mm and 25.7 mm respectively, and the maximum deformation of latter is 33% lower than that of the former. Under the same conditions, the costs of SUG and SSG support and repair within two years of 50 m roadway are 1.55 million yuan and 0.8 million yuan respectively, and the latter is 48% lower than the former. At last, the site test of SSG support was carried out in the bad strata in the 1000 m middle section of mining area, and the deformation monitoring of supporting roadway is carried out for 3-5 years. The results show that SSG support roadway has good stability, strong security and high cost performance, which meets the requirements of creep deformation control of roadway in high stress poor strata, and has been popularized and applied in the construction of deep bad strata roadway in the copper mine.

**Key words:** deep well high stress; bad rock formation; spray anchor net + U steel arch + grouting (SUG); spray anchor net + Steel beam + grouting (SSG)

## 1 前言

某铜矿资源历经40多年的开采, 目前已经进入

千米深井开采条件。深井采矿“三高一扰动”的开采特征日趋显著, 导致巷道围岩碎裂蠕变变形大、变

[作者简介] 李志(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿山安全与管理工作。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(编号:52374110)资助。

[引用格式] 李志, 张席芝, 吴迪, 等. 某铜矿高应力采矿扰动不良围岩巷道 SSG 联合支护技术研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(5): 16-21+27.

形速率快、持续时间长,严重影响深部巷道工程的稳定性<sup>[1-3]</sup>。针对该矿区不良岩层,已经开展以喷锚为主的巷道支护技术与稳定性控制研究,通过在该矿山工程试验研究与应用,初步实现对上部工程围岩稳定性控制的目的<sup>[4-7]</sup>。进入21世纪以来,随着开采向深部延伸,深井高地应力、高渗透压力以及不良地质条件,导致碎裂围岩遇水膨胀,碎胀蠕变变形破坏更加突出,原有支护工艺无法满足深部开采的条件<sup>[8-10]</sup>。因此,许多专家学者针对深部支护进行了相关研究,程勃等<sup>[11]</sup>针对沃溪坑口深井支护问题,提出了钢丝绳锚杆和整体锚网两种支护方案,并分别进行了井下试验。丁永红<sup>[12]</sup>采用数值模拟的方法分析了巷道掘进的围岩响应特征,提出了超前锚注支护+二次补强支护相结合的联合支护方式。吴国栋<sup>[13]</sup>提出采用“注浆锚杆+锚网索+梯子梁”的联合支护方案,实现加固和锚固的双重作用。李俊<sup>[14]</sup>分析主动支护和被动支护对巷道稳定性的影响,提出新的支护方案,并进行了现场试验。兰宇等<sup>[15]</sup>基于现场钻孔窥视结果和围岩破坏机理,提出“浅部注浆管+深部注浆锚索”分部注浆加固技术方案。

目前该矿区1000 m中段巷道采用“喷锚-U型钢支架+锚注(SUG)”联合支护,在1038 m和958 m分段采矿活动的强烈扰动下,支护巷道围岩破坏变形严重,巷道每年返修多达2~3次,不仅增加巷道稳定性维护费用,而且还严重影响矿山开采的生产效率。为了降低深部高应力围岩巷道支护与维护成本,近年来,针对不良岩层巷道开展了多种支护理论与支护技术的探索性研究与工程实践,但目前现有支护技术均存在不同程度的技术与成本问题。在总结前人研究基础上,本文开展“喷锚+钢管梁+锚注(SSG)”联合支护与工程试验研究。针对深部矿区工程地质条件、围岩变形破坏特征以及主要影响因素,提出SSG联合支护结构参数;采用FLAC软件对SSG支护巷道数值模拟和工程试验。根据支护结构变形监测与成本分析结果表明,SSG联合支护在1000 m返修工程以及14行回风井联络道返修工程中应用,具有显著的技术与成本优势,是深部不良岩层巷道稳定性控制必不可少的支护形式。目前SSG联合支护技术已在该铜矿矿区深部高应力、强扰动破碎围岩巷道支护中推广应用。

## 2 深井地质条件与巷道变形分析

### 2.1 深井工程地质条件

该矿区1000 m巷道工程、850 m中段工程及14行回风井联络道工程埋深接近1000 m。深部原岩应力测试结果显示,深部矿体最大主应力随深度增加而呈现非线性递增趋势,其最大主力方向以NNE~NE为主,且最大与最小主应力差随着深度增加在逐渐增大,导致深部工程围岩剪切变形破坏特征更加显著。该矿区1000 m中段运输巷道全长2798 m,是该中段矿石运输的主要工程,承担该中段100 m高度的矿石运输任务,是充填采矿的咽喉要道。巷道围岩以大理岩、混合岩、斜长角闪岩为主。岩石破碎且层间挤压强烈,节理裂隙夹有泥质物,遇水强度软化与体积膨胀,导致巷道工程变形破坏呈现挤压破裂蠕变的变形特征。目前正在开采的1018 m分段底板与1000 m中段运输巷道顶板相差仅12 m,因此其采矿活动对1000 m巷道工程影响十分显著。尤其采矿爆破震动加剧对巷道工程围岩的扰动,导致巷道围岩应力高度集中,实测围岩最大水平应力高达30 MPa,而垂直应力也接近20 MPa,导致破碎围岩碎裂蠕变变形更显著,呈现出变形快、持续时间长,总变形量大,以致巷道断面缩小难以满足使用要求而进行返修,因此巷道变形控制是深部采矿的关键技术。

### 2.2 深部巷道变形破坏特征

为控制该矿区1000 m巷道变形破坏,已经探索多种支护,包括双层喷锚网、双层喷锚网+U型钢支架、喷锚网+U型钢支架+钢筋混凝土+锚注支护等。虽然不同支护具有各自优缺点,但总体上对控制强扰动不良岩层巷道碎裂蠕变变形效果不佳:其一、支护成本高、施工工艺复杂;其二、控制碎裂蠕变变形效果不足,巷道在使用期间多次返修加固。调查发现:深部巷道变形破坏特征有三种形式:巷道底鼓变形突出(图1a),巷道两侧内挤变形严重(图1b),巷道拱顶剪切破坏(图1c)。其共同特点是:初期变形速度快。不到两周巷道收敛变形达到500 mm。巷道两帮最大收敛位移达2000 mm,底鼓变形超过2000 mm,巷道断面由5.4 m×5.2 m(宽×高)收缩为3.5 m×3.0 m。

### 2.3 巷道变形破坏影响因素

深井高地应力环境不良岩层地压形式从初期流变地压向散体地压转变,其转变速率、变形量以及变



图1 1000 m中段运输巷道变形破坏形式

形破坏形式,与围岩类型、支护形式、支护时机、支护强度以及受采动影响密切相关。因此,深部巷道变形破坏的主要影响因素有以下四个方面。

(1)不良地质条件。该矿区深部围岩节理裂隙发育,岩性以多种岩浆岩侵入的中薄层大理岩组为主,大部分地段处于蚀变强烈的大理岩中。岩体结构复杂,大多为层状碎裂结构、散体结构,结构面繁多,断层破碎带较多,进一步导致层间滑动、岩体碎裂和强度劣变。

(2)高地应力环境。1000 m巷道埋深接近1000 m,垂直应力高达23 MPa,水平构造应力将达到35 MPa。岩体在高应力作用下以流变变形为主,而十分发育的节理裂隙切割岩体成碎裂结构,岩体力学特性(抗压、抗剪强度)劣化,因此工程围岩碎裂蠕变变形突出。

(3)采矿活动影响。由于在同一水平沿脉道、穿脉道同时掘进,因此爆破震动相互叠加,不断影响巷道围岩的稳定性。大型采掘、负载运输机械设备等扰动,诱发节理裂隙岩体力学特性弱化,从而降低围岩的力学特性。当维护围岩的支护应力不能阻止这种恶化趋势,必将导致围岩力学特性逐渐变差直至变形破坏。这种岩体质量劣化发展到变形破坏,不仅与围岩本身质量密切相关,而且还取决于维护围岩稳定性的支护效果。

(4)不适应支护技术。高应力环境不良岩层巷道支护,是维护围岩稳定和控制围岩变形的决定性因素。虽然1000 m中段巷道采用不同形式的支护结构,但支护形式、支护刚度和支护时机,与巷道地压类型与围岩变形破坏特征存在不同程度的不适应性,是深部巷道变形破坏的影响因素之一。

### 3 两种联合支护参数与施工工艺

#### 3.1 SUG联合支护结构

该矿区1000 m中段巷道掘进支护和返修广泛

采用SUG联合支护结构。该支护结构参数为:U36型钢拱架+单层喷锚网+锚注,U型拱架间距1.0 m。喷射混凝土厚100 mm,混凝土等级C25;锚杆为 $\phi 18$  mm螺纹钢,锚杆长2.25 m,排距、间距为500 mm $\times$ 500 mm。钢筋网为 $\phi 6.5$  mm钢筋,网度为150 mm $\times$ 150 mm,垫板为 $\delta 10$  mm钢板,规格为200 mm $\times$ 200 mm。二次喷锚网支护参数与首次相同。双层喷锚网支护后进行注浆,注浆锚杆为 $\phi 32$  mm $\times$ 6 mm钢管,长3.0 m,排、间距为2000 mm。SUG联合支护结构在1000 m中段应用,在不良岩层和强扰动的采矿活动一下,支护巷道仍存在变形速度快、变形量大,巷道长期稳定性得不到维护,每年对同一巷道需要进行多次返修加固,严重影响矿区人员设备安全和正常生产,因此,开展“喷锚网+钢管梁支架+锚注(SSG)”联合支护结构研究。

#### 3.2 SSG联合支护结构

SSG联合支护结构为喷锚网+钢管梁+锚注(SSG)。锚杆为 $\phi 18$  mm螺纹钢,长2.25 m,排距、间距为1000 mm $\times$ 1000 mm。钢筋网 $\phi 6.5$  mm,网度为150 mm $\times$ 150 mm,垫板为 $\delta 10$  mm的A3钢板,规格为200 mm $\times$ 200 mm。注浆锚杆为 $\phi 32$  mm $\times$ 6 mm钢管,长3000 mm,排间距2000 mm。钢管支架型号为 $\phi 194$  mm $\times$ 10 mm,间距为1000 mm,断面尺寸净宽为4.6 m $\times$ 4.3 m,钢管支架结构如图2所示。

#### 3.3 支护巷道数值模拟分析

采用FLAC对两种联合支护巷道进行模拟与分析,研究支护巷道围岩应力分布与变形规律。

##### 1)SUG联合支护结构数值模拟

首先对目前应用最多的SUG联合支护巷道进行数值分析。图3所示为支护巷道围岩最大与最小主应力云图。由此可见,围岩集中应力小于无支护围岩,且应力集中区域也缩小。应力集中主要在巷道底板,最大垂直应力为40.6 MPa,最大水平应力为44.6 MPa。巷道顶板上覆岩局部区域的最大水

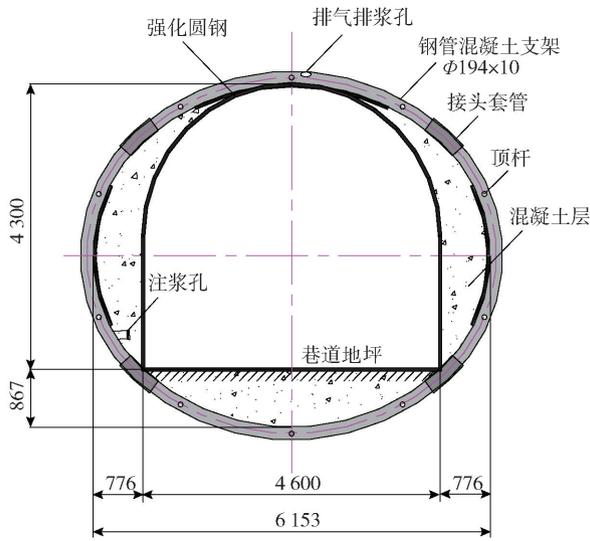
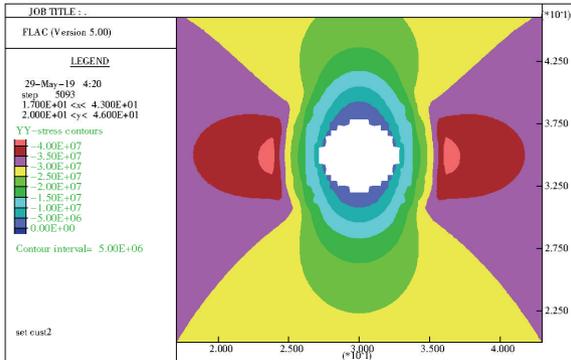


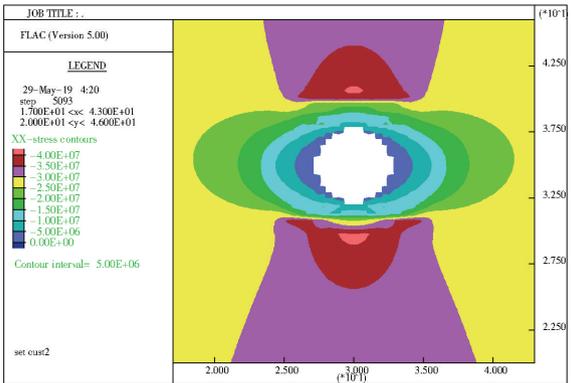
图2 1000 m 中段不良岩层支护巷道断面与椭圆形钢管梁支架结构

平应力超过 40 MPa。巷道围岩最大变形位于顶板, 其值为 38.6 mm, 比无支护巷道围岩变形量减小约 90%。

逐渐增大至峰值后减小;水平应力则沿巷道顶底板边缘向深部逐渐增大后减小至稳定,最大变形为 25.7 mm, 比 SUG 联合支护减小 33%, 由此可见, SUG 联合支护控制围岩变形效果显著。巷道围岩最大水平应力位于底板, 最大垂直应力在两帮。与 SUG 支护结构相比, SSG 联合支护巷道围岩变形量有所减小, 巷道稳定性得到提高。

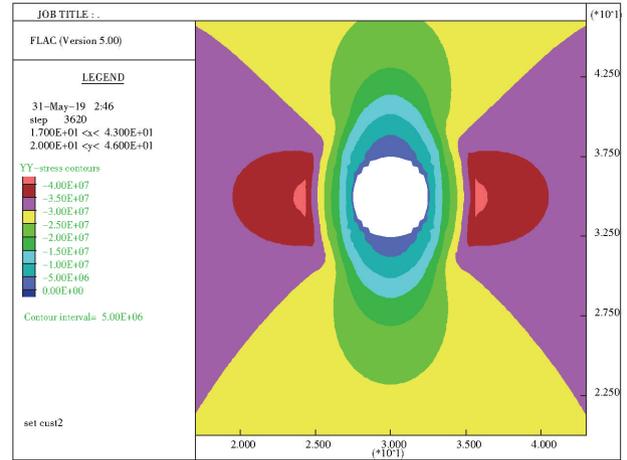


(a) 垂直应力

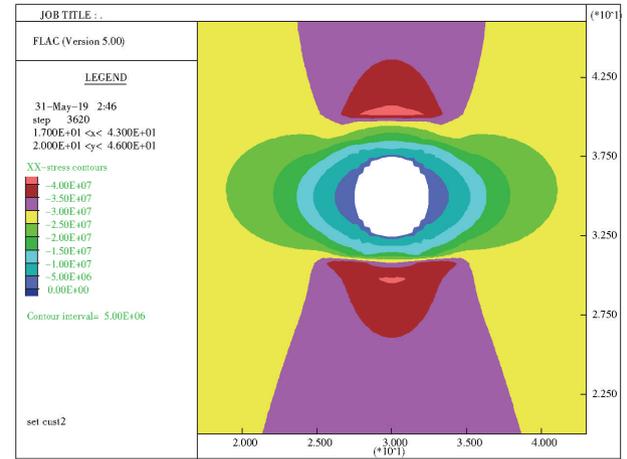


(b) 水平应力

图3 深部不良地层 SUG 联合支护巷道围岩应力云图



(a) 垂直应力



(b) 水平应力

图4 深部不良地层 SSG 联合支护巷道围岩应力云图

## 4 SSG 联合支护现场试验与成本分析

### 4.1 深部巷道支护试验研究

为验证 SSG 支护结构的可行性与可靠性, 选择 1000 m 中段上盘岩脉道长 50 m 不良岩层巷道工程, 开展巷道支护试验。图 5 所示为 SSG 试验巷道断面, 图 6 所示为钢架支架应变采集箱布置图。

针对 SSG 支护试验段巷道布置的应变检测系统, 对试验段支护巷道的钢管支架进行 3~5 年变形监测, 数据采集间隔为 24 h。图 7 所示为钢拱架应变 10 d 检测结果。由此可见, 巷道支护 10d 的钢拱

### 2) SSG 联合支护结构数值模拟

SSG 联合支护巷道围岩应力云图如图 4 所示。由此可见, 其垂直应力在巷道左右两帮边缘向深部



图5 1000 m中段试验巷道

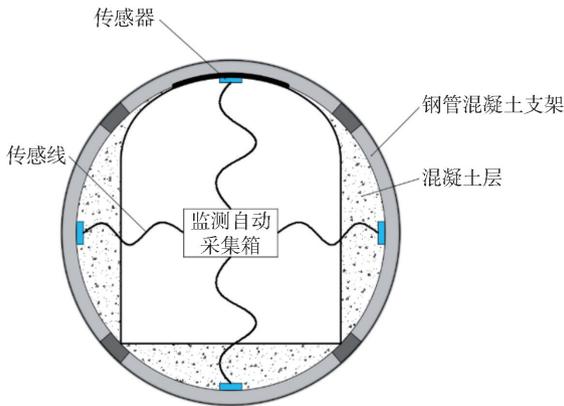


图6 巷道变形监测采集箱布置图

架已经发生明显变形。但变形较小,仅有少数测点应变明显。例如 A071598、A068280 和 A085669。

图8所示为试验巷道SSG支护结构中不同编号的钢拱架不同测点应变与时间的变形曲线。由此可见,27#支架顶拱和左拱,28#支架左拱的应变计检测的量值较大,表明上述位置的钢拱架压力较大,使支架产生应变。尤其中间位置支架的变形值得关注。18#和20#支架的三个测点变形值都较小,表明该支护结构稳定;根据整个试验段巷道的支护钢拱架变形检测结果可见,除27#支架外,其余支架的拱顶变形均较其他位置的变形小,由此证明数值分析获得的结论:支护巷道的顶拱集中应力较小,基本处于较稳定状态。相比较,位于巷道两帮钢拱架的变形监测点的检测应变较大,因此两帮围岩变形较大,并且处于显著压缩变形。

#### 4.2 两种支护结构经济分析

##### 1) 两种支护结构材料成本对比分析

表1给出该矿区1000m中段长度为50m试验巷道两种支护结构的材料成本核算(成本计算扣除使用相同的材料数量如锚杆、垫板等材料费用)。由此可见,SSG联合支护结构比SUG支护的材料费

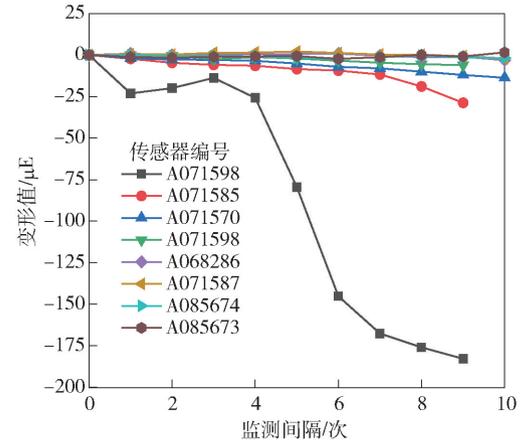
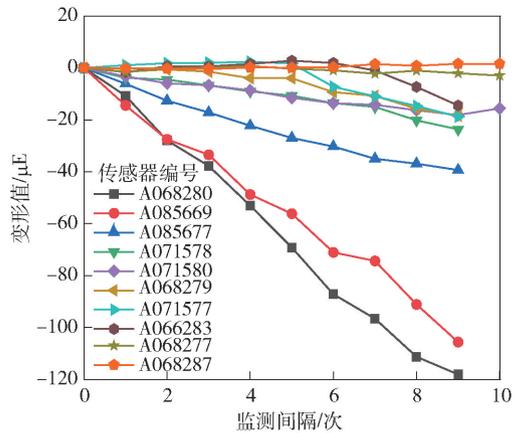


图7 试验巷道支护系统中钢拱架 10 d 变形检测曲线

少约26万元。

##### 2) 两种支护结果施工周期与成本分析

返修50m巷道SUG和SSG施工时间分别为40天和80天。SUG支护施工每班岩爆工4人和支护工2人,40天工期人工费约11万元。SSG支护80天人工费约30万元。返修中产出毛石铲运费用按实测平均断面计算,每一根钢管梁支架施工要多出约4000元,因此SSG联合支护比SUG支护成本高65万元。但SSG比SUG支护巷道稳定性时间长约12个月,2年内无需大返修维持4年左右,两年内返修成本为80万元。而SUG支护巷道每年需要返修2~3次,返修费用为77.5万元。综上所述,SSG支护比SUG支护具有稳定性好、安全性强、性价比高特点,适合于该矿区深部开采巷道支护施工应用。

## 5 结论

通过本文研究可以获得以下结论:

(1) SSG联合支护巷道围岩最大变形为25.7mm, SUG支护巷道围岩最大变形38.6mm,

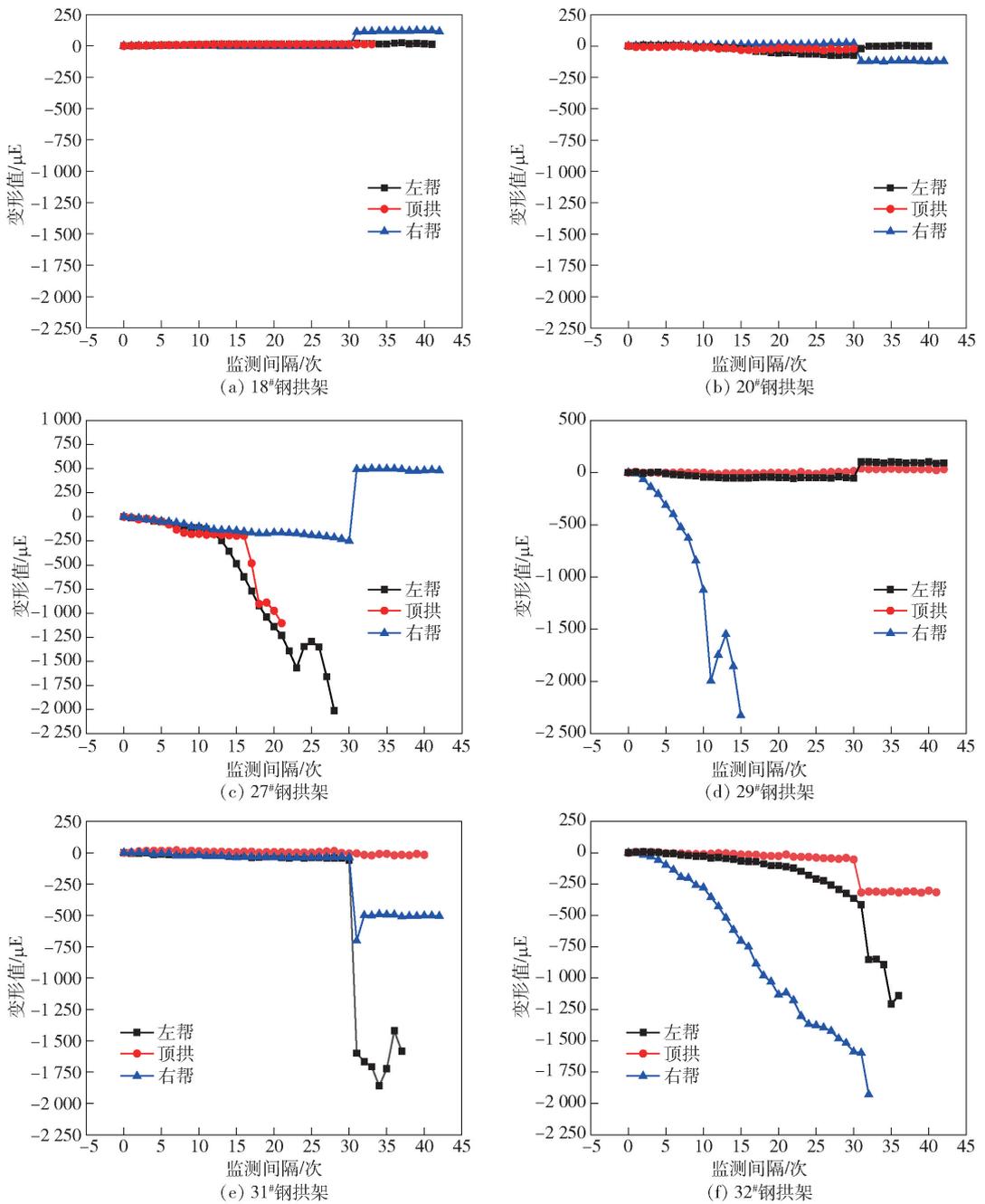


图8 SSG 支护结构不同监测点钢拱架的应变与时间的关系曲线

表1 试验巷道 SUG 和 SSG 两种联合支护结构的材料成本

支护结构	单价/元·架 <sup>-1</sup>	数量/架	喷锚网/元·m <sup>-1</sup>	试验巷道长度/m	支护费用/元
SUG	6 850	60	2 427	50	793 050
SSG	12 600	50	3 261	50	532 350

SSG 支护最大位移减小 33%。

(2)长度 50 m 两种支护巷道试验段返修工程成本,SSG 支护及两年内返修成本为 80 万元,而

SUG 支护及两年内返修成本 155 万元,前者支护比后者成本降低 48%。

(3)SSG 支护结构具有稳定性好、安全性强、性价比高等特点,适合于该矿区高应力、强扰动及破碎围岩条件的巷道稳定性控制。

[参考文献]

[1] 刘允秋,肖益盖,李同鹏,等.深井高应力破碎岩体支护技术研究与应用[J].金属矿山,2022(6):29-34.

(下转第 27 页)