

CODEN MTHPDA ISSN 0253-9993
CN 11-2190/TD

煤炭学报

JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY

中国煤炭学会
成立六十周年
特刊



1

2022
第47卷 第1期
2022年1月出版



ISSN 0253-9993



中国科学技术协会 主管 中国煤炭学会 主办

第六届《煤炭学报》编辑委员会

主任委员:刘 峰

名誉主任委员:王显政 范维唐 濮洪九 梁嘉琨

副主任委员:

宋振骥 王淀佐 钱鸣高 岑可法 洪伯潜 周世宁 张铁岗 谢和平 彭苏萍 岳光溪
刘炯天 袁 亮 张玉卓 李晓红 康红普 武 强 顾大钊 金智新 王国法 王双明
李术才 赵阳升 葛世荣 高 翔

委 员:(按姓氏笔画为序排列)

于 斌 王卫军 王 虹 王恩元 王海军 王家臣 王辅臣 王 磊 卞正富 邓 军
卢义玉 田 会 代世峰 冯国瑞 毕银丽 吕俊复 朱红青 伍永平 刘建功 刘春生
齐庆新 许家林 孙亚军 孙继平 李成武 李全生 李国富 杨小林 杨仁树 杨俊哲
来兴平 肖 睿 邱介山 何学秋 张平松 张吉雄 张旭辉 张建国 张彦禄 张党育
张瑞新 张 群 陈绍杰 范立民 周福宝 孟祥瑞 赵毅鑫 郝传波 胡振琪 姜德义
姜耀东 秦志宏 秦 勇 徐明厚 高明忠 郭文兵 郭永存 唐永志 陶伟忠 曹代勇
康立军 梁卫国 梁 冰 梁运涛 董书宁 董霁红 程卫民 程远平 程建远 程 桦
傅雪海 解 强 谭厚章 潘一山 鞠文君 魏建平

Jincai ZHANG(USA)

Kaiwen XIA(Canada)

Shanyong WANG(Australia)

Tingxiang REN(Australia)

Yi LUO(USA)

Yujing JIANG(Japan)

第三届《煤炭学报》青年专家编辑委员会

(按姓氏笔画为序排列)

卫俊涛 马立强 马 砺 王 文 王汉鹏 王宏伟 王和堂 王金满 王学文 王学斌
王绍清 王 勃 王 亮 王 琦 王登科 王鹏飞 王 磊 王 燕 石军太 石 磊
申 建 由 爽 冯子军 冯利利 朱卫兵 乔 伟 任强强 刘世奇 刘志新 刘 英
刘送永 刘 勇 刘 浪 刘清泉 刘 辉 闫 霞 孙 鸣 李 勇 李振雷 李振华
李桂臣 李 博 李鹏飞 杨 科 杨胜利 杨健健 肖 武 吴玉新 吴拥政 余伟健
宋大钊 尹希文 张 凯 张建波 张俊文 张振宇 张 强¹ 张 强² 陆 伟 陈 伟
陈尚斌 陈彦龙 陈洪月 林海飞 林雄超 周 刚 周 伟 庞义辉 郑 允 孟庆彬
赵 丹 赵春虎 赵 蕾 荆洁颖 胡国忠 段伦博 段晨龙 宫凤强 姚强岭 秦 凯
聂士斌 聂 文 桂夏辉 高亚楠 郭红玉 唐世斌 曹安业 梁 睿 彭守建 葛兆龙
蒋长宝 韩 军 鲁晶津 谢生荣 雷少刚 鲍久圣 解盘石 蔚立元 谭 波 樊红卫

潘荣锟(¹ 山东科技大学 ² 中国矿业大学)

主 编:刘 峰

副 主 编:朱拴成

执行主编:朱拴成

执行副主编:毕永华

策划编辑:韩晋平 王晓珍 张晓宁 郭晓炜 钱小静

交叉·前沿

- 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径 刘峰,郭林峰,赵路正(1)
- 无煤柱开采围岩控制技术及应用 康红普,张 晓,王东攀,田锦州,伊钟玉,蒋 威(16)
- “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO₂地下封存途径与技术难题探索
..... 王双明,申艳军,孙 强,刘 浪,师庆民,朱梦博,张 波,崔世东(45)
- 智能化煤矿数据模型及复杂巨系统耦合技术体系
..... 王国法,任怀伟,赵国瑞,巩师鑫,杜毅博,薛忠新,庞义辉,张 潇(61)
- 智能采运机组自主定位原理与技术..... 葛世荣,王世佳,曹 波,王世博,吕嘉晨(75)

采矿理论与工程

- 图像识别智能放煤技术原理与应用 王家臣,潘卫东,张国英,杨胜利,杨克虎,李良晖(87)
- 厚松散层薄基岩非对称开采井筒偏斜机理 程 桦,张亮亮,姚直书,彭世龙,郭龙辉(102)
- 采动覆岩卸荷膨胀累积效应的影响因素 许家林,秦 伟,陈晓军,胡国忠,谢建林,王晓振,朱卫兵(115)
- 保水开采覆岩等效阻水厚度的内涵、算法与应用 张东升,范钢伟,张世忠,马立强,王旭锋(128)
- 特厚煤层综放煤-矸-岩放落流动的时序规律及识别方法 刘长友,张宁波,郭凤岐,安 森,陈宝宝(137)
- 我国煤矿冲击地压防治现状与难题
..... 窦林名,田鑫元,曹安业,巩思园,贺 虎,何 江,蔡 武,李许伟(152)
- 冲击地压应力流理论及其数值实现 齐庆新,王守光,李海涛,穆鹏宇,杜伟升,杨冠宇(172)
- 煤矿深部超大断面硐室群围岩连锁失稳控制研究进展
..... 谭云亮,范德源,刘学生,张俊文,宁建国,姚强岭,付小敏(180)
- 浅埋深蹬空底板煤柱群动态失稳机理及防治 冯国瑞,朱卫兵,李 竹,白锦文,罗泽强(200)
- 岩石灾变非连续结构与多物理场效应的透明解析与透明推演
..... 鞠 杨,任张瑜,郑江韬,毛灵涛,王 凯,周宏伟,谢和平(210)
- 剪切载荷作用下岩体结构面动态接触特征数值模拟
..... 蒋宇静,张孙豪,栾恒杰,王长盛,王 冬,韩 伟(233)
- 原位应力下裂缝性致密砂岩各向异性地震波速及其渗透率关联特征
..... XIA Kaiwen,李 星,齐春艳,姚 伟,肖香姣,张 杰,NASSERI M H B(246)
- 近距离煤层蹬空开采围岩应力及裂隙演化规律
..... 赵毅鑫,刘文超,张 村,刘焕海,魏 勇,王朋朋,师洋洋,翟江澎,高 森(259)

安全科学与工程

- 厚基岩采场弱胶结岩层动力溃砂机制研究现状与展望
..... 董书宁,柳昭星,王 皓(274)

烷基糖苷活性剂对煤体结构改性及甲烷解吸特性的影响 李树刚, 闫冬洁, 严敏, 白杨, 岳敏(286)

我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望 王恩元, 张国锐, 张超林, 李忠辉(297)

瓦斯氛围下煤水固液接触特征 魏建平, 王洪洋, 司磊磊, 席宇君(323)

煤与瓦斯突出冲击气流形成及传播规律 许江, 程亮, 彭守建, 周斌, 魏仁忠, 杨海林, 李奇贤(333)

改性高岭土抑爆剂对瓦斯煤尘复合爆炸压力的影响 余明高, 贺涛, 李海涛, 郑凯(348)

鄂尔多斯盆地巨厚白垩系下煤层开采突泥溃砂物源及成灾模式
..... 李文平, 朱厅恩, 王启庆, 杨玉茹, 杨志(360)

煤与煤系气地质与勘查

中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择 秦勇, 申建, 史锐(371)

高煤阶煤层气富集机理的深化研究 桑树勋, 韩思杰, 刘世奇, 周效志, 李梦溪, 胡秋嘉, 张聪(388)

煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术 程建远, 陆自清, 蒋必辞, 李鹏, 王盼(404)

基于 IABC-ICA 的随掘地震去噪方法 程久龙, 程鹏, 李亚豪(413)

矿山环境保护

煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展
..... 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 陈歌, 赵先鸣, 李鑫, 高雅婷, 张尚国, 朱璐璐(423)

黄河流域矿区生态环境与黄河泥沙协同治理原理与技术方法 胡振琪, 赵艳玲(438)

碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤(449)

西部煤矿区深色有隔内生真菌修复机理与生态应用模式 毕银丽, 彭苏萍, 王淑惠(460)

煤炭加工与利用

碳中和目标下煤矿甲烷减排趋势模型及关键技术 刘文革, 徐鑫, 韩甲业, 王勃, 李志, 严媛(470)

生物质与油浆共热解产物分布及相互作用
..... 黄伟, 郝泽光, 张乾, 高增林, 张宏文, 彭泽宇, 杨凯, 梁丽彤(480)

毫米级颗粒在湍流场中的传热及着火特性 吴玉新, 郭慧娜, 冯乐乐, 胡振坤, 张守玉(489)

煤矿机电与智能化

可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备
..... 范京道, 封华, 宋朝阳, 任怀伟, 马英, 汪青仓, 谭杰, 刘全辉, 李川(499)

基于精确大地坐标的煤矿透明化智能综采工作面自适应割煤关键技术研究及系统应用
..... 毛善君, 鲁守明, 李存禄, 陈华州, 张鹏鹏, 范吉宏, 李鑫超, 陈金川(515)

采煤机截割状态与煤岩识别的关联载荷特征模型 刘春生, 刘延婷, 刘若涵, 白云锋, 李德根, 沈佳兴(527)

复杂煤层条件下采煤机自适应截割控制策略 赵丽娟, 王雅东, 张美晨, 金鑫, 刘宏梅(541)

矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术
..... 丁恩杰, 俞啸, 夏冰, 赵小虎, 张达, 刘统玉, 王卫东(564)

煤矿远程智能掘进面临的挑战与研究进展
..... 张旭辉, 杨文娟, 薛旭升, 张超, 万继成, 毛清华,
雷孟宇, 杜昱阳, 马宏伟, 赵友军, 李晓鹏, 胡成军, 田胜利(579)

基于空间阵列式惯性单元的防冲钻孔机器人位姿解算方法
..... 王忠宾, 司垒, 王浩, 张修峰, 赵世豪, 魏东, 谭超, 闫海峰(598)

CONTENTS

Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background
 *LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng* (1)

Strata control technology and applications of non-pillar coal mining
 *KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, et al* (16)

Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target
 *WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al* (45)

Digital model and giant system coupling technology system of smart coal mine
 *WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al* (61)

Autonomous positioning principle and technology of intelligent shearer and conveyor
 *GE Shirong, WANG Shijia, CAO Bo, et al* (75)

Principles and applications of image-based recognition of withdrawn coal and intelligent control of draw opening
 in longwall top coal caving face *WANG Jiachen, PAN Weidong, ZHANG Guoying, et al* (87)

Mechanism of shaft deflection caused by asymmetric mining in thin bedrock and deep loose strata
 *CHENG Hua, ZHANG Liangliang, YAO Zhishu, et al* (102)

Influencing factors of accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief
 *XU Jialin, QIN Wei, CHEN Xiaojun, et al* (115)

Equivalent water-resisting overburden thickness for water-conservation mining: Conception, method and
 application *ZHANG Dongsheng, FAN Gangwei, ZHANG Shizhong, et al* (128)

Sequential rules and identification method of coal-gangue-rock caving flow in fully mechanized top-coal-caving
 workface of extra thick coal seam *LIU Changyou, ZHANG Ningbo, GUO Fengqi, et al* (137)

Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China
 *DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al* (152)

Stress flow theory for coal bump and its numerical implementation
 *QI Qingxin, WANG Shouguang, LI Haitao, et al* (172)

Research progress on chain instability control of surrounding rock for super-large section chamber group in
 deep coal mines *TAN Yunliang, FAN Deyuan, LIU Xuesheng, et al* (180)

Dynamic collapse mechanism and prevention of shallow-buried pillar group underlying working seam floor in
 mined-out area *FENG Guorui, ZHU Weibing, LI Zhu, et al* (200)

Transparentized solutions and interpretation for the effects of discontinuous structures and multiphysics on rock
 failure *JU Yang, REN Zhangyu, ZHENG Jiangtao, et al* (210)

Numerical simulation on the 3D surface dynamic contact characteristics of rock discontinuity subject to shear
 loading *JIANG Yujing, ZHANG Sunhao, LUAN Hengjie, et al* (233)

Anisotropic seismic wave velocity of fractured tight sandstone under in-situ stress conditions and its correlation
 to permeability *XIA Kaiwen, LI Xing, QI Chunyan, et al* (246)

Stress and fracture evolution of surrounding rock during mining above mined out area in contiguous coal seams
 *ZHAO Yixin, LIU Wenchao, ZHANG Cun, et al* (259)

Research status and prospect on the mechanism of dynamic sand inrush at weakly cemented strata in working
 face with thick bedrock *DONG Shuning, LIU Zhaoxing, WANG Hao* (274)

Effect of alkyl glycoside on coal structure modification and methane desorption characteristics	<i>LI Shugang, YAN Dongjie, YAN Min, et al</i> (286)
Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China	<i>WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al</i> (297)
Characteristics of coal-water solid-liquid contact in gas atmosphere	<i>WEI Jianping, WANG Hongyang, SI Leilei, et al</i> (323)
Formation and propagation law of coal and gas outburst impact airflow	<i>XU Jiang, CHENG Liang, PENG Shoujian, et al</i> (333)
Influence of modified kaoline inhibitor on the explosion suppression pressure of the methane-coal dust mixture	<i>YU Minggao, HE Tao, LI Haitao, et al</i> (348)
Material source and disaster model of mud-sand inrush in coal mining under extremely thick Cretaceous in Ordos Basin	<i>LI Wenping, ZHU Tingen, WANG Qiqing, et al</i> (360)
Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China	<i>QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui</i> (371)
Comprehensive study on the enrichment mechanism of coalbed methane in high rank coal reservoirs	<i>SANG Shuxun, HAN Sijie, LIU Shiqi, et al</i> (388)
A novel technology of “long excavation/ long detection” for rapid excavation in coal mine roadway	<i>CHENG Jianyuan, LU Ziqing, JIANG Bici, et al</i> (404)
Denosing method of mine seismic while drilling data based on IABC-ICA	<i>CHENG Jiulong, CHENG Peng, LI Yahao</i> (413)
Multi-field action mechanism and research progress of coal mine water quality formation and evolution	<i>SUN Yajun, ZHANG Li, XU Zhimin, et al</i> (423)
Principle and technology of coordinated control of eco-environment of mining areas and river sediments in Yellow River watershed	<i>HU Zhenqi, ZHAO Yanling</i> (438)
Solutions to mine ecological restoration under the context of carbon	<i>BIAN Zhengfu, YU Haochen, HAN Xiaotong</i> (449)
Restoration mechanism and ecological application model of dark septate endophytic fungi in western mining area	<i>BI Yinli, PENG Suping, WANG Shuhui</i> (460)
Trend model and key technologies of coal mine methane emission reduction aiming for the carbon neutrality	<i>LIU Wenge, XU Xin, HAN Jiaye, et al</i> (470)
Product distribution and interaction of co-pyrolysis of biomass and oil slurry	<i>HUANG Wei, HAO Zeguanguang, ZHANG Qian, et al</i> (480)
Heat transfer and ignition characteristics of millimeter-scale particles in turbulent flow field	<i>WU Yuxin, GUO Huina, FENG Lele, et al</i> (489)
Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine	<i>FAN Jingdao, FENG Hua, SONG Zhaoyang, et al</i> (499)
Key technologies and system of adaptive coal cutting in transparent intelligent fully mechanized coal mining face based on precise geodetic coordinates	<i>MAO Shanjun, LU Shouming, LI Cunlu, et al</i> (515)
Correlation load characteristic model between shearer cutting state and coal-rock recognition	<i>LIU Chunsheng, LIU Yanting, LIU Ruohan, et al</i> (527)
Research on self-adaptive cutting control strategy of shearer in complex coal seam	<i>ZHAO Lijuan, WANG Yadong, ZHANG Meichen, et al</i> (541)
Development of mine informatization and key technologies of intelligent mines	<i>DING Enjie, YU Xiao, XIA Bing, et al</i> (564)
Challenges and developing of the intelligent remote control on roadheaders in coal mine	<i>ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, XUE Xusheng, et al</i> (579)
Position and attitude calculation method of anti-impact drilling robot based on spatial array inertial units	<i>WANG Zhongbin, SI Lei, WANG Hao, et al</i> (598)

冲击地压应力流理论及其数值实现

齐庆新,王守光,李海涛,穆鹏宇,杜伟升,杨冠宇

(煤炭科学研究总院 深部开采与冲击地压防治研究院,北京 100013)

摘要:冲击地压作为应力敏感型动力灾害,具象化地描述应力在煤岩介质中的空间流动特征,对于冲击地压科学评价与防控具有重要意义。为此,完善了冲击地压应力流理论,指出应力流在时间上表征了应力率,在空间上表征了应力梯度,提出了应力流张量与应力流矢量的概念及计算公式,指出应力流张量描述了不同位置、不同时刻应力的流动趋势,而应力流矢量总是与应力梯度增量方向相同。理论推导表明应力流越大的区域,应力强度因子变化越大,材料可能更易发生断裂破坏。在非线性有限元程序中开发了应力流矢量计算程序,实现了应力流的可视化,通过数值分析还原了单轴压缩试验、单煤层常规开采条件下的动态应力状态,计算结果表明:岩石单轴压缩过程中,应力流矢量呈近水平分布,向外发散;常规开采过程中,垂直方向应力流较大,由顶底板岩层指向中间煤层,水平方向应力流主要指向工作面前方,当开挖距离增大,采空区附近应力梯度明显增大,应力流矢量分布区随工作面前移。通过单轴压缩试验,发现应力流矢量方向与试样破坏变形方向较为吻合,初步验证了应力流与岩体开裂破坏的内在相关性。最后探讨了工程现场的应力流监测方法。研究成果有望为煤矿冲击危险性定量评价与差异化防治措施制定提供直观的认知形式和实用的理论工具。

关键词:应力流张量;应力流矢量;开裂破坏;应力梯度;冲击地压

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)01-0172-08

Stress flow theory for coal bump and its numerical implementation

QI Qingxin, WANG Shouguang, LI Haitao, MU Pengyu, DU Weisheng, YANG Guanyu

(Deep Mining and Rockburst Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Coal bump is a stress-sensitive dynamic disaster. It is of great significance for scientific evaluation and prevention of coal bump to quantitatively describe the spatial characteristics of stress flow in coal and rock medium. Therefore, the idea of coal bump stress flow theory was improved in this paper, and the idea that stress flow represents the stress rate in time and stress gradient in space was pointed out. The concepts of stress flow tensor and stress flow vector were proposed. It was pointed out that the stress flow tensor describes the flow trend of stress in different locations at different times, and the stress flow vector is always in the same direction as the stress gradient increment. Theoretical derivation shows that the stress intensity factor increases with the stress flow, which could lead to the material failure. The stress flow calculation program was developed using nonlinear finite element method to realize the visualization of stress flow. The dynamic stress states under uniaxial compression test and single coal seam under pillar mining conditions were simulated by the finite element program. The results show that the stress flow vectors are distribu-

收稿日期:2021-12-05 修回日期:2022-01-06 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.YG21.2003

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874176, 51904303)

作者简介:齐庆新(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士。E-mail:qiqingxin@x263.net

通讯作者:王守光(1993—),男,江苏宿迁人,助理研究员,博士。Tel:010-84264672, E-mail:wsgtsinghua@foxmail.com

引用格式:齐庆新,王守光,李海涛,等.冲击地压应力流理论及其数值实现[J].煤炭学报,2022,47(1):172-179.

QI Qingxin, WANG Shouguang, LI Haitao, et al. Stress flow theory for coal bump and its numerical implementation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 172-179.



移动阅读

ted horizontally and diffused outwardly during the process of rock uniaxial compression. In the pillar retention mining process, the stress flow vectors in vertical direction are larger than those in horizontal direction, and the stress flows in vertical direction mainly point from the roof and floor strata to the middle coal seam, while the stress flows in horizontal direction mainly point to the front of the mining face. When the excavation distance increases, the stress gradient near the mined-out areas increases significantly, and the distribution of the stress flow vectors moves forward with the mining face. Through the uniaxial compression test, it is found that the stress flow vector directions are consistent with the failure and deformation directions of the rock sample, which preliminarily demonstrates the internal correlation between the stress flow and rock failure. Finally, the monitoring and analysis method of stress flow in engineering site was discussed. The research work is expected to provide an intuitive cognitive form and a practical theoretical tool for the quantitative evaluation of coal bump risk and formulation of differentiated prevention and control measures.

Key words: stress flow tensor; stress flow vector; rock failure; stress gradient; coal bump

2010 年至今,我国累计发生冲击地压事故 25 起,造成 119 人死亡、108 人受伤,随着我国煤炭资源深部开采的常态化,具有应力敏感特征的冲击地压将成为对煤矿安全生产威胁最为显著的危害。虽然冲击地压具有发生突然和破坏剧烈的特征,但从原岩应力状态演化至最终灾害发生,显然需要孕育过程,而弄清楚冲击地压孕灾过程对于其科学防控具有重要意义。

目前行业对于冲击地压弹性能剧烈释放的本质是存在共识的^[1-3],但由于能量抽象且现场不可测的特征,往往将其关联至现场可测的应力进行研究。以此为基础,我国学者对各种类型冲击地压孕灾机理取得了丰富的研究成果。笔者^[4-5]提出冲击地压“三因素”理论,认为结构、应力和物性是主控因素,之后又进一步提出应力控制理论,突出应力对冲击地压的控制性作用。窦林名等^[6-7]提出强度弱化减冲机理,认为煤岩体高强度和应力集中是发生冲击地压的重要因素。姜耀东等^[8]认为应力状态是导致煤岩体突然失稳破坏的本质因素。潘俊峰等^[9]提出冲击启动理论,认为静载荷集中是冲击启动的内因。

应力作为常规物理量,被广泛地用来描述工程尺度的一些矿压现象。然而,现场可测的“应力”往往依赖于介质的变形,由此使得该物理量的获得只能依赖于接触式测量^[10-13],进而制约了其所能描述的空间范围。而受限于应力空间分布状态测量手段的缺乏,对于工程尺度应力状态的描述也多停留在概念层面,如应力集中、应力转移等,对于上述概念的相关性质也尚未给出进一步的定量研究。应力作为控制冲击地压的直接物理量,对其集中、转移等性质进行定量描述,对于深化工程尺度应力状态的认知,指导新型应力监测装备的研发,实现冲击地压的量化防控都有着至关重要的作用。

为此,笔者提出了应力流的概念,用以描述煤岩

体应力在时间和空间上的变化,从而为煤岩体应力转移、冲击地压孕灾机制等研究提供载体^[14]。应力本身是材料的一种状态,但应力流刻画了材料在未来的变形破坏趋势。类比于水势和电势控制了水流和电流的运动方向,应力流也描述了应力的“势”,由于“势”的存在导致了“流”的发生。当应力流经介质并达到某个临界值或具备某些特性时,煤岩体可能发生不可逆的破坏。从这个意义上说,应力流与材料变形破坏有内在相关性。

对于应力与岩体破坏的关系,一直是研究的重点^[15-16],ADYNA 等^[17]、SELLERS 和 KLERCK^[18]针对隧道围岩开挖,认为应力重分布是导致围岩破坏的根本原因;左建平等^[19-20]认为深部围岩开挖后,巷道周边应力重分布形成的应力梯度是导致围岩发生破坏的一个非常重要的因素。然而,无论是应力重分布还是重分布形成的应力梯度,都是一种结果性表述,形成对应结果显然都涉及到应力状态的变化过程。对于工程现场而言,研究冲击地压的目的是对其实现有效防控,而有效防控的理想状态是“预防为主,防患未然”,结果性表述能够给出类似于危险等级的认知,而有效防控则需要获得形成危险的过程细节,以支持措施参数和介入时机的合理选择,应力流正是针对这一切需求而提出的过程描述参量。

为此,笔者将进一步拓展和完善应力流内涵,提升应力流作为煤岩体变形、破坏等行为描述指标的普适性,提出了应力流张量及应力流矢量的概念,建立了应力流的计算公式,实现了对冲击地压“三因素”中应力因素的量化,并在自主开发的有限元程序中,融入了应力流矢量计算公式,实现了应力流可视化,通过单轴压缩、单煤层常规开采等 2 个具体的计算案例,揭示了应力流与岩石破坏的内在相关性,初步探讨了工程现场应力流的监测方法,为煤矿冲击危险性定量

评价与防治措施科学制定提供理论支撑。

1 应力流的理论公式

应力流是从时间和空间角度对应力转移过程的一种描述。在一个空间结构中,同一位置、不同时刻应力的增减情况可以用应力变化率来描述,即

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (1)$$

其中, σ 为应力张量; $\dot{\sigma}$ 为应力率张量; t 为时刻。而同一时刻、不同位置的应力不均匀分布情况可以用应力梯度来描述:

$$\mathbf{G} = \nabla \sigma, \mathbf{G}_{ijk} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_k} = \sigma_{ij,k} \quad (2)$$

其中, \mathbf{G} 为应力梯度张量;下标 i, j 和 k 为坐标轴序号, $i, j, k=1, 2, 3$ 。由式(2)知,应力梯度张量描述的只是某一瞬时空应力场的分布特征,缺乏时间维度的描述能力。根据应力流的定义,应力流指标既要能描述应力的空间不均匀性,也要能描述应力在时间维度上的变化趋势。因此,本文提出应力流张量的理论公式为

$$\mathbf{F} = \frac{\partial (\nabla \sigma)}{\partial t} \quad (3)$$

其中, \mathbf{F} 为应力流张量。由式(3)知,应力流张量描述了不同位置、不同时刻应力的流动趋势。由式(3)进一步提出应力流矢量计算公式:

$$\vec{\mathbf{F}} = \frac{\nabla \sigma|_{t_1} - \nabla \sigma|_{t_2}}{\Delta t} \mathbf{e}_L \quad (4)$$

其中, $\vec{\mathbf{F}}$ 为应力流矢量; $\nabla \sigma|_{t_1}$, $\nabla \sigma|_{t_2}$ 分别为空间一点在 t_1 和 t_2 时刻的应力梯度; Δt 为 t_1 和 t_2 时刻时间差; \mathbf{e}_L 为应力流方向矢量,其与 t_1 时刻空间一点处应力梯度方向相同。容易证明,应力流矢量 $\vec{\mathbf{F}}$ 总是指向应力梯度增量方向。

若 $(\nabla \sigma|_{t_1} - \nabla \sigma|_{t_2}) > 0$,此时应力从高应力梯度区流出,应力流矢量方向与 t_1 时刻初始应力梯度方向相同,如图1(a)所示;若 $(\nabla \sigma|_{t_1} - \nabla \sigma|_{t_2}) < 0$,此时应力流入高应力梯度区,应力流矢量方向与 t_1 时刻应力梯度方向相反,如图1(b)所示。

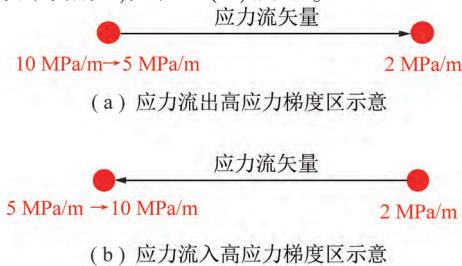


图1 应力流矢量方向示意

Fig 1 Diagram of stress flow vector direction

2 应力流与开裂破坏的理论关系探讨

应力流概念提出的初衷是量化冲击地压“三因素”理论中的应力因素。因此,应力流与岩体的开裂破坏应当具有内在相关性。下面从理论上探究2者的定性关系。

考虑某一局部区域 Γ 的应力状态 $\sigma(\mathbf{x}, t)$,设 t_0 时刻在位置 \mathbf{x}_0 处的应力为 $\sigma(\mathbf{x}_0, t_0)$, t 时刻在位置 \mathbf{x} 处的应力为 $\sigma(\mathbf{x}, t)$,位置 \mathbf{x} 在 \mathbf{x}_0 的 δ 邻域内,如图2所示,对 $\sigma(\mathbf{x}, t)$ 进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} \sigma(\mathbf{x}, t) = & \sigma(\mathbf{x}_0, t_0) + \frac{\partial \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \frac{\partial \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial t} (t - t_0) + \\ & \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x}^2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x} \partial t} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) (t - t_0) + \\ & \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial t^2} (t - t_0)^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial t \partial \mathbf{x}} (t - t_0) (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + o^n \end{aligned} \quad (5)$$

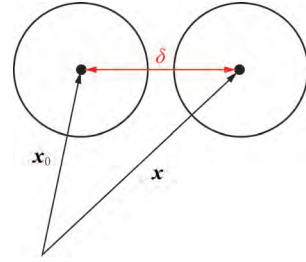


图2 局部区域内位置矢量示意

Fig 2 Diagram of position vector in local area

设 $(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = \delta \mathbf{x}$, $(t - t_0) = \Delta t$,则式(5)可简化为

$$\begin{aligned} \sigma(\mathbf{x}, t) = & \sigma(\mathbf{x}_0, t_0) + \frac{\partial \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x}} \delta \mathbf{x} + \frac{\partial \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial t} \Delta t + \\ & \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x}^2} (\delta \mathbf{x})^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x} \partial t} \delta \mathbf{x} \Delta t + \\ & \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial t^2} (\Delta t)^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial t \partial \mathbf{x}} \Delta t \delta \mathbf{x} + o^n \end{aligned} \quad (6)$$

由于邻域范围很小, $\delta \mathbf{x}$ 的高阶项可以忽略;当考虑较小时间间隔时, Δt 的高阶项也可以忽略。式(6)可改写为

$$\sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma(\mathbf{x}_0, t_0) + \frac{\partial \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x}} \delta \mathbf{x} + \frac{\partial \sigma(\mathbf{x}_0, t_0)}{\partial t} \Delta t \quad (7)$$

式(7)中第2项为应力梯度项,第3项为应力率,将式(1),(2)代入式(7)得

$$\sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma(\mathbf{x}_0, t_0) + \mathbf{G}(\mathbf{x}_0, t_0) \delta \mathbf{x} + \dot{\sigma}(\mathbf{x}_0, t_0) \Delta t \quad (8)$$

由式(8)表明在局部区域 Γ 中应力水平不仅与该点初始应力绝对值有关,还与局域范围内的应力梯度和应力率有关,应力梯度和应力率共同影响了局域内的应力水平。

借助断裂力学中岩石材料的断裂失稳条件:

$$K_I \leq K_{IC} \quad (9)$$

其中, K_I 为裂纹尖端的应力强度因子; K_{IC} 为材料的断裂韧性。而 K_I 为

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (10)$$

其中, a 为裂纹深度; Y 为形状系数。将式(8)代入式(10)得

$$K_I = Y(\sigma_0 + g\delta x + \dot{\sigma}\Delta t)\sqrt{\pi a} \quad (11)$$

其中, g 为标量应力梯度。因此,在基础应力相同的情况下,某点的应力梯度或应力率越大,则应力强度因子 K_I 越大,材料就更易发生断裂破坏。

3 应力流数值算例

根据式(1)~(4),在自主开发的非线性有限元程序 MINTEC 中融入应力流计算模块,分别开展岩石单轴压缩试验、单煤层常规开采等 2 个数值算例,验

证应力流与开裂破坏的内在相关性。

3.1 实验室尺度单轴压缩破坏的应力流过程

图 3 为一长方体岩石试样单轴压缩数值算例,单元数为 10,节点数为 44,试样尺寸为:10 cm×10 cm×20 cm,设置岩石弹性模量为 7.2 GPa,泊松比为 0.167,密度 2 400 kg/m³,摩擦因数为 1.7,本构关系采用 Drucker-Prager 准则。在试样上表面施加均匀压缩变形,直至产生屈服破坏。

如图 3 所示,分别为计算模型、岩石屈服破坏前后的轴向变形对比、岩石屈服破坏前后的最大主应力(S_1)对比和试样屈服破坏时应力流矢量分布,其中轴向变形以压缩变形为负,mm;最大主应力以压应力为正,MPa。由图 3 可知,岩石单轴压缩屈服破坏前后的位移场和应力场分布相似,水平方向分布均匀,垂直方向梯度分布。应力流矢量呈近水平分布,向外发散,这是由于单轴压缩时垂直方向应力梯度很小,在该方向几乎没有应力流产生,而水平方向应力梯度随加载而逐渐增大,所以应力流方向呈水平向外分布。需要说明的是,应力流矢量方向一般与主应力方向不同。

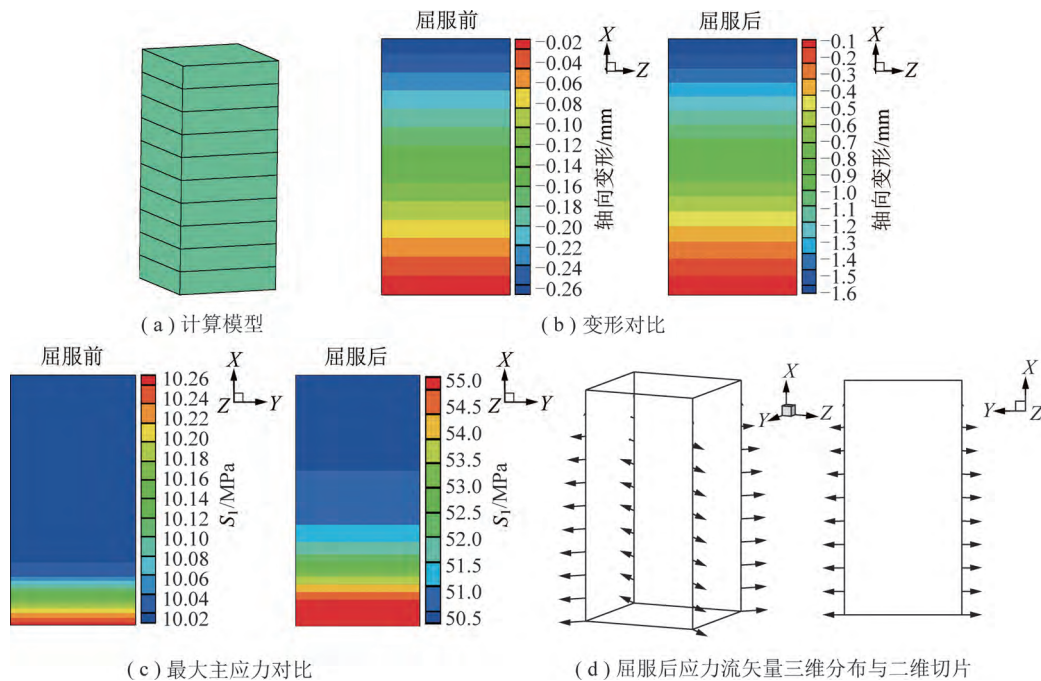


图 3 岩石单轴压缩过程中应力流矢量计算

Fig 3 Calculation of stress flow vectors during rock uniaxial compression

为了对数值计算结果进行验证,开展煤岩单轴压缩破坏试验,并采用天津三英精密仪器公司生产的 nanoVoxel-4000 CT 扫描系统对煤样受载前及开始产生破坏时的状态进行 CT 扫描,如图 4 所示,扫描主要参数为:扫描电压 180 kV,电流 350 μ A,曝光时间

0.68 s,放大倍数 6.614,空间分辨率 15.119 5 μ m,帧数 3 240。为了使煤样破坏后仍保持较完整形态以便对其进行 CT 扫描,使用保鲜膜对煤样进行包裹。

利用煤样破坏前后的 CT 扫描图,采用 Digital Volume Correlation(DVC)方法,通过跟踪试验前后相同

点的空间位置变化来计算三维位移矢量,对位移矢量进行差分后获得试样的三维应变场,如图 5(a)所示。对三维应变场进行二维切面位移分析,如图 5(b)所示。



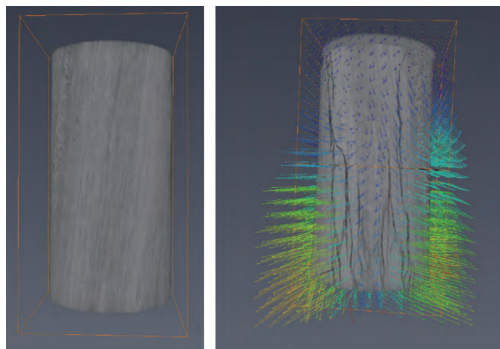
(a) 煤标样单轴压缩试验



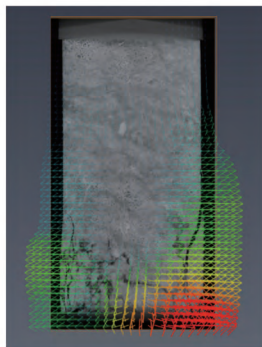
(b) NanoVoxel-4000 CT扫描系统

图 4 圆柱形煤样单轴压缩试验及 CT 扫描试验设备

Fig 4 Experimental equipment of uniaxial compression test and CT scanning of cylindrical coal samples



(a) 试样破坏前后三维体应变分析



(b) 试样破坏后二维切面位移分析

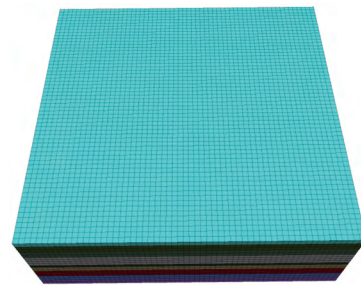
图 5 圆柱形煤样单轴压缩破坏前后 CT 扫描结果分析

Fig 5 CT scanning analysis of cylindrical coal samples before and after uniaxial compression failure

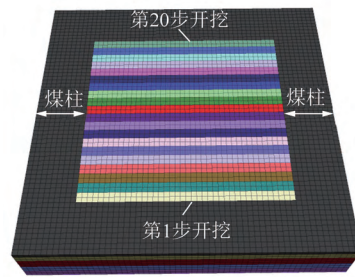
由图 5 可知,煤样单轴压缩破坏时变形方向为近水平向外发散,图 5 试样破坏变形方向与图 3(d)应力流方向吻合较好,印证了应力流与煤单轴压缩破坏具有内在相关性。

3.2 工程尺度常规开采的应力流形成过程

进一步针对常规开采的应力流形成过程进行有限元模拟,如图 6 所示,上覆岩层密度取 $2\ 600\ \text{kg}/\text{m}^3$,上覆岩层高度为 300 m,上覆岩层产生的垂直压应力为 7.644 MPa,在计算模型中煤层的上、下各有 4 层岩层,岩层参数见表 1。建模时,以第 9 层泥岩的底板面为模型底面,即 $Z=0$;模型中 9 层岩层厚度共计 100 m,即模型顶面 $Z=100\ \text{m}$;模型尺寸为 $300\ \text{m}\times 300\ \text{m}\times 100\ \text{m}$ 。工作面的长度为 200 m,两侧各有 50 m 煤柱,回采工作面距模型边界也为 50 m。煤层分 20 步开挖,每步开挖长度是 10 m,如图 6(b)所示。由表 1 容易计算出,煤层底部纵坐标 $Z=45\ \text{m}$,煤层顶部纵坐标 $Z=50\ \text{m}$ 。



(a) 数值模型



(b) 开挖步示意

图 6 常规开采数值模型

Fig 6 Numerical model diagram of pillar retention mining

数值计算结果如图 7 所示,取煤层底部,即 $Z=45\ \text{m}$ 处的最大主应力(左边)和应力流矢量(右边)进行分析。由图 7 可知,在煤层各开挖步,最大压应力区都分布在开挖区域四周,距采空区约 10 m;垂直方向应力流较大,由底板岩层指向煤层,水平方向应力流主要指向工作面前方。当开挖距离由 20 m 增加到 80,140 和 200 m 时,最大主应力由 12 MPa 增加至 22,24 和 26 MPa,采空区附近应力梯度明显增大,应力流矢量分布区随工作面前移。由图 7 可知,开采过程中应力流的来源主要为顶底板岩层挤压,且挤压应力大多在工作面附近,煤层内应力水平流动相对较小。

煤炭学报

MEITAN XUEBAO

月刊 (1964 年创刊)

第 47 卷第 1 期(总第 328 期) 2022 年 1 月

Journal of China Coal Society

Monthly (Started in 1964)

Vol. 47 No. 1 (Series No. 328) Jan. 2022

主 管 中国科学技术协会
主 办 中国煤炭学会
出 版 《煤炭学报》编辑部
(北京和平里, 邮政编码: 100013)
主 编 刘 峰
副 主 编 朱拴成
执行主编 朱拴成
执行副主编 毕永华
主 任 张晓宁
责任编辑 韩晋平 王晓珍 张晓宁
郭晓炜 钱小静
数字编辑 郭晓炜 宫在芹
印 刷 北京联合互通彩色印刷有限公司
国内发行 《煤炭学报》编辑部
国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(北京 399 信箱)
国外代号 M 190

Responsible Institution China Association for Science and Technology
Sponsor China Coal Society
Publisher Editorial Office of Journal of China Coal Society
(Hepingli, Beijing, China, 100013)
Editor in Chief LIU Feng
Associate Chief Editor ZHU Shuancheng
Exec. Chief Editor ZHU Shuancheng
Deputy Exec. Chief Editor BI Yonghua
Director ZHANG Xiaoning
Responsible Editor HAN Jinping WANG Xiaozhen
ZHANG Xiaoning GUO Xiaowei
QIAN Xiaojing
Digital Editor GUO Xiaowei GONG Zaiqin
Domestic Distributor Editorial Office of Journal of China Coal Society
Overseas Distributor China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing, China)
Code Number M 190

中国标准连续出版物号: ISSN 0253-9993
CN 11-2190/TD
国内定价: 78.00 元

Tel (010) 87986411
E-mail mtxb@vip. 163. com
http://www. mtxb. com. cn