DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0913-06

岩爆岩石断裂的微观结构形貌分析及岩爆机理*

赵　康,赵红宇,贾群燕

(江西理工大学建筑与测绘工程学院,江西 赣州 341000)

摘要:利用扫描电镜(SEM)对岩爆岩石断口微观形貌特征进行研究分析,从微观角度探索岩爆产生的机理。通过对平顶山十二矿岩爆现场取样对其断口形貌特征与地应力和岩石成分之间关系进行研究。巷道围岩劈裂岩块断口形貌多呈台阶状,劈裂面与地应力最大主应力方向平行,岩石断口属拉张断裂,劈裂纹的产生主要是脆性断裂;岩爆抛射出的岩块断口形貌非常复杂,裂面与切应力(最大主应力)方向平行或相交,不同平面内的微裂纹通过与岩爆裂纹间的微裂纹或受撕裂作用形成台阶,表面不平整,属于拉张或剪切型断裂。岩石细观成分对岩爆的影响也较大,结晶程度高、结构致密的硬脆岩石更易发生岩爆。

关键词:爆炸力学;微观形貌;扫描电镜;岩爆;岩石断口;地应力;岩石成分

中图分类号:O389;TU452　　**国标学科代码**:13035　　**文献标志码**:A

岩爆,也称冲击地压,常出现在深埋地下工程硬脆岩体高地应力区域施工的过程中,坚硬围岩因开挖扰动导致应力的转移与集中,当集中应力超过巷道围岩的破坏强度时,聚积在巷道岩体内部储存的弹性应变能突然释放,致使巷道围岩产生爆裂性松脱、剥落、弹射或抛掷,甚至发生矿震,严重威胁矿山安全生产,常造成重大人员伤亡和生产设备的损坏事故[1-3]。对于岩爆产生的机理,虽然很多学者进行了大量研究,但目前仍没有定论[4-5]。岩爆断裂微观结构形貌分析,在一定程度上真实反映了岩爆形成时岩石材料内部损伤演化过程中的受力情况和结构破环特征,客观地揭示了断裂过程的本质特性。扫描电镜(SEM)自从1965年被发明以来,在各行业应用广泛,尤其是在研究材料的微观结构方面发挥了巨大作用[6-8]。近几十年来,一些学者将扫描电镜应用到研究岩石断口的微观几何图像,以此来探索岩爆形成的过程,分析岩爆断口的微观形貌特征与断裂力学性质,揭示岩爆微裂纹的萌生、扩展、贯通等动态破裂机理,建立岩石断裂微观结构形态与岩爆过程的内部关系[9-11]。

由于岩爆现场导致的岩石较破碎或取样较难,所以关于岩爆现场岩样的相关研究不多,为了进一步探索岩爆机理,本文中针对平顶山十二矿高应力区域岩爆现场取样,采用扫描电镜对其岩石断口微观结构形貌进行分析,结合该矿地应力和岩石自身物理力学性质探索平顶山十二矿岩爆产生的机理。

1　岩爆岩石断口电镜实验

十二矿位于平顶山东部,矿区地质主要受一系列的北西-南东向褶皱平行排列的复式褶皱构造形态影响,同时兼有前聂背斜、焦赞向斜、郭庄背斜、任庄向斜等构造形态。目前该矿山开采深度超过1 km,属于深埋矿山,在该矿三水平皮带下山施工过程中,巷道围岩经常发生岩爆,发出巨大声响,并抛出岩石,给施工造成巨大影响。围岩主要是砂岩,经室内实验,其单轴抗压强度为206.6 MPa,弹性模量为34.6 GPa,普氏系数为20.6,属高强度硬脆岩石。为了该矿山的安全生产,作者对该矿－600 m进风巷道三水平皮带下山施工过程中岩爆岩石取样,并对其断口进行扫描电镜(SEM)观察,拟从微观角度研究断口微观结构形貌,对岩爆机理进行解释和探讨。

---

* **收稿日期**:2014-04-17;**修回日期**:2014-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51304083);教育部科学技术研究重大项目基金(413045);
江西省自然科学青年基金项目(20142BAB216020);江西省科技支撑计划项目(20132BBG70106);
江西理工大学重点课题(NSFJ2014-K02)

第一作者:赵　康(1980—　),男,博士,副教授,zhaok_666666@163.com。

1.1 实验取样

为了便于比较分析，试样选取岩爆区域不同部位的 2 个试样：

(1)岩爆附近围岩巷道边帮劈裂岩块，岩性为砂岩(岩样 1)；

(2)岩爆抛射出的岩块，岩性为砂岩(岩样 2)。

1.2 试样制备及实验设备

试样断口背面打磨平整，厚度 4 mm，断口面积为 1 cm^2，将试样用导电胶粘于样品台上，进行真空镀膜，喷涂金膜后进行电镜观察。实验采用 S-3400 型扫描电子显微镜对岩爆岩石断裂微观结构形貌进行观察。

2 实验结果分析

2.1 岩爆断口微观形貌特征

岩石断口的微观形貌总体可分为剪裂和拉断 2 大类[12-14]：剪裂断口微观形貌花样包括平行滑移线状花样、条纹花样、线状排列小颗粒状花样等 8 种。拉断断口微观形貌包括台阶状花样、河流状花样、舌状花样、根状花样等 9 种。

本次研究采用扫描电镜(SEM)在岩爆岩石断口进行了微观扫描，根据不同放大倍数下的砂岩断口花样代表性的显微照片，分析岩爆不同部位 2 种砂岩的微观破坏形貌特征、微观破裂形式和微观破坏力学机理。

砂岩由多种矿物组成，各矿物晶体之间含有大量裂隙，裂纹大多源于众多晶体颗粒的边界或晶体颗粒与胶结物的交界处，在晶界处裂纹很少，主要原因是颗粒的强度远大于胶结强度，岩爆发生后受应力波及材料内部结构的影响，岩石断口形貌较复杂，呈台阶状、河流状、雾区状等。在岩爆强大的弹性能作用下，导致晶体颗粒与胶结物的交界处最先起裂，应力波传播时遇到晶界、晶体时产生反射，这样应力波反复叠加交错，使裂纹扩展迅速且裂纹形貌复杂。其断裂机理总体可归结为拉张和剪切破坏 2 种。砂岩内部晶体颗粒起初处于随机分布的无序状，随着应力波导致胶结物的起裂，强大的岩爆应力波瞬间使起裂纹扩展，当应力波传播到晶粒内，在晶粒内产生裂纹或裂纹扩展贯通晶粒，大量裂纹在不同晶面上产生交合、贯通而产生裂缝，裂缝在岩爆弹性能作用下撕裂、错动相交成台阶状；晶面上不同平面内的微裂纹与岩爆的微裂纹受应力波撕裂作用形成台阶(见图 1，岩样 1)，撕裂是由晶体连接部分在岩爆强大弹性能迅速释放时产生的剪、拉应力造成的，台阶表面凸凹交错、形貌复杂，这与砂岩自身的各向异性、非均质、非线性关系密切。砂岩自身的弱面或层状的发育结构，在岩爆应力波的冲击下，极易在这些区域产生初始裂纹，这些裂纹的扩展形成层状或者板状(见图 2，岩样 1)。

砂岩中一些晶粒被其他颗粒或胶结物包围，矿山局部区域高应力集中使这些颗粒的周边最先形成

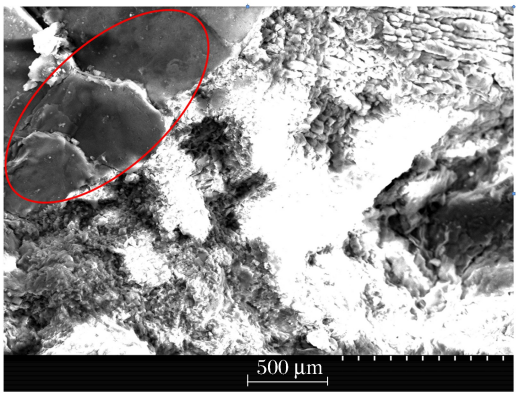

图 1 台阶状断口微观形貌

Fig. 1 Micromorphological cross section of a step-like crack

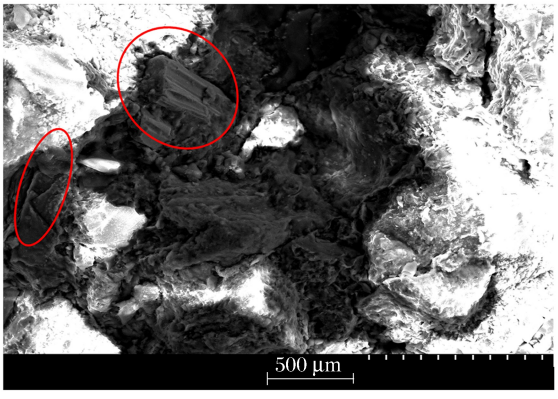

图 2 板状断口微观形貌

Fig. 2 Micromorphological cross section of a plate-like crack

微裂纹，然后逐渐扩展至颗粒内部，当颗粒被微裂纹在内部完全贯通时，颗粒彻底失去承载能力突然断裂（当大量颗粒在同一时间段内突然断裂，形成很强大的弹性能突然释放，造成部分岩块脱离母体向自由面而弹射出来，形成岩爆），形成粗糙的雾区（见图 3，岩样 2）。若砂岩内部的胶结物较多时，在强大岩爆应力波冲击下，极易产生沿晶断裂，断裂面较平整（见图 4，岩样 2），此时地应力的最大主应力平行于断口。

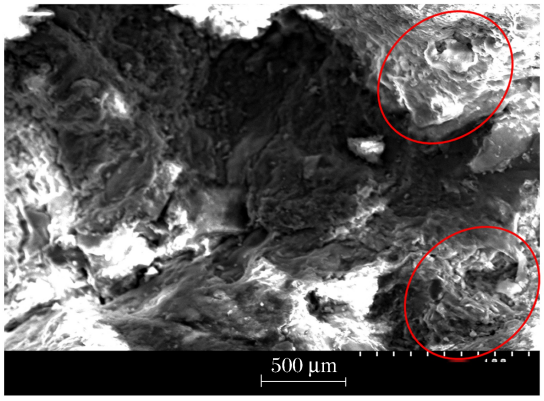

图 3 雾区状断口微观形貌

Fig. 3 Micromorphological cross section of a mist zone-like crack

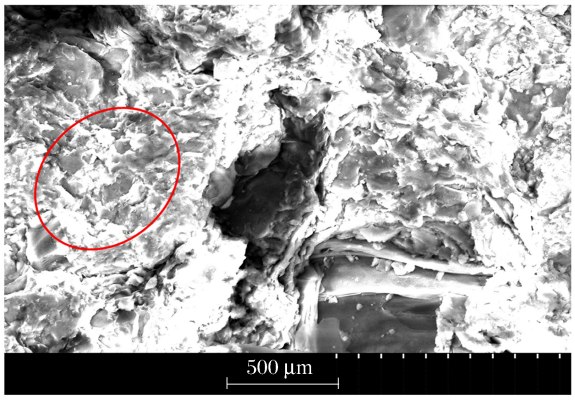

图 4 沿晶断裂断口微观形貌

Fig. 4 Micromorphological cross section of a crack's intergranular fracture

2.2 地应力与岩爆关系

平顶山十二矿－600 m 进风巷道三水平皮带下山所处位置接近李口向斜轴部，岩层走向 118°，倾角大致在 0°～5°。经现场地应力测量（表 1），地应力较大，最大主应力与最小主应力差值也较大。根据实测皮带下山与最大主应力的夹角约为 19°，这有益于皮带下山巷道围岩后期的稳定性，但给开采初期的巷道掘进带来了安全隐患，最大主应力方位角与李口向斜枢纽近似 90°，表明该区域地应力以构造应力为主。最大主应力造成工作面左帮的应力集中，这是造成工作面左帮多次发生岩爆的主要原因。

（1）岩爆区附近劈裂岩块断口形貌特征多呈台阶状（见图 1）和板状（见图 2），根据劈裂岩块在围岩中的方位可知，台阶劈裂面大致平行巷道走向，这与地应力最大主应力方向平行。从图 1 可以看出，左上部为沿晶拉花，其他部位为穿晶拉花，是拉张断裂，主要是在巷道切向应力（最大主应力）作用下挤压张裂。上述断口形貌特征表明，劈裂纹的产生主要是脆性断裂。

（2）岩爆抛射出的岩块断口形貌特征为雾区状（见图 3）和沿晶断裂（见图 4）。巷道围岩横断面上，岩爆断面台阶状形貌较复杂，由于岩爆抛出的碎石无法准确地确定其在原岩的具体位置和所处方向，但是根据围岩岩爆断口和抛出岩石的断面形状之间的吻合度，大致可以判断出破裂面与最大主应力之间的关系：有的裂面与巷道走向及切应力（最大主应力）方向大致平行，有的裂面与切应力（最大主应力）成约 30°，其断面有的区域为沿晶拉花，有的为穿晶拉花，属于拉张和剪切型断口。有的岩块呈板状，多被拉成碎片；有的岩块呈透镜状、透镜棱块状及鳞片状，多受剪切所致。

表 1 地应力实测结果

Table 1 Results of in-situ stress measurements

测点	最大主应力			中间主应力			最小主应力		
	σ/MPa	方位 α/(°)	倾角 β/(°)	σ/MPa	方位 α/(°)	倾角 β/(°)	σ/MPa	方位 α/(°)	倾角 β/(°)
进风巷 A	24.7	219	37	12.6	119	13	5.1	13	50
进风巷 B	29.7	235	45	11.9	104	34	6.6	355	27

2.3 岩石微观成分与岩爆关系

岩石一般是由多种矿物组成的比较稳定的固态集合体，矿物自身有一定的物理化学特性，不同的矿

物因其化学成分和分子结构不同，其化学键也各不相同，导致矿物本身的力学特性也各异，在承受外力过程中储存弹性变形能和变形破坏突然释放弹性能的能力也不同。

岩石材料的微观结构决定了其宏观的力学特性，矿物成分的差异也会对材料破坏特征产生较大的影响，因此，在前述不同的 2 块砂岩中，选取破裂面对其细观成分进行分析。

由图 5～6、表 2～3（表中 w、a 分别表示质量分数、原子分数）对比可知，砂岩 2 矿物成分含 C、O、Si、Cr、Fe、Ni 共 6 种化学成分，颗粒均匀、致密、结晶程度好，弹性模量大，其刚度和抗变形的能力也大，强度高，在承受荷载时，这些矿物组成受力骨架，能够积蓄大量的弹性应变能；而砂岩 1 岩样矿物成分除含有上述 6 种化学成分外，还含有其他成分，矿物成分多，颗粒粒径大小、形态、组构各异，胶结物较多，结晶程度低，弹性模量小，受力时变形大，发生塑性变形耗散的能量也大，强度也相对较低。所以砂岩 2 相比砂岩 2 弹性模量大、强度高，发生脆性破坏的能力增强，在承受载荷的过程中储存弹性应变能能力增强，产生塑性变形消耗的能量小，所以岩石变形破坏后释放的剩余应变能增大，发生岩爆的可能性增强。因此，在外界应力集中程度相同的情况下，岩爆极易发生在结晶程度高、结构致密、均匀的硬脆性岩石中。

表 2 岩样 1 元素成分分析

Table 2 Component analysis of No. 1 rock material

元素	w/%	a/%
C	27.78	55.64
O	11.11	16.71
Na	1.52	1.59
Si	1.85	1.59
Cl	0.62	0.42
Ca	0.76	0.45
Cr	5.88	2.72
Fe	9.82	4.23
Ni	40.65	16.65

表 3 岩样 2 元素成分分析

Table 3 Component analysis of No. 2 rock material

元素	w/%	a/%
C	27.05	54.90
O	10.54	16.05
Si	3.67	3.18
Cr	23.72	11.12
Fe	9.63	4.20
Ni	25.40	10.55

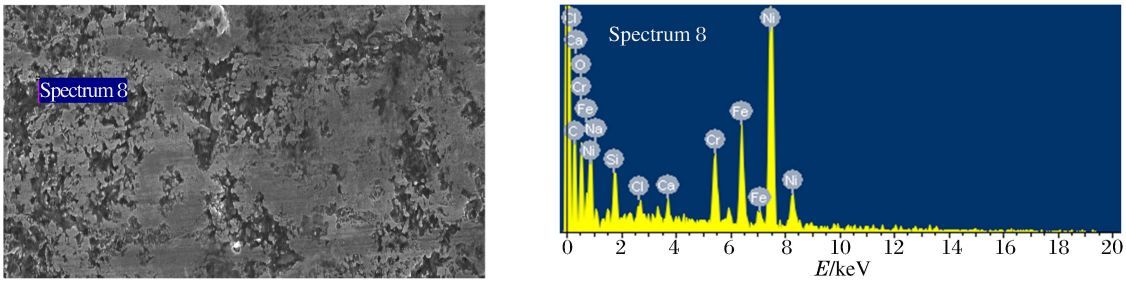

图 5 岩样 1 岩石材料的扫描电镜和 EDS 图谱

Fig. 5 SEM and EDS spectrums of No. 1 rock material

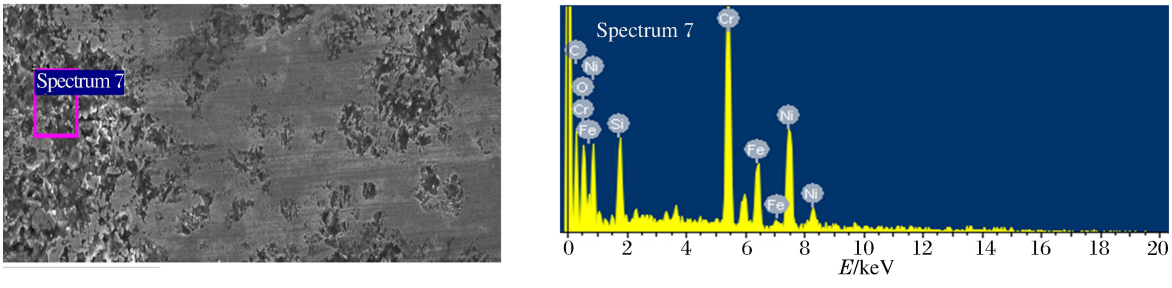

图 6 岩样 2 岩石材料的扫描电镜和 EDS 图谱

Fig. 6 SEM and EDS spectrums of No. 2 rock material

3 结 论

通过扫描电镜对平顶山十二矿岩爆机理进行了分析,得出如下结论:

(1)巷道围岩劈裂岩块断口形貌特征大多呈台阶状,劈裂面与地应力最大主应力方向平行。岩石断口微观形貌特征表明是拉张断裂,主要是在巷道切向应力作用下挤压张裂。劈裂纹的产生以脆性断裂为主。

(2)岩爆抛射出的岩块断口形貌较复杂,有的裂面与巷道走向及切应力(最大主应力)方向大致平行,有的裂面与切应力(最大主应力)成约 30°,其断面有的区域为沿晶拉花,有的为穿晶拉花,属于拉张和剪切型断口。呈板状的岩块,多被拉成碎片;呈透镜状、透镜棱块状及鳞片状的岩块,多受剪切所致。

(3)对过平顶山十二矿岩爆机理的分析,可为该矿今后采取有效措施预防岩爆的发生提供依据。

感谢河南理工大学苏承东教授、刘建辉硕士,东北石油大学夏法锋教授在地应力测量及电镜扫描中给予的帮助。

参考文献:

[1] 苏承东,李化敏.深埋高应力区巷道冲击地压预测与防治方法研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊 2):3840-3846.
Su Cheng-dong, Li Hua-min. Study on forecast and prevention methods for rockburst of deep roadway with high geostrss[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(suppl 2):3840-3846.

[2] 蔡美峰,王金安,王双红.玲珑金矿深部开采岩体能量分析与冲击地压综合预测[J].岩石力学与工程学报,2001,20(1):38-42.
Cai Mei-feng, Wang Jin-an, Wang Shuang-hong. Analysis of energy distribution and prediction of rockburst during deep mining excavation in Linglong Gold Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(1):38-42.

[3] 张晓君.高应力硬岩卸荷岩爆模式及损伤演化分析[J].岩土力学,2012,33(12):3554-3560.
Zhang Xiao-jun. Pattern and damage evolution of unloading rockburst for high-stress hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(12):3554-3560.

[4] 黄锋,徐则民.用动光弹方法研究隧道岩爆的爆破扰动机理[J].爆炸与冲击,2009,29(6):632-636.
Huang Feng, Xu Ze-min. On blasting perturbation mechanism of rock burst in tunnel by dynamic photo-elasticity [J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(6):632-636.

[5] 陈国庆,李天斌,何勇华,等.深埋硬岩隧道卸荷热-力效应及岩爆趋势分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8):1554-1563.
Chen Guo-qing, Li Tian-bin, He Yong-hua, et al. Thermo-mechanical coupling and rockburst tendency analysis of deep hard rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(8):1554-1563.

[6] Priest S D, Hudson J A. Discontinuity of spacing in rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976,13(5):135-148.

[7] 冯涛,谢学斌,潘长良,等.岩爆岩石断裂机理的电镜分析[J].中南工业大学学报:自然科学版,1999,31(1):14-17.
Feng Tao, Xie Xue-bin, Pan Chang-liang, et al. Fracture menchanism analysis for burst rock with electron scanning microscope[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 1999,31(1):14-17.

[8] 谭以安.岩爆岩石断口扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程[J].电子显微报,1989,8(2):41-47.
Tan Yi-an. Analysis of fractured face of rock burst with scanning electron microscope and its progressive failure process[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1989,8(2):41- 47.

[9] 黄达,谭清,黄润秋.高应力卸荷条件下大理岩破裂面细微观形态特征及其与卸荷岩体强度的相关性研究[J].岩土力学,2012,33(增刊 2):7-15.
Huang Da, Tan Qing, Huang Run-qiu. Study of micro-mesoscopic characteristics of marble fracture surface and correlation with unloading rock mass strength under high stress and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,

33(suppl 2):7-15.

[10] 朱珍德,张勇,徐卫亚,等.高围压高水压条件下大理岩断口微观机制分析与试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):44-51.
Zhu Zhen-de, Zhang Yong, Xu Wei-ya, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis on marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(1):44-51.

[11] 杨仁树,王雁冰,薛华俊,等.切缝药包爆破岩石爆生裂纹断面的SEM试验[J].中国矿业大学学报,2013,42(3):337-341.
Yang Ren-shu, Wang Yan-bing, Xue Hua-jun, et al. SEM experiment of rock crack cross section morphology after explosion fracturing with slotted cartridge[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013,42(3):337-341.

[12] 李先炜,兰勇瑞,邹浚兴.岩石断口分析[J].中国矿业大学学报,1983(1):15-21.
Li Xian-wei, Lan Yong-rui, Zou Jun-xing. A study of rock fractures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1983(1):15-21.

[13] 郑达,巨能攀.千枚岩岩石微观破裂机理与断裂特征研究[J].工程地质学报,2011,19(3):316-322.
Zheng Da, Ju Neng-pan. Scanning electronic microscope tests for rock micro-rupture mechanism and fracture characteristic of phyllite[J]. Journal of Engineering Geology, 2011,19(3):316-322.

[14] 左建平.温度-应力共同作用下砂岩破坏的微观机制与强度特征[D].北京:中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,2006:75-94.

An analysis of rockburst fracture micromorphology and study of its mechanism

Zhao Kang, Zhao Hong-yu, Jia Qun-yan

(*School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou* 341000, *Jiangxi*, *China*)

Abstract: The micromorphological characteristics of rock failure surface by rockburst are analyzed and studied with the scanning electron microscope to explore the rockburst mechanism. The relation between rock failure surface morphology with stress and rock constituent is studied with rock samples from the rockburst site of the 12th Pingdingshan Mine. The results show the rock failure surface of surrounding rock of roadway presents a step-like shape, and the split surface is parallel to the orientation of the maximum principal stress of in-situ stress; the rock failure surface belongs to a draw-stretch fracture, where the crack is brittle. The rock failure surface morphology with rockburst casting is very complicated, and the broken face is parallel to or intersected with the direction of the shear stress (maximum principal stress). The microcrack on different planes form steps with those among rockburst cracks or under tearing effect, with uneven surfaces, which can be defined as stretch-draw or shearing fracture. Rock micro-components have a greater effect on rockburst, and the rockburst occurs more likely for the compact and brittle rock with a high crystalline degree.

Key words: mechanics of explosion; micromorphology; scanning electron microscope; rockburst; rock failure surface; in-situ stress; rock composition

(责任编辑　曾月蓉)