

文章编号: 0253 - 9993 (2008) 12 - 1329 - 07

煤矿井下应力场类型及相互作用分析

康红普

(煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013)

摘 要: 基于原岩应力场与采动应力场, 提出支护应力场的概念, 即支护在围岩中产生的应力场与在支护体内部产生的应力场, 并指出 3 种应力场构成了煤矿井下综合应力场. 在井下实测数据的基础上, 研究了煤矿井下原岩应力, 特别是构造应力的分布特征; 采用数值模拟方法, 分析了掘进工作面、巷道及采煤工作面周围应力分布特征与规律, 采动集中应力的分布大小; 计算了预应力锚杆支护、单体液压支柱及金属支架在围岩中产生的应力场. 分析计算了锚杆杆体、托板及钢带等支护构件中的应力大小与分布特征, 并对比分析了原岩应力、采动应力及支护应力的量值. 论述了原岩应力场对采动应力场的影响, 以及采动应力场与支护应力场的相互作用与关系.

关键词: 原岩应力场; 采动应力场; 支护应力场; 综合应力场; 相互作用

中图分类号: TD311

文献标识码: A

Analysis on types and interaction of stress fields in underground coal mines

KANG Hong-pu

(Coal Mining and Designing Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The concept of supporting stress fields was put forward on the basis of in-situ and mining stress fields, which are the stress fields in surrounding rock caused by supports and the stress fields in the supports. The three types of stress fields consist of comprehensive stress field in underground coal mines. Based on the underground measurement data, the distribution characteristics of in-situ stresses, especially tectonic stresses were analyzed; the stress distribution features and laws, the magnitude of stress concentration around heading face and working face were analyzed by means of numerical simulation; the stress fields in surrounding rock caused by pretensioned bolting, individual hydraulic props and steel arches were computed. The stress magnitude and distribution features in bolt bar, plate and steel strap were computed in contrast to the magnitudes of in-situ stresses, mining stresses and supporting stresses. The affects of in-situ stresses to mining stresses, and the interaction and relation between mining and supporting stress fields were discussed.

Key words: in-situ stress field; mining stress field; supporting stress field; comprehensive stress field; interaction

地应力是煤矿开采等地下工程围岩变形与破坏的根本驱动力. 随着煤矿开采深度的不断增加, 地应力越来越大, 井下应力环境发生了很大变化, 导致巷道大变形、冲击矿压、煤与瓦斯突出及突水等灾害越来越严重. 只有充分了解应力场分布特征、煤岩体性质与结构特征, 才能进行合理的、切合实际的围岩稳定性、围岩变形与破坏分析, 进而提出合理的支护设计与灾害控制措施^[1]. 可见, 应力场研究是岩石力学

收稿日期: 2008-09-25 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2006CB202203); 国家科技支撑计划项目 (2006BAK03B06)

作者简介: 康红普 (1965—), 男, 山西五台人, 研究员, 博士生导师. Tel: 010-84263125, E-mail: kanghp@163.com

与采矿工程中最基本、最重要的工作之一。煤矿井下应力场一般指原岩应力场与采动应力场, 本文又单独提出了支护应力场: 支护在围岩中产生的应力场与在支护体内部产生的应力场。原岩应力是指在漫长的地质历史时期中逐渐形成的, 在未经人为扰动的天然状态下, 地壳岩体中具有的内应力。原岩应力场在空间的分布极不均匀, 而且随着时间的推移不断变化, 属于非稳定的应力场, 但对于采矿工程的设计期来说, 可忽略时间因素, 将它视为相对稳定的应力场。采动应力场是指由于井下开挖巷道、硐室及开采煤层等采掘活动引起的煤岩体中应力重新分布, 出现的次生应力场。采动应力场在空间分布上有一定的范围, 而且随着采矿活动的进行与时间的推移不断变化。支护应力场出现在与支护体接触的围岩周围及支护体内部, 它在空间分布上范围较小, 而且随着采掘活动的进行与时间的推移发生变化。上述 3 种应力场构成了煤矿井下综合应力场。时间上, 先有原岩应力场, 然后才有采动应力场与支护应力场, 而且是随时间变化的; 空间上, 原岩应力场普遍存在于地壳中, 采动应力场分布在采掘活动影响的一定范围内, 而支护应力场则分布在更小的范围。

1 煤矿井下应力场的特征

1.1 原岩应力场

原岩应力产生的原因非常复杂, 主要与地球的各种运动有关, 如板块挤压、地幔热对流、地心引力、地球旋转、岩浆侵入及地壳非均匀扩容等^[2]。此外, 温度不均、水压梯度、地表剥蚀或其它物理化学变化等均可引起相应的应力场。其中, 重力应力场与构造应力场是现今地应力场的主要组成部分。

1.1.1 自重应力场

自重应力是由上覆岩层自重产生的应力。其中, 垂直自重应力 $\sigma_v = \rho h$, 水平自重应力 $\sigma_H = \sigma_h = \mu \sigma_v$, 其中, ρ 为岩层的容重, kN/m^3 ; h 为上覆岩层的厚度, m ; μ 为侧压系数, $\mu = \nu / (1 - \nu)$, ν 为岩层泊松比。自重应力场有以下特点: 垂直自重应力总是大于水平自重应力; 2 个方向的水平应力相等; 坚硬岩层的泊松比较小, 水平自重应力较小; 相反软弱岩层的泊松比较大, 水平自重应力较大; 自重应力随上覆岩层厚度的增加基本呈线性增大。

1.1.2 构造应力场

构造应力由构造运动引起, 分为活动和残余构造应力。活动构造应力是近期和现代地壳运动正在积累的应力, 是地应力中最活跃、最重要的部分; 残余构造应力是由古构造运动残留在岩层中的应力。为了解煤矿井下地应力场, 特别是构造应力场的分布特征与规律, 煤炭科学研究总院开设计研究分院专门开发了适应于煤矿井下巷道中使用的小孔径水压致裂地应力测量装置^[3-4], 并在多个矿区进行了井下测量, 获得了大量地应力实测数据^[4-5]。表 1 是晋城矿区部分地应力测试结果。18 个测点的最大水平主应力均大于垂直主应力, 而且有 7 个测点的最小水平主应力也大于垂直主应力。 σ_H / σ_v 最小为 1.15, 最大为 2.33。可见, 晋城矿区所测区域地应力以水平应力为主, 构造应力占绝对优势。

分析煤矿井下沉积岩中地应力分布特征, 结合其它行业及岩浆岩、变质岩等不同岩石中的地应力测量结果^[6-8], 发现构造应力分布有以下特点: 构造应力与地壳运动有关, 地壳运动一般以水平、挤压运动为主, 因此构造应力主要是水平或近水平方向的压应力; 一般在地层浅部, 多数情况下最大水平主应力大于垂直主应力, 即 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$; 有些甚至最小水平主应力也大于垂直主应力, 即 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$; 构造应力有时比自重应力大很多倍。在深部地层, 地应力分布与浅部地层有相反的趋势; 构造应力的分布具有明显的区域性, 其空间分布具有明显的方向性, 主要取决于所处地区的地质历史和构造运动方式及方向。2 个水平主应力不相等, 有时相差很大; 构造应力明显存在于现今构造运动强烈地带, 在大褶皱、断层带常积累有很大的地应力。但如果岩层内节理、裂隙等结构面非常发育或岩层塑性大时, 新的构造应力则难于积累, 地应力值就会大大降低; 构造应力与岩性有很大关系。与水平自重应力相反, 在弹性模量大、坚硬岩层中构造应力大, 而在弹性模量小、软弱岩层中构造应力较小; 构造应力随上覆岩层厚度的增加变化比较复杂, 离散性比较大。

表 1 晋城矿区地应力测试结果

Table 1 Stress measurement results in Jincheng coal mining area

序号	巷道名称	埋深 /m	垂直应力 /MPa	最大水平主应力 /MPa	最小水平主应力 /MPa	最大水平主应力方向
1	寺河矿 1号车场二顺槽	282	7.05	16.44	8.76	N71.2 W
2	寺河矿 2号车场入口	384	9.60	18.26	8.67	N39.2 E
3	寺河矿东轨大巷	376	9.40	18.92	9.67	N83.4 W
4	成庄矿 2102巷	448	11.20	12.91	6.48	N86.0 E
5	成庄矿 3106回风巷	366	9.15	13.15	6.41	N82.4W
6	成庄矿 3208巷	240	6.00	10.60	5.52	N32.6 E
7	成庄矿 3213巷	279	6.98	13.84	6.35	N85.8W
8	古书院矿西一胶带巷	181	4.52	8.83	4.96	N45.3 W
9	古书院矿 92105巷	213	5.32	9.62	6.28	N32.7 °W
10	古书院矿 93103巷	215	5.38	10.17	6.41	N19.4 °W
11	凤凰山矿北配风巷	265	6.63	13.17	6.99	N26.0 °E
12	凤凰山矿 2112巷	250	6.25	11.06	5.85	N53.4 E
13	凤凰山矿 92回风巷	232	5.80	11.49	6.50	N46.3 W
14	凤凰山矿 92304进风巷	237	5.93	12.29	7.44	N36.7 W
15	凤凰山矿 92胶带巷	261	6.53	10.81	5.93	N22.3 W
16	长平矿辅助运输大巷与上仓斜巷绕道	290	7.25	10.09	6.17	N31.7 W
17	长平矿检修斜巷与辅助运输石门交界	270	6.75	8.47	4.68	N37.6 W
18	长平矿辅助运输大巷与胶带大巷联络道	280	7.00	9.95	5.48	N41.3 W

1.2 采动应力场

煤岩体在未受采掘扰动前处于原岩应力状态。在煤岩体中开掘巷道、硐室等地下工程,围岩应力将重新分布,围岩内出现应力集中。如果应力超过煤岩体强度,围岩就会产生塑性变形,在周边附近的围岩中出现塑性区与破坏区,引起应力向围岩内部转移。同样,在煤层开采过程中,会引起采场周围岩层移动与应力重新分布。

1.2.1 巷道与掘进工作面围岩应力场

关于巷道围岩应力分布,人们采用弹塑性力学理论、流变力学理论、损伤力学理论等分析了圆形、椭圆形巷道围岩应力分布状况,得出一些有理论指导意义的结果。如根据弹性理论得出:巷道周围会形成切向应力集中,最大切向应力出现在巷道周边;对于圆形巷道,应力集中系数可达 2~3,对于椭圆形巷道,应力集中系数可达 4~5;在不等压的条件下,围岩中还会出现拉应力。弹塑性理论则认为:当应力超过煤岩体强度时围岩中会出现一定范围的塑性区,导致最大集中应力向围岩内部转移。对于其它断面形状、复杂边界条件、不同煤岩层分布等条件,可采用数值计算方法分析巷道围岩应力分布状况。

采用有限差分数值计算软件 FLAC^{3D},对晋城寺河矿首采区工作面巷道围岩应力分布进行了分析。巷道开挖过程中水平切面上垂直应力分布及垂直切面上水平应力分布如图 1所示,可以看出:巷道开挖以后,垂直应力在掘进工作面周围重新分布,在工作面前后方出现应力降低区与升高区。在工作面前方,先出现应力降低区,之后出现应力升高区,但两区域的范围较小;在工作面后方,随着远离工作面,应力降低区与应力升高区范围不断扩大,到一定距离后保持稳定。水平应力在掘进工作面前后方出现应力降低区与升高区。在工作面前方,先出现应力降低区,之后出现应力升高区,但两区域的范围较小,而且集中应力也不大。在工作面后方,顶、底板围岩中也出现了应力降低区与升高区,而且随着远离工作面不断扩大,到一定距离后保持稳定。工作面后方顶、底板围岩的集中应力无论大小还是作用范围都明显大于工作面前方。

1.2.2 采煤工作面周围应力场

采用 FLAC^{3D}模拟了晋城寺河矿一次采全高工作面周围应力分布情况。工作面开采煤层厚度 6.34 m,

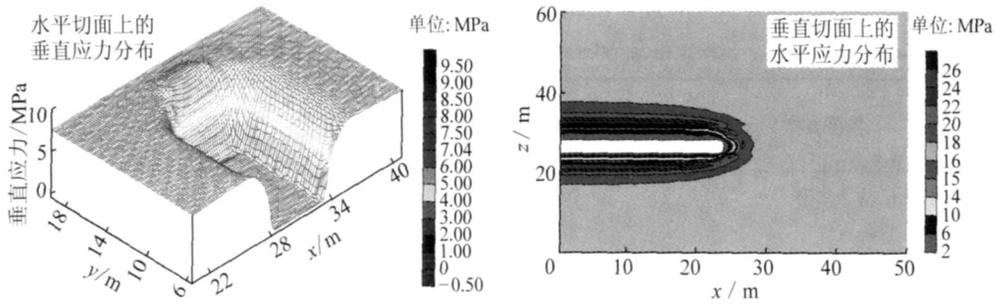


图 1 掘进工作面附近垂直应力与水平应力分布

Fig. 1 The vertical and horizontal stress distribution around heading face

工作面长度为 225 m, 采高为 5.5~6.0 m. 图 2 为垂直应力三维分布. 从图中可以看出: 工作面开采后, 应力重新分布, 在其周围形成了应力降低区和应力升高区. 对于垂直应力, 在工作面前方先出现很小的应力降低区, 之后出现应力升高区, 到一定位置集中应力达到最大值 25 MPa, 为原始垂直应力的 3.5 倍. 随后应力值逐渐减小, 直到原岩应力状态. 在工作面左前方的煤柱上出现了较高的集中应力. 在工作面后方左侧的煤柱上, 由于上一个工作面已经回采, 应力叠加造成极高的集中应力, 最大值超过 36 MPa, 为原始垂直应力的 5.1 倍. 在右侧的煤体上也出现了应力集中现象, 但应力值明显小于煤柱左侧.

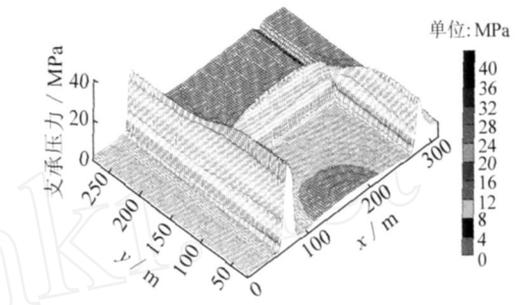


图 2 采场围岩垂直应力分布

Fig. 2 The vertical stress distribution around working face

1.3 支护应力场

1.3.1 支护在围岩中产生的应力场

各种支护形式与围岩相互作用, 均可在围岩中形成由支护引起的应力场. 如锚杆支护、金属支架、喷射混凝土、砌碛等巷道支护, 以及液压支架、单体支柱等工作面支护, 都可在煤岩体中产生有各自特点的支护应力场. 为了区分主动支护与被动支护, 又可将支护应力场分为主动与被动支护应力场. 锚杆(索)预应力在围岩中产生的预应力场^[9-11], 液压支架与单体支柱的初撑力产生的应力场属于主动支护应力场; 而金属支架、砌碛支护及无预应力锚杆等支护形式形成的是被动支护应力场.

图 3 (a) 为预应力锚杆支护 (锚杆预紧力为 100 kN) 在巷道顶板中产生的主动支护应力场^[9]. 锚杆尾部附近出现了较大的应力集中现象, 最大压应力达 0.36 MPa (其实在托板与顶板接触的部位, 压应力可达 10 MPa 左右). 随着深入顶板远离锚杆尾部, 压应力逐渐减小. 至锚杆长度的 1/5 处, 压应力减小到 120 kPa. 在锚杆长度一半左右的范围内形成了应力值大于 40 kPa 的压应力区. 在锚杆端部出现了拉应力区, 应力值很小. 锚杆附近应力集中明显, 随着远离锚杆位置, 压应力逐渐减小. 但是, 即使到两根锚杆中部, 应力值仍达到 40 kPa. 单体支柱初撑力 (150 kN) 在巷道顶板产生的主动支护应力场 (垂直应力) 如图 3 (b) 所示. 在单体支柱与顶板接触的部位出现了比较高的集中应力, 达到 650 kPa. 随着远离支柱, 压应力逐步减小, 特别是在水平方向, 应力降低速度很快. 在两根支柱之间及之外的大部分区域, 压应力很小甚至为零, 单体支柱在这些区域几乎没有支护作用. U 型钢金属支架 (U25) 在巷道围岩中产生的被动支护应力场 (最大主应力) 分布如图 3 (c) 所示. 在支架外侧施加均布的垂直巷道周边的力, 模拟围岩变形后作用在支架上的反力在围岩中产生的应力分布. 在巷道顶部与底部产生了拉应力区, 但拉应力不大 (20 kPa); 在巷道两帮出现了压应力集中区, 最大应力达到 300 kPa, 随着远离巷帮, 应力迅速降低, 到巷道宽度一半的距离, 压应力降低到 20 kPa. 在巷道拱顶与帮部连接的肩角部位, 是压应力区与拉应力区的过渡带, 应力值很低.

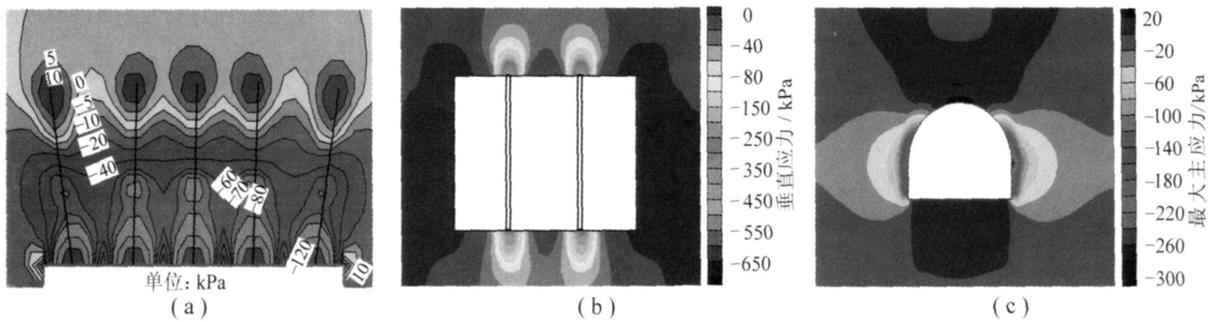


图 3 锚杆支护、单体支柱和 U 型钢金属支架应力场分布

Fig. 3 Stress distribution caused by pretensioned rock bolting, individual hydraulic props and steel arches

1.3.2 支护体内的应力场

各种支护形式对围岩产生支护作用的同时，在支护体内部也会产生应力场。不同结构的支护形式其内部应力场分布各有特点。

锚杆支护构件包括杆体、锚固剂、托板、钢带及金属网等，它们共同作用支护围岩，并在各自内部产生应力场。锚杆杆体在巷道围岩中会受到拉伸、弯曲、剪切与扭曲等作用，受力状态比较复杂。对于简单的拉伸状态，BHRB500 的高强度锚杆杆体，在弹性范围内可产生高达 500 MPa 的拉应力。

图 4 为锚杆预紧力为 100 kN 时，100 mm × 100 mm 平托板的压应力分布^[12]。可见，托板中心压应力最大（超过 10 MPa），随着远离托板中心，压应力迅速减小。到一定距离，托板应力变得很小。图 5 为 W 型钢带受弯时的应力分布^[13]。钢带跨中部分向下弯曲，受拉部分为钢带两压槽，受拉面积较小，受力较大；上表面受压，面积较大，受力较小且比较平均。在托板作用处，钢带上表面和孔口部位应力集中明显。钢带两压槽受压力，上表面受拉力，最大应力出现在托板边缘钢带的压槽处。

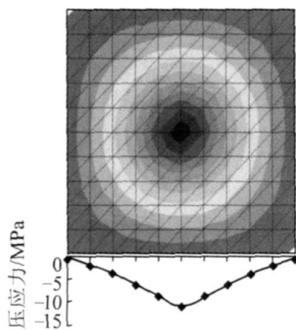


图 4 托板压应力分布

Fig. 4 Compressive stress distribution in plate

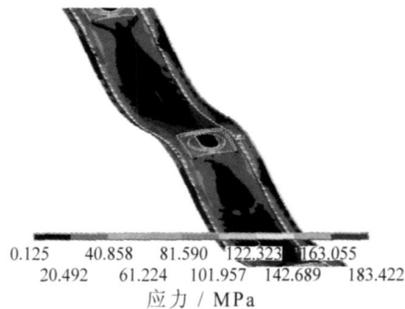


图 5 W 型钢带受弯时的应力分布

Fig. 5 Stress distribution in W-shaped steel strap in bending state

金属支架内的应力可根据支架在井下的受力状况建立计算模型，采用材料力学、结构力学，以及有限元数值计算方法，分析支架各构件中的弯矩及应力分布。对于液压支柱等支护构件，可以根据支柱承受的轴向载荷、附加弯矩及油压等，分析活柱、油缸等部件中的应力分布。

2 各种应力场相互作用

2.1 应力场量值的比较

以晋城寺河煤矿首采工作面为例进行分析。原岩应力为 7.05 ~ 16.44 MPa；不受动压影响巷道围岩的集中应力为 9.5 ~ 26.0 MPa，回采工作面周围的集中应力为 25 ~ 36 MPa，考虑到在巷道顶板或煤帮中部会出现拉应力，拉应力不超过顶板泥岩的抗拉强度（约 2 MPa），因此，采动应力场中应力变化范围为 -2 ~ 36 MPa（“-”表示拉应力）；锚杆支护在围岩中产生的支护应力场应力值为 -0.1 ~ 12.0 MPa，拉应力主

要出现在锚杆头部,最大压应力出现与托板接触处;锚杆支护构件中的应力分布更是各有特点:杆体中的拉应力可达到 400~600 MPa (BHRB400杆体从屈服到破断);托板中的压应力可达到 10 MPa,甚至更大;钢带中的拉应力可能使钢带屈服 (235 MPa),甚至拉断 (380 MPa)。

可见在锚固区内,围岩与支护构件中的应力场呈现多种多样的形式,而且应力值相差悬殊。支护在围岩中形成的应力场主要对围岩的拉应力和剪应力产生明显作用,抑制拉伸、剪切破坏的出现。

2.2 原岩应力场对采动应力场的影响

原岩应力对采动应力场的作用主要表现在以下几方面。原岩应力大小在很大程度上决定了采动应力的大小。如前所述,巷道围岩中的集中应力可达到原岩应力的 2~5 倍,采场周围的集中应力甚至高达 5 倍以上的原岩应力。在一定范围内,原岩应力越大,采动应力越高。围岩的塑性区及破坏范围与原岩应力有很大关系。根据弹塑性理论,圆形巷道的塑性区半径随着原岩应力的增大呈指数函数关系迅速增长,应力重新分布的范围与集中应力也明显增大。围岩应力分布与主应力的空间分布、方向及主应力差值有关。巷道轴线方向与水平主应力方向呈一定角度,会导致围岩应力分布不对称,集中应力与破坏区偏向巷道一侧;主应力差大,会导致围岩中出现拉应力区和较大的剪切应力,产生拉破坏与剪切破坏。

采动应力场不仅与原岩应力场有关,而且还受很多因素的影响,如巷道与采煤工作面在空间与时间上的关系,包括煤柱尺寸,一侧采动还是两侧采动,是正在回采还是已经采过等。同时,采动应力场还受围岩性质与强度、围岩结构等多种因素的影响,这些因素与原岩应力相互影响,共同对采动应力场起作用。

2.3 采动应力场与支护应力场的关系

采动应力场对支护应力场影响很大。采动影响越强烈、集中应力越高,对支护系统的要求也越高。在围岩条件相同的情况下,动压巷道支护体受力要明显大于静压巷道。强烈动压影响巷道往往需要高强度、高刚度且具有足够延伸率的支护系统。如果支护形式与参数设计不合理,有可能引起支护体受力过大而失效,导致支护应力场的丧失。

支护能够对围岩施加约束,改变围岩的应力状态,如可使围岩表面从二向应力状态转向三向应力状态,从而影响采动应力场。以预应力锚杆支护为例进行分析,支护应力场对采动应力场有以下作用:预应力锚杆支护能够控制锚固区围岩的离层、滑动、裂隙张开、新裂纹产生等扩容变形与破坏,使围岩处于受压状态,抑制围岩拉应力区与剪切破坏区的出现,最大限度地保持锚固区围岩的完整性,减小锚固区围岩强度的降低,使围岩成为承载的主体,提高锚固区围岩的应力水平。反过来,锚固区围岩的完整性又保证了锚杆的锚固力,以及支护阻力能够有效扩散到围岩中,起到良好的支护作用;预应力锚杆支护能够有效控制围岩的塑性区,减小围岩的破坏范围,从而影响采动应力的分布特征、范围与集中应力的大小;预应力锚杆支护可通过提高锚固区的刚度,使集中应力发生转移。如大幅度提高煤巷顶板的刚度,可使顶板垂直压力转移到巷道两侧煤体深部,降低两侧煤帮的压力,减小煤帮变形,对巷帮维护十分有利。

3 结 论

(1) 煤矿井下应力场分为原岩应力场、采动应力场及支护应力场。3种应力场相互影响,共同对围岩起作用,构成了煤矿井下综合应力场。

(2) 重力应力场与构造应力场是现今地应力场的主要组成部分。一般在地层浅部,构造应力占明显优势,最大水平主应力大于垂直主应力。构造应力的分布具有明显的区域性与方向性,而且与地质构造、煤岩性质及强度等有很大关系。

(3) 采动应力场在空间上分布有一定的范围,而且随着采矿活动的进行与时间的推移不断变化。采动应力场不仅与原岩应力场有关,而且还受到围岩性质、围岩结构,及采掘空间形状、大小、采动状况等多种因素影响。

(4) 支护应力场包括支护在围岩中产生的应力场,以及在支护体内部产生的应力场。锚杆支护、金属

支架、喷射混凝土、砌碇等巷道支护, 以及液压支架、单体支柱等工作面支护, 都可在煤岩体及自身中产生有各自特点的支护应力场。围岩与支护构件中的应力场呈现多种多样的形式, 而且应力值相差悬殊。

(5) 支护能够对围岩施加约束, 改变围岩应力状态, 影响采动应力场分布特征、范围与集中应力程度。

参考文献:

- [1] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制 (修订本) [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
Qian Minggao, Liu Tingcheng. Ground pressure and strata control [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991.
- [2] 吴继敏. 工程地质学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
Wu Jimin. Engineering geology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006
- [3] 康红普, 林 健. 我国巷道围岩地质力学测试技术新进展 [J]. 煤炭科学技术, 2001, 29 (7): 27 - 30.
Kang Hongpu, Lin Jian. New development in geomechanics measurement and test technology of mine roadway surrounding rock [J]. Coal Science and Technology, 2001, 29 (7): 27 - 30.
- [4] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 36 - 51.
Kang Hongpu, Wang Jinhua. Rock bolting theory and complete technology for coal roadways [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007: 36 - 51.
- [5] 康红普, 林 健, 张 晓. 深部矿井地应力测量方法研究与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (5): 929 - 933.
Kang Hongpu, Lin Jian, Zhang Xiao. Research and application of in-situ stress measurement in deep mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (5): 929 - 933.
- [6] 朱焕春, 陶振宇. 不同岩石中地应力分布 [J]. 地震学报, 1994, 16 (1): 49 - 63.
Zhu Huanchun, Tao Zhenyu. Geostress distributions in different rock [J]. Acta Seismologica Sinica, 1994, 16 (1): 49 - 63.
- [7] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 中国地应力场分布规律统计分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (6): 1 265 - 1 271.
Zhao Dean, Chen Zhimin, Cai Xiaolin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (6): 1 265 - 1 271.
- [8] 王胜本, 张 晓. 煤矿井下地质构造与地应力的关系 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (7): 738 - 742.
Wang Shengben, Zhang Xiao. Relation between geological structures and in-situ stresses in underground coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (7): 738 - 742.
- [9] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力在锚杆支护中的作用 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (7): 673 - 678.
Kang Hongpu, Jiang Tieming, Gao Fuqiang. Effect of pretensioned stress to rock bolting [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32 (7): 673 - 678.
- [10] 王金华, 康红普, 高富强. 锚索支护传力机制与应力分布的数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (1): 1 - 6.
Wang Jinhua, Kang Hongpu, Gao Fuqiang. Numerical simulation study on load-transfer mechanisms and stress distribution characteristics of cable bolts [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (1): 1 - 6.
- [11] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力锚杆支护参数的设计 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (7): 721 - 726.
Kang Hongpu, Jiang Tieming, Gao Fuqiang. Design for pretensioned rock bolting parameters [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (7): 721 - 726.
- [12] 姜铁明. 煤巷锚杆支护构件的作用机理及其在晋城矿区的应用研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2008.
Jiang Tieming. Study on action mechanism of rock bolting components in coal roadways and its applications in Jincheng coal mining area [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2008.
- [13] 李建波. 钢带的力学性能与支护作用研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
Li Jianbo. Study on mechanical property and support function of steel strip [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2008.