8.2 m 大采高液压支架设计配套关键技术研究

韩会军[1],曾明胜[1],宋智鹰[1],闫 跃[2]
(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013;2. 兖州煤业股份有限公司,山东 济宁 273500)

摘 要:为完善一次采全厚成套装备技术,提高特厚煤层开采效率,在总结国内外综采装备使用经验基础上,研制出适用于 8.2 m 工作面的超大采高液压支架,针对支架稳定性、防片帮措施、抗冲击性能、过渡配套方式及所使用材料的焊接性能等关键技术进行了研究,分析了支架失稳角度及销孔配合对支架稳定性的影响,开发了支架三级协动护帮装置,发明了大缸径能量耗散抗冲击立柱,完成了新型拼装式锻造柱窝设计,解决了 3.5 m 大梯度过渡配套难题,研发了 Q890 新材料及其焊接工艺,在此基础上,解决了超大采高液压支架大尺度高动压敏感结构稳定性和可靠性难题,实现了液压支架轻量化设计,有效提高了煤炭回采率。

关键词:超大采高;液压支架;抗冲击;大梯度过渡
中图分类号:TD823.9 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2017)11-0063-06

Research on key technology of powered support design in 8.2 m large mining height face

HAN Huijun[1], ZENG Mingsheng[1], SONG Zhiying[1], YAN Yue[2]
(1. *Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing* 100013, *Chinai*;
2. *Yanzhou Coal Mining Company Ltd., Jining* 273500, *China*)

Abstract: Based on summarizing the experience of using of fully-mechanized mining equipment, powered support in 8.2 m ultra large mining height working face was researched; stability of powered support, preventive measures of spalling, impact resistance, coordination method and weldability of the new material were studied; in stability angle of powered support and effect of pin-hole on stableility were calculated; the three level coordinated coal wall protector was optimized; large diameter impact resistant pillar was developed; assembled forging pillar socket was designed; coordination method in 3.5 m working face was solved; new material Q890 was researched and whose weld ability was experimented meanwhile; the stableility and reliability of ultra large height powered support were solved and the powered support was lighter in the premise of the enough support structural strength, the coal recovery rate was improved.

Key words: ultra large mining height; hydraulic support; impact resistance; large gradient transition

0 引 言

我国西部的晋、陕、蒙、新等大型煤炭基地赋存有大量厚度为 6~8 m、煤质坚硬、埋深较浅的厚煤层,受制于煤层坚硬、顶煤冒放性差等因素,这类煤层更加适宜采用一次采全厚开采方法[1]。目前,国外综采液压支架的架型主要为大工作阻力的两柱掩护式支架,其支护工作阻力一般在 6 000~12 000 kN,支护高度一般在 2~6 m,支架立柱缸径 250~420 mm,支架中心距 1.5~2.0 m。国内机采高度为 5~7 m 的大采高综采技术与装备已经广泛应用,实现了很好的技术与经济效益[2]。在认真调研国外综采技术装备发展形势的基础上,结合我国综采工作面生产现状和发展需求,将工作面一次采全高的高度由 7.0 m 提升至 8.0 m,可为我国西部矿区 6~8 m 坚硬厚煤层安全、高效、高回采率、绿色开发开

收稿日期:2017-09-30;**责任编辑**:杨正凯 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2017.11.011
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB046302);国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U161020003)
作者简介:韩会军(1984—),男,山西吕梁人,助理研究员。Tel:13811798093,E-mail:hanhuijun@tdkcsj.com
引用格式:韩会军,曾明胜,宋智鹰,等.8.2 m 大采高液压支架设计配套关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(11):63-68.
HAN Huijun, ZENG Mingsheng, SONG Zhiying, *et al*. Research on key technology of powered support design in 8.2 m large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 63-68.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

拓出更佳的技术途径。

液压支架为工作面围岩结构稳定性控制的核心设备,其支护性能直接决定着超大采高综采的成败[3]。采高增加对液压支架本身稳定性及可靠性提出更高的要求;同时,由于工作面一次割煤高度达到 6~8 m,直接顶冒落后对采空区充填不充分,基本顶来压时矿山压力显现剧烈,围岩控制难度大,极易诱发煤壁片帮、冒顶、切顶压架等安全事故,在这种情形下,有效的防片帮措施及良好的抗冲击性能对于维护工作面围岩稳定具有至关重要的作用;大采高工作面及相对较低巷道间的大高度差使液压支架支护效率降低,无法回收工作面两端顶部三角煤,如何通过灵活的设备配套解决超大梯度过渡是大采高开采方式面临的关键问题[4];此外,随着工作阻力及开采高度的增大,液压支架重量相应增加,制造成本急剧上升,如何在保证液压支架支护强度的同时,减少生产制造成本,完成液压支架的轻量化设计,也是大采高支架亟需解决的难题。

1　8.2 m 液压支架结构特点

针对某矿平均厚度 7.68 m 的中等偏硬煤层所开发的 ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架,是在认真总结国内外大采高综采支架使用经验基础上,采用先进设计制造手段生产加工,具有适应性强、可靠性高、结构紧凑、支护能力大、操作方便、移架速度快等特点。①液压支架型式为两柱掩护式液压支架,双侧活动侧护板,前、后双连杆,稳定性好,抗偏载能力强,可靠性高。②液压支架顶梁采用刚性整体带伸缩梁结构,顶梁前部设有三级护帮装置,伸缩梁与护帮机构分体设计,三级护帮机构差动控制。③底座采用刚性开底式,排矸性能好,带有底调架千斤顶,配备抬底、推移机构,移架速度快。总之,8.2 m 大采高液压支架梁端距的总变化量为 156.7 mm,在采高 5.3~8.0 m 范围内的梁端变化量为 82.8 mm;支架由高降低时,梁端轨迹摆向煤壁,利于顶板的维护。

2　8.2 m 液压支架设计关键技术

2.1　超大采高液压支架稳定性

1)液压支架失稳角度分析。液压支架在工作中受到包括工作面倾角、支架中心距、支架位置及重心高度等诸多因素相互作用,使支架失稳问题趋于复杂,其失稳涉及到支架倾倒、下滑。

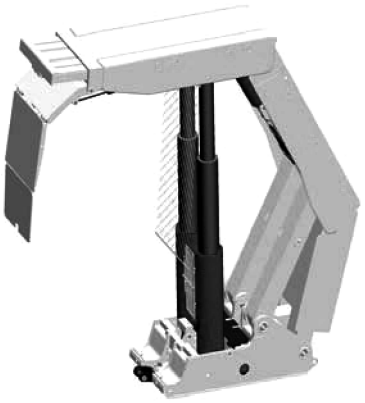


图 1　ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架三维模型

Fig. 1　3D model of ZY21000/38/82D hydraulic support in ultra large height mining face

以横向稳定性为例,当工作面存在倾角,支架在其自重 G、顶板压力 Q、底板反力 W、支架背矸重力 P 等作用下保持平衡状态。当支架与顶、底板摩擦力不足以抵抗自重及背矸质量,支架出现下滑可能,支架不发生下滑的条件为

$$2fQ + f(G + P)\cos\alpha \geqslant (G + P)\sin\alpha \quad (1)$$

式中:f 为摩擦因数;α 为倾斜角度。

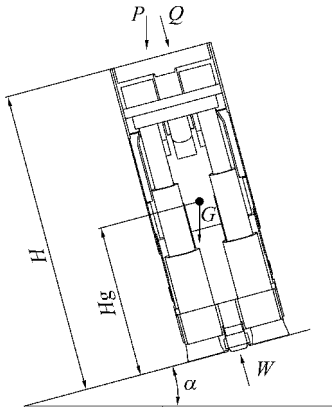


图 2　液压支架倾斜状态

Fig. 2　Incline condition of Hydraulic support

当大采高支架底座沿工作面下滑,将引发支架沿工作面向上倾倒的趋势。支架对底座下侧边缘的倾倒力矩为

$$M = fHQ + 0.5B_wQ + 0.5(G + P)B_w\cos\alpha - GH_g\sin\alpha + PH_p\sin\alpha \quad (2)$$

其中:H_p 为掩护梁背矸重力在支架上的作用高度;B_w 为液压支架底座宽度;H_g 为液压支架重心位置高度。根据液压支架重心位置,将支架工作高度 H 和重心高度进行拟合,可近似得出液压支架高度与其重心高度间的关系为

$$H_g = 0.512\,5H + 0.157\,5 \quad (3)$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

支架空载时,顶板压力 $Q=0$,$P=0$,此时液压支架倾倒力矩为

$$M = 0.5GB_w\cos\alpha - G\sin\alpha(0.512\,5H + 0.157\,5) \tag{4}$$

基于同样的算法计算,液压支架空载状态下的失稳角度见表 1。

表 1　8.2 m 液压支架失稳角度

Table 1　In stableility angle of 8.2 meters hydraulic support

失稳状态	失稳角度/(°)		
	最低高度	最大采高	最大高度
前倾失稳	39.2	19.3	18.2
后倾失稳	45.2	27.5	26.1
横向失稳	25.2	13.2	12.5

2)四连杆铰接间隙对稳定性影响。液压支架四连杆铰接处存在的间隙会使液压支架结构产生横向偏斜,顶梁相对于底座及支架中心线发生偏移,对液压支架横向稳定性产生影响,超大采高支架尤为明显。四连杆机构最大偏斜角为

$$\gamma = \arctan\frac{d_1 - d_2}{b} + \arctan\frac{d_1 - d_2}{B} \tag{5}$$

其中:d_1、d_2分别为销孔与销轴直径;B 为包容耳板宽度;b 为被包容耳板宽度。则顶梁前端总偏斜量为

$$\delta = \sum_{i=1}^{3} l_i \times \sin\gamma_i \tag{6}$$

其中:l_i 为连杆长度;γ_i 为连杆的最大偏斜角。液压支架高度越低,理论上立柱最大偏斜角度越大,如图 3 所示,但支架在低位时,重心稳定,不易产生偏斜,立柱偏斜不会达到最大值。综上所述,四连杆铰接间隙越大,支架各结构件偏斜幅度越大,对支架稳定性影响越大,因此应严格控制铰接间隙。

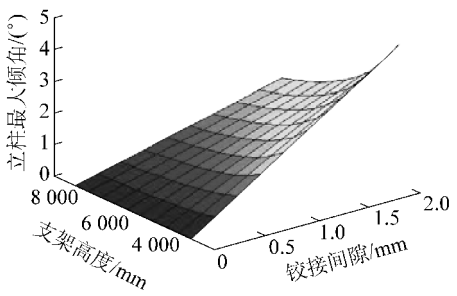


图 3　支架立柱倾斜角度受铰接间隙影响

Fig. 3　Relationship of inclination angle and joint clearance

ZY21000/38/82D 液压支架支架横向连接间隙控制在 4~8 mm,轴孔间隙控制在 0.500~0.875 mm 之间,支架在最高位置时,顶梁最大横向偏移量为 85 mm,立柱横向倾斜角度最大为 0.71°。

2.2　液压支架防片帮技术

大采高工艺常有煤壁片帮发生,随着采高增加,片帮现象将更容易出现,因此片帮控制是 8 m 大采高能否成功的关键;合理的顶梁前端支顶力和护帮机构参数是控制工作面片帮的重要条件[7-9]。

1)提高液压支架初撑力和前端支顶力。采高增加后工作面片帮加剧的一个原因是前方支承压力增加,压力影响范围增大,煤壁附近煤体的承载能力严重降低。提高液压支架初撑力和支架前端支顶力可以控制顶板下沉量,从而控制煤壁附近煤体内裂隙的发育,避免工作面片帮。

2)合理设计护帮装置,优化护帮板结构,提高护帮效果。设置护帮装置也是控制煤壁片帮的重要手段。护帮装置应具有一定的支撑能力和调节余地,根据数值模拟可知,当采高达到 5 m 时,开始出现片帮趋势,当采高达到 8 m 时,有出现长度大于 2.5 m 片帮的趋势。

为了提高液压支架的防片帮能力,支架顶梁采用刚性整体带伸缩梁结构,顶梁前端采用带四连杆机构的三级护帮装置,如图 4 所示,伸缩梁和护帮板分体设计,2 套机构独立工作,能够充分发挥各自支护能力,有利于煤壁及时支护。护帮高度为 4 350 mm,采用液压联动使三级护帮更好的贴合煤壁;可以对煤壁形成有效防护。数据模拟和现场经验都显示,该方案护帮力大,对煤壁破坏范围小,有利于抑制煤壁片帮,在超大采高工作面开采过程中防片帮能力强。

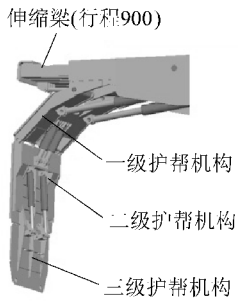


图 4　分体式三级协动护帮装置

Fig. 4　Three-level split type sprag unit

2.3　液压支架抗冲击性能

1)大缸径抗冲击立柱研制。液压支架外载主要来源于顶板压力,受岩层自重、回转空间及滑落空

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

间影响,超大采高工作面液压支架所受到的顶板压力常表现为冲击载荷。

ZY21000/38/82D 单颗立柱工作阻力达到 10 500 kN,缸径达到 530 mm,设计中采取了一系列措施以增加其抗冲击性能,大幅提高了支架抗冲击性能及可靠性:①缸口采用等强度矩形螺纹连接、导向环采用三道设置,保证连接导向的可靠性,保证连接强度的同时便于立柱加工时拆装;采用整体密封沟槽;密封圈采用聚氨酯复合密封圈,密封效率高,可靠性高[13];②立柱缸筒和活柱采用 30CrMnSi 材料,能有效提高材料的机械性能和热处理性能,确保立柱可靠性;缸筒内壁及导向套镀铜处理,提高抗腐蚀能力;③立柱采用一个 4 000 L/min 与一个 500 L/min的双安全阀,保证及时排出冲击时受压液体,保证立柱安全,并在上腔装防涨缸安全阀,此时冲击情况下外缸内压力小于 1.25 倍额定工作压力。

2)拼装式柱窝结构设计。采面矿压以外载的形式作用在液压支架上,液压支架垂直方向的支撑力主要由立柱提供,立柱在支架上的直接作用点是柱窝,其工作性能直接影响液压支架支护质量。

ZY21000/38/82D 液压支架柱窝采用锻造的拼装式柱窝,即柱窝并不直接与支架顶底板焊接,而是在柱窝下部焊接垫板,在垫板与支架梁体间焊接“井”字型筋板,使柱窝与底板间形成蜂窝状的箱型结构,如图 5 所示。

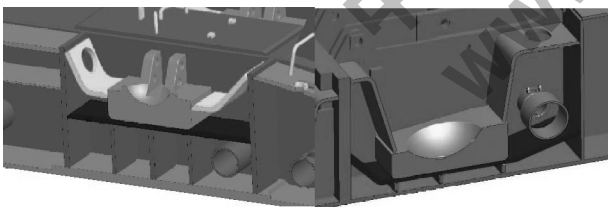


图 5　蜂窝箱型+双层 U 型垫板+锻造式柱窝结构

Fig. 5　Structure of pillar socket with honeycomb+double U cushion

柱窝本身区别于传统铸造式镂空柱窝,采用锻造加工成实体结构,在增加其承载能力的同时,减少加工缺陷,有效改善柱窝力学性能。加工过程中,柱窝通过两侧双层 U 型板加固,增加了柱窝与支架梁体间的焊缝连接强度;蜂窝箱型结构具有良好的吸能效果[17],可以有效提高支架的抗冲击能力。

2.4　工作面大梯度过渡方式

当工作面煤层开采高度达到 8.0 m 时,巷道高度受到掘进设备及支护技术的限制,一般只有 4.0~4.5 m,这样工作面采高与巷道所形成高度差达到 4 m 左右。常规的逐渐过渡的配套方式造成工作面两端部过渡段顶部三角煤损失和支架偏载加剧,给生产和维护带来诸多问题。

在 8.2 m 大采高工作面中,采用“大梯度+小台阶”短缓过渡配套方式,很好地解决了巷道与工作面大高度差过渡问题。工作面巷道利用端头支架支护,高度 4.5 m,工作面靠近巷道处,先利用 2~3 架中部支架将采高逐渐降低到 7 m 左右,在巷道端头支架与中部支架之间,利用特殊大梯度过渡支架进行过渡,使过渡支架大侧护板与端头支架搭接,小侧护板与已降低高度的中部支架搭接,如图 6 所示。特殊过渡支架左右侧护板大小不同。小侧护板为正常侧护,大侧护板为铰接的侧翻板,在正常开采过程中为大梯度过渡提供侧护,在支架最低高度时避免干涉运输机机头。该短缓过渡方式在避免了巷道与工作面高度过大造成支护困难的同时,可减少工作面端部过渡段顶部三角煤损失,改善液压支架受载状态,提高煤炭采出率,单个工作面可多回采煤炭超过 40 万 t。

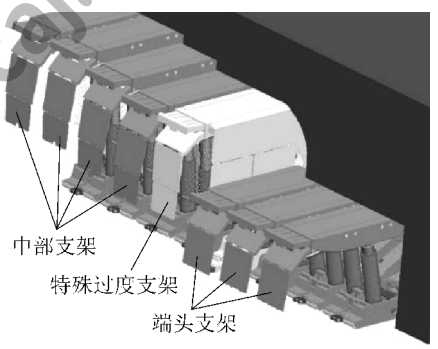


图 6　大梯度+小台阶过渡方式

Fig. 6　Transitional scheme with great gradient + small bench

2.5　高强度焊接结构钢及其焊接性能

在保证高可靠性的前提下,为达到轻量化目的,ZY21000/38/82D 液压支架拟采用新型高强度焊接结构钢 Q890 作为主要材料进行加工。将新材料应用于生产之前,需要在明确材料机械性能基础上进行焊接性能研究。

1)高强度焊接结构钢机械性能。Q890 高强度钢板的屈服强度下限为 955 MPa,抗拉强度为 1 000 MPa,其物理性能满足煤矿液压支架用易焊接高强度钢板规定,见表 2 和表 3。

2)高强度焊接结构钢焊接性能研究。Q890 为超低碳合金钢,碳当量低,有一定淬硬倾向,必须进行焊前预热或焊后热处理。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 2　Q890 化学成分

Table 2　Chemical components of Q890

测试编号	化学成分质量分数/%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Al	B
实测 1	0.052	0.382	1.545	0.008	0.005	0.214	0.217	0.479	0.025	0.035	0.004
实测 2	0.066	0.334	0.795	0.003	0.003	0.369	0.485	0.971	0.026	0.040	0.004

表 3　Q890 机械性能

Table 3　Mechanical properties of Q890

参数	下屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
实测值	955	1 000	16

根据材料最高硬度试验及焊接接头试验,对于厚度不超过 25 mm 的钢板,预热温度应不低于 80 ℃;随着钢板厚度的增加,其焊接预热温度应随之提高,对厚度为 40 mm 的钢板,预热温度应不低于 120 ℃,且厚度为 40 mm 的 Q890CFD 高强度钢板采用 300 ℃焊后保温时(去氢),焊缝平均抗拉强度为 1005 MPa,采用 480 ℃焊后去应力保温,焊缝平均抗拉强度为 962 MPa。采用 480 ℃焊后去应力保温时,焊缝的韧性得到提高,抗拉强度与母材接近,符合等强匹配的要求。说明对于 40 mm 的 Q890 高强度钢板采用焊后去应力处理,保温温度为 480 ℃比较合适。

在将 Q890 新材料运用于 8.2 m 液压支架前,需要检验其整体焊接性能。经过预热工艺、层间温度、后热处理等一系列试验研究,结果表明材料整体性能优良,未出现冷裂纹和开焊现象。ZY21000/38/82D 液压支架最终结构减重 15%,且在井下工作性能良好,通过了井下恶劣环境考验。

3　结　　论

8.2 m 大采高液压支架设计与制造关键技术的突破,将工作面一次采全高的高度提高至 8 m 以上,为我国安全高效矿井的建设和发展提供技术保证,为 8 m 以上超大采高成套装备的研制积累了宝贵的经验。

1)稳定性是超大采高液压支架具有良好支护性能的前提,提高支架横向刚度、控制孔轴间隙能提高支架稳定性,此外应进行轻量化设计,降低支架重心位置。

2)超大采高工作面矿压显现剧烈,提高支架初撑力及顶梁支顶力可有效防止煤壁片帮,使用蜂窝箱型结构拼装锻造式柱窝能加强支架的抗冲击性能。

3)“大梯度+小台阶”短缓过渡方式,可以完好解决工作面端头部位顶板支护,减少端头三角煤损失,提高煤炭资源采出率。

4)Q890 结构钢强度较目前广泛使用 Q690 材料强度高,作为液压支架主要结构用钢减重效果明显,可进一步推广应用。

参考文献(References):

[1] 王国法,庞义辉,张传昌,等.超大采高智能化综采成套技术与装备研发及适应性研究[J].煤炭工程,2016,48(9):6-10.
WANG Guofa,PANG Yihui,ZHANG Chuanchang,*et al*.Intelligent long wall mining technology and equipment and adapTableility in super large mining height working face [J]. Coal Engineering, 2016,48(9):6-10.

[2] 张银亮,赵摇军.国产大采高液压支架的研究现状与发展趋势[J].煤矿开采,2008,13(6):1-3.
ZHANG Yinliang, ZHAO Raojun. Status quo and development tendency of domestic powered support with large mining height[J]. Coal Mining Technology,2008,13(6):1-3.

[3] 王金华.特厚煤层大采高综放工作面成套装备关键技术[J].煤炭科学技术,2013,41(9):1-5,28.
WANG Jinhua. Key technology of complete equipment of fully-mech-anized top coal caving face with large mining height in extra-thick seam[J].Coal Science and Technology,2013,41(9):1-5,28.

[4] 张子飞,杨俊哲,代贵生,等.7 m 大采高综采工作面开采关键技术研究[J].煤炭工程,2015,47(3):1-4.
ZHANG Zifei,YANG Junzhe,DAI Guisheng,*et al*.Research on key technology of 7 m high cutting fully mechanized working face [J]. Coal Engineering,2015,47(3):1-4.

[5] 韩会军.超大采高液压支架稳定性分析[J].煤矿机械,2017,38(4):61-63
HAN Huijun. STableility analysis of powered support with large mining height[J].Coal Mine Machinery,2017,38(4):61-63

[6] 王国法,庞义辉,李明忠,等.超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J].煤炭学报,2017,42(2):518-526.
WANG Guofa,PANG Yihui,LI Mingzhong,*et al*.Hydraulic support and coal wall coupling relationship in ultra large height mining face [J].Journal of China Coal Society,2017,42(2):518-526.

[7] 杨培举,刘长友,吴锋锋.厚煤层大采高采场煤壁的破坏规律与失稳机理[J].中国矿业大学学报,2012,41(3):371-377.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

YANG Peiju, LIU Changyou, WU Fengfeng. Breakage and falling of a high coal wall in a thick mined seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 371-377.

[8] 吴　浩, 宋选民. 8.5 m 大采高综采工作面煤壁稳定性的理论分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(3): 22-25.
WU Hao, SONG Xuanmin. Theoretical analysis on coal wall sTableility of fully mechanized 8.5m high cutting longwall mining face [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 22-25.

[9] 张银亮, 刘俊峰, 庞义辉, 等. 液压支架护帮机构防片帮效果分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 691-695.
ZHANG Yinliang, LIU Junfeng, Pang Yihui, *et al*. Effect analysis of prevention rib spalling system in hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 691-695.

[10] 庞义辉. 机采高度对顶煤冒放性与煤壁片帮的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 105-111.
PANG Yihui. Influence of coal cutting height on top-coal caving and drawing characteristics and rib spalling[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 105-111.

[11] 尹希文, 闫少宏, 安　宇. 大采高综采面煤壁片帮特征分析与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 222-225.
YIN Xiwen, YAN Shaohong, AN Yu. Characters of the rib spalling in fully mechanized caving face with great mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 222-225.

[12] 赵志礼. 双伸缩立柱底阀开启压力计算[J]. 煤矿开采, 2008, 13(3): 69-70.
ZHAO Zhili. Calculation of opening pressure of bottom valve of doubly telescopic prop[J]. Coal Mining Technology, 2008, 13(3): 69-70.

[13] 赵志礼, 宋智鹰. 立柱和千斤顶缸口矩形螺纹参数优化[J]. 煤矿开采, 2013, 18(2): 34-35, 93.
ZHAO Zhili, SONG Zhiying. Parameter optimization of rectangle screw thread of prop's and lifting jack's cylinder port[J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(2): 34-35, 93.

[14] 赵忠辉, 姜金球, 王　勇, 等. 液压支架立柱在冲击载荷作用下的有限元分析[J]. 矿山机械, 2010(11): 10-13.
ZHAO Zhonghui, JIANG Jinqiu, WANG Yong, *et al*. FEA of column of hydraulic support bearing impact load[J]. Mining & Processing Equipment, 2010(11): 10-13.

[15] 韩会军, 刘新华. 高端液压支架柱帽结构特点与适应性分析[J]. 煤矿开采, 2017, 22(2): 34-36.
HAN Huijun, LIU Xinhua. Analysis of structure feature and adaptableility on prop cap of high rank powered support[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(2): 34-36.

[16] 梁利闯, 田嘉劲, 郑　辉, 等. 冲击载荷作用下液压支架的力传递分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2522-2527.
LIANG Lichuang, TIAN Jiajin, ZHENG Hui, *et al*. A study on force transmission in a hydraulic support under impact loading on its canopy beam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2522-2527.

[17] 李永强, 宦　强. 基于 Ansys 的冲击载荷下蜂窝夹芯板的动力学响应[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2015, 36(6): 858-862.
LI Yongqiang, HUAN Qiang. Dynamic response of honeycomb sandwich panel under impact loading based on ansys[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, [J]. 2015, 36(6): 858-862.

[18] 程　骏, 张严敬, 荣和芳. 7m 大采高综采液压支架设计及配套[J]. 煤矿开采, 2013, 18(1): 25-27.
CHENG Jun, ZHANG Yanjin, RONG Hefang. Design of powered support and equipments matching for 7m mining height[J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(1): 25-27.

[19] 徐亚军, 王国法, 刘国柱, 姚连登, 屈朝霞. Q890CFD 液压支架用高强度结构钢焊接性能研究[J]. 煤矿机械, 2016(2): 52-54.
XU Yajun, WANG Guofa, LIU Guozhu, *et al*. Study on Weldability of Q890CFD high strength steel for powered support[J]. Coal Mine Machinery, 2016(2): 52-54.

[20] 徐亚军, 黄书祥, 刘成峰. Q890 高强度结构钢在液压支架应用的试验研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(3): 46-48.
XU Yajun, HUANG Shuxiang, LIU Chengfeng. Experimental research on Q890 high strength structural steel application in hydraulic support[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(3): 46-48.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net