机电与自动化

综合机械化固体充填采煤自动控制研究与应用

刘建功[1,2,3],毕锦明[4],赵利涛[2,3],谢国强[5]

(1. 冀中能源集团有限责任公司,河北 邢台 054000;2. 河北煤炭科学研究院,河北 邢台 054000;3. 国家能源充填采煤技术重点实验室,河北 邢台 054000;4. 冀中能源股份有限公司,河北 邢台 054000;5. 冀中能源股份有限公司 邢东矿,河北 邢台 054000)

摘 要: 为进一步提高充填采煤效率,保证固体充填质量的一致性,提出采用固体充填自动化技术,设计研发了固体充填自动化控制系统。给出了自动控制策略和方法,包括充填液压支架推力与密实充填率之间数学关系,充填体自由度对充填采煤工作的影响以及充填采煤的时空特性,深入剖析了自动化充填采煤与控制工作面顶板上覆岩层的运移规律。同时,系统中液压支架自动控制流程、传感器布控原理以及系统控制模式实现了现场工业应用。结果表明: 充填效率和推进速度均提升49%左右,劳动强度和充填成本大幅下降,充填效果明显提高,有力推动了固体充填采煤的科学发展。

关键词: 固体充填自动化; 自动化控制系统; 充填液压支架; 自由度; 充填效率

中图分类号: TD67 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)01-0149-08

Research and application on automatic control of comprehensive mechanized solid backfill coal mining

Liu Jiangong[1,2,3], Bi Jinming[4], Zhao Litao[2,3], Xie Guoqiang[5]

(1. *Jizhong Energy Group Corporation Limited, Xingtai* 054000, *China*; 2. *Hebei Coal Research Institute, Xingtai* 054000, *China*; 3. *National Energy Key Lab of Backfill Coal Mining Technology, Xingtai* 054000, *China*; 4. *Jizhong Energy Corporation Limited, Xingtai* 054000, *China*; 5. *Xingdong Mine, Jizhong Energy Corporation Limited, Xingtai* 054000, *China*)

Abstract: In order to further improve a backfill coal mining efficiency and to ensure a consistency of the solid backfill quality, an automatic technology of the solid backfill was provided and an automatic control system of the solid backfill was designed and developed. An automatic control tactics and method were provided, including the mathematical relationship between the thrust of the backfill powered support and the dense backfill rate, the backfill freedom affected to the backfill mining operation and the space-time characteristics of the backfill coal mining. The paper in detail analyzed the automatic backfill coal mining and the migration law to control the overburden strata above roof of coal mining face. Meanwhile, the automatic control procedure of the powered support in the system, the distribution and control principle of the sensors and the system control mode were realized in the site industrial applications. The results showed that the backfill efficiency and pushing forward speed were both improved about 49%, the labor intensity and backfill cost were highly reduced, the backfill effect was obviously improved and the scientific development of the solid backfill coal mining was powerfully promoted.

Key words: solid backfill automation; automatic control system; backfill powered support; freedom; backfill efficiency

0 引 言

煤炭作为我国主体能源,占有不可替代作用,随着煤炭开采机械化程度不断提高,煤炭采出率不断得到提升,但考虑到建筑物下、铁路下、水体下等“三下”压煤量依然巨大,与一些发达国家相比,我国煤炭采出率依然相对较低,解放“三下”压煤问题形势迫切,同时在传统的煤炭开采过程中,矸石、废

收稿日期: 2015-08-11; **责任编辑:** 赵 瑞 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.01.025

基金项目: 河北省重大技术创新资助项目(11276722Z)

作者简介: 刘建功(1956—),男,山东沾化人,教授级高级工程师,博士生导师,博士。E-mail: Liujg@jzeg.cn

引用格式: 刘建功,毕锦明,赵利涛,等. 综合机械化固体充填采煤自动控制研究与应用[J]. 煤炭科学技术,2016,44(1):149-156.

Liu Jiangong, Bi Jinming, Zhao Litao, *et al*. Research and application on automatic control of comprehensive mechanized solid backfill coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 149-156.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

水、地表沉陷以及瓦斯大量排放对环境造成了严重污染，为实现矿区可持续绿色开采带来严重阻力。为此，由我国自主研发的综合机械化固体充填采煤技术应运而生，并得到规模化工业推广[1-4]，而固体充填系统具有结构简单，成本低，充填效果好等特点，在充填采煤中占有重要位置。但是，由于充填工艺是人工操作，充填速度和效果对操作人员技术水平依赖性强，很容易造成充填效果不一致，充填稳定性受到影响，阻碍了充填能力和效果的发挥。如何提高充填效率和充填效果，是固体充填研究的重点[5-9]。为了进一步提高充填效率并形成规模化充填，冀中能源集团在全国范围内首次开展了工作面自动化充填采煤[10-15]，并取得成功。综合机械化充填采煤系统自动控制的成功应用，不仅提高了充填能力和效率，而且又提高了充填效果，降低了工人的劳动强度，取得了较好的社会效益和环境效益，是固体充填开采技术向成熟发展的标志，也是充填开采发展的方向。因此笔者针对固体充填自动控制策略、控制方案等方面进行了介绍，以期为煤矿充填开采提供技术参考。

1　固体充填自动控制策略

1.1　直接顶下沉量的影响因素

1) 直接顶下沉量 h_b。受充填装备、工艺和充填材料的影响，直接顶存在着下沉量，由充填前下沉量 U_1、充填过程下沉量 U_2 和岩石特征下沉量 U_3 组成。U_1 和 U_2 尽管不容易消除，但通过改变支架参数、结构，改善充填材料和工艺，以及加强现场管理，可以有效控制。但是，U_3 是由直接顶岩性和上覆岩层压力带来下沉量，不能人为控制，实际上充前和充后下沉量都与其有关(图 1)。直接顶下沉量 h_b 表达式可表示为[12]

$$h_b = U_1 + U_2 + U_3 \tag{1}$$

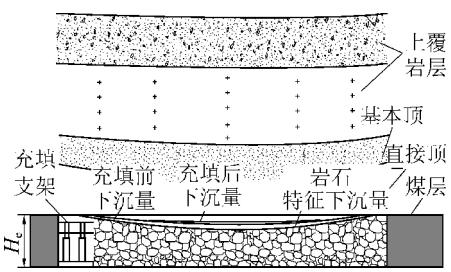


图 1　直接顶下沉量的影响因素

Fig. 1　Influencing factors of immediate roof sink

2) 密实充填率。充填不容易实现所有空间全部充填，因为充填的体积和形成支护顶板的实体体积有一个差别，称之为密实充填率 k_b，所以有:

$$h_b = H_c - (H_c - U_1 - U_3)\,k_b \tag{2}$$

其中，H_c 为采高，m。因 U_2 与 k_b 相关，为分析方便，因此，用 k_b 代替 U_2。充填过程中，U_1 和 k_b 是可控因素，而在充填区域，k_b 是控制重点。

3) 直接顶最大允许下沉空间 $h_{b,max}$。上覆岩层采动沉降结构力学模型如图 2 所示。

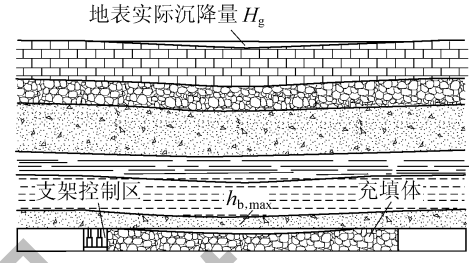


图 2　上覆岩层采动沉降结构力学模型

Fig. 2　Mechanical model of mining settlement structure in overlying strata

依据地表(村庄、铁路、水体)保护等级要求，确定地表沉降等级标准 $[H_i]$，得到直接顶最大允许下沉空间 $h_{b,max}$。控制 h_b 不大于 h_{bmax}，则可以保证充填效果满足地表沉降控制要求。

$$H_g = qh_{b,max}\cos\theta \tag{3}$$

若 $H_g = [H_i]$，则 $h_{b,max} = [H_i]/(q\cos\theta)$，则有:

$$H_c - (H_c - U_1 - U_3)\,k_b \leqslant [H_i]/(q\cos\theta) \tag{4}$$

式中: H_g 为地表实际沉降量，mm; q 为充填体上覆岩层载荷，MPa; θ 为直接顶与水平面夹角，(°)。

1.2　充填效果判断依据

按照 $h_{b,max}$ 与 $[H_i]$ 之间数学模型，确定 $h_{b,max}$ 影响因素和大小; 研究建立推压密实机构推力 F_N 与 $h_{b,max}$、h_b 和 k_b 的关系式，结合 h_b 和 H_g 不等式，确定 k_b 的边界值; 建立 F_N 与 k_b 之间的数学模型，由 F_N 边界值确定充填体最小受力，得出判定充填效果的依据。

1.3　自动控制策略

在固体充填采煤过程中，直接顶下沉影响着充填区域上覆岩层运移，进而引起地表沉降。影响固体充填采煤效果有若干因素，例如: 材料配比特性和湿度对充填的影响; 工作面地质条件对充填的影响; 推力与密实充填率的关系; 充填过程材料运动自由度对充填的影响; 充填采煤过程中时空特性的影响

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

等,必须系统全面考虑这些因素,才能完成充填自动控制过程。

根据地表保护等级需要和各种因素的影响,把各种因素作为过程条件,设定不同的控制参数; 建立推压密实机构推力 F_N 与 k_b 之间的数学关系; 确定自动控制策略,实现固体充填的自动控制。

2　固体充填自动控制方案

2.1　充填前顶板下沉量

工作面采动打破了岩体的平衡状态,在岩体的应力作用下,巷道发生变形,工作面顶板出现下沉,形成充填前下沉,实时检测支架的高度是充填开采面临的首要问题。当支架完成移架后,并与顶板充分接顶,记录此时的支架高度 h ,则充填前顶板下沉量为

$$U_1 = H_c - h \tag{5}$$

充填前下沉是不可避免的,但能够实现可控,在充填工作面,首先要保证液压支架足够的工作阻力,同时,要合理设计支架的结构形式,消除薄弱点,整个顶梁就能有效地支撑顶板,同时,在移架过程中,还要保证支架的初撑力足够大,防止支架让压下沉,这样,可最大限度地减少充填前下沉量。

2.2　固体充填物密实充填率 k_b 边界值

直接顶最大允许下沉空间 $h_{b,max}$ 是地面条件允许的最大下沉量,而 h_b 为人为可控因素, k_b 又影响和决定着 h_b 大小,为了满足限制地表沉降的目的, k_b 应满足式(6) 要求:

$$k_b \geqslant \frac{qH_c\cos\theta - [H_i]}{q\cos\theta(H_c - U_1 - U_3)} \tag{6}$$

2.3　充填体受推力与密实充填率之间

2.3.1　体积变化率和推力的关系

构建单元体数学模型如图 3 所示。假设充填体为均质状态。推压密实后,三向应力出现,取 α 方向任意边长为 a 的单元体, σ_x、σ_y 和 σ_z 分别为推力的水平、垂直和竖向应力,其中有 $\sigma_x = \sigma_y = \lambda\sigma_z$, λ 为侧压系数, $0 < \lambda < 1$ 。

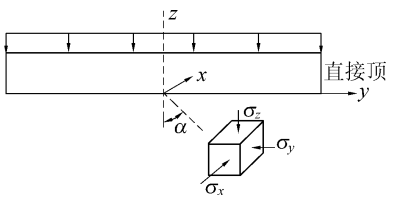


图 3　构建单元体数学模型

Fig. 3　Mathematical model of building unit cell

1) 原单元体体积为

$$v = a^3 \tag{7}$$

2) 推压密实过程结束后,单元体体积为

$$v_1 = (1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z)a^3 \tag{8}$$

其中, ε_x、ε_y、ε_z 分别为单元体水平、垂直、竖直方向的应变。展开式(8) ,略去高阶微量,变成为

$$v_1 = (1 + \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)a^3 \tag{9}$$

则单元体体积变化率 η 为

$$\eta = \frac{v_1 - v}{v} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \tag{10}$$

3) 因为单元体的变化具有一般性,充填体为均质状态,那么结合广义胡克定律应力 - 应变关系,得出单元体各方向上的应变为

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= [\sigma_x - \mu_1(\sigma_y + \sigma_z)]/E \\ \varepsilon_y &= [\sigma_y - \mu_1(\sigma_x + \sigma_z)]/E \\ \varepsilon_z &= [\sigma_z - \mu_1(\sigma_x + \sigma_y)]/E \end{aligned} \tag{11}$$

其中, E 为初始弹性模量,GPa; μ_1 为岩石泊松比。由式(10) 和式(11) 得

$$\eta = \frac{v_1 - v}{v} = \frac{(1 - 2\mu_1)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{E} \tag{12}$$

又有:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_x}{\lambda} = \frac{\sigma_y}{\lambda} = \frac{\mu_1}{1 - \mu_1}\sigma_x \tag{13}$$

联立式(12) 和式(13) 得

$$\sigma_x = \frac{E\eta(1 - \mu_1)}{(1 - 2\mu_1)(1 + \mu_1)} \tag{14}$$

$$\sigma_x = \frac{F_N}{A_s} \tag{15}$$

η 取决于固体物料进入量和 F_N ,决定 k_b 的大小, F_N 与 η 之间数学模型为

$$F_N = \frac{E_1 A_s \eta(1 - \mu_1)}{(1 - 2\mu_1)(1 + \mu_1)} \tag{16}$$

式中, A_s 为推压模式机构与充填体接触面积,m^2。

2.3.2　密实充填率与推力的关系

由动弹性模量公式,得出:

$$E_m = K_m\sqrt{s}E_1 \tag{17}$$

其中: E_m 为充填体最终被压实后的弹性模量,GPa; K_m 为弹模系数; s 为充填体特征参数值; E_1 为充填体的初始弹性模量,GPa。式(17) 中各参数具体数值可根据《矿山开采沉陷及其损害防治》表查得。结合岩体力学理论,可知:

$$E_m\varepsilon = q \tag{18}$$

其中, q 为均压载荷,充填体由初始强度至最终

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

强度的应变 ε 可表示为

$$\varepsilon = \frac{v_1 - v_2}{v_1} = 1 - k_b \tag{19}$$

其中：v_1 为充填体初始体积，m^3；v_2 为充填体压实后最终体积，m^3。

F_N 与 k_b 之间数学模型由式(16)—式(19)可以推出：

$$F_N = \frac{qA_s\eta(1-\mu_1)}{K_m\sqrt{s}(1-2\mu_1)(1+\mu_1)(1-k_b)} \tag{20}$$

F_N 与 k_b 之间的数学表达式，可为实现自动控制充填采煤、推压密实机构循环作业提供科学判定依据。

2.3.3　实际推力关系式

推压装置作用力方向如图 4 所示，在实际工作中，推压装置用力方向与水平面存在一个角度，机构推力为 T 时，与 F_N、k_b 关系如下：

$$T \geqslant [T] \tag{21}$$

$$[T] = \frac{qA_s(1-\eta)(1-\mu_1)}{\cos\arctan(h/L+b-im)K_m\sqrt{s}(1-2\mu_1)(1+\mu_1)(1-k_b)}$$

式中：$[T]$ 为推压密实机构允许推力，N；L 为支架与预留充填空间间距，m；b 为支架预留充填空间长度，m；i 为支架循环推压次数；m 为一次循环进尺，m。

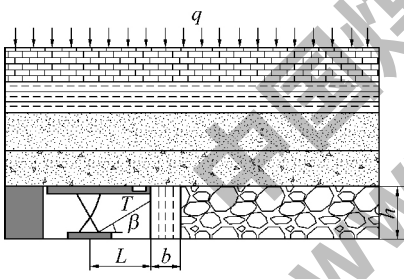


图 4　推压装置作用力方向

Fig. 4　Force direction of push device

当推压密实机构长度达到 $L + b - im/\cos\beta$，且满足实际密实推压机构推力 T 不小于允许推力 $[T]$，则说明充填体充分接顶，并且密实充填率达到要求。

2.4　充填工作面地质条件对充填的影响

2.4.1　仰采情形

仰采时，假设工作面走向倾角为 α_1，充填材料自然堆积后的安息角为 θ_1，实际的安息角为

$$\theta' = \theta_1 + \alpha_1 \tag{22}$$

此时，充填材料实际的安息角是大于自然堆积后的安息角，推压密实机构与充填材料可接触面积较大，利于充填材料的推压密实，如图 5 所示。

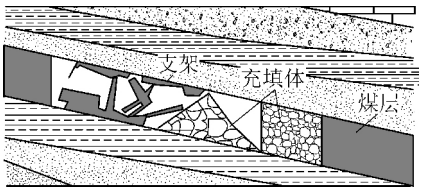


图 5　工作面仰采时充填材料堆积效果的影响

Fig. 5　Packing material accumulation effect when face overhead mining

仰采充填时，下放的充填材料更有利于充填材料的堆积成型，此时的推压密实效果较好，可以充分利用这个优势适当减少投料和推压密实的轮次。

2.4.2　俯采情形

俯采时，实际的安息角为

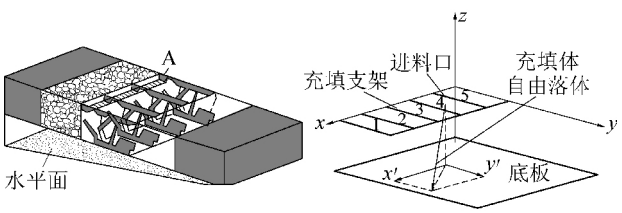
$$\theta' = \theta_1 - \alpha_1 \tag{23}$$

此时，充填材料实际的安息角小于自然堆积后的安息角，推压密实机构与充填材料可接触面积较小，不利于充填材料的推压密实。

俯采充填时，下放的充填材料有向推压密实机构一侧运动和堆积的趋势，在确保已推压密实的充填材料成型的条件下，为更好地保证现有的推压密实效果，需增加投料和推压密实的轮次。

2.4.3　工作面倾角

工作面倾角在一定范围内，对充填的效果和工艺影响并不大，当工作面倾角一旦达到落料超过本架推压范围，则需要改变操作方式，按照倾角方向，启动相应支架推压密实机构，才能达到推压密实的效果。图 6b 中 x、y、z 坐标系依据工作面倾向、走向以及垂直底板方向而建立，实体线代表充填料落料轨迹，根据工作面倾向与走向倾角，可以分解出沿工作面倾向和走向位移 x' 和 y'。



(a) 工作面充填支架布置　　(b) A处落料示意

图 6　工作面倾向与走向倾角对落料影响

Fig. 6　Influence between working face inclination and strike pitch on blanking

2.5　充填体自由度影响

尽管固体充填物料加入一定水分后有黏着力，

但仍然保持着散料的基本特性，受力时存在流动性，形成自由度，对推压密实的效果较差。

如果单一密实机构推压时，充填体的自由度较大，充填体有向两侧产生运动的趋势，推压密实的效果不好，如图 7 所示。充填材料落至 2 号支架对应的区域时，自动开启邻架群动模式推压密实，1、2、3 号支架的推压密实机构同时推压充填材料，这就使充填材料的自由度减小，推压密实效果得到了增强。充填材料落至 3 号支架对应区域时，2、3、4 号支架的推压密实机构同时运动。

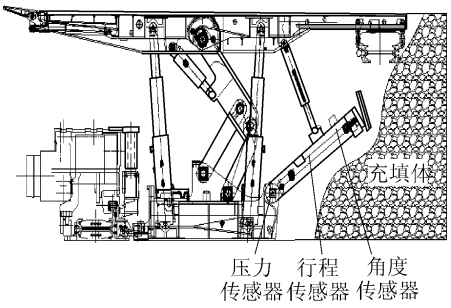
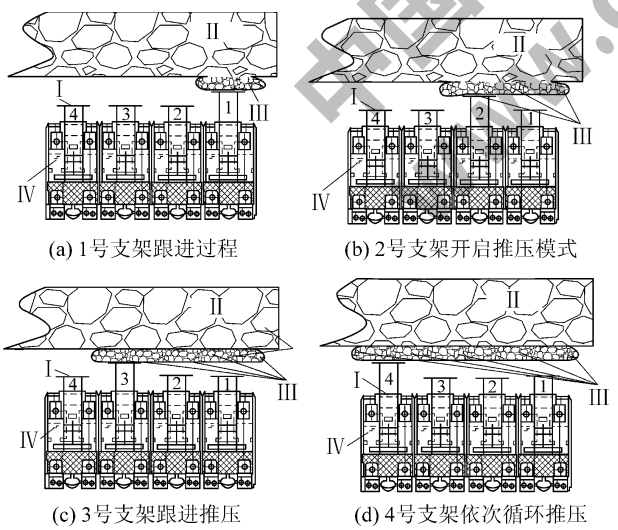


图 7　单一密实机构推压效果

Fig. 7　Push effect of single solid institutions

同时，为了保证充填效果，减小充填体的自由度，还可以采用顺序多轮密实和加宽推压面积的方法[10]，多组合推压密实机构循环工作情况如图 8 所示。充填液压支架控制流程如图 9 所示。



(a) 1号支架跟进过程　(b) 2号支架开启推压模式

(c) 3号支架跟进推压　(d) 4号支架依次循环推压

Ⅰ—推压机构; Ⅱ—充填体; Ⅲ—自由度; Ⅳ—液压支架
1—4 为支架号

图 8　多组合推压密实机构循环工作示意

Fig. 8　Duty – cycle operation of multiple combination solid institutions

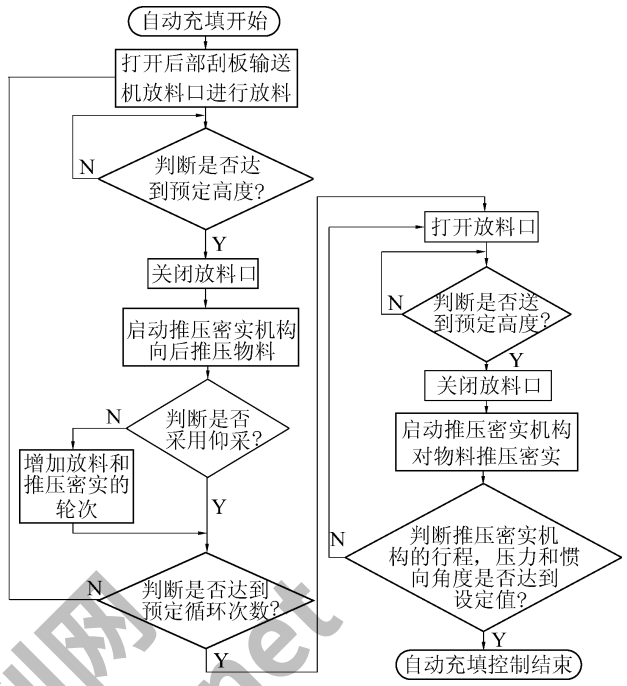


图 9　充填液压支架控制流程

Fig. 9　Control process of filling hydraulic support

3　固体充填自动控制的实施

固体充填采煤自动控制系统采用集散控制方式，由巷道主控系统、充填液压支架控制系统、矸石输送系统、液压系统、采煤机运行状态及位置参数控制系统、视频系统和数据传输系统组成。主控系统判断满足充填开采的条件，启动刮板输送机、转载机和带式输送机，并向支架控制器发送指令，支架程序自动完成充填任务后，向主控系统发送完成指令，并等待下一个循环任务，主控系统接到反馈后，向下一个液压支架发送充填指令，依次控制所有充填支架完成任务。

工作面巷道监控中心是整个工作面协调机制的控制系统，依据充填采煤工艺，控制充填液压支架和矸石物料运输系统; 依据工作面倾角及采用俯采或仰采的情况，实时调整充填液压支架采煤充填动作参数及矸石运输系统参数; 实时监控工作面充填作业和配套设备的信息; 实现数据处理、网络管理和诊断功能。

3.1　充填液压支架传感器布置

按照自动控制的要求，充填液压支架安装相应的传感器，包括压力传感器，角度传感器，行程传感器以及落料高度检测传感器(图 10)，判断充填状态给出过程信息，提供判断依据。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

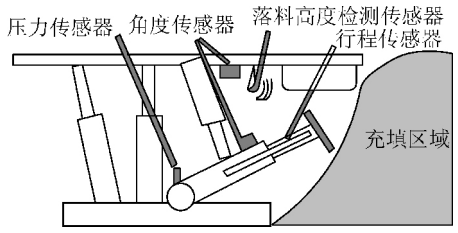


图 10　传感器检测位置示意

Fig. 10　Schematic diagram of sensor examine position

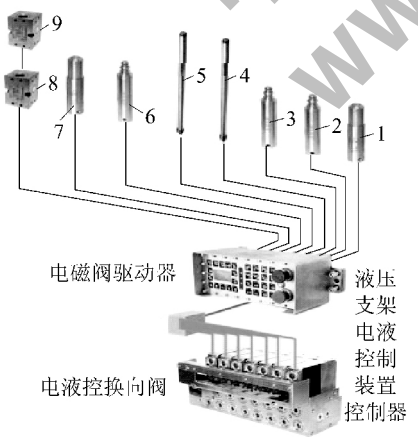
3.2　推压密实机构与充填刮板输送机防碰撞技术

1) 防碰撞原理。推压密实是在卸料刮板输送机下方进行的，根据液压支架角度，充填刮板输送机位置，液压支架及推压密实机构相关尺寸，计算出推压密实机构最大允许仰角，在充填过程中控制推压密实机构仰角小于最大允许仰角，避免两者相互碰撞。

2) 充填液压支架控制流程。传感器将现场检测的实时数据传输给控制器，控制器根据程序和指令来控制电磁阀驱动器，实时调整液压支架的动作参数以及推杆的角度、行程和运动频率，从而控制充填液压支架完成充填任务。

3.3　工作面采煤与充填协同作业流程

当采煤机行走一段距离，液压支架完成自动移架后，巷道主控系统根据设定参数判断是否具备自动充填的条件，若满足条件，巷道主控系统向相应的充填液压支架控制器发送充填指令(图 11)，依次控制充填支架完成充填任务。



1—红外接收器；2、3—前柱、后柱矿用压力传感器；4、5—摆梁推移、升降行程传感器；6—摆梁升降矿用压力传感器；7—落料高度检测传感器；8、9—摆梁、后梁升降矿用倾角传感器

图 11　充填液压支架自动控制系统

Fig. 11　Control system of filling hydraulic support

3.4　随动功能对工作面自动化充填系统的保护

自动化充填系统保护原理如图 12 所示，在机头安装监控摄像头，用于监控机头的堆料情况作为辅助决策依据。当发现机头出现堆料情况，且工作面执行充填任务的充填支架数量达到上限，可及时对各项参数进行调整。

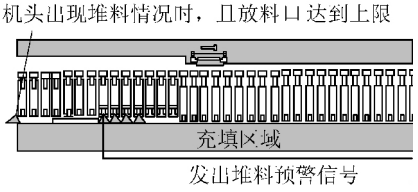


图 12　自动化充填系统保护原理

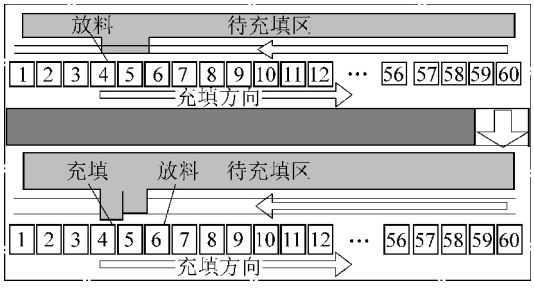
Fig. 12　Protection principle of automatic filling system

3.5　移架与充填刮板输送机后移协调同步控制

在充填与采煤平行作业中，为保证充填刮板输送机直率，安装了充填液压支架行程传感器，当液压支架跟机前移时，控制后方的充填刮板输送机同时移动相同的距离，满足平行作业需求。

3.6　充填液压支架控制模式

充填液压支架控制系统有手动充填控制模式、记忆充填控制模式以及自动化充填控制模式。①手动模式：支架操作人员可通过操作支架控制器相应动作按键直接对充填液压支架的充填动作进行控制。②记忆模式：控制器记录操作人员的单架动作操作序列及相应的动作时间，生成并存储记忆自动充填动作参数。操作人员可一键启动记忆自动充填循环，控制器将按照存储的记忆充填动作参数执行自动充填动作。③自动模式：控制器等待主控制器命令，当收到主控制器命令时，支架控制器根据内部存储的充填控制程序和动作参数，自动控制充填液压支架完成充填任务，并实时将充填状态反馈给主控制器。自动控制充填作业过程如图 13 所示。



1—60 为支架号

图 13　自动控制充填作业过程

Fig. 13　Process of automatic control of filling operation

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

1) 4—7 号支架进行充填作业时,8—11 号支架做充填预警。4 和 5 号架开始进行放料时,6 和 7 号支架做准备; 当 4 和 5 号支架结束放料,开始进行充填作业时,6 和 7 号架开始进行放料。

2) 完成一个放料、充填动作循环后,4 和 5 号支架继续开始放料,6 和 7 号支架开始进行充填作业; 依次循环,直至 4—7 号支架全部充填完毕。

3) 8—11 号支架继续进行与上述相同方式循环充填作业。固体自动充填系统整体控制流程如图 14 所示。

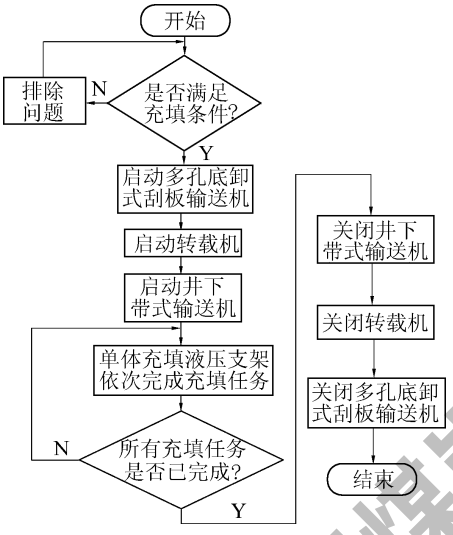


图 14　固体自动充填系统整体控制流程

Fig. 14　Whole control process of solid automatic filling system

4　固体充填采煤自动控制系统应用效果

综合机械化固体充填自动控制工作面在邢东矿正式使用后,充填效率和推进速度均提升了 49% 左右; 充填工人数量由 12 人缩至 3 人,并且劳动强度明显降低; 单个支架充填时间从 9 min 降至 6.5 min,密实充填率标准差从 0.117 降低到 0.024; 顶板平均下沉量从 295 mm 降至 185 mm; 每吨成本降低 12.2 元,成本大幅下降,充填效果明显提高,经济效益明显。

综合机械化固体充填采煤自动控制技术研究过程中,成功应用了固体充填采煤自动控制的判断依据,保证了固体充填质量的一致性; 开发出自动控制落料系统,形成了充填采煤自动化顺序作业工艺; 设计了矸石充填单架及成组控制方式,完成了充填与密实的协同作业,提高了回采与充填效率,建成了具有自主知识产权的完整的控制系统。综合机械化固体充填采煤自动控制系统的成功实施,使固体充填效果判断依据理论上有了突破,充填效果从人为判断进入自动判断阶段,充填效果有了标准规范工作程序,有力推动了固体充填采煤的科学发展。

参考文献(References) :

[1] 刘建功. 冀中能源低碳生态矿山建设的研究与实践 [J]. 煤炭学报,2011,36(2):317 - 321.
Liu Jiangong. Study and practice of low - carbon ecological mining construction of Jizhong Energy Group [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):317 - 321.

[2] 刘建功. 综合机械化固体充填采煤技术研究 [J]. 煤炭与化工,2013,36(1):1 - 7.
Liu Jiangong. Solid - filling rechnology in fully mechanized coal mining [J]. Coal and Chemical Industry,2013,36(1):1 - 7.

[3] 王家臣,杨胜利,杨宝贵,等. 长壁矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟实验 [J]. 煤炭学报,2012,37(8):1256 - 1262.
Wang Jiachen,Yang Shengli,Yang Baogui,*et al*. Simulation experiment of overlying strata movement features of longwall with gangue backfill mining [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(8):1256 - 1262.

[4] 王家臣,杨胜利. 固体充填开采支架与围岩关系研 [J]. 煤炭学报,2010,35(11):1821 - 1826.
Wang Jiachen,Yang Shengli. Research on support - rock system in solid backfill mining methods [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(11):1821 - 1826.

[5] 刘长友,杨培举,侯朝炯,等. 充填开采时上覆岩层的活动规律和稳定性分析 [J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):166 - 169.
Liu Changyou,Yang Peiju,Hou Chaojiong,*et al*. Movement law and stability analysis of overlaying strata under the condition of mining with filling [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2004,33(2):166 - 169.

[6] 李　猛,吴晓刚,姜海强,等. 基于充填率控制的导水断裂带发育高度研究 [J]. 煤炭科技,2014,40(1):50 - 57.
Li Meng,Wu Xiaogang,Jiang Haiqiang,*et al*. Study on development height of water fracture zone based on the control of filling rate [J]. Coal Science and Technology Magazine,2014,40(1):50 - 57.

[7] 张吉雄,吴　强,黄艳利,等. 矸石充填综采工作面矿压显现规律 [J]. 煤炭学报,2010,35(S1):1 - 4.
Zhang Jixiong,Wu Qiang,Huang Yanli,*et al*. Strata pressure behavior by raw waste backfilling with fully - mechanized coal mining technology [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(S1):1 - 4.

[8] 武飞龙,周华强,李　峰,等. 充填开采引起地表沉陷的影响因素探讨 [J]. 能源技术与管理,2008(1): 21 - 26.
Wu Feilong,Zhou Huaqiang,Li Feng,*et al*. Analysis the facts of surface subsidence by backfilling mining [J]. Energy Technology and Management,2008(1):21 - 26.

[9] 黄艳利,张吉雄,张　强,等. 充填体压实率对综合机械化固体

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

充填采煤岩层移动控制作用分析[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(2):162-167.
Huang Yanli,Zhang Jixiong,Zhang Qiang,*et al*. Strata movement control due to bulk factor of backfilling body in fully mechanized backfilling mining face[J]. Journal of mining & Safety Engineering,2012,29(2):162-167.

[10] 焦山林,刘建功,郑强强,等. 矿用固体充填液压支架控制系统[J],煤矿机械,2015,36(2):236-238.
Jiao Shanlin,Liu Jiangong,Zheng Qiangqiang,*et al*. Hydraulic support control system of mine-used solid filling[J]. Coal Mine Machinery,2015,36(2):236-238.

[11] 刘建功,赵庆彪. 综合机械化充填采煤[J]. 煤炭学报,2010,35(9):1413-1418.
Liu Jiangong,Zhao Qingbiao. Comprehensive mechanized filling coal mining[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(9):1413-1418.

[12] 刘建功,赵利涛. 基于充填采煤的保水开采理论与实践应用[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1545-1551.
Liu Jiangong,Zhao Litao. Theory of water protection and practice application in mining based on the backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1545-1551.

[13] 郭志杰,姚宝志. 邢台矿矸石与粉煤灰充填开采地表移动规律分析[J]. 矿山测量,2010(3):82-84.
Guo Zhijie,Yao Baozhi. Surface movement law is analyzed of filling coalmining face by rawwaste in Xingtai Mine[J]. Mine Surveying,2010(3):82-84.

[14] 郝宝生,张书国. 矸石与粉煤灰混合充填开采的试验研究[J]. 中国煤炭,2009,35(11):63-65.
Hao Baosheng,Zhang Shuguo. An experimental study on waste stone-fly ash mixture for stowing after mining[J]. China Coal,2009,35(11):63-65.

[15] 刘建功. 冀中能源低碳生态矿山建设的研究与实践[J]. 煤炭学报,2011,36(2):317-321.
Liu Jiangong. Study and practice of low-carbon ecological mining construction of Jizhong Energy Group[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):317-321.

(上接第 148 页)

[17] 邓　军,徐精彩,徐通模,等. 煤自燃性参数的测试与应用[J]. 燃料化学学报,2001,29(6):553-556.
Deng Jun,Xu Jingcai,Xu Tongmo,*et al*. Test and application of the spontaneous combustibility parameters of coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2001,29(6):553-556.

[18] 徐精彩,文　虎,葛岭梅,等. 松散煤体低温氧化放热强度的测定和计算[J]. 煤炭学报,2000,25(4):387-390.
Xu Jingcai,Wen Hu,Ge Lingmei,*et al*. Determination and calculation of oxidation heat liberation intensity of loose coal at low temperature stage[J]. Journal of China Coal Society,2000,25(4):387-390.

[19] 陈晓坤,易　欣,邓　军. 煤特征放热强度的试验研究[J]. 煤炭学报,2005,30(5):623-626.
Chen Xiaokun,Yi Xin,Deng Jun. Experiment study of characteristicself-heating intensity of coal[J]. Journal of China Coal Society,2005,30(5):623-626.

[20] 郭小云,王德明,李金帅. 煤低温氧化阶段气体吸附与解析过程特性研究[J]. 煤炭工程,2011(5):102-104.
Guo Xiaoyu,Wang Deming,Li Jinshuai. Study on gas adsorption and solution process features at coal low temperature oxidation stage[J]. Coal Engineering,2011(5):102-104.

[21] 焦新明,王德明,仲晓星,等. 基于 CO 浓度求解煤自燃临界温度的影响因素分析[J]. 煤矿安全,2012,43(3):11-15.
Jiao Xinming,Wang Deming,Zhong Xiaoxing,*et al*. The analysis of influencing factors on coal spontaneous combustion calculate critical temperature based on CO concentration[J]. Safety in Coal Mines,2012,43(3):11-15.

[22] 尹晓丹,王德明,仲晓星. 基于耗氧量的煤低温氧化反应活化能研究[J]. 煤矿安全,2010,41(7):12-15.
Yin Xiaodan,Wang Deming,Zhong Xiaoxing. The research on activation energy of coal oxidation at low temperature based on oxygen consumption[J]. Safety in Coal Mines,2010,41(7):12-15.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net