

大断面硐室底鼓分步控制研究

王金^{1,2},王卫军^{1,2},彭文庆^{1,2},赵建峰^{1,2}

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省
重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:以曲江高坑暗皮带斜井机头硐室为工程背景,采用理论分析、数值计算、现场试验等手段,研究暗皮带斜井机头硐室的底鼓特征与机理,分析机头硐室底板应力分布情况。认为硐室底鼓及不对称变形的主要原因是频繁扰动影响、应力分布不均衡及围岩性质差等。根据底鼓分步控制原理,提出“第一步钻孔卸压,第二步锚索+槽钢+喷浆”的分步控制方式,并在该硐室实施。运用数值模拟比较分析新方案支护前后硐室塑形区和应力变化,工程实践表明该支护方案对控制机头两端相对位移和底鼓的效果良好。

关键词:底鼓;大断面硐室;钻孔卸压;分步控制

中图分类号:TD323

文献标识码:A

Research on large section cave floor heave steps control

WANG Jin^{1,2}, WANG Wei-jun^{1,2}, PENG Wen-qing^{1,2}, ZHAO Jian-feng^{1,2}

(1. School of Mining and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Hunan Xiangtan 411201, China; 2. Hunan University of Science and Technology, Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan Xiangtan 411201, China)

Abstract: Taking Qujiang Gao Keng subinclined belt shaft head chamber as the engineering background, its floor heave characteristics and mechanism and its floor stress distribution were analyzed by theoretical analysis, numerical simulation, field test method. The main reason of floor heave and asymmetric deformation was frequent disturbed, unbalanced stress distribution and rock properties etc. To control the stability of surrounding rock of the chamber, the key measures is to control the uniform stress distribution, followed by controlling the shallow rock stress concentration degree, and finally improving the roadway surrounding rock. The surrounding rock deformation can be controlled. According to the principle of floor heave steps control, "the first step is to borehole pressure relief, the second step is to cable + channel + spray" is proposed and is put into effect in that tunnel. The new supporting scheme chamber plastic zone and stress change with original supporting scheme were compared by utilizing numerical simulation. Engineering practice shows that the new supporting scheme effect is good for controlling the relative displacement of head ends and the floor heave, the key measures is to control the uniform stress distribution

Key words: heave; large section cave; borehole pressure relief; steps control

硐室底鼓破坏会影响井下运输,进而导致矿井无法正常生产,甚至造成事故。如何采取更有效的治理措施来防治复杂条件下硐室底板遭受破坏受到业内人士越来越多的关注^[1-4]。我国对巷

道底鼓控制方面的研究成果很多。许多专家学者对底板锚杆、开掘卸压巷、全断面锚注等底鼓治理措施进行了深入研究。灵北煤矿曾采用爆破注浆、封闭式支架与爆破等分步控制防治软岩巷道

收稿日期:2015-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51434006,51374105);湖南省教育厅资助项目(12cy013,13C308);湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S130003)

作者简介:王金(1989-),男,云南曲靖人,研究生,研究方向为巷道围岩控制。

底鼓,取得了较好的支护效果^[4];谢广祥等^[5]提出了超挖锚注回填技术;高明中^[6]提出带底拱的U型钢可缩性支架、混凝土碇和弧板等全断面支护法,以及底板锚杆、底板注浆和锚注结合的方法治理底板;高延法^[7]研制的封闭式混凝土支架使混凝土处于三向受压状态控制超千米巷道底鼓;王卫军^[8-9]提出巷道围岩是有顶板、底板、两帮组成的复合结构体,加固两帮控制深井巷道底鼓。然而,目前对大断面硐室底板破坏机理及控制对策方面的研究仍然十分缺乏。因此,本文以江西高坑煤矿暗皮带斜井机头硐室为研究对象,运用两种力学模型分析底鼓机理,提出合理的底鼓治理方法。

1 工程概况及变形特征

1.1 工程概况

高坑煤矿暗皮带斜井布置在工业广场高一正断层上盘扫边槽底板中,为矿井三水平以下主要运煤系统。巷道由上到下分别布置在扫边槽底板垫底槽层位及底部砾岩层位中,暗皮带斜井机头位置位于-146 m标高,距地面垂直深度为350 m,断面较大,曾采用砌碇支护方式。暗皮带斜井机头位置围岩中含较多的斜绿泥石和水钙沸石,遇水后容易软化、泥化和膨胀,影响巷道的稳定。硐室断面图如图1所示。

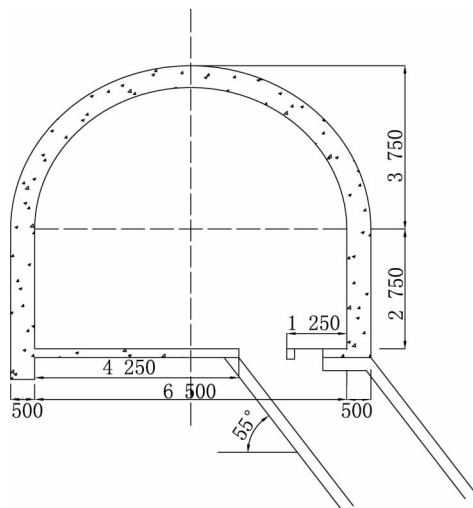


图1 机头断面图

Fig.1 The nose cavern section

1.2 变形破坏特征

在现场共布置了6个钻孔,分别对帮部、底板围岩进行了窥视。

在暗皮带斜井机头硐室帮部围岩中,裂隙最为发育位置在2.4 m以内;在3.2~3.8 m的位置较为松散。现场调查可知,暗皮带斜井机头自受采动影响以来,由于高地应力、围岩岩性差等各种原因,使硐室变形十分严重,呈现出以下特征:

(1)帮变形严重:两帮变形量突出且明显,左帮变形尤为明显,变形量已达150 mm。

(2)变形持续时间长:根据窥视结果分析,由于井筒破碎最为严重的应该在2.0~2.4 m,3.5 m左右的范围出现少量裂隙,所以硐室帮部的大变形应是长期持续的结果。

(3)不对称底鼓明显:由于帮部破坏比较严重、支护初期忽略巷道底板控制的重要性及底板施工困难,导致硐室底板出现不对称底鼓,表现为硐室左半部底鼓大于右半部,因不对称底鼓量严重致使皮带运输机机头不能正常运行。

2 围岩底鼓与围岩破坏

研究表明,该硐室围岩破坏是围岩底鼓导致的结果^[9],硐室底板受到动压扰动影响而变形破坏,严重影响巷道围岩稳定性。因此,有必要从理论计算和数值模拟两方面来分析底鼓与巷道围岩变形破坏的关系。

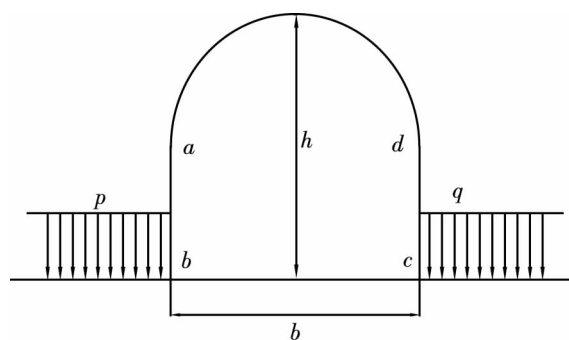
2.1 底鼓模型理论分析

目前,为了分析底鼓机理,常用的计算方法有板状及松散状岩体两种模型,由本文的钻孔窥视可知,宜采用松散岩体模型进行分析。由于影响底鼓的因素很多,概括起来有两个主要方面,即:巷道周围过高的应力以及底板松软的岩层,两个因素相结合导致了底板岩层扩容并向巷道内挠曲、流变等^[10]。朱川曲^[11]将巷道围岩的应力环境简化后建立力学模型,作用在巷道两侧支承压力被简化为两个集中力,作用点在支承压力峰值点。在不考虑遇水膨胀性底鼓时,引入郎肯土压力理论来分析软岩巷道底鼓的原因^[12]。为便于分析,假设底板两侧所承受的载荷为均布荷载 p 。如图2所示,取右侧底板分析。假定 cj 为挡土墙,根据郎肯土压力理论, cj 各点上所受的主动压力强度和被动压力强度为^[13]:

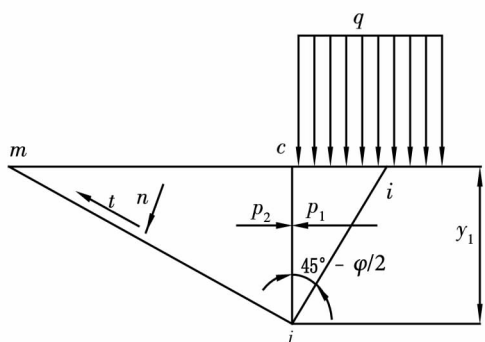
$$\text{主动土压力系数 } K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

$$\text{被动土压力系数 } K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$$

式中, φ —松散岩体的折算摩擦角(参照类似矿井



(a) 巷道模型



(b) 底板模型

图2 松散体围岩力学分析模型

Fig.2 The surrounding loose rock mechanical analysis

取值为 50°)。cj 范围内: $\sigma_1 = (q + \gamma y) K_a$, $\sigma_2 = \lambda y K_p$; j 点以上, $\sigma_1 > \sigma_2$, 岩体处于塑形状态; j 点处, $\sigma_1 = \sigma_2$, 岩体处于极限平衡; j 点以下, $\sigma_1 < \sigma_2$, 岩体处于弹性状态; 式中, γ - 上覆岩层的平均容重; q - 均布荷载, kPa。右侧底板极限破坏深度 y_1 :

$$y_1 = \frac{q}{\gamma} \frac{K_a}{K_p - K_a} \quad (1)$$

由(1)式可知, y_1 以下的底板岩体向上鼓起, y_1 以下将不会出现移动。

$$p = p_1 - p_2$$

$$p_1 = \frac{1}{2}(\gamma y_1 + q) y_1 K_a$$

$$p_2 = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 K_p \quad (2)$$

将 p 分解为法线和切线方向:

$$n = p \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

$$t = p \cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (3)$$

沿 mj 的有效滑动力:

$$t_1 = t - n \tan \varphi \quad (4)$$

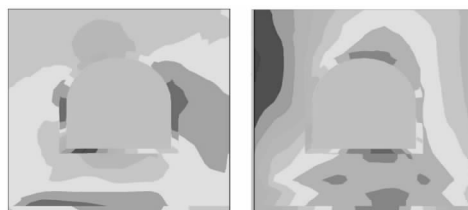
$$t_1 = [(\frac{1}{2} \gamma y_1^2 + \frac{1}{2} q y_1) K_a - \frac{\gamma y_1^2}{2} K_p] [\cos(45^\circ -$$

$$\begin{aligned} & \frac{\varphi}{2}) - \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \frac{2 \cos^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) - 1}{2 \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}] \\ & = [(\gamma y_1 + q) K_a - \frac{\gamma y_1^2}{2} K_p] \frac{y_1}{4 \cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2})} \end{aligned} \quad (5)$$

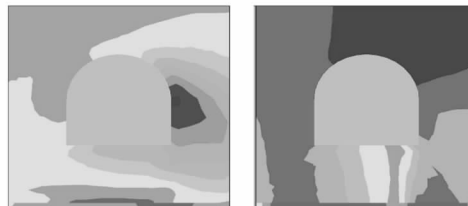
高坑煤矿暗斜井机头硐室底板岩石参数: 容重 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, 硐室埋深为 350 m 平均垂直应力 $q = 8.75 \text{ MPa}$, 由于硐室左侧的煤仓能起到卸压的作用, 根据数值模拟分析可得硐室右侧的最大垂直应力为 9.3 MPa, 左侧的垂直应力为 7.2 MPa, 折算摩擦角 $\varphi = 52^\circ$, $K_p = 8.434$, $K_a = 0.118$, 右侧极限破坏深度 $y_1 = 3.72 \text{ m}$, 有效滑动力 $t_1 = 0.7 \text{ MPa}$ 。同理可得左侧极限破坏深度 $y_1' = 2.88 \text{ m}$, 有效滑动力 $t_1' = 0.42 \text{ MPa}$ 。在机头右侧即靠近硐室左帮有底鼓破坏, 而左帮右侧没有底鼓破坏, 高坑煤矿暗斜井机头硐室底鼓形式为准全断面底鼓。此时, $y_1' \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) > b$ (b 为硐室宽度 6.5 m), 底板岩体在两侧压力的作用下向上鼓起, 底压均匀分布。

2.2 机头硐室数值模拟

以暗斜井机头硐室原支护方案及其对应的地质资料为依据, 建立计算模型。模型尺寸: $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 20 \text{ m}$; 巷道尺寸: $4.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 。分别模拟巷道断面的应力及位移分布云图, 具体见图 3。



(a) 水平应力与垂直应力云图



(b) 水平位移与垂直位移云图

图3 应力位移云图

Fig.3 umerical calculation model

由图 3 可知, 最大垂直位移在巷道中央底板位置, 巷道最大水平位移在靠近左帮底角处。由本文 2.1 节力学分析可得底板第一分层水平应力

临界载荷为 2.47 MPa,小于作用在其两端的水平应力,说明已经发生破断而产生底鼓量;而第二分层的临界载荷为 19.76 MPa,远大于数值模拟的最大水平应力值 11.1 MPa,说明底板第二分层没有发生破断。

2.3 硐室围岩破坏机理

由上述理论分析、数值模拟及现场调查情况可得出:暗斜井机头段发生严重支护失效的原因有以下 4 个方面:

(1) 扰动影响多、应力水平高且应力场极不均衡。上覆煤层采动影响及机械运转扰动对机头硐室影响明显。机头硐室巷道围岩的高应力是导致巷道围岩进入塑性且发生大变形的主要原因。由数值模拟结果显示硐室处于不对称应力环境中,巷道围岩塑性区容易扩展、支护结构破坏严重,最终将逐步出现不对称变形、底鼓严重情形。

(2) 原支护方案针对性差。原支护方案采用“砌碛结构”支护形式,该支护形式用于控制高应力扰动有着很多不足。首先,支护强度不够,“砌碛结构”支护结构提供的支护阻力十分有限,不足以对抗该环境中的高应力;其次,频繁的应力扰动对砌碛结构也是一种严重的威胁。由上述分析可知,原支护方案对不对称应力不具有针对性,对高应力分布的区域没有重点加强支护,因而,对巷道围岩的变形破坏限制作用十分有限,从而导致其在采动和构造应力作用下剧烈变形。

(3) 巷道围岩岩性差。由机头硐室下段的斜井巷道围岩内节理裂隙发育情况可以推测,随着裸露时间延长,节理裂隙被侵蚀严重,由 x 衍射图谱分析可知围岩内部含有膨胀矿物的粘土,此类岩体遇水膨胀,整体强度表现的极低,在高应力作用下,塑性区极易形成。

(4) 构造应力的影响。该段岩层内部存在的地质构造有 DF4、DF5、DF9 和 BF1 等正断层,构造应力加剧了巷道围岩应力场的不均衡。

3 暗斜井机头分步控制

3.1 分步控制原理

从该硐室围岩变形过程可知,硐室围岩变形右半部分明显大于左半部分,尤其是底鼓此类现象更加明显,故而导致皮带运输机头传动轴受力极不均衡。因而,针对这种变形特征,应采取卸压

与“锚索+槽钢+喷浆”分步的控制方法进行控制。卸压针对其高应力集中明显区域进行,“锚索+槽钢+喷浆”针对卸压后的巷道围岩进行全面补强加固。只有通过两者相互配合的方法,才能让巷道围岩变形趋于稳定,最大限度的消减不对称变形,巷道围岩稳定控制得以实现。

钻孔卸压的设计思想是为了减小巷道围岩变形、降低支护压力,每个钻孔形成一定的破碎区,当破碎区互相接近后,便能使围岩起到卸压的作用。此次通过钻孔窥视得知机头硐室两帮 4 m 内围岩较为破碎,因此采用大孔径深孔卸压方式。对钻孔卸压时间应做合理安排,既要保证钻孔卸压充分,又要保证卸压时间不能过长,消减卸压作用。

主要通过高强支护来减少围岩强度损失。巷道围岩是一个复合结构体,加固两帮可有效控制巷道底鼓^[2]。由钻孔窥视、数值模拟计算结果及力学模型分析,在机头硐室的二次支护方案中支护重点在巷道左帮和靠左底板位置。

3.2 分步控制方案

依据分步控制原理,结合现场工程地质条件,提出对巷道右半部高应力区域进行钻孔卸压,改善围岩的应力状态,使其应力向深部转移。对两帮及底板采用“锚索+槽钢+喷浆”整体加固围岩,从而使巷道围岩不均应力对巷道围岩的破坏得以控制,如图 4 所示。

结合巷道围岩条件,借助正交实验、FLAC3D 数值仿真程序分别对锚杆(索)的排距、间距、长度及直径等参数进行模拟优化,得出的支护参数如下:

(1) 锚杆参数。锚杆: $\Phi 22$ mm, $L=2\ 500$ mm 左旋无纵筋普通螺纹钢锚杆,锚杆间排距为 800 mm $\times$ 800 mm,每根锚杆 3 卷 K2350 树脂锚固剂。

(2) 锚索支护。锚索: $\Phi 17.8$ mm, $L=7.3$ m 的钢绞线,间排距为 1 600 mm $\times$ 1 600 mm。树脂端部锚固,锚固长度 2 000 mm。

(3) 喷网:金属网 $\Phi 6$ mm,网格 100 mm $\times$ 100 mm,尺寸 1 000 mm $\times$ 800 mm。喷射混凝土层厚 100~120 mm。

(4) 底板锚索:底板锚索: $\Phi 17.8$ mm, $L=4.3$ m,间排距:2 400 mm $\times$ 2 400 mm。每两根锚索采用高强度刚带或梯子梁连接起来,形成一体。

(5) 局部注浆方案:注浆孔深 3.5 m,排距均为 2 m。

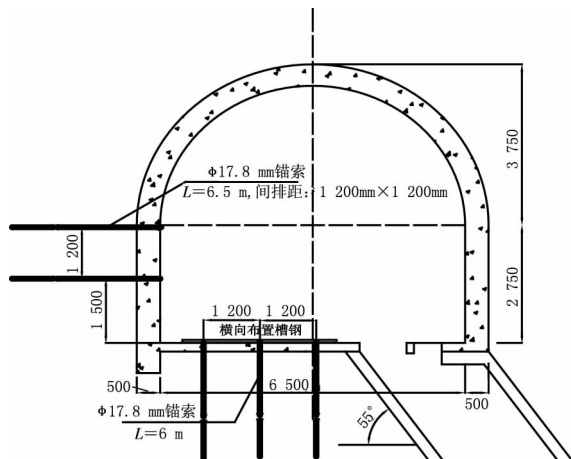
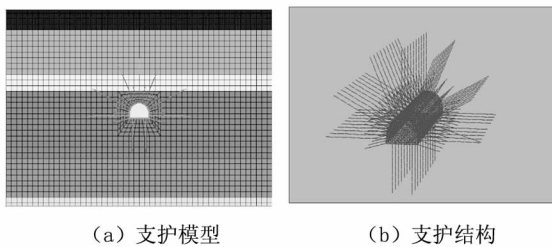


图4 次支护方案图

Fig.4 The secondary supporting

3.3 控制方案数值模拟

依据图5(a)的巷道模型,运用FLAC软件建立新支护计算模型如图5所示,计算新支护方案的应力与位移云图,如图6所示。

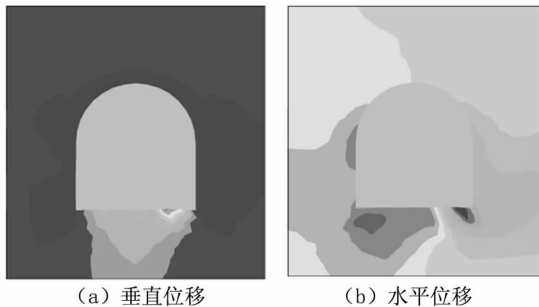


(a) 支护模型

(b) 支护结构

图5 数值计算模型

Fig.5 Numerical calculation model



(a) 垂直位移

(b) 水平位移

图6 新方案应力位移云图

Fig.6 Stress and displacement of new scheme

结果显示:采用新的支护方案后的塑性区范围减小为0.5 m,左右的塑性环均匀分布在巷道四周,塑性区被控制在了“塑性环”大致均匀缓慢扩展阶段,顶板塑性区最大值1.0 m,两帮均为0.5 m。巷道两帮最大移近量为30.27 mm,顶底板移近量为38.09 mm,底鼓量仅为54.39 mm。新支护方案围岩塑性区发展进程控制曲线如图6所示。因此,采用“锚网索喷+局部注浆加强”的支护方案,可有效阻止围岩塑性区的恶性扩展,保持巷道在

服务年限中正常使用。

4 工程检测与效果分析

在机头硐室试验段设置了四个相对位移检测点对机头两端和皮带两端进行了一个月的观测和记录。机头两端的相对位移量会影响煤矿正常运输;皮带两端检测点分别位于硐室帮脚和中间,所测的相对位移可近似等同于硐室的底鼓量。

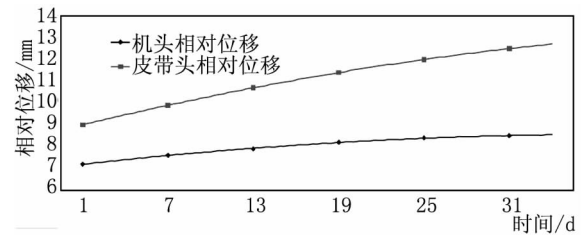


图7 暗斜井机头硐室皮带两端相对位移和机头两端相对位移

Fig.7 Relative displacement of belts ends and head end in subinclined head chamber

如图7所示,皮带和机头两端相对位移的增量逐渐降低说明钻孔卸压对压力释放效果较好,有效的限制了硐室底鼓量和机头两端的相对位移。在钻孔卸压后将进一步对底板进行“锚索+槽钢+喷浆支护”分步控制,提高底板巷道围岩的整体性和强度。

5 结论

依据塑性区控制原理,提出了“锚网索喷+局部注浆加强”的支护形式。数值计算与现场实践表明:敏感部位的塑性区局部畸变被较好地控制,塑性区总体均匀变化,围岩变形在可控范围之内,保证了巷道的正常使用。

参考文献:

- [1]姜耀尔. 巷道底鼓机理及控制方法的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,1993.
- [2]韩 颂,张恩强. 红石岩煤矿回采巷道变形破坏机理与治理研究[D]. 西安:西安科技大学,2013.
- [3]陈少帅,白峰青,刘 猛,等. 邢东矿隐蔽致灾因素研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(2):97-100.
- [4]高延辉,庞建勇. 复杂条件下埋深硐室底鼓机理及支护技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2011.
- [5]谢广祥,常聚才. 超挖锚注回填控制深部巷道底鼓研究[J]. 煤炭学报,2010,35(8):1242-1246.
- [6]高明中. 巷道压曲性底鼓的机理与控制[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2008,28(1):20-24.
- [7]高延法. 钢管混凝土支架力学性能实验及其在巷道支

护中的应用[C]//第八届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会. 台北,2009:1-10.

- [8] 王卫军,冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5):808-811.
- [9] 王卫军,彭刚,黄俊. 高应力极软破碎岩层巷道高强度耦合支护技术研究[J]. 煤炭学报,2011,36(2):225.
- [10] 康红普,陆士良. 巷道底鼓机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报,1991,2(4):362-373.
- [11] ZHU CHUAN QU. Mechanics model and numerical anal-

ysis of floor heave in soft rock roadway[J]. Journal of Coal Science and Engineering,2011,17(4):372-376.

- [12] 倪龙鑫,李帅. 深井软岩巷道卸压锚注支护技术实践[J]. 中国矿业,2012,21(2):394-398.
- [13] 高明仕,张农. 三维锚索与巷帮卸压组合支护技术原理及工程实践[J]. 岩土工程学报,2005,27(5):587-590.

(责任编辑 王利君)

(上接第77页)

度 $t_{sd} = 6^{\circ}\text{C}$ 时,该循环在不同传热温差下,高温循环中冷凝温度对其 COP 的影响。结果显示,在传热温差固定不变时, COP 随着冷凝温度的增大而近似呈直线急剧下降;当冷凝温度一定时, COP 与传热温差成正比。

3 结论

1) 对于带回热器的 R404a/ CO_2 复叠式制冷循环,过冷度对其 COP 影响较为显著,在不同蒸发温度、不同低温循环冷凝温度条件下均可提高系统性能系数 COP 。说明增加过冷度是提高 R404a/ CO_2 复叠式制冷循环性能系数的有效路径之一。

2) 通过分析低温循环冷凝温度对系统 COP 的影响,可以看出在蒸发温度、高温循环冷凝温度、过冷度和冷凝蒸发器传热温差给定时,存在一个低温循环冷凝温度的最优值,使得系统循环 COP 最大。

3) 传热温差和高温循环冷凝温度对于该复叠式制冷系统 COP 也起到非常重要的作用,为提高系统的 COP ,应尽量增大冷凝蒸发器传热温差,降低高温循环冷凝温度。

参考文献:

- [1] 朱明善. 21 世纪制冷空调行业绿色环保制冷剂的趋势与展望[J]. 暖通空调,2000(2):22-26.
- [2] 史敏,贾磊,钟瑜,等. 二氧化碳制冷技术[J]. 制冷与空调,2007(6):1-5.
- [3] 李丽霞,姬长发,赵文秀. CO_2 制冷系统的技术进展

[J]. 能源技术,2008(5):285-289.

- [4] KITZMILLER W R. Advantages of CO_2 - Ammonia system for low - temperature refrigeration[J]. Power,1932(1):92-94.
- [5] GETU H M, BANSAL P K. Thermodynamic analysis of an R744/R717 cascade refrigeration system[J]. International Journal of Refrigeration,2008,31(1):45-54.
- [6] 宁静红,马一太,李敏霞. R290/ CO_2 自然工质低温复叠式制冷循环理论分析[J]. 天津大学学报,2006(4):449-453.
- [7] 宁静红,李惠宇,彭苗. R290/ CO_2 复叠式制冷系统的性能实验[J]. 制冷学报,2007(6):57-60.
- [8] 赖艳华,王庆为,吕明新,等. R404A/ CO_2 复叠式制冷系统的分析[J]. 山东大学学报:工学版,2011(6):115-121.
- [9] 赖艳华,王庆为,吕明新,等. R404A/ CO_2 复叠式制冷系统的熵分析[J]. 工程热物理学报,2012(6):1005-1008.
- [10] 靳光亚,谢英柏,刘春涛. NH_3/CO_2 复叠式制冷循环的分析与优化[J]. 电力科学与工程,2013(1):69-73.
- [11] 王庆为. R404A/ CO_2 复叠式制冷系统的理论分析与优化[D]. 济南:山东大学,2012.
- [12] 彦启森,石文星,田长青. 空气调节用制冷技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] QURESHI B A, ZUBAIR S M. The effect of refrigerant combinations on performance of vapor compression refrigerant system with dedicated mechanical subcooling[J]. International Journal of Refrigeration,2012(35):47-57.

(责任编辑 王利君)