

高温矿井降温空调的概况及进展

刘忠宝¹, 王 浚¹, 张书学²

(1. 北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系 505 教研室, 北京 100083;
2. 山东三河口煤矿, 山东 济宁 272100)

摘 要: 介绍了矿井空调的几种形式, 对不同形式的矿井空调进行对比, 指出目前需要解决的关键技术难题。结论认为: 涡轮式空气制冷、以热电站为热源的吸收式冷水机组在矿井中降温技术成熟; 冰冷却空调系统在矿井空调中还处在试应用阶段。

关键词: 高温; 矿井空调; 研究现状

中图分类号: TB6

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2002)03-0130-05

PROGRESS ON AIR-CONDITIONING OF COAL MINE

LIU Zhong-bao¹, WANG Jun¹, ZHANG Shu-xue²

(1. Department of Fight Vehicle and Mechanics, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China; 2. ShanDong SanHekou Mine Coal, Jining 272100, China)

Abstract: Several kinds of air-conditioning of coal mine are systematically introduced and compared. The key points of every kind of air-conditioning technique needing to be solved at present are indicated. It is concluded that turbine air refrigeration air-conditioning and absorption refrigeration driven by heat of thermal electric plant are reliable techniques in air-conditioning of coal mine. Ice-cooling system is still on the stage of experimental application.

Key words: high temperature; coal mine; air-conditioning; present researches

1 引言

随着矿井开采深度的增加, 岩石温度升高, 开采与掘进工作面环境的热害日益严重, 不少工作面的气温超过 28℃, 个别高达 34℃。在高温环境下作业, 矿工劳动生产率下降, 身体健康将受到损害, 同时严重威胁井下安全生产。

矿井通风不仅为井下工人提供赖以生存的氧气, 而且可以冲淡井下有害气体浓度, 降低井下温度, 是矿井安全生产的重要保障之一。然而对于高温矿井, 单靠矿井通风是不能解决高温热害影响的。矿井降温中的空气调节(以下简称矿井空调)技术作为控制井下高温热害最有效的措施, 已被世界大多数国家采用。我国的矿井, 尤其是煤矿, 高温热害又比较突出, 已成为制约生产的重要因素^[1]。

矿井空调虽然已有 80 余年的历史, 但迅速发展和较广泛地应用仅是近 30 年的事。1977 年, 原苏联研制成移动式矿用制冷机, 在煤矿和金属矿的独头掘进巷道中应用。1985 年 11 月, 南非在世界上首次用冰做载冷剂冷却空冷器的冷却水, 该系统的制冷能力达 628 MW。目前, 德国也在积极开展此项研究。1989 年, 南非一金矿建成压缩空气制冷空调系统, 将空气在地面压缩为液态, 通过管道输送到井下, 首先膨胀成气态后, 再进入空气制冷机, 排出的低温空气冷却工作面的风流。同年, 波兰研制出涡流管式空气制冷装置, 在煤矿掘进

收稿日期: 2002-04-02

作者简介: 刘忠宝(1971—), 男, 山东省菏泽市人, 博士后, 从事环境模拟与仿真以及车辆空调的研究工作。

工作面试用,取得了一定的空调效果。早在20世纪70年代,我国曾研制过压气引射器和涡流管制冷装置。1993年7月,平顶山矿务局科研所和原中国航空工业总公司第609研究所联合研制成KKL101矿用无氟空气制冷机。1995年,山东矿业学院陈平等提出用压气引射器和制冷机结合进行矿井空调。在此之前,我国采用的制冷设备主要是以氟里昂和氨为制冷剂的冷水机组^[1,2~5]。

本文作者在文献[6]中详细介绍了蒸气压缩式循环制冷空调、空气制冷空调、吸收式制冷空调以及吸附式制冷空调在装甲、坦克车辆上应用的情况。然而高温矿井空调系统与地面或车辆空调系统有很大的不同,如冷负荷主要受矿井地质条件和井深的影响,输冷管道长、井下电动设备需要防爆等。

目前研制的高温矿井空调系统根据热力学特点来分,大约有4种。第1种是蒸气压缩式循环制冷空调,主要是以氟里昂和氨为制冷剂的冷水机组;第2种是空气制冷空调,又有涡轮式空气制冷、变容式空气制冷、涡流管式空气制冷和压气引射器制冷等形式;第3种是以热电站为热源的溴化锂制冷、串联压缩式制冷机组或氨吸收式制冷机组;第4种是冰冷却空调系统。

以氟里昂为制冷剂的蒸气压缩式冷水机组,输冷管道长,投资大,而且目前存在氟里昂禁用问题。需研究相应替代物质制冷剂条件下这种空调系统在矿井中的应用。以氨为制冷剂的蒸气压缩式冷水机组及其配套系统结构复杂,氨易泄漏,具有腐蚀性,易爆。

空气制冷空调中,压气引射器和涡流管制冷装置,由于其制冷量小、噪音大,都没有被很好地应用;变容式空气制冷存在的问题是变容式压缩-膨胀器中一些关键技术问题,如变容式压缩机轴承和润滑需要解决等,目前美国等技术发达国家还处于研究阶段^[7~15]。采用涡轮式空气制冷、以热电站为热源的吸收式冷水机组以及冰冷却空调系统是日前矿井空调系统设计中可供选择的方案。

2 热电站为热源的吸收式冷水机组

韩学廷在文献[3]中指出,矿井降温冷源与煤矿热电站联产。采用大电网电力即外购电制冷的矿井空调系统,不仅本身电耗大,费用高,且加重矿区电力紧张、电费昂贵的局面,由此引起的煤炭成本升高将导致煤矿经济效益下降。这是我国煤矿高温矿井使用空调降温技术所面临的一个突出问题。煤矿生产伴有大量的煤矸石等劣质燃料,既占地又污染环境,且外运极不经济。利用丰富的劣质煤源,建设小型坑口自备热电站,除满足煤矿所需的热电能量外,可以配置以热电站为热源的吸收式制冷机,生产高温矿井和地面建筑所需的冷量,将大大提高煤矿的经济效益,且能改善矿区环境,推动第三产业的发展。

由于坑口热电站建于地面,利用电站热量的制冷机房若设在井底车场附近,需将热沿保温管道由地面输送到井底,热损较大,这是极不经济的。故制冷机房只能设于地面,这时,矿井降温空调系统需要制取1℃的冷水,而采用溴化锂制冷机显然满足不了这一要求。可在溴化锂制冷机之后再串联一级压缩式制冷机组,最终制出1℃冷水送往井下的降温系统。压缩式制冷机组用电也取自热电站所发电力。按折合有用能等价法计算出的联产电价非常便宜,为0.095~0.110元/kW·h,因而制出的低温冷冻水价格较低。

采用氨吸收式制冷机(制冷机房只能设于地面),则可以直接制取1℃冷水供井下降温系统使用。这种方案较串联制冷更能体现出热电联产的优越性。因为它生产的冷水所消耗的全是较低品质的煤气,而节省出的高品位电能供煤炭开采使用,减少或不用外购电,以提高整个煤矿的经济效益。尽管氨吸收式制冷机的当量热力系数较低(与电动蒸气压缩式制冷相比),但综合考虑制冷的全过程,两者的能耗大体相当。然而两者最大的区别是,联产制冷的最初燃料是作为废物的劣质煤炭,而外购电制冷的一次能源是供发电的优质煤,价格差距很大。因此,只要有条件搞热电联产的煤矿,应尽量选用这一矿井降温冷源方案。但是联产制冷需要建设小型坑口热电站,初始投资比较大^[3]。

蒸气压缩式循环制冷空调、热电站为热源的吸收式制冷机组都是利用制冷机制备的冷冻水作为供冷媒质,通过空冷器冷却风流,从而向采掘工作面供冷,其基本结构模式如图1所示。这种空调系统根据制冷站的安装位置、冷却矿内风流的地点、载冷剂的循环方式等,可分为井下集中空调系统、地面集中空调系统、井上下联合空调系统和井下分散局部空调系统^[5]。

(1) 井下集中空调系统。该系统的制冷机设在井下,通过管道集中向各工作面供冷水,系统比较简单,供冷管道短,没有高低压换热器,仅有冷水循环管路。但是必须在井下开凿大断面峒室,给施工和维护带来困

难,并且电机和控制设备都需防爆,难度大,造价高。并且,随着矿井开采深度的增加,矿井需求冷量的增大,井下集中空调系统的冷凝热排放困难则成为突出的问题,制约了制冷能力。

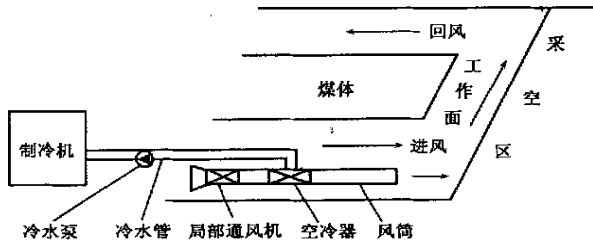


图1 冷水机组矿井空调系统送风结构模式

高差大,载冷剂输送管道中的静压很大,所以必须在井下增设一个中间换热装置(高低压换热器)。其中,高压侧的载冷剂循环管道承压大,易被腐蚀损坏,且冷损较大。

(3) 井上下联合空调系统。该系统制冷机分别设在地面和井下,具有地面和井下2个系统的特点。该设备布置分散,冷媒循环管路复杂,操作管理不便。

(4) 井下分散局部空调系统。该系统的制冷机可移动,仅供1个或局部高温场所空调使用。蒸发器即相当于空冷器。冷量传输距离小,冷损小,初期投资少,移动灵活。系统比较简单,但冷凝热排放困难,故仅适用于小范围的煤矿降温空调。

3 涡轮式空气制冷

涡轮式空气制冷是利用压缩空气经过涡轮绝热膨胀做功,从而使空气制冷。1993年7月,平顶山矿务局科研所和609研究所大胆借鉴空气制冷技术在航空、制氧、石油等工业上的成功应用经验,联合研制成KKL101无氟空气制冷机,为我国矿井空调开辟了一条新的途径。

KKL101无氟空气制冷机主要由涡轮膨胀机、水冷却器、水分离器、消音隔热风筒、阀门和压力表组成。从井下压缩空气主管来的压缩空气经过限流环将压力减小到0.22 MPa以下,然后进入涡轮膨胀机的压气机端增压。压气机的动力来自涡轮中空气膨胀时的输出功,空气在压气机中增压的同时,温度也随着升高;接着进入水冷却器与冷却水进行热交换冷却,使空气的温度降到接近压气机进口的空气温度。为防止空气中游离水进入涡轮膨胀机的涡轮端,在水冷却器出口处安装了水分离器,除去水的空气进入涡轮膨胀降温后流入隔热风筒,与风筒内的空气混合后输往工作面降温。涡轮膨胀机为二轮升压式结构,涡轮与压气机装在同一轴上,转速达50 000 r/min。压气机叶轮为离心式,涡轮叶轮为向心径流式。采用滚动轴承支承,油芯式润滑。水冷却器为单程叉流式,其换热芯片是由高密度波纹板、边条、隔板和端板在高真空度的真空炉中钎焊而成。连接端盖、接头等是由手工氩气保护焊焊成。具有结构紧凑、单位体积内传热面积大、质量小等优点^[2]。

涡轮式空气制冷机系统用空气制冷机作为高温矿井空调终端,如图2所示,它相当于冷水机组系统中的空冷器(如图3所示),具有系统简单,没有高低压换热器和空冷器,输冷管道少,承压小,材质要求低,施工技术难度低等特点。空气制冷机本身无需电力驱动,无防爆问题,空气既是制冷剂又是载冷剂,取之不尽,用之不竭,又无环境污染问题,在高温、高沼气煤矿具有很好的应用前景^[2,8~15]。但该系统需要矿井具有充足的压缩气源,通过经济分析比较,与蒸气压缩式空调系统相比,每千瓦制冷量的投资和年运行费用较高。

4 冰冷却空调系统

冰冷却空调系统就是利用地面制冰场制取的粒状冰或泥状冰,通过风力或水力输送至井下的融冰装置,与井下空调的回水进行直接热交换,使空调回水的温度降低^[4,7]。

与普通矿井空调系统相比,冰冷却空调系统由于利用冰的融解潜热进行降温,所以在同样冷负荷的条件下,向井下的输冰量仅为输水量的1/4~1/5。由于输冷管道和输送流量减少,管道投资费用和运行能耗降低,由管道温升而产生的冷损降低,所以系统的装机容量和投资费用都大大降低。它不存在普通矿井空调所难以克服的过高静水压力和冷凝热排放困难等问题,主要电动设备均在井上,不需要防爆,能较好地适应矿

井的安全要求。

冰冷却空调系统的应用主要应考虑:冰冷却空调系统的具体方式、冰的制备、冰的输送和冰的溶解等问题^[4]。

(1) 冰的制备。根据冰的形状可以分为粒状冰和泥状冰,根据制冰的传热机理可分为直接传热和间接传热。粒状冰冷却系统所采用的冰粒形状有多种,如立方体、圆柱体、管状和片状等,其形状主要是由制冰机蒸发器的几何形式所决定的。制取粒状冰需要制冰机有较低的蒸发温度($-15\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$),这使制冰机的性能系数降低。比较而言,管状与片状冰的制冰机性能系数要比立方体、锥体等块状冰的制冰机高。粒状冰的优点是较低的蒸发温度使得冰粒具有较大的过冷度,从而可以减小输送过程中的融化损失,而且便于输送。粒状冰制冰机的工作过程分为冻结和收冰两个阶段。冻结和收冰的时间影响着制冰机的性能。泥状冰是指水或盐水中混合的小冰晶,制取时形成的小冰晶从盐水中析出,冰比生成它的溶液纯净,这个过程叫做冰冻除盐。用于大规模泥状冰的制备有间接传热法、真空制冰法和直接传热制冰法。

(2) 冰的输送。冰的输送方式有传送带输送、风力输送、水力输送和重力输送。不同形状的冰和不同的输送位置应采用不同的输送方式。

粒状冰从制冰场到竖井井口可采用传送带或风力输送,竖井内以及井下到融冰槽的水平段可采用重力输送。风力输送属于管道输送的一种方式,压缩空气的压力应保持在 150 kPa 以上,实际应用时可达 400 kPa 。空气温度宜在 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下^[4]。在实际运行过程中应随时调整输冰速度和压缩空气量,防止冰块过于密集,导致管道阻塞或破裂。由于片状冰的表面积与质量比比较大,容易相互黏连,而导致管道阻塞,所以实际应用中应首选管状冰。

泥状冰只能采用水力输送,对管道和泵都没有特殊要求,其优点是可以直接利用改造后的冷水管进行输送。为了减轻过高的静水压力对井下设备的影响,可采用高低压换热器,也可安装水轮机等水能回收装置,以减少输送能耗^[4]。

(3) 冰的融化。为了保证冰的融化速度,必须在井下设置专门的融冰装置,并需对融冰机理进行研究。融冰机理的分析需要解决的是变冰量条件下的融冰过程分析和连续输冰条件的融冰过程分析。变冰量条件下的融冰过程指的是融冰过程中不再补充新的冰量,随着融冰的进行,冰床高度越来越低,残冰量越来越少。变冰量条件下的融冰过程属于非稳态过程,研究的主要目的是了解融冰装置内一定量的冰完全融化时所需要的时间。连续输冰条件下的融冰过程指的是随着融冰过程的进行,冰量不断地补充到融冰装置内,融冰过程中冰床高度和融冰装置的出水温度保持不变。连续输冰条件下的融冰过程属于稳态过程,研究的主要目的是探讨融冰装置的出口水温和冰床高度、进水流量、水温以及冰粒形状和大小等之间的关系。在进行系统控制设计时,应保证产冰量、输冰量和融冰量之间的平衡^[7]。

作为一项矿井空调的新技术,冰冷却空调系统在系统运行管理和控制方面有较高的要求。该系统在我国还处于试应用阶段。为在我国真正推广应用冰冷却空调系统,尚需开展许多工作,如适合不同冰制备方式的制冰设备的开发和研制,输冰系统和输冰设备的研究与开发,适合低温水和泥状冰传热要求的井下空冷器的研究与开发^[4,5,7]。

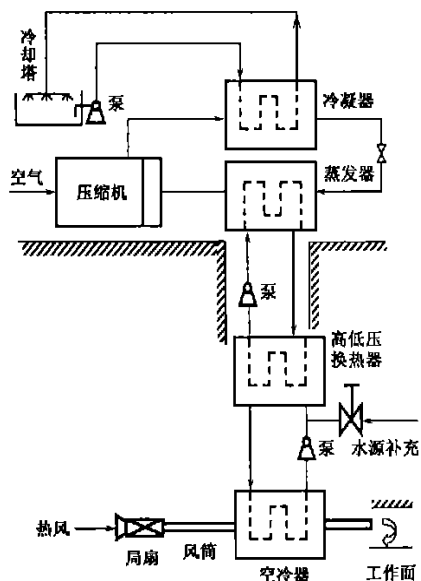


图2 涡轮式空气制冷矿井空调系统

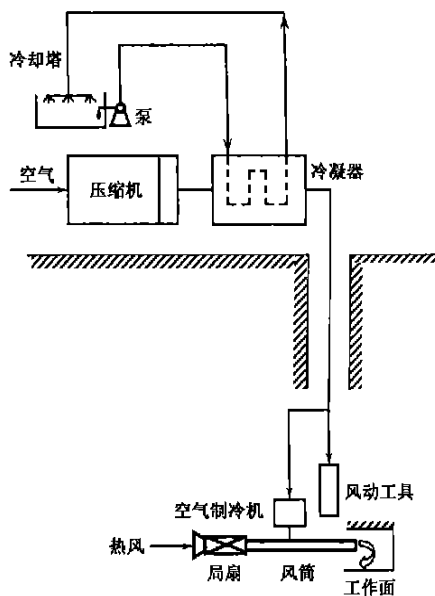


图3 冷水机组矿井空调系统

在我国真正推广应用冰冷却空调系统,尚需开展许多工作,如适合不同冰制备方式的制冰设备的开发和研制,输冰系统和输冰设备的研究与开发,适合低温水和泥状冰传热要求的井下空冷器的研究与开发^[4,5,7]。

5 结 论

我国高温矿井的数量不断增多,但热害程度不同。目前,涡轮式空气制冷、以热电站为热源的吸收式冷水机组在矿井中应用技术较成熟,冰冷却空调系统在矿井空调中还处在试应用阶段。如果采用单一的矿井空调系统的模式,必然难于适应我国矿井空调的需要。在确定矿井空调方案时,必须根据矿井的实际情况和具体结构,对现有的矿井空调系统类型做综合比较,既要在技术上可行,又要使总投资最低,从而选择合理的系统方式。

参考文献:

- [1] 李慧娟. 矿井降温中的空气调节技术[J]. 暖通空调, 1994, 6: 43.
- [2] 黄伯儒, 陈遂斋, 邓铠清. KKL101 矿用无氟制冷机的研制与应用[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(10): 13.
- [3] 韩学廷. 矿井降温冷源与煤矿热电冷联产[J]. 节能, 1996, (2): 28.
- [4] 王景刚, 乔华, 冯如彬. 深井降温冷却水系统的应用[J]. 暖通空调, 2000, 30(4): 76.
- [5] 王景刚, 乔华, 冯如彬, 等. 深井降温的技术经济分析[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(1): 23.
- [6] 刘忠宝, 王浚. 装甲、坦克车辆空调的概况及进展[J]. 真空与低温, 2002, (1): 12.
- [7] 乔华, 王景刚, 张子平. 深井降温冰冷却系统融冰及技术经济分析研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25: 122.
- [8] 王浚, 黄本城, 万才大. 环境模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 5.
- [9] SCALES ROBERT H. Cycles of war[J]. Armed Forces Journal, 1997, (7): 38.
- [10] 秦钢, 李敏, 程尔玺, 等. 空气制冷机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 6.
- [11] 齐铭. 制冷附件[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991. 4.
- [12] B J CVAN DER WEKKEN, R J M VANGERWEN. Development of an air cycle plant[C]. 19th International Congress of Refrigeration 1995. Proceedings Volume IV_b, 1995. 1 037.
- [13] HOLDER D M, BROWN I, GIGIEL A J. The effects of water icing on the performance of open air cycle systems—problems and solutions[C]. 19th International Congress of Refrigeration 1995. Proceedings Volume III_b, 1995. 845.
- [14] GRESIN A K, GROMOV A V, KARAGUSOV V I, et al. Ecologically safe stirling and GIFFORD-MCMAHON refrigeration plants with cooling level of (-20) to (-90) °C for medical and freeze-drying applications[C]. 19th International Congress of Refrigeration 1995. Proceedings Volume III_a, 1995. 562.
- [15] BROWN T, HOLDER D M, GIGIEL A J. Safety aspects of air cycle refrigeration and heat pump systems[C]. 19th International Congress of Refrigeration 1995. Proceedings Volume IV_b, 1995. 742.

关于国家低温容器质量监督检验中心 协办《真空与低温》杂志的通知

作为低温容器行业协作信息网的牵头单位——国家低温容器质量监督检验中心,为国家级质检中心,其行业协作信息网拥有众多会员单位。该中心考虑到《真空与低温》杂志的专业方向对低温容器、相关行业的产品生产和行业发展具有前瞻性的指导作用,经与本刊协商决定,从今年起将成为《真空与低温》杂志协办单位。该中心将在本刊不定期地发布中心的主要工作、行业信息、标准制订、新产品、新技术的应用、新工艺探讨等。

本刊欢迎协作信息网的会员单位及时订阅《真空与低温》杂志,踊跃投稿,发布广告及相关信息。对于会员单位发布的广告,本刊将优先刊发并实行优惠价。

(本刊编辑部)