

The Efficient Energy Analysis of the Mine'S Cooling System

Wei Hang¹², He Ji¹, Linfan Zhang¹, Houli Shi¹, Jian Wang¹

1. School of Mechanics & Civil engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, China

2. National Lab of Deep Geotechnics of China University of Mining and Technology Xuzhou, China

e-mail: hway@cumt.edu.cn

Abstract: Based on the research of the ice-cooling technology used in the deep-mine's cooling system, the paper introduces the composition and characters of the ice-cooling system, and the application of the deep-mine ice-cooling. It analyzes the efficiency and energy saving of this system of ice making, transporting, and melting. In addition, it also compares the deep-mine's cooling system with the common cooling system by technology and economy to prove that the deep-mine's cooling system has great advantages both technically and economically. In the different forms of deep-mine's cooling system layout, because of the difference of equipment layout, the system's construction and energy consumption of operation are different, among which the surface centralized layout has the biggest energy consumption, the deep-mine ice-cooling localized layout has the minimum energy consumption.

Keywords: mine's cooling, local cooling, efficient energy, ice cooling

矿井降温系统的能效分析

黄伟¹², 纪河¹, 张琳伽¹, 史厚丽¹, 王健¹,

1.中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏徐州, 中国, 221116

2.中国矿业大学深部岩土国家重点实验室 江苏徐州, 中国, 221008

E-mail:hway@cumt.edu.cn

摘要: 本文在矿井降温冷负荷计算分析的基础上, 对不同形式的矿井降温系统特性及能耗进行了分析, 研究了井下分布式局部降温系统能效特性, 并分析了冰冷却技术在矿井降温中的应用特点与发展前景。在矿井降温系统的不同形式中, 由于机组设备布置不同, 使得系统建造和运行能耗差别较大, 其中能耗最大为地面集中式, 能耗最小为井下局部式冰水降温系统。

关键词: 矿井降温, 局部降温, 能效, 冰冷却

1 引言

国民经济建设对煤炭的需求, 加速了煤炭向深部开采, 使得高温矿井日益增多。当矿井掘进深度达到800m时, 井下温度将超过30℃^{[1][2]}, 矿井内相对湿度也将超过90%。由于我国是高温矿井较多的国家, 所以矿井降温问题以及随之带来的能效利用问题都是不容忽视的。

高温矿井降温系统与地面建筑的空调系统有很大的区别。井下降温冷负荷是受矿井地质条件、井深及工作面环境等因素的影响, 由于矿井延深及采面的推移, 使得输冷降温的能耗很大, 因此矿井降温系统高效低耗综合利用问题需要进行深入的探讨与研究。

2 矿井降温的冷负荷分析

矿井环境是一个无限大的密闭环境, 而且处在深井的采掘环境是一个大的地热物理场, 由于受到采掘与风流的影响, 地热热流方向是由煤层深处流向围岩壁面, 再与风流进行热交换。分析矿井降温的冷负荷主要有: 围岩与采掘面煤层散热、矿物氧化放热、机电设备放热、矿井渗水放热、空气的自压缩热及人体散热等。

2.1 围岩与采掘面煤层散热

当无局部热源时, 风流与围岩的热交换量:

$$Gdh = \alpha_w (t_w + t_k - t) dF \quad (1)$$

式中: G —矿井内空气流量 kg/s; dh —矿井内所取较短距离的两断面的空气焓差 kJ/kg, 且围岩及煤层的换热量又有 $Q_c = Gdh = GC_p dt$, kW; C_p —空气的定压比热 kJ/kg·K; dt —风流的始终端两断面温差; dF —风流流过的围岩表面积, m^2 , 当巷道或工作断面的周长为 L_w , 风流流过距离为 dx 时, 有 $dF = L_w dx$; α_w —围岩和煤层的换热系数, kW/m²·°C; t_w —围岩等散热量表面温度, °C; t_k —由于辐射而产生的等效温度, °C; 围岩温度一般<60°C, 可取3~5°C^[3]; t —矿井内空气温度°C。

围岩换热的微分方程为:

$$\alpha_w dx = \frac{GC_p}{L_w(t_w + t_k - t)} dt \quad (2)$$

2.2 矿物氧化放热

井下矿物氧化放热是一个比较复杂的热交换过程, 一般采用的计算式为^[4]:

$$dQ_o = q_0 V^{0.8} dF \quad (3)$$

式中: Q_o —矿物氧化放热量, kW; F —所取围岩的表面积, m^2 ; V —风流速度, m/s ; q_0 —在风流速度 $V=1 m/s$ 时的氧化放热量, 综采面可取 7.5~8.5 kW/m²^[5], 其他可取 3~4.6 kW/m²。

2.3 机电设备的散热

风流经过采掘等机电设备后, 在机电设备与围岩的叠加换热作用下, 使风温快速升高, 机电设备热耗散计算式为^[6]:

$$Q_m = \frac{n_1 n_2 n_3 \tau_R}{n} \sum N_i \quad (4)$$

式中: Q_m —电器设备散热量, kW; n_1 —安装系数(电动机实耗最大功率与额定功率之比), 一般可取 0.7 左右; n_2 —同时系数; n_3 —负荷系数; τ_R —每日运转时间, h/d; n —每日使用小时数, h/d; N_i —电动机组的总额定功率, kW。

2.4 矿井渗水的潜热散热

当矿井涌水量较大且温度较高时对井下湿热环境产生很大影响, 其散热量为^[7]:

$$dQ_s = M_s c_s (t_s - t) dx \quad (5)$$

式中: Q_s —渗水散热量, kW; M_s —单位长度巷道涌出水量, kg/m·s; c_s —水的比热, 4.187 kJ/kg·°C; t_s —涌水出口平均水温, °C; t —排出水的平均水温, °C; $(t_s - t)$

取 1~3°C; x —计算涌出水量的巷道长度。

2.5 井筒空气的压缩热

空气进入井筒在下行过程中, 压力和温度逐渐上升形成“自压缩”过程, 并将压缩能转换为焓增。若此过程中空气与外界不发生换热、换湿, 且气体流速也不变化, 根据能量守恒定律计算, 空气进入矿井井筒后, 深度每增加 100 米, 气温上升约 1°C, 其自压缩热为:

$$Q_r = 0.00981 M \Delta H \quad (6)$$

式中: Q_r —自压缩热, kW; M —井筒进风量, kg/s; ΔH —风流自上向下流动的高差, m。

2.6 冷负荷分析

针对某矿某综采面冷负荷的计算分析, 得到如下比例关系:

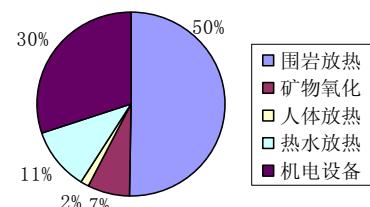


Figure 1. The heat sources distribution chart of a mine's integrated working face
图 1. 某矿综采面热源分布图

矿井降温的主要冷负荷依次为围岩散热、机电设备散热、矿井热水散热和矿物氧化散热, 人体散热很少可以忽略。

3 矿井降温系统特性分析

在矿井降温技术中, 空气冷却系统是由制冷机组和空气冷却设施组成, 其系统形式主要有: 地面集中式、井下集中式、地面和井下联合式和局部分散式。不同降温系统其性能和降温效果是有差别的。

3.1 地面集中式

制冷机组与空气处理设备全部布置在矿井地面上(图 2), 制冷系统将矿井通风风流集中冷却后送入井下。这种方式对于高温高湿的深水平矿井不适宜, 因为冷却的风流经井筒、主巷道再到采掘工作面, 长距离的输送使得风流得热量加大, 对高温工作面热环境的降温效果不明显, 到达工作面的冷风风流的降温能力在流经长距离巷道与围岩煤壁的热量交换过

程中已经消耗殆尽。

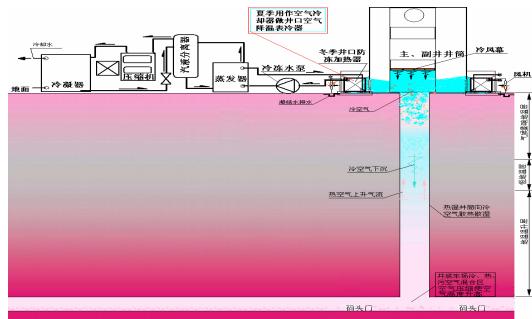


Figure 2. Ground centralized cooling system
图 2. 地面集中式降温系统

3.2 井下集中式

制冷机组与空气处理设备全部布置在井下（图3）。井下集中制冷站，由制冷机组制取的低温冷水送至采面空气处理设备，再对风流进行冷却降温后送至采掘工作面。制冷过程产生的冷凝热可以采用井下排除冷凝热和地面排除冷凝热的方法。井下排热采用回风流排热或矿井水排热，回风流排热大大提高了回风巷温度，矿井水排热或地面排热都需要设置繁杂的冷凝热排水系统。井下设置的制冷机组存在排除冷凝热、保证机组正常运行以及防爆等问题。

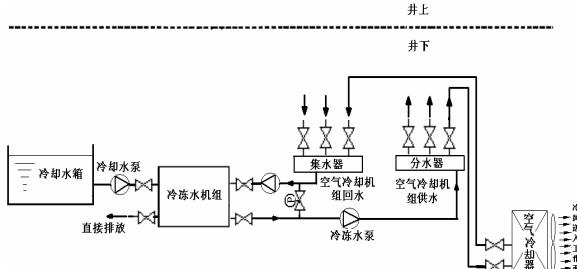


Figure3. Demonstration of underground centralized mine's cooling system
图 3. 井下集中式矿井降温系统示意

3.3 地面和井下联合式

制冷机组布置在地面上，制冷机制取的冷媒水（或盐水）由保冷隔热管道送至井下采掘工作面的空气冷却装置(图4)。由于地面到井下高差大,载冷剂输送管道中的静水压力很大,所以必须增设高低压换热器。为了解决静水压力的问题，可以采用冰泥输送至井下，再经融冰后将冷水送至空气冷却装置（图5）。

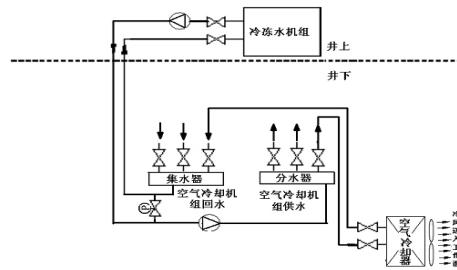


Figure 4. The figure of water cooling system
图 4. 水冷却降温系统图

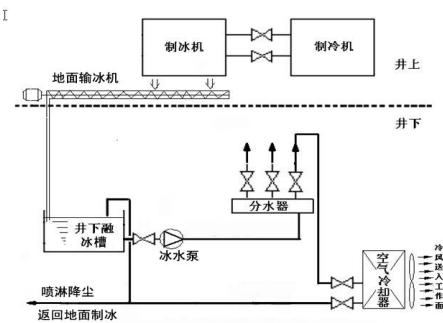


Figure 5. The figure of ice cooling system
图 5. 冰冷却降温系统图

3.4 局部分散式

在井下采掘工作面附近设置制冷空调装置，进行局部分散式降温。由于将处理后的空气直接送入工作面或直接在热源附近采取降温措施，冷空气的冷损失小，达到降温更有效和节能。此种方式的制冷机组也存在冷凝热排除和机组防爆问题。

4 矿井降温系统能效分析

在井下采掘工作面和巷道中，风流流动线路和工作面温度场分布都在不断变化，矿井热源散热的控制很难采用像地面建筑那样通过覆盖绝热层、设置排风或隔热装置等措施来削弱。虽然也可以采用加大风量、减少巷道散热面积、由回风水平向工作面供风、减缓氧化过程和防止空气湿度增加等非空调降温措施，但是对于采掘水平深的高温矿井，非空调降温措施将无法达到矿井作业环境要求规定温度，所以必须采取空气冷却方式进行人工降温。

矿井降温系统投资大，运行费用高。一个回采面的降温工程投资约为几百万元，一个采掘水平的矿井降温工程投资高达约几千万元。因此矿井降温技术的研究需要从经济、低耗、有效性等方面进行研究。下面针对不同的降温系统进行对比分析。

4.1 地面集中矿井降温系统

设置在地面上的矿井降温制冷空调设备不需要防爆，冷凝热易于排放，制冷机房的建造费用低于井下建设制冷站，但是由于处理的冷空气经过井筒到达井底时，风流获得每向下流动 100m 温升约 1℃的压缩热，在流过主巷道到达采掘面时，由于沿途不断与围岩壁等热源进行热量交换，温度持续上升，到达工作面时，风流已不具备降温的能力。根据对冷负荷的分析也证明冷空气应靠近采面，尽可能地缩短输送路径，输送管路越长输送过程中的冷损失就越大，能耗及设备运行费用均增加，故此种降温方式仅适用于开采深度小、风流输送距离短的高温矿井。

4.2 井下集中矿井降温系统

井下集中空调系统的制冷设备置于井下，制备的冷媒水通过管道集中向各工作面的空气冷却器供冷水，系统结构比较紧凑、供冷管路相对于井上集中式系统要短很多，输送冷损失小，水泵功率较低，所以运行电耗少。冷水系统也不承受很高的静水压力，即不必设置高低压换热器，仅有冷水循环管路，但是必须在井下开凿大空间硐室，制冷站建造投资费用较高，施工及运行维护都比较困难，而且电机和电气控制设备都需要防爆，难度大，制冷机组产生的冷凝热不易排除。随着矿井开采深度的增加，矿井降温所需冷量增大，井下集中空调系统冷凝热排放困难则会更突出，从而使制冷机性能降低。

4.3 地面和井下联合式矿井降温系统

地面和井下联合式降温系统，是上述两种系统的综合，主要电动设备均设置在地面，无需防爆，能很好适应矿井的安全要求。根据地面制冷机组制取冷媒介质的不同分为水冷却矿井降温系统和冰冷却矿井降温系统。

4.3.1 水冷却矿井降温系统

制冷机组布置在地面机房内，冷却风流设备布置在井下。地面制冷机组制取的冷媒水（或盐水）由保冷隔热管道经高低压换热器再送至井下的空气冷却器与矿井风流进行热交换。冷冻水在转换过程中会产生 3~4℃的温度跃升，所以冷损失较大，高压侧的载冷剂循环管道也要承受较大的压力，易造成管路的腐蚀损坏。输冷管路铺设工艺复杂、管路长、冷损失大、输送能耗高。

4.3.2 冰冷却矿井降温系统

冰冷却降温系统主要由制冰系统、输冰系统、融冰系统、冷水输配管路以及空气冷却装置组成。制冰系统生产出粒状冰（或冰浆），经输冰系统将冰体送至井口，冰体依靠其自重作用，由垂直输冰管道送达井底硐室并进入融冰装置。在融冰装置内冰与融冰回水进行充分的热交换，可以产生 0~2℃的冷水，冷水再经冷水泵加压后由输配管路送至采掘工作面附近的空气冷却装置进行气—水热交换，从而获得工作面所需要的较低温度的冷风流。气-水换热装置的部分回水经融冰装置再循环，部分多余回水则被输送回井上用来继续制冰或用于采掘机的喷淋除尘。冰浆在输送过程中，为减少冷损失输冷管道与融冰装置均应采取严格的保温措施，以防止冷量损失。

冰冷却降温系统的制冰设备设置于井上，制冷系统不受井下内部条件的限制，免除了制冷设备及其动力设备工作时产生的热量散发到井下，大约能使井下减少 20% 的冷负荷，因此降低了制冷能耗。对于冰冷却降温系统由于利用地面制冰设备制取的粒状冰或冰浆具有很高的比热容比能，而且利用冰的融化潜热进行降温，所获得相同冷量的需冰量仅为水冷系统水量的 20%~25%，冰与水直接接触进行能量交换，相对应的输冷管道产生的冷损失大大降低，冷量的输送与能量交换更适合深井降温系统。虽然冰冷却降温系统设备复杂，制冰机组的制冷系数 COP 约在 2.0~3.5 范围之内^[8]，制冷性能偏低、电耗较大，但是，该系统的井下管道投资费用和运行能耗都将大大降低，因为输冷管道运行费用在矿井降温系统中占有较大比例，所以冰冷却系统总体装机容量和投资费用都相对降低，通过对某煤矿的矿井空调设计方案的技术经济比较^[9]，显示出冰冷却系统无论是工程总投资还是运行费用都是较低的，并且随着矿井井深的增加，这一优势会更加明显。

4.3.3 井下局部式冰水降温系统

冰冷却降温系统有一套较复杂的输冰、融冰和冷水输配系统，同时这些输送环节增加了系统能耗。本文作者研究采用一种蓄冷释冷移动式局部冰水降温系统，有效地消除了输冰融冰和冷水输配的能耗损失。并且在实际矿井降温的应用中，获得很好的降温效果。

4.4 矿井降温系统经济技术比较

Table 1. Technical and economic comparison of mine's cooling system
表 1 矿井降温系统技术经济比较

系统类型	井下集中式	联合式地面水冷却降温系统	联合式地面冰冷却降温系统	井下局部式冰水降温系统
机组设备布置情况	制冷机组及空气处理设备全部设置在井下	制冷机组布置井上,空气处理设备全部设置在井下	制冰机组布置井上,输冷设备及空气处理设备全部设置在井下	制冰机组布置井上,空气处理器设备全部设置在井下
机组设备及施工安装情况	复杂、要防爆、增容难,施工难	简单、增容能力小,施工容易	复杂、增容能力大,安装施工容易	简单、增容能力大,安装施工容易
制冷降温系统运行情况	井上排冷凝热时存在静水压力,制冷剂若泄漏有危害	冷水输送存在静水压力,井下需设置高低压换热设备	输冰融冰及冷水输送系统较复杂,系统不存在静水压力	输冰融冰及冷水输送系统简单,不存在静水压力
冷量输送及水量水质要求	井下输冷水泵循环压カ较低,水量较多,需软化处理	输送冷水水泵循环压カ高,水量多,需软化处理	设有输冰融冰系统,井下水泵循环压カ低;水量少,水质要求一般	井下设储冰融冰装置及循环水泵及低压空氣处理设备,水量少,一般
机组排热散热及运行维护	困难且工艺复杂,机组发热在井下;设备维护困难	井下无制冷设备散热;地面设备维护容易,地面排热容易	无制冷设备散热;井下设备维护困难,地面排热容易	无制冷设备散热;井下设备易维护,地面排热容易
系统能效与电耗	较低;较高	低;高	高;低	高;低
投资费用比较	比地面水冷却系统低	最高	比井下水冷却系统低	最低
设备及运行费综合评价	较高	高	低	最低

5 结束语

对上述几种矿井降温系统进行比较显示，冰冷却降温系统有得天独厚的优越性，具有系统设备集中，输冷损耗小，综合费用低，施工方便，易于实施等特点。特别是采用井下局部冰水降温系统，可以大大减少输冰融冰和冷水输送的能耗和冷损失，且系统简单、易于布置及施工安装。

冰冷却降温系统具有很大增容能力和开发潜力，虽然在初投资、运行管理和系统控制等方面要求较高，但在有效控制矿井热环境方面，采用该系统，无论是技术要求还是工程投资及运行费用都是最优的，冰冷却降温系统不仅在技术上具有诸多的优势和可行性，而且在经济上也是最佳的。在深井采煤生产中，冰冷却降温系统将发挥越来越大的优越性，在深井降温领域中具有非常好的应用前景。

References (参考文献)

- [1] Huang Han-wen (translated). 1982, Mine's Cooling Guide, Coal Industry Publishers, Beijing, 14p (original written in Russian by А.Н.Шербани, О.А.ремнев, В.Я.Журавленко).
 - [2] [苏]A.H.舍尔巴尼、O.A.克列姆涅夫、В.Я.茹拉夫连科著, 黄翰文译.矿井降温指南.煤炭工业出版社, 1982 年 2 月, 第 1 版.
 - [3] Institution of gas ventilation and fire protection. 2003, Fifty Years in Deep Mine's Cooling Technology, J. Mines Safety. 34(supplement issue):28~32(Ch).
瓦斯通风防灭火安全研究所. 深井降温技术的 50 年历程. 煤矿安全[J].2003,(增刊):28~32.
 - [4] Deyuan Yang. Mine air heat exchange. Coal Safety, 2003,34 (supplement): 94 ~ 97(Ch).
杨德源. 矿井风流热交换.煤炭安全,2003,34 (增刊) :94~97
 - [5] West of Howard. numerical modeling of Coal face temperature distribution law. journal of china coal society, 2002,27 (1): 59 ~ 63(Ch).
周西华等. 回采工作面温度场分布规律的数值模拟.煤炭学报,2002,27 (1) : 59~63.
 - [6] Xiaoming Liu, Zhouquan Luo , Changnian Xia, YaBin Wu, WangPing Liu. Deep heat mining thermal damage control technology. Safety and Environmental Engineering[J], 2006, 13,(1):85~88(Ch).
刘晓明,罗周全,夏长念,吴亚斌,刘望平.深井高温矿山热害控制新技术.安全与环境工程[J], 2006, 13,(1):85~88
 - [7] Qiyang Wang. Mine heat damage analysis and control measures. ground pressure and strata control, 2003 (4): 111 -112(Ch).
王其扬. 煤矿热害分析及防治措施.矿山压力与顶板管理,2003 (4) : 111~112
 - [8] Lei Kuang, Xiaofeng Wang, Yafei shan. Mine air temperature prediction and the analysis of heat exchange mechanism. Modern minin, 2008 (11): 64 ~ 66(Ch).
匡蕾,王晓峰,单亚飞.矿井风流温度预测及热交换机理分析.矿业快报, 2008(11):64~66.
 - [9] Wang Jing-gang, Qiao Hua, Feng Ru-bin. Ice cooling for deep coal mines. HV&AC. [J].2000,30,(3):76~77(Ch).
王景刚、乔华、冯如彬. 深井降温冰冷却系统的应用.暖通空调[J].2000,30,(3):76~77.
 - [10] Liu Xiao-ming, Luo Zhou-quan, Xia Chang-nian, Wu Ya-bin, Liu Wang-ping. 2006, The New Technology of Heat-harm Control in High-temperature Deep Mine, J. Safety and Environmental Engineering. 13 (1): 85-88. (Ch).
刘晓明,罗周全,夏长念,吴亚斌,刘望平.深井高温矿山热害控制新技术.安全与环境工程[J], 2006, 13,(1):85~88.
 - [11] Qiao Hua, Wang Jing-gang, Zhang Zi-ping. 2000, Study on the ice melting and feasibility of cooling system, J. Journal of china coal society. 25 (12): 122~125(Ch).
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. 煤炭学报[J], 2000,25, (12):122~125
 - [12] Huang Wei, Yu Bao-Hai.2006, The Ice Cooling System of Deep Wells and the Analysis of Techniques and Economy,Nanjing, Teaching Approach in Refrigerating, Press of Southeast University.(4):395~399(Ch).
黄炜、于宝海. 深井降温冰冷却系统及技术经济分析.制冷空调学科教学研究进展.东南大学出版社 2006.4
 - [13] Shuangying Wu. Thermodynamic analysis of convective heat transfer process and its application [D]. Institute of Power Engineering of Chongqing University, 2004
吴双应. 对流换热过程的热力学分析及其应用[D]. 重庆大学动力工程学院, 2004.