

小型矿用空冷器除湿效果研究

苗德俊^{1,2}, 谭冬伟^{1,2}, 张坤^{1,2}, 常德化^{1,2}, 葛星³, 于超^{1,2}

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 广州特种设备检测研究院, 广东 广州 510000)

摘要: 为了探究传统小型矿用空冷器在降温的同时是否具备除湿能力的问题, 采用试验研究和数值模拟相结合的研究方法, 构建了小型矿用空冷器除湿试验装置及其相应模型。在试验研究中对小型矿用空冷器输送的冷风温度和湿度进行 4 种不同工况设置, 即 20 °C、35%、20 °C、55%、25 °C、35% 和 25 °C、55%。保持其他试验参数固定不变, 监测环境相对湿度在不同试验条件下的变化情况, 然后采用 ANSYS 数值模拟方法对以上 4 种不同工况进行模拟研究, 并对试验结果加以验证。结果表明: 小型矿用空冷器在降温的过程中具有一定的除湿能力, 但整体除湿效果并不明显, 需要进一步探究除湿能力较强的矿用降温除湿空冷器设备, 以增加高温高湿矿井的安全生产效率。

关键词: 小型矿用空冷器; 湿交换机理; 除湿效果; 高温高湿矿井

中图分类号: TD727 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)11-0121-06

Study on de-moisture effect of small type mine air cooler

Miao Dejun^{1,2}, Tan Dongwei^{1,2}, Zhang Kun^{1,2}, Chang Dehua^{1,2}, Ge Xing³, Yu Chao^{1,2}

(1. Cultivation Base Provincial and State Joint Key Lab of Mining Disaster Prevention and Control Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Mining and Safety Engineering Shandong University of Science and Technology Qingdao 266590, China;

3. Guangzhou Special Equipment Inspection and Test Institute, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to study and discover the conventional small type mine air cooler would have the de-moisture capacity while the air cooler would have the temperature reduction, a study method combined with the experiment study and the numerical simulation was applied to establish the de-moisture experiment device and other related model of the small type mine air cooler. During the experiment study, there were four different devices conducted to send the cool air temperature and humidity to the small type mine air cooler, the cool temperature and humidity were 20 °C and 35%, 20 °C and 55%, 25 °C and 35% and 25 °C and 55% individually. Other experiment parameters were kept stable and no change and the variation condition of the environment relative humidity under the different experiment condition was monitored and measured. Then the ANSYS numerical simulation method was applied to the simulation study on the four different devices and the experiment results were verified. The results showed that during the cooling process, the small type mine air cooler would have a certain de-moisture capacity, but the completed de-moisture effect was not obvious and a further discovery and study should be conducted on the mine cooling and de-moisture air cooler equipment with a higher de-moisture capacity in order to improve the safety production efficiency of the high temperature and high moisture mine.

Key words: small type mine air cooler; moisture exchange mechanism; de-moisture effect; high temperature and high moisture mine

0 引 言

由于煤矿深部矿产资源的开发, 矿井的采掘深度不断增加, 目前许多国家的采煤深度已达 1 000

m^[1-2]。随着矿井开采深度的增加, 机械化程度也越来越高, 由此产生的机械散热也越来越大, 矿井中高温高湿等热害问题也显得越来越突出。造成矿井空气湿度过大的主要原因是井巷壁面的散湿和矿井水

收稿日期: 2016-03-27; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.11.023

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012EEM004)

作者简介: 苗德俊(1970—), 男, 山东烟台人, 副教授, 博士。Tel: 15306394978, E-mail: junmdxh@163.com

引用格式: 苗德俊, 谭冬伟, 张坤, 等. 小型矿用空冷器除湿效果研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 121-126.

Miao Dejun, Tan Dongwei, Zhang Kun et al. Study on de-moisture effect of small type mine air cooler[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 121-126.

的蒸发,矿井开采过程的生产用水也是造成矿井下空气湿度过大的重要因素。此外,由于某些矿井出现了地下水,不但使气温升高,也使得空气湿度增大,严重恶化了矿井内的作业环境,从而导致高温高湿问题已经成为所有矿山矿井亟待解决的问题。在我国,也已有很多大型矿井的开采深度超过800 m,甚至已有矿井开采深度超过1 000 m^[3],导致井下高温高湿状况越来越严重^[4-8]。而矿井职工长时间在高湿环境中工作,会致使人体生理、心理和行为能力降低,产生如嗜睡、体温升高、水盐代谢紊乱、皮肤病、内循环系统失调、精神萎靡等反应,从而影响矿井职工的身体健康,使其注意力下降,将构成安全隐患,严重的将会导致事故的发生,因此为保障矿井安全高效生产,必定要重视和解决矿井高湿难题^[9-11]。由于井下空间大,而实际需要降温除湿的有效面积小,为节约成本,目前某些矿井主要采用小型矿用空冷器对有效区域进行降温除湿^[12-13]或是采用局部冷水降温系统^[14]。然而,该部分矿井多注重于小型矿用空冷器对井下有效区域温度方面的控制研究,而忽略了小型矿用空冷器对除湿方面的研究,使得高湿问题依然是矿井问题中较为严重的现象,制约着煤矿的安全发展。为了实现小型矿用空冷器在降温的同时也具备除湿能力,笔者通过对小型矿用空冷器的除湿能力及效果进行研究,并运用ANSYS软件数值模拟小型空冷器的除湿效果,以期对未来小型矿用空冷器的发展提供技术参考。

1 风流的传热传湿计算

湿度是影响矿井工作环境舒适程度的重要参数,是研究高温高湿矿井所必需研究的要素之一^[15]。进风的相对湿度决定着空气进入井巷后是吸收水分还是丧失水分,这关系到矿井降温的难易和能耗大小^[16]。空气进入矿井后,含湿量一般都是逐渐增加的,空气中的含湿量变化,可以调节空气的温度;反之,空气温度的变化,也可以调节空气的含湿量。

1.1 饱和温度 t_s 、压力 p_s 的饱和水热量计算

水的饱和压力 p_s 和饱和温度 t_s 之间的关系为

$$t_s = 178.4 \sqrt[4]{p_s} - 0.6p_s \quad (1)$$

当0.01 °C的水在定压 p_s 下加热至 t_s 的饱和水,所需要的热量 q 可表示为

$$q = \int_{273.16}^{t_s+273.16} c_p dt \quad (2)$$

其中, T 为水的温度。如果把水的定压比热容 c_p 当作定值,则 $q \approx c_p t_s$ 。当水的温度小于100 °C时,它的平均比热容为4.186 8 kJ/(kg·K)。

1.2 相对湿度 φ_a 和含湿量 d_a

相对湿度 φ_a 定义为空气中实际水蒸气分压力 P_a 与该空气温度下饱和水蒸气分压力 P_a^* 的比值,即:

$$\varphi_a = \frac{P_a}{P_a^*} \times 100\% \quad (3)$$

相对湿度只反映空气中水蒸气的饱和程度,不反映其绝对含量。含湿量 d_a 定义为每千克干空气中所含有的水蒸气质量,即:

$$d_a = \frac{m_w}{m_a} \quad (4)$$

式中: m_w 为水蒸气质量; m_a 为干空气质量。

含湿量是反映空气中水蒸气绝对含量的指标。已知大气压力 P 及 P_a ,则有:

$$d_a = \frac{0.622P_a}{P - P_a} \quad (5)$$

则 φ_a 又可以表示为

$$\varphi_a = \frac{d_a}{d_a^*} \quad (6)$$

式中, d_a^* 为同温度下空气饱和含湿量。

将室温为22~25.2 °C、湿度为20%~60%、伴随空气轻微流动的环境称之为舒适环境,将空气中相对湿度高于60%的环境称为高湿环境^[17]。千米深度的高温矿井湿度通常很高,一般约90%,影响矿井的安全生产和工人的身心健康。

1.3 湿壁巷道与风流的传热传湿计算

围岩内部通过热传导的方式将热量传递到井巷表面,然后通过对流传热及对流传质的方式传递给井巷风流^[18]。高温高湿矿井中,从围岩放出的一部分热量消耗作为水分蒸发的潜热 Q_1 (巷道壁面围岩向风流散热的总热量),另一部分热量消耗于风流干球温度上升的显热 Q_s (巷道壁面进入风流的显热热量)上,即:

$$Q_1 = Q_s + Q_1 \quad (7)$$

式中: Q_1 为巷道壁面进入风流的潜热热量。

$$Q_s = \alpha(T_w - T_f)A \quad (8)$$

式中: α 为围岩与风流间的对流换热系数; T_w 为巷道壁面温度; T_f 为巷道风流温度; A 为对流换热的巷道面积。

$$Q_1 = f\sigma L_v(m_w - m)A \quad (9)$$

式中: f 为湿度系数, 完全干燥壁面 $f=0$, 完全潮湿壁面 $f=1$, 介于其间的潮湿状态壁面 $0 < f < 1$; σ 为壁表面的质量交换系数; L_v 为水的蒸发潜热; m_w 为完全湿润壁面近旁空气的含湿量; m 为风流的平均含湿量。

2 小型空冷器除湿试验及模拟

2.1 试验装置的设置

为研究小型矿用空冷器的除湿能力, 设计如图 1 所示的试验装置。本试验装置为长 \times 宽 \times 高为 4 m \times 2 m \times 2 m 的绝热装置, 装置的一个壁面为散热壁面, 其余装置的壁面所用材质为聚氨酯泡沫塑料, 散热壁面的对面有个小型冷风入口, 另外装置内设有一热源, 其规格为高 \times 长 \times 宽=1.0 m \times 0.2 m \times 0.2 m 的长方体, 位于整个装置底面的中间。

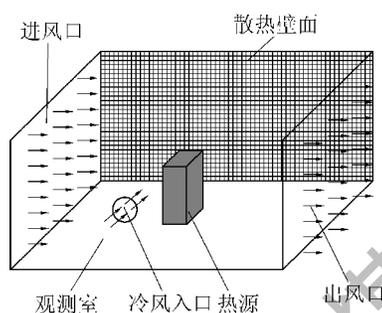


图 1 试验装置立体结构示意图

Fig.1 Schematic of three-dimensional structure of experimental device

整个装置的背景风流设置如下: 左边为风流的进风口, 进风口风速 1 m/s, 相对湿度 90%, 温度 303.15 K (30 °C), 右边为风流出风口, 且出风口无任何压力与温度条件; 热源温度 307.15 K (34 °C), 热源的热流密度 1 000 W/m²; 散热壁面温度 305.15 K (32 °C), 壁面的热流密度 450 W/m²。采用矿用小型空冷器进行冷风输送, 其冷风入口高度 0.5 m (从底面垂直向上的距离), 直径 0.2 m。

2.2 观测点的选取

在观测室内, 共 28 个监测点, 分为 4 组, 如图 2 所示。

1) 第 1 组竖直放置, 其点坐标为: $A_1(1.0, 1.9, 0.8)$; $A_2(1.0, 1.9, 0.7)$; $A_3(1.0, 1.9, 0.6)$; $A_4(1.0, 1.9, 0.5)$; $A_5(1.0, 1.9, 0.4)$; $A_6(1.0, 1.9, 0.3)$; $A_7(1.0, 1.9, 0.2)$ 。

2) 第 2 组竖直放置, 其点坐标为: $B_1(1.0, 2.1, 0.8)$; $B_2(1.0, 2.1, 0.7)$; $B_3(1.0, 2.1, 0.6)$; $B_4(1.0,$

$2.1, 0.5)$; $B_5(1.0, 2.1, 0.4)$; $B_6(1.0, 2.1, 0.3)$; $B_7(1.0, 2.1, 0.2)$ 。

3) 第 3 组水平放置, 其点坐标为: $C_1(1.3, 2.0, 0.6)$; $C_2(1.2, 2.0, 0.6)$; $C_3(1.1, 2.0, 0.6)$; $C_4(1, 2.0, 0.6)$; $C_5(0.9, 2.0, 0.6)$; $C_6(0.8, 2.0, 0.6)$; $C_7(0.7, 2.0, 0.6)$ 。

4) 第 4 组水平放置, 其点坐标为: $D_1(1.3, 2.0, 0.4)$; $D_2(1.2, 2.0, 0.5)$; $D_3(1.1, 2.0, 0.5)$; $D_4(1.0, 2.0, 0.5)$; $D_5(0.9, 2.0, 0.5)$; $D_6(0.8, 2.0, 0.5)$; $D_7(0.7, 2.0, 0.5)$ 。

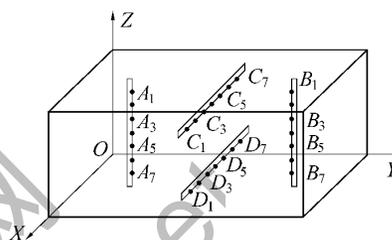


图 2 观测室内测量点及坐标

Fig.2 Measuring points and plot of observation room

2.3 观测点的测量及其结果分析

1) 工况 1: 当小型矿用空冷器输送的风流温度 20 °C、风量 15 m³/min、相对湿度 35% 时, 观测室内测量的相对湿度见表 1。

2) 工况 2: 当小型矿用空冷器输送的风流温度 20 °C、风量 15 m³/min、相对湿度 55% 时, 观测室内测量的相对湿度见表 1。

3) 工况 3: 当小型矿用空冷器输送的风流温度 25 °C、风量 15 m³/min、相对湿度 35% 时, 观测室内测量的相对湿度见表 1。

4) 工况 4: 当小型矿用空冷器输送的风流温度 25 °C、风量 15 m³/min、相对湿度 55% 时, 观测室内测量的相对湿度见表 1。

由表 1 可知, 在背景风流相对湿度为 90% 的情况下, 增加低温低湿的冷空气, 观测室内各观测点的相对湿度都有所降低。工况 1、工况 2 相较于工况 3、工况 4 相对湿度值较低, 这主要是由于同温同风速的冷空气, 相对湿度较小的冷空气与同背景风流进行湿交换的程度高, 除湿效果较为明显。

同一观测点工况 1 和工况 3 分别相比于工况 2 和工况 4 相对湿度值较低。这主要是由于相同湿度的冷空气, 其含湿量是温度的单调递增函数(表 2) 故相对湿度较低的冷空气与同背景风流进行湿交换后, 相对湿度较低, 除湿效果较好。

表 1 不同工况条件下相对湿度观测结果

Table 1 Relative humidity observation results in different working condition

观测点	相对湿度			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
A ₁	0.880 150	0.880 169	0.892 229	0.880 170
A ₂	0.878 019	0.878 024	0.878 017	0.878 025
A ₃	0.878 188	0.879 188	0.879 189	0.879 188
A ₄	0.879 997	0.880 000	0.879 996	0.879 997
A ₅	0.879 502	0.879 503	0.879 505	0.879 507
A ₆	0.880 049	0.880 050	0.880 050	0.880 067
A ₇	0.880 921	0.880 923	0.880 910	0.880 938
B ₁	0.817 545	0.820 073	0.818 488	0.821 971
B ₂	0.801 576	0.810 318	0.803 240	0.814 495
B ₃	0.761 356	0.780 399	0.762 552	0.786 006
B ₄	0.737 640	0.767 718	0.738 528	0.769 007
B ₅	0.780 667	0.799 417	0.785 561	0.799 718
B ₆	0.818 075	0.828 661	0.818 558	0.829 942
B ₇	0.825 149	0.829 864	0.825 933	0.829 971
C ₁	0.840 363	0.863 797	0.846 099	0.864 447
C ₂	0.868 549	0.878 488	0.866 941	0.889 107
C ₃	0.828 597	0.842 456	0.829 602	0.855 858
C ₄	0.879 188	0.879 188	0.879 187	0.879 189
C ₅	0.880 089	0.880 089	0.880 096	0.880 091
C ₆	0.891 301	0.891 316	0.892 340	0.891 351
C ₇	0.892 236	0.892 238	0.892 246	0.894 447
D ₁	0.798 759	0.857 372	0.828 256	0.853 695
D ₂	0.855 043	0.877 088	0.866 662	0.877 660
D ₃	0.815 243	0.847 551	0.830 593	0.855 294
D ₄	0.775 561	0.799 417	0.780 667	0.799 718
D ₅	0.867 129	0.866 735	0.864 739	0.868 936
D ₆	0.891 567	0.891 559	0.891 556	0.891 567
D ₇	0.892 229	0.892 212	0.892 211	0.893 695

2.4 ANSYS 模拟分析

为更好地研究小型矿用空冷器的除湿效果,用 ANSYS 软件对 4 种工况条件下的相对湿度进行除湿模拟分析,模拟结果如图 3—图 6 所示。

由图 3—图 6 可知,相同背景风流下,通入低温低湿度冷空气,模型除湿区域内除湿效果较为明显,这主要由于低温低湿的冷空气比等量的高温高湿的

表 2 不同温度和湿度下的每千克干空气含湿量

Table 2 Dry air moisture content per kilogram under different temperature and humidity

温度/ ℃	相对湿度 35%的	相对湿度 55%的
	每千克干空气含湿量/g	每千克干空气含湿量/g
20	5.065	7.997
21	5.390	8.513
22	5.734	9.058
23	6.096	9.634
24	6.479	10.243
25	6.883	10.885

热空气,与同等情况下的热空气混合后焓值较低造成的。

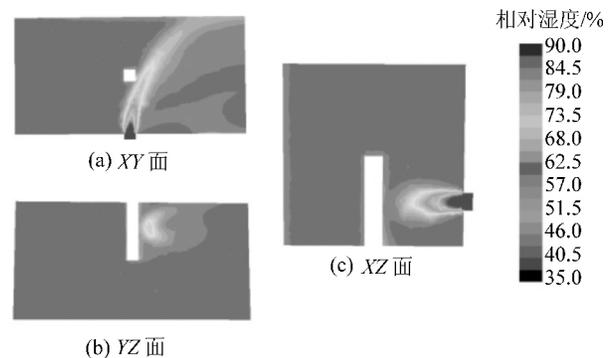


图 3 工况 1 条件下相对湿度分布

Fig.3 Relative humidity distribution in case 1

将工况 1 与其他工况条件分别相比较,相同区域前者除湿效果高于后者,这主要由于同等情况下前者输送的空气湿度低,饱和程度低,更能够充分地

与同等情况的热空气进行湿交换; 将工况 1 与其他工况条件分别相比较, 前者除湿效果高于后者, 这主要是由于输送冷空气的量与实际需要降温除湿的空气量相差很大。2 种情况混合后温度没有差别, 而同等情况下前者输送的空气含湿量较低, 与同等情况的热空气相混合后, 含湿量较低。这与第 2 部分的试验研究结果相吻合。

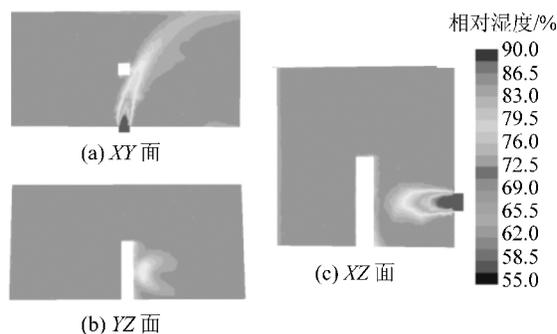


图 4 工况 2 条件下相对湿度分布

Fig.4 Relative humidity distribution in case 2

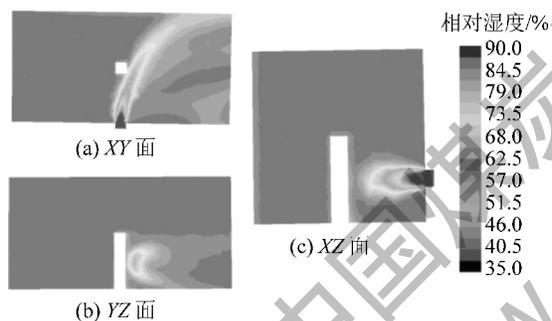


图 5 工况 3 条件下相对湿度分布

Fig.5 Relative humidity distribution in case 3

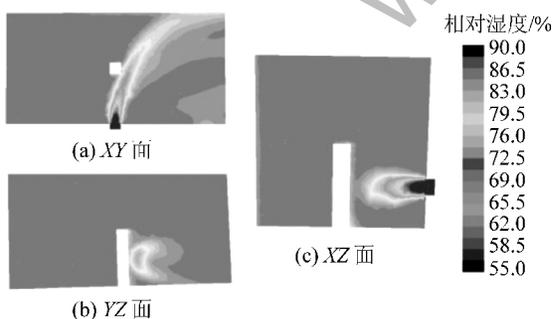


图 6 工况 4 条件下相对湿度分布

Fig.6 Relative humidity distribution in case 4

4 结 论

1) 试验实测研究结果表明: 在冷风流过的区域

内实测点湿度与相对湿度为 90% 背景风流相比都有不同程度的降低, 冷风未曾流过的区域内的实测点湿度与 90% 背景风流相比没有变化。

2) ANSYS 数值模拟结果显示: 冷风流过的空间区域内, 小型矿用空冷器除湿效果较为明显, 但随着冷风流的不断延伸, 除湿效果不断降低, 其他冷风流未曾流过的空间区域, 相对湿度接近背景风流湿度。

3) 试验装置内及 ANSYS 数值模拟云图中, 不同区域内相对湿度不同, 主要是由于从矿用空冷器流出的低温低湿度的冷风与高温高湿的热风热湿交换的程度不同造成的, 一方面低温低湿的冷风流稀释了高温高湿的热风流; 另一方面混合后的较高温度和湿度的风流经出风口流出, 带走一定量热量和水蒸气。

4) 虽然小型矿用空冷器在降温的同时具备一定的除湿能力, 但整体除湿效果不是很强, 需要进一步研究除湿能力较强的矿用降温除湿空冷器设备, 以提高高温高湿矿井的安全生产效率。

参考文献 (References):

- [1] 何满潮, 徐敏. HEMS 深井降温系统研发及热害控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1353-1361.
He Manchao, Xu Min. Research and development of HEMS cooling system and heat-harm control in deep mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1353-1361.
- [2] He Manchao. Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(3): 269-275.
- [3] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
Lan Hang, Chen Dongke, Mao Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [4] 张秀华, 王季管, 董子良. 高温高湿矿井湿热空气对通风风阻的影响[J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(1): 69-71.
Zhang Xiuhua, Wang Liguan, Dong Ziliang. The influence of humid and hot air on ventilation resistance in high temperature and high humidity mine [J]. Mining Research and Development, 2012, 32(1): 69-71.
- [5] 高祥骥, 袁艳平, 余南阳, 等. 矿井避难硐室热环境研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 107-116.
Gao Xiangkui, Yuan Yanping, Yu Nanyang et al. Review of thermal environment of mine refuge chamber [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S1): 107-116.
- [6] 何国家, 阮国强, 杨壮. 赵楼煤矿高温热害防治研究与实践[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 101-104.
He Guojia, Ruan Guoqiang, Yang Zhuang. Research and appli-

- cation on preventive measures against heat disaster in Zhaolou Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 101-104.
- [7] 亓玉栋,程卫民,于岩斌,等.我国煤矿高温热害防治技术现状综述与进展[J].煤矿安全,2014,45(3):168-174.
Qi Yudong, Cheng Weimin, Yu Yanbin *et al.* Status summarization and progress of heat hazard control technology in coal mine of China [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(3): 168-174.
- [8] 周静,刘锡明,张国华.黑龙江省煤矿高温热害分析及防治措施[J].中国矿业,2009,18(5):104-109.
Zhou Jing, Liu Ximing, Zhang Guohua. Mine heat-harm analysis and prevention measures in Heilongjiang [J]. China Mining Magazine, 2009, 18(5): 104-109.
- [9] 周刚,程卫民,田传强,等.矿井通风系统危险源辨识评价与控制[J].山东科技大学学报:自然科学版,2014,33(6):51-57.
Zhou Gang, Cheng Weimin, Tian Chuanqiang *et al.* Hazard identification, evaluation and control of mine ventilation system [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 33(6): 51-57.
- [10] 王希然,李夕兵,董陇军.矿井高温高湿职业危害及其临界预防点确定[J].中国安全科学学报,2012,22(2):157-163.
Wang Xiran, Li Xibing, Dong Longjun. Occupational hazard of high temperature and high humidity in mines and determination of critical prevention points [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(2): 157-163.
- [11] 刘金娥,王培植,姚东.矿井高温高湿环境危害分析及治理措施[J].工业安全与环保,2008,34(9):27-28.
Liu Jine, Wang Peizhi, Yao Dong. Mine high temperature and high humidity environment hazard analysis and treatment measures [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(9): 27-28.
- [12] 吉春和,常嘉林.新型矿井移动式局部降温技术及应用[J].煤炭科学技术,2015,43(10):103-106.
Ji Chunhe, Chang Jialin. New mine mobile local cooling technology and application [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 103-106.
- [13] 苗德俊,李西安.采煤工作面非均匀环境营建技术[J].煤矿安全,2014,45(11):84-87.
Miao Dejun, Li Xi'an. Establishment technique of non-homogeneous environment at coal face [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 84-87.
- [14] 黄华良.永川煤矿高温热害防治技术研究与实践[J].煤炭科学技术,2012,40(5):42-45.
Huang Hualiang. Study and practices on high temperature heat disaster prevention and control technology in Yongchuan Mine [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(5): 42-45.
- [15] 孔嘉莉.矿井高温高湿环境对人体机能影响的研究[D].湘潭:湖南科技大学,2014:6-16.
- [16] 姬建虎.掘进工作面传热特性及热害治理研究[D].重庆:重庆大学,2014:101-112.
- [17] 张景钢,杨诗涵,索诚宇.高温高湿环境对矿工生理心理影响试验研究[J].中国安全科学学报,2015,25(1):24-28.
Zhang Jinggang, Yang Shihan, Suo Chengyu. Research on effects of high temperature and high humidity environment on miners' physiology and psychology [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(1): 24-28.
- [18] 高建良,张学博.围岩散热计算及壁面水分蒸发的处理[J].中国安全科学学报,2006,16(9):23-28.
Gao Jianliang, Zhang Xuebo. Treatment of water evaporation on airway surface in calculation of strata rock heat [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(9): 23-28.