

# 矿井排风余热喷淋换热效率分析与计算

田峰<sup>1</sup>,王海桥<sup>1\*</sup>,方璐绮<sup>1</sup>,樊思雨<sup>2</sup>,蒋加川<sup>3</sup>,刘锐鸿<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
3. 深圳市中金岭南有色金属股份有限公司 凡口铅锌矿, 广东 韶关 512300)

**摘要:**针对矿井排风余热提取中的喷淋换热,其效率取值尚未见行业标准给予规定,是空白点.基于此,利用湿空气“火积”理论,推导出风侧喷淋换热前后湿空气“火积”及换热效率计算公式;以长沙市作为湿空气“火积”的逐时状态参考点,基于实验数据确定出空气侧的始末状态,利用所得的换热效率计算公式,量化了大气干球温度及含湿量对换热效率的影响,掌握了喷淋过程中换热效率数值的变化规律;最终,提出风侧换热效率可定为60%.所得结论,是直接喷淋式矿井排风能量提取及其预评估的重要参考依据.

**关键词:**矿井排风;余热;喷淋换热;换热效率;“火积”

中图分类号:TD727 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)04-0074-05

## Analysis and Calculation of Heat Transfer Efficiency of Mine Exhaust Heat Spray

TIAN Feng<sup>1</sup>, WANG Haiqiao<sup>1</sup>, FANG Luqi<sup>1</sup>, FAN Siyu<sup>2</sup>, JIANG Jiachuan<sup>3</sup>, LIU Ruihong<sup>3</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
3. Fankou Lead-Zinc Mine, Shenzhen Zhongjin Lingnan Non-ferrous Metal Company Limited, Shaoguan 512300, China)

**Abstract:** For the spray heat transfer in the extraction of waste heat of mine exhaust, its efficiency value has not been specified in the industry standard, so it is a blank spot. Based on this, this paper uses the theory of entransy of wet air to deduce formulas for calculating entransy of wet air before and after spraying heat transfer and heat transfer efficiency in the spray heat exchange wind side. Changsha city is taken as the hourly reference point for the state of wet air entransy, and the initial and final states of the air side are determined by the experimental data. The influence of dry bulb temperature and moisture content on the heat transfer efficiency is quantified by using the obtained heat transfer efficiency calculation formula, and the change law of the heat transfer efficiency during the spraying process is mastered. Finally, the wind side heat transfer efficiency can be set as 60%. The conclusion is an important reference for extraction and pre-evaluation of direct spray mine exhaust energy.

**Keywords:** the mine ventilation; waste heat; spray heat exchanger; efficiency of heat exchanging; entransy

矿井排风中蕴含着大量低品位能量,直接排放不仅造成环境污染,更造成了能源浪费,因此,余热提取技术必不可少<sup>[1-4]</sup>.目前,在矿井排风余热回收过程中,喷淋换热方式在国内外得到广泛使用<sup>[5]</sup>.喷淋过程不仅能降低排风温度<sup>[6]</sup>,而且具有除尘能力<sup>[7-8]</sup>.矿井排风与喷淋水的热交换过程类似于湿空气与水的热交换,既有由于温度差造成的显热交换,又有由于焓差引起的潜热交换<sup>[9]</sup>.喷淋室内湿空气-水的热湿交换

收稿日期:2021-08-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774134);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ60044)

\*通信作者,E-mail:hqwang1962@126.com

受湿空气参数、水参数、喷淋水滞留时间、喷淋室结构、喷淋方向等多种因素的影响<sup>[10-12]</sup>。

为了分析和优化不涉及热功转换的传热过程,过增元等<sup>[13-14]</sup>提出了“火积”耗散原理,证明当“火积”耗散达到极值时,传热性能最优;陈群<sup>[15]</sup>建立了“火积”理论—用于分析传热传质过程和优化蒸发冷却过程,建立了“火积”耗散方程—用于空气与水直接接触式换热,也适用于喷淋换热.针对空气-水热湿传递过程中,存在显热传递温差和传质含湿量差,江亿等<sup>[16]</sup>提出显热“火积”损失或湿“火积”损失,并认为“火积”损失永远为正,总“火积”损失是过程微元传递“火积”损失的总和。

## 1 喷淋热湿传递过程“火积”分析

对喷淋室内空气-水传热传质现象中空气侧吸热能力进行分析研究,提出湿空气“火积”,用于表征湿空气传递热量的能力.在数值上,湿空气“火积”等于湿空气热量“火积”与湿度“火积”之和<sup>[17]</sup>.当以环境温度 $t_0$ (单位:℃)下的饱和空气为状态参考点( $p_0, t_0, d_0$ )时( $p_0$ 为大气压, $d_0$ 为含湿量),湿空气“火积”表示为

$$J_a = J_h + J_w = \frac{1}{2}Gcp(T_a - T_0)^2 + \frac{1}{2}\gamma G(T_b - T_0)(d - d_0). \quad (1)$$

式中: $J_a$ 为湿空气的“火积”; $J_h$ 为湿空气的热量“火积”; $J_w$ 为湿空气的温度“火积”; $G$ 为空气流量,kg/s; $cp$ 为空气的定压比热,取1.004 kJ/(kg·K); $T_a$ 为空气的干球温度,K; $\gamma$ 为汽化潜热,取2 257.2 kJ/kg; $T_b$ 为空气的露点温度,K; $d$ 为空气含湿量,g/kg.

空气流量的计算式为

$$G = u\rho = u \cdot 0.003\ 483 \frac{B}{T_a} \left( 1 - 0.377\ 9 \frac{\varphi P_s}{B} \right). \quad (2)$$

式中: $u$ 为空气流速,m<sup>3</sup>/s; $B$ 为当地大气压,Pa; $\varphi$ 为相对湿度; $P_s$ 为饱和蒸气压,Pa.

饱和蒸气压的计算式<sup>[18]</sup>为

$$P_s = 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_a} + e_3 T_a + e_4 T_a^2}. \quad (3)$$

式中: $e_1$ 为15.233 116 19; $e_2$ 为-2 806.323 803 14; $e_3$ 为-0.009 878 99; $e_4$ 为7.035 1×10<sup>-6</sup>.

露点温度的计算式<sup>[19]</sup>为

$$T_b = 235 \left[ \frac{7.45}{\lg(\varphi 10^{235 + \frac{7.45}{T_a - 273.15}})} - 1 \right]^{-1}. \quad (4)$$

含湿量的计算式为

$$d = 0.622 \frac{\varphi P_s}{B - \varphi P_s} = 0.622 \frac{\varphi 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_a} + e_3 T_a + e_4 T_a^2}}{B - \varphi 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_a} + e_3 T_a + e_4 T_a^2}}. \quad (5)$$

在喷淋过程发生前,湿空气干球温度为 $T_{a1}$ ,相对湿度为 $\varphi_1$ ,则根据式(1)~式(5),可得喷淋前湿空气“火积”为

$$J_{a1} = \frac{1}{2}u0.003\ 483 \frac{B}{T_{a1}} \left( 1 - 0.377\ 9 \frac{\varphi_1 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a1}} + e_3 T_{a1} + e_4 T_{a1}^2}}{B} \right) cp(T_{a1} - T_0)^2 + \frac{1}{2}\gamma u 0.003\ 483 \frac{B}{T_{a1}} \left( 1 - 0.377\ 9 \frac{\varphi_1 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a1}} + e_3 T_{a1} + e_4 T_{a1}^2}}{B} \right) \left\{ 273.15 + 235 \left[ \frac{7.45}{\lg(\varphi_1 10^{235 + \frac{7.45}{T_{a1} - 273.15}})} - 1 \right]^{-1} - T_0 \right\} \left( 0.622 \frac{\varphi_1 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a1}} + e_3 T_{a1} + e_4 T_{a1}^2}}{B - \varphi_1 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a1}} + e_3 T_{a1} + e_4 T_{a1}^2}} - d_0 \right). \quad (6)$$

在喷淋过程发生后,湿空气干球温度为 $T_{a2}$ ,相对湿度为 $\varphi_2$ ,则根据式(1)~式(5)可得喷淋后湿空气“火积”为

$$J_{a2} = \frac{1}{2}u0.003\ 483\ \frac{B}{T_{a2}}(1 - 0.377\ 9\ \frac{\varphi_2 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a2}} + e_3 T_{a2} + e_4 T_{a2}^2}}{B})cp(T_{a2} - T_0)^2 + \frac{1}{2}\gamma u0.003\ 483\ \frac{B}{T_{a2}}(1 - 0.377\ 9\ \frac{\varphi_2 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a2}} + e_3 T_{a2} + e_4 T_{a2}^2}}{B}) \left\{ 273.15 + 235 \left[ \frac{7.45}{\lg(\varphi_2 10^{235 + \frac{e_2}{T_{a2}} + e_3 T_{a2} + e_4 T_{a2}^2})} - 1 \right]^{-1} - T_0 \right\} \left( 0.622 \frac{\varphi_2 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a2}} + e_3 T_{a2} + e_4 T_{a2}^2}}{B - \varphi 10^{e_1 + \frac{e_2}{T_{a2}} + e_3 T_{a2} + e_4 T_{a2}^2}} - d_0 \right). \quad (7)$$

喷淋换热效率为喷淋换热前湿空气“火积”与喷淋换热后湿空气“火积”的差值与喷淋换热前湿空气“火积”的比值,即

$$\eta = \frac{J_{a1} - J_{a2}}{J_{a1}} \times 100\%. \quad (8)$$

## 2 喷淋换热效率算例确定

在矿井实际工作工程中,矿井排风温度、相对湿度基本趋于稳定.因此,在矿井喷淋余热回收过程中,影响矿井排风中湿空气“火积”的主要因素为外部环境条件.为了分析外部环境条件对喷淋换热效率的影响,本文通过实验数据及中国建筑热环境分析专用气象数据<sup>[20]</sup>,对长沙市喷淋换热前、后湿空气“火积”进行逐时计算,从而得出逐时换热效率.

### 2.1 空气侧始末状态确定

熊慧玲实验地点为湘潭市湖南科技大学,实验装置为热能回收模拟实验台,其中,模拟喷水装置总喷水量为 16 819.2 kg/h,即 16.819 m<sup>3</sup>/h;风机送风量为 14 016 m<sup>3</sup>/h,即 3.89 m<sup>3</sup>/s.

表 1 热能回收实验数据<sup>[21]</sup>

编号	空气流量 G/(m <sup>3</sup> /h)	喷水前空气	喷水前空气相对	喷水后空气	喷水后空气相对
		温度 T <sub>a1</sub> /℃	湿度 φ <sub>1</sub> /%	温度 T <sub>a2</sub> /℃	湿度 φ <sub>2</sub> /%
A6	11 380.68	26.04	97.39	14.93	99.43

### 2.2 外部环境条件

实验地点为湘潭市,但中国建筑热环境分析专用气象数据库无湘潭市数据,因此,导出相邻于湘潭市的长沙市典型气象年逐时参数,提取出“火积”计算时所需因素:大气压、大气干球温度、大气含湿量.

### 2.3 喷淋换热效率

将 2.1 节、2.2 节数据分别代入式(6)、式(7)中,计算得出热能回收模拟实验台喷淋换热前湿空气“火积”、喷淋换热后湿空气“火积”;再将其代入式(8),得出该实验台的逐时喷淋换热效率,共 5 040 组数据.

## 3 计算结果与讨论

由中国建筑热环境分析专用气象数据可知,大气干球温度与含湿量两者都随着气候的变化而改变,且两者相互独立.而“火积”在计算过程中同时受到两种因素的相互影响,因此,喷淋换热效率的主要因素为大气干球温度和大气含湿量.

### 3.1 大气干球温度对换热效率的影响

根据筛选所得 5 040 组数据绘制图 1,由图 1 可知,大气干球温度在-5~16℃时,随着大气干球温度的增加,喷淋换热效率逐渐增加;在 16~25℃时,随着大气干球温度的增加,喷淋换热效率逐渐减小.当温度大于 20℃时,喷淋换热效率逐渐小于 60%.

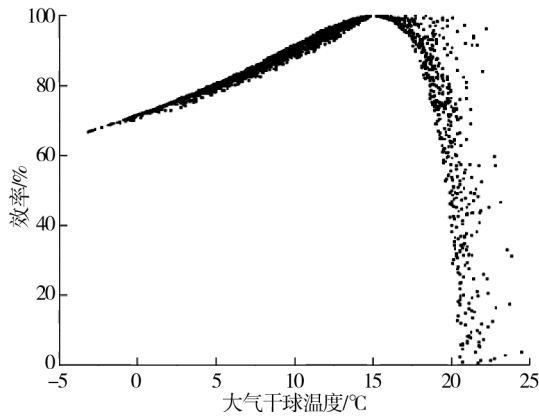


图1 大气干球温度与效率关系

### 3.2 含湿量对换热效率的影响

根据筛选所得 5 040 组数据绘制图 2,由图 2 可知,大气含湿量在 2.0~10.5 g/kg 时,随着大气含湿量的增加,喷淋换热效率逐渐增加;大气含湿量在 10.5~16.0 g/kg 时,随着大气干球温度的增加,喷淋换热效率逐渐减小;大气含湿量在 8~12 g/kg 时,有少部分数据组换热效率小于 60%;大气含湿量大于 12 g/kg 时,逐渐有越来越多数据组换热效率小于 60%.

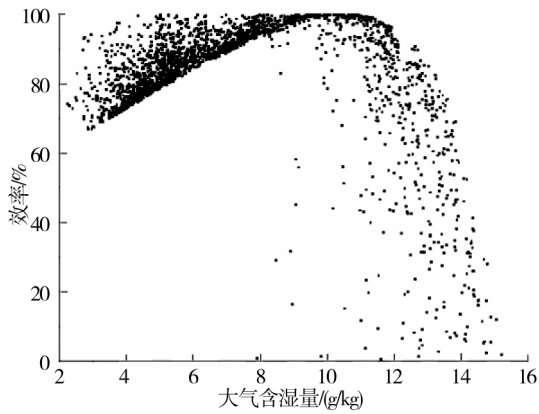


图2 大气含湿量与喷淋换热效率关系

### 3.3 喷淋换热效率的确定

根据筛选所得 5 040 组数据绘制图 3,由图 3 可知,随着大气干球温度和大气含湿量的增加,喷淋换热效率先逐渐增加至最高点,此时,大气干球温度为 15 °C,大气含湿量为 10.59 g/kg,随后,喷淋换热效率逐渐降低.

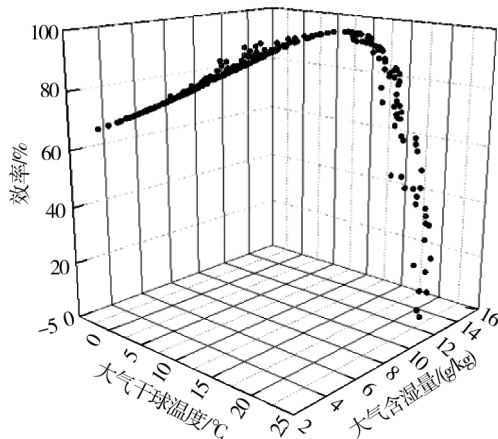


图3 大气干球温度、含湿量与效率的关系

由计算结果可知,所筛选出的5 040组数据中,喷淋换热效率小于60%的仅有351组数据.因此,在矿井喷淋换热工程经济预评估中,喷淋换热效率可采用定值60%.

## 4 结论

- 1)利用“火积”理论,得到了换热效率计算公式.
- 2)大气干球温度小于20℃且大气含湿量小于12 g/kg时,喷淋换热效率相对稳定,基本高于60%.
- 3)所得结论,可为直接喷淋式矿井排风热湿能量提取及其工程经济技术预评估提供量化依据.

## 参考文献:

- [1] 刘建功.煤矿低温热源利用技术研究与应用[J].煤炭科学技术,2013,41(4):124-128.
- [2] 韩磊,裴婷.矿井余热利用技术研究现状及展望[J].应用能源技术,2013(5):36-39.
- [3] 亓玉栋,程卫民,于岩斌,等.高温矿井低品位余热综合利用技术研究[J].中国矿业,2015,24(2):60-66.
- [4] Liu J Y. Waste heat utility technology in coal mine[J]. Applied Mechanics & Materials,2012,170-173:2723-2726.
- [5] 张习军.集中冷却矿井风流的直接接触式喷淋热交换系统[J].煤炭技术,2015,34(9):222-225.
- [6] 王翔,张泽昊,廖增安,等.喷淋降温传热传质模型及其特性规律研究[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2578-2587.
- [7] 唐晓梅,马素霞,段泽敏.矿井乏风余热回收和除尘实验研究[J].煤炭学报,2016,41(8):1984-1988.
- [8] 崔海蛟,陈世强,郑旭,等.上喷式扩散塔喷淋装置热回收与除尘理论模型构建及求解[J/OL].煤炭学报:1-10[2021-11-23].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.0165>.
- [9] 强天伟,沈恒根.直接蒸发冷却空调工作原理及不循环水喷淋填料分析[J].制冷与空调,2005(2):62-65.
- [10] 周华慧.矿井回风余热回收换热装置的换热性能研究[D].邯郸:河北工程大学,2012.
- [11] 鲍玲玲.矿井回风热能回收热湿传递研究[D].天津:天津大学,2013.
- [12] 陈世强,陈友明,崔海蛟.上喷式矿井排风热回收装置内液滴运动模型及其优化计算[J].安全与环境学报,2015,15(4):78-82.
- [13] 过增元,梁新刚,朱宏晔.“火积”—描述物体传递热量能力的物理量[J].自然科学进展,2006,16(10):1288-1296.
- [14] Guo Z Y, Liu X B, Tao W Q, et al. Effectiveness thermal resistance method for heat exchanger design and analysis[J]. Heat Mass Transfer,2010,53(13-14):2811-2884.
- [15] Chen Q, Yang K D, Wang M, et al. A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I:theory[J]. Energy,2010,35(6):2448-2454.
- [16] 江亿,谢晓云,刘晓华.湿空气热湿转换过程的热学原理[J].暖通空调,2011(3):51-64.
- [17] 鲍玲玲,赵旭,陈冬,等.基于(火积)耗散理论的喷淋室内传热传质性能优化研究[J].工程热物理学报,2018,39(1):17-22.
- [18] 袁江,胡明辅,毕二朋,等.湿空气饱和水蒸气压数学计算式的拟合与优选[J].武汉工程大学学报,2011,33(10):25-27.
- [19] 王凌杰,杨昌盛.湿空气露点温度计算公式的研究与应用[J].装备制造技术,2019(5):124-126.
- [20] 中国气象局气象信息中心气象资料室.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [21] 熊慧灵.矿井回风热能回收热湿传递及换热效率研究[D].湘潭:湖南科技大学,2016.