

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412908

采掘装备截割煤层过程中截齿温度场特性研究*

司 垒,王忠宾,戴剑博,魏 东,顾进恒
(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要:采掘装备在截割煤层过程中,不同性状的煤岩体会导致截齿温度发生变化。为了探究截齿温度场的变化特性,分析了截齿截割煤层过程的热源分布情况,利用热源法建立了截割煤层过程中截齿温度场的理论计算模型,并考虑到采掘装备的实际工况条件,推导了喷雾系统对流换热系数的计算过程。以MG2×55/250-BWD型采煤机为研究对象,基于ABAQUS有限元软件建立了截齿旋转截割煤岩模型,研究了不同工况下截齿温度场的分布情况与变化规律;接着,基于Fluent流体仿真软件建立了喷雾冷却模型,获取了不同喷雾压力下截齿的对流换热系数,进而将换热系数带入ABAQUS有限元模型来模拟水喷雾冷却下截齿截割煤岩过程的温度场;最后,搭建了滚筒截割煤岩温度采集实验台,设计了截齿温度采集系统,开展了不同工况下滚筒截割煤岩实验,分析了截齿温度场的变化规律,验证了理论计算与仿真模型的正确性。结果表明,不同工况下截齿的温度场具有不同的分布形态,且最高温度与滚筒转速、牵引速度、煤岩坚固性系数呈正相关性;水喷雾压力与截齿温度呈反比,与常规条件相比水喷雾冷却能使截割温度场温度降低20%以上。研究成果为基于截齿温度场的煤岩性状识别提供新的理论和方法。

关键词:采掘装备;煤岩截割;截齿温度场;喷雾冷却

中图分类号: TH6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440. 60

Research on temperature field characteristics of cutting teeth during coal seam cutting with mining equipment

Si Lei, Wang Zhongbin, Dai Jianbo, Wei Dong, Gu Jinheng

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: During the process of cutting coal seams with mining equipment, different characteristics of coal and rock can cause changes in the temperature of the cutting teeth. To explore the changing characteristics of the temperature field of the pick, the heat source distribution in the process of cutting the coal seam by the pick is analyzed. The theoretical calculation model of the temperature field of the pick in the process of cutting the coal seam is established using the heat source method. Considering the actual working conditions of the mining equipment, the calculation process of the convection heat transfer coefficient of the spray system is deduced. Taking the MG2×55/250-BWD shearer as the research object, a model of rotating cutting of coal and rock is formulated based on ABAQUS finite element software. The distribution and variation of the temperature field of the pick under different working conditions are studied. Based on Fluent fluid simulation software, the spray cooling model is established, and the convective heat transfer coefficient of the pick under different spray pressures is obtained. Then, the heat transfer coefficient is brought into the ABAQUS finite element model to simulate the temperature field of the pick during coal cutting under water spray cooling. Finally, a temperature collection experimental platform for drum-cutting coal and rock is established. A temperature collection system for cutting teeth is designed. Some experiments on drum-cutting coal and rock under different working conditions are conducted, and the variation law of the temperature field of the cutting teeth is analyzed. The correctness of designed theoretical calculations and simulation models is evaluated. The results show that the temperature field of the pick has different distribution patterns under different working conditions, and the maximum temperature is positively correlated with the rotating speed of the cylinder, the traction speed, and the coefficient of coal rock firmness. Water spray pressure is inversely proportional to the cutting temperature, and the water spray cooling can greatly reduce the cutting temperature by over 20%, compared to dry cutting conditions. The research results provide new theories and methods for identifying coal-rock properties

收稿日期:2024-06-02 Received Date: 2024-06-02

* 基金项目:国家自然科学基金(52174152)、徐州市基础 Research 计划(KC23051)、山东省中央引导地方科技发展资金(YDZX2024119)项目资助

based on the temperature field of the cutting teeth.

Keywords: mining equipment; coal-rock cutting; cutting tooth temperature field; spray cooling

0 引言

2020年,国家发展改革委、国家能源局等八部委出台了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,明确指出智能化是煤炭工业高质量发展的核心支撑技术,建设智慧煤矿符合国家战略,是煤炭工业发展的必然选择。智能开采是智慧煤矿核心系统之一,可以在不同程度上无需人工干预而独立完成采煤作业,具有自主感知、自主决策、自主控制等关键智能要素。煤岩性状在线辨识是智能开采自主感知关键技术之一,是采掘装备实现智能化作业和根据复杂地质环境自适应调控的重要依据。采掘装备截齿截割煤岩温度场是煤岩力学性能本质属性,截齿温度场特征与煤岩力学性能存在强相关关系,截齿温度场特性为采掘装备截割煤岩性状识别提供一种新的思路和方法^[1-2]。因此,开展采掘装备截割煤岩温度场特性研究对于提升采掘装备的智能化水平具有重要意义。

切削温度场一直是机械加工领域重点研究内容。李金乐等^[3]采用移动热源法分别建立了在剪切滑移面热源和前刀面摩擦热源作用下单晶锆的微切削温升理论模型,计算了单晶锆3种切削速度下的最高切削温度,同时以同类硬脆性材料单晶硅的切削温度对此模型进行了验证。肖强等^[4]基于刀-屑接触区的摩擦理论,构建了考虑切削参数以及温度影响的ZM5镁合金刀-屑摩擦理论模型。王贵林^[5]等通过有限元仿真模拟铲钻钻削过程的温度场,掌握了倒棱角度和倒棱宽度对钻削温度的影响规律。Jiao等^[6]基于热源法建立了面铣削传热模型,并利用有限元法对铣削加工表面温度场进行了瞬态数值模拟,通过实验验证了理论分析模型和有限元模型的正确性。岳玉霞等^[7]对五轴数控机床产生的切削热而导致的加工误差进行实时补偿,设计了一种误差补偿控制器,实验结果证明了该方法的有效性。岳彩旭等^[8]综合考虑第2变形区时变性热强度、时变性热量分配比以及前角因素,提出了一种基于“移动热源法”的铣刀前刀面瞬态温度场建模方法,仿真与试验结果验证了模型的准确性。然而,金属切削过程与煤岩截割过程中刀具与对象几何干涉关系存在显著差异,如金属材料切削加工过程中主要采用正前角刀具切削,材料去除方式以剪切断裂为主,而截齿截割煤岩过程主要以负前角进行煤岩切割,材料去除方式以挤压断裂为主,进而导致切削过程热源产生机理存在较大差异,金属切削加工温度场模型无法直接用于截齿截割煤岩温度场分析。因此,针对镐形截齿截

割煤岩温度场模型还需基于截齿与煤岩相互作用几何干涉关系以及热源产生机理进一步深入研究。

部分国内外学者采用有限元仿真和实验方法对煤矿井下采掘装备截割煤岩温度场展开了有益的探索。Deng等^[9]使用有限元模型研究了不同结构参数镐形截齿的应力和温度场,并通过线性截割实验验证了数值模拟结果的可靠性。张德义等^[10]建立镐形截齿截割产热与煤岩强度数学关系模型,对不同配比岩样进行摆进截割试验并获取截割红外热像及温度信号,分析稳定阶段截割温度随煤岩强度的变化规律,并以此为基础进行记忆截割过程实验。庞国辉等^[11]建立截齿截割岩石有限元模型,得到不同运行参数下载齿的温度分布云图以及截割过程的温度随时间变化曲线,研究不同运行参数下镐形截齿的温度分布及其变化规律。Shao等^[12]开发了一种特殊的热电偶结构来测量镐形截齿与岩石材料接触面上的温度,研究了截深、截距、截速等切削参数对截齿温度的影响。张强等^[13-14]对采煤机镐形截齿截割煤岩过程中的红外热像特性以及瞬态闪温差异进行了研究,建立了基于最小模糊度优化的采煤机煤岩界面动态识别模型。Sun等^[15]对比评估了热稳定金刚石复合材料与钨碳化化合物的岩石截割磨损与温度,分析了两种材料的磨损、切割温度与切割参数之间的关系。Dewangan等^[16]通过使用两种不同材料制成的镐型截齿进行了煤样的线性截割实验,得到了截割后去除的煤量和截齿尖的温度,比较了两种镐型截齿的性能。Liu等^[17]研制了镐型截齿温度无线测量系统,并通过直线截割煤岩实验获得了截割头尖端的实际温度,测温值与热红外数据误差小于2%,证明了该测温系统的可靠性。

从上述研究可以看出,以往采掘装备截割煤岩温度场研究主要局限于有限元仿真方法和实验分析方法,少数镐型截齿截割煤岩温度场模型研究忽略了截齿与煤岩相互作用几何干涉关系,且没有考虑喷雾冷却系统的实际工况特征,并不能真实反映镐形截齿截割煤岩过程中热源产生机理以及温度场特性。为此,通过分析采煤机截齿截割煤岩过程中截齿与煤岩相互作用几何干涉关系,利用热源法建立了煤层截割过程中截齿温度场理论计算模型,推导了喷雾系统对流换热系数的计算过程;并采用ABAQUS有限元软件建立了镐形截齿旋转截割煤岩模型,分析不同工况下载齿温度场分布特征及其演化规律,搭建了滚筒截割煤岩温度采集实验台,验证了本文理论模型与有限元模型的正确性。本文研究成果对于建立基于温度场特征的煤岩性状识别方法具有重要意义。

1 截齿截割煤层过程温度模型

1.1 截齿截割煤层过程热源分布

在采掘装备截割煤层过程中, 实际参与截割的部分为镐型截齿, 截齿对煤岩进行破坏从而实现煤岩碎屑的去除。由于产热区集中于截齿和煤岩的接触区域, 且镐型截齿在滚筒上的安装排列具有规律性和相似性, 因此为了简化建模过程和降低计算量, 选取单截齿与煤岩接触的部分进行建模分析。

如图 1 所示为截齿截割煤岩过程受力与产热区示意图。图 1(a) 为截齿截割煤岩时的受力状态, 其中截割力 F_h 为截齿沿截割速度方向所受的力, 法向力 F_n 为截齿在垂直于截割速度方向所受的力, h 为截深, v_j 为截齿截割速度, F_{fj} 为齿-屑之间的滑动摩擦力, v_{fj} 为齿-屑之间的摩擦速度, F_{fn} 为齿-煤岩之间的摩擦力, v_{fn} 为齿-煤岩之间的摩擦速度。如图 1(b) 所示, 截齿截割煤岩温度场主要包括 3 个产热区: 第 1 产热区为截齿合金头前刀面与破碎的煤岩屑滑动摩擦产热, 记为齿-屑摩擦面热源, 该热源热量传递给截齿和崩落的煤岩屑; 第 2 产热区为煤岩受到截齿截割力产生的剪切变形热, 记为剪切面热源, 该热源热量传递给煤岩与破碎的煤岩屑; 第 3 产热区为截齿合金头后刀面与已截割煤岩截槽表面的摩擦热, 记为齿-煤岩摩擦面热源, 该热源热量传递给截齿和煤岩。

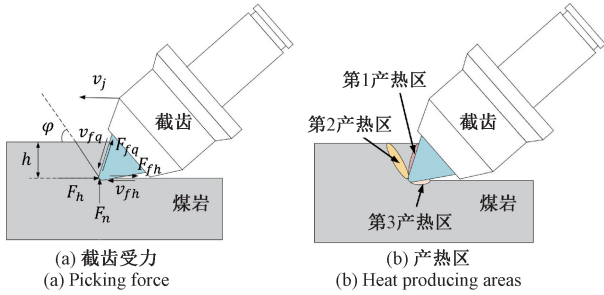


图 1 截齿截割煤岩过程受力与产热区
Fig. 1 The force and heat producing areas during the process of cutting coal and rock with cutting teeth

在截齿截割煤岩过程中, 截割力所做机械功几乎全部转化为了截割热。由于第 2 产热区的剪切变形对煤岩及截齿的温升影响很小, 因此忽略该热源的影响。综上, 截齿温度场建模主要考虑两个热源, 即第 1 产热区的齿-屑摩擦热源和第 3 产热区的齿-煤岩摩擦热源。

1.2 截割区域截齿温度场建模

1) 齿-屑摩擦热源热流密度和传热模型

在截齿截割煤壁过程中, 前刀面与煤岩体之间摩擦

力做的功转化成热能。该摩擦面热源的热流密度为:

$$q_Q = \frac{F_{fj} v_{fj}}{S_1} \quad (1)$$

式中: q_Q 为齿-屑摩擦面的热流密度, 单位为 W/m^2 ; S_1 为齿-屑摩擦面的面积, 单位为 m^2 。

图 2 为齿-屑摩擦面面积计算模型示意图。煤岩截割过程中截割厚度远远大于齿尖钝圆半径, 为了简化截齿与煤岩接触面积的推导计算过程, 忽略齿尖半径的影响, 将截齿合金头看作标准圆锥体。

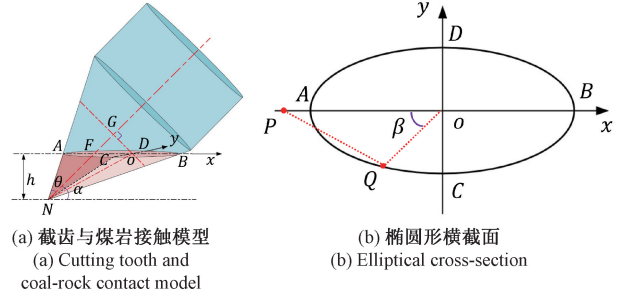


图 2 截齿与煤岩接触面积计算模型
Fig. 2 Calculation model for contact area between cutting teeth and coal-rock

如图 2(a) 所示, 齿-屑摩擦面记为曲面 $N-ACD$, 其面积记为 S_1 。如图 2(b), 煤岩体的上表面与合金头相交截面为椭圆形, 其长轴半径为 m , 短轴半径为 n , 则椭圆方程可以表示为:

$$\frac{x^2}{m^2} + \frac{y^2}{n^2} = 1 \quad m > n > 0 \quad (2)$$

由几何关系可以得到长轴 m 长度的表达式为:

$$m = \frac{h}{2} \left(\frac{1}{\tan(\alpha - \theta)} - \frac{1}{\tan(\alpha + \theta)} \right) \quad (3)$$

式中: h 为截割深度; α 为截齿安装角; θ 为合金头半锥角。

由图 2(b) 可知, 椭圆截面短轴 CD 是以点 G 为圆心并垂直于圆锥轴线的截面圆的弦, 设此截面圆半径为 r_n , 圆心到此弦的距离为 h_n , 由几何关系可以得到短轴 n 长度的表达式为:

$$n = \sqrt{r_n^2 - h_n^2} \quad (4)$$

式中:

$$r_n = \left(\frac{h}{\sin\alpha} + \overline{FO} \cos\alpha \right) \tan\theta \quad (5)$$

$$h_n = \overline{FO} \sin\alpha \quad (6)$$

$$\overline{FO} = m + \frac{h}{\tan(\alpha + \theta)} - \frac{h}{\tan\alpha} \quad (7)$$

根据几何关系推导出齿-屑摩擦面 $N-ACD$ 的面积 S_1 为:

$$S_1 = 2 \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \times \overline{QN} ds \quad (8)$$

$$\overline{QN} = \sqrt{(-\overline{OP} + m \cos \beta)^2 + (n \sin \beta)^2 + h^2} \quad (9)$$

$$\overline{OP} = m + \frac{h}{\tan(\alpha + \theta)} \quad (10)$$

式中: β 为椭圆离心角。

由于齿-屑摩擦热源产生的热量会传递给截齿与煤岩碎屑,所以齿-屑摩擦热源传递给截齿的热分配系数 γ_{JC} 可以表示为:

$$\gamma_{JC} = \frac{\sqrt{\lambda_j c_j \rho_j}}{\sqrt{\lambda_j c_j \rho_j} + \sqrt{\lambda_m c_m \rho_m}} \quad (11)$$

式中: λ_j, c_j, ρ_j 分别为截齿合金头材料的导热系数、比热容与密度; λ_m, c_m, ρ_m 分别为煤岩材料的导热系数、比热容与密度,单位分别为 $W/(m \cdot K)$ 、 $J/(kg \cdot K)$ 与 kg/m^3 。

齿-屑摩擦热源传递给截齿的热源密度可以表示为:

$$q_{JC-1} = \gamma_{JC} q_0 \quad (12)$$

根据镜像热源理论,在 x 轴负方向关于 yoZ 平面设置镜像热源,从而将截齿温度模型转化为无限大物体传热问题,如图3所示。

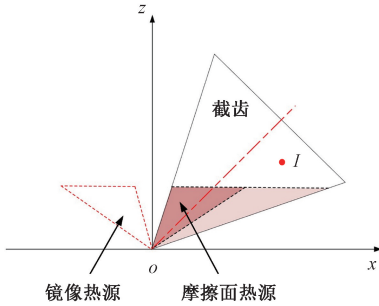


图3 齿-屑摩擦面热源产生的截齿温度模型

Fig. 3 The temperature model for cutting teeth generated by the heat source on the tooth chip friction surface

齿-屑摩擦面热源可以分解为若干椭圆弧状线热源,而线热源又可以视为由若干点热源微元组成。因此可以得到点热源微元 $P(x_p, y_p, z_p)$ 对截齿任意一点 $I(X, Y, Z)$ 产生的温升为:

$$dT_Q = \frac{q_{JC-1}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{L_1^2 + L_2^2}{4at}\right) dx dy dz \quad (13)$$

对整个摩擦面热源及镜像热源积分,得到齿-屑摩擦热源及其镜像热源对截齿瞬态温度场产生的温升为:

$$T_Q = \int_0^h dz \int_0^\pi \frac{q_{JC-1}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{L_1^2 + L_2^2}{4at}\right) \times \sqrt{m_1^2 \sin^2 \beta + n_1^2 \cos^2 \beta} d\beta \quad (14)$$

式中: L_1 和 L_2 分别为齿-屑摩擦热源和镜像热源上的微元点热源到截齿任意一点的距离:

$$L_1^2 = (X - x_p)^2 + (Y - y_p)^2 + (Z - z_p)^2 \quad (15)$$

$$L_2^2 = (X + x_p)^2 + (Y - y_p)^2 + (Z - z_p)^2 \quad (16)$$

2) 齿-煤岩摩擦热源热流密度和传热模型

在截齿截割煤岩过程中,截齿与煤岩之间存在压力,因此会产生摩擦力做功,形成截齿后刀面与煤岩已截割面的摩擦面热源。齿-煤岩摩擦面热源的热流密度可以表示为:

$$q_H = \frac{F_{fh} v_{fh}}{S_2} \quad (17)$$

式中: q_H 为齿-煤岩摩擦面的热流密度,单位为 W/m^2 ; S_2 为齿-煤岩摩擦面的面积,单位为 m^2 。

齿-煤岩摩擦面可以表示为图2(b)中的椭圆形平面 $ABCD$,其面积记为 S_2 。根据几何关系,摩擦面面积可以表示为:

$$S_2 = \frac{\pi}{4} \times \overline{AB} \times \overline{CD} \quad (18)$$

联立式(2)~(4),代入式(18),并将截深 h 转换为层切高度 h_m ,可以得到截齿后刀面与煤岩已截割表面的摩擦面面积。

齿-煤岩摩擦热源传递给截齿的热源密度可以表示为:

$$q_{JC-2} = \gamma_{JC} q_H \quad (19)$$

齿-煤岩摩擦面热源相对于截齿来说可以视为静止热源,在截割过程中与截齿的相对位置保持不变。同样设置镜像热源,建立的齿-煤岩摩擦面热源下截齿传热模型如图4所示。

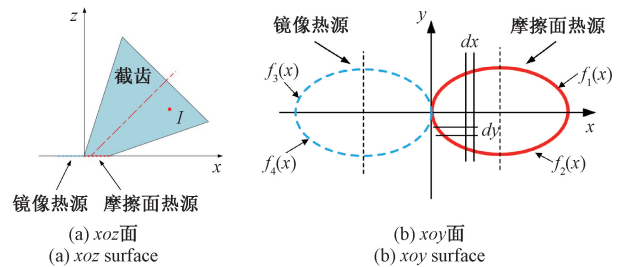


图4 齿-煤岩摩擦面热源产生的截齿温度模型

Fig. 4 The temperature model for cutting teeth generated by the heat source on the tooth coal-rock friction surface

齿-煤岩摩擦面热源由若干有限长线热源组成,每个有限长线热源又由若干点热源微元组成,如图4(b)所示。点热源微元 $Q(x_q, y_q, z_q)$ 对截齿任意一点 $I(X, Y, Z)$ 引起的温升可以表示为:

$$dT_H = \frac{q_{JC-2}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{L_3^2 + L_4^2}{4at}\right) dx dy \quad (20)$$

式中: L_3 和 L_4 分别为齿-煤岩摩擦热源和镜像热源上的微元点热源到截齿任意一点的距离:

$$L_3^2 = (X - x_q)^2 + (Y - y_q)^2 + (Z - z_q)^2 \quad (21)$$

$$L_4^2 = (X + x_q)^2 + (Y - y_q)^2 + (Z - z_q)^2 \quad (22)$$

将齿-煤岩摩擦热源以 x 轴为界分为上下两部分, 其表达式分别为 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 。根据椭圆几何关系可知, 式中 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 分别为:

$$f_1(x) = n \sqrt{1 - \frac{(x - m)^2}{m^2}}, 0 \leq x \leq 2m \quad (23)$$

$$f_2(x) = -n \sqrt{1 - \frac{(x - m)^2}{m^2}}, 0 \leq x \leq 2m \quad (24)$$

对整个摩擦面热源及镜像热源积分, 得到齿-煤岩摩擦热源及其镜像热源对截齿瞬态温度场产生的温升为:

$$T_H = \int_0^{2m} \int_{f_2(x)}^{f_1(x)} \frac{q_{JC-2}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{L_3^2 + L_4^2}{4at}\right) dx dy \quad (25)$$

3) 常规条件下截齿总温升

综合上述分析, 常规条件下截齿总温升可表示为:

$$T_{JC-G} = T_Q + T_H \quad (26)$$

1.3 喷雾条件下截割区域截齿温度场建模

采掘装备在截割煤层过程中会产生大量的粉尘, 此外滚筒截齿部分还会产生大量的截割热, 因此采掘装备一般在摇臂上安装水喷雾系统。喷雾系统的冷却作用改变了截齿边界的换热状态, 由于切条件下的绝热边界变为了对流换热边界, 造成镜像热源热流密度的值比原热源要小, 因此引入一个低温修正系数 k 来调整镜像热源的热流密度。此外截齿温度除了受到摩擦热源的影响, 还与喷雾冷却造成的热损失源有关^[18]。

喷雾条件下齿-屑摩擦热源及其镜像热源对截齿瞬态温度场产生的温升可以表示为:

$$T_{QW} = \int_0^h dz \int_0^\pi \frac{q_{JC-1}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \times \left(\exp\left(-\frac{L_1^2}{4at}\right) + k \exp\left(-\frac{L_2^2}{4at}\right) \right) \times \sqrt{m_1^2 \sin^2 \beta + n_1^2 \cos^2 \beta} d\beta \quad (27)$$

喷雾条件下齿-煤岩摩擦热源及其镜像热源对截齿瞬态温度场产生的温升为:

$$T_{HW} = \int_0^{2m} \int_{f_2(x)}^{f_1(x)} \frac{q_{JC-2}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \times \left(\exp\left(-\frac{L_3^2}{4at}\right) + k \exp\left(-\frac{L_4^2}{4at}\right) \right) dx dy \quad (28)$$

热损失源的热流密度 q_{lose} 可以表示为:

$$q_{lose} = h_w (T_s - T_w) \quad (29)$$

式中: h_w 为表面对流换热系数, 单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; T_s 为热源表面温度, 单位为 K ; T_w 为冷却介质温度, 单位为 K 。

前刀面热损失源及其镜像热源对截齿瞬态温度场产生的温升可以表示为:

$$T_{QL} = \int_0^h dz \int_0^\pi \frac{q_{lose-q}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \times \left(\exp\left(-\frac{L_1^2}{4at}\right) + k \exp\left(-\frac{L_2^2}{4at}\right) \right) \times \sqrt{m_1^2 \sin^2 \beta + n_1^2 \cos^2 \beta} d\beta \quad (30)$$

式中: q_{lose-q} 为前刀面热损失源热流密度, 单位为 W/m^2 。

后刀面热损失源及其镜像热源对截齿瞬态温度场产生的温升可以表示为:

$$T_{HL} = \int_0^{2m} \int_{f_2(x)}^{f_1(x)} \frac{q_{lose-h}}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \times \left(\exp\left(-\frac{L_3^2}{4at}\right) + k \exp\left(-\frac{L_4^2}{4at}\right) \right) dx dy \quad (31)$$

式中: q_{lose-h} 为后刀面热损失源热流密度, 单位为 W/m^2 。

因此, 喷雾条件下截齿总温升可以表示为:

$$T_{JC-W} = T_{QW} + T_{HW} + T_{QL} + T_{HL} \quad (32)$$

1.4 喷雾系统对流换热系数计算

为了分析喷雾系统对截齿温度场特性的影响, 需要求解喷雾系统的对流换热系数。为了方便计算, 对采掘装备截割煤岩的水喷雾冷却表面对流换热进行如下简化: 1) 截割热来自截齿与煤岩之间的相互摩擦, 假设单位时间内的热流密度稳定; 2) 水喷雾液滴能够完全覆盖整个滚筒及附近煤壁, 能够与截齿和煤岩发生有效热交换。

在表面温度低于 $100^\circ C$ 的截割区域, 水喷雾液滴没有发生相变, 所以此区域的水喷雾冷却为无沸腾换热^[19]。此区域的对流换热系数 h_1 可以分为两部分: 空气与壁面的自然对流换热系数 h_a 与水喷雾液滴的对流换热系数 h_{w1} 。

空气与壁面的自然对流换热系数 h_a 为:

$$h_a = 0.906 R_e^{1/2} P_r^{1/3} \times \frac{\lambda_a}{l} \quad (33)$$

式中: R_e 为雷诺数; P_r 为普朗特数; λ_a 为空气的导热系数, 单位为 $W/(m \cdot K)$; l 为截割区换热长度, 单位为 m 。

得到无沸腾换热区的总对流换热系数 h_1 为:

$$h_1 = h_{w1} + h_a = \frac{N_w c_w \rho_w V_w}{\pi r_{surf}^2 t_w} + h_a \quad (34)$$

式中: N_w 为水喷雾液滴总数; c_w 为水的比热容, 单位为 $J/(kg \cdot K)$; ρ_w 为水的密度, 单位为 kg/m^3 ; V_w 为水喷雾液滴的体积, 单位为 m^3 ; r_{surf} 为水喷雾液滴铺展半径, 单位为 m ; t_w 为喷雾总时间, 单位为 s 。

在表面温度高于 $100^\circ C$ 的截割区域, 水喷雾液滴会因超过沸点发生相变, 所以此区域的水喷雾冷却为核态沸腾换热^[20]。同样, 在核态沸腾区域的对流换热系数 h_2 也分为两部分: 空气与壁面的自然对流换热系数 h_a 与水喷雾液滴的核态沸腾对流换热系数 h_{w2} 。核态沸腾区的

总对流换热系数 h_2 可以表示为:

$$h_2 = h_{w2} + h_a = \frac{(h_{fa} + c_w(T_s - T_w))Q_w\rho_w}{\pi r_{surf}^2(T_n - T_w)} + h_a \quad (35)$$

式中: h_{fa} 为水喷雾液滴的汽化潜热; T_s 为饱和温度, 单位为 K; T_w 为水喷雾液滴初始温度, 单位为 K; T_n 为过度沸腾换热的起始温度, 单位为 K; Q_w 为水泵供水流量, 单位为 m^3/s 。

2 常规条件下截齿温度场数值模拟

2.1 有限元模型建立

本文以 MG2×55/250-BWD 型号采煤机为例建立截齿的简化模型: 去除齿柄部分, 只保留齿体与合金头。煤岩选择 Drucker-Prager 本构模型来模拟受到截齿的冲击超过屈服极限发生塑性破坏的情况。有限元模型如图 5 所示, 各部分属性如表 1 和 2 所示^[21-22]。

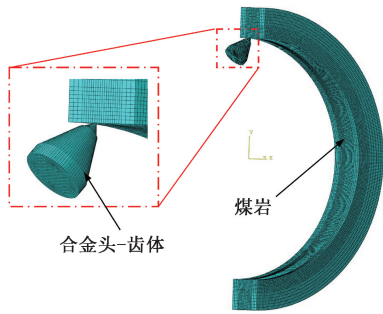


图 5 截齿旋转截割煤岩有限元模型

Fig. 5 Finite element model for rotary cutting of coal and rock with cutting teeth

表 1 截齿材料及属性参数

Table 1 Cutting material and property parameters

部件	材料	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
合金头	YG8	14 600	6×10^5	0.22
齿体	42CrMo	7 850	2.1×10^5	0.28

表 2 煤岩属性参数

Table 2 Coal rock attribute parameters

煤岩名称	坚固性系数	抗压强度/ MPa	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
煤岩 1	1	10	1 370	1.05×10^4	0.21
煤岩 2	3	30	1 860	2.49×10^4	0.23
煤岩 3	5	50	2 450	3.78×10^4	0.26

截齿网格选择 C3D4T 四结点热耦合四面体单元, 煤

岩网格选择 C3D8RT 八结点热耦合六面体单元, 并选择单元删除选项。对截齿截割煤岩体过程进行温度位移耦合分析。预定义场环境温度设为 $10^\circ C$ 。

通过分析截割参数, 截齿温升的主要影响因素有截割速度和截割深度; 此外, 煤岩本身的力学与物理性质也是重要的影响因素。对于截齿旋转截割来说, 滚筒转速与牵引速度决定了截割速度与截割深度。因此在仿真模拟中主要关注滚筒转速、牵引速度与煤岩坚固性系数变化对截齿温度场的影响。仿真方案如表 3 所示。

表 3 仿真方案

Table 3 Simulation schemes

组号	煤岩坚固性系数 f	滚筒转/ ($r \cdot min^{-1}$)	牵引速度/ ($m \cdot min^{-1}$)
1	3	60	4
2	3	70	4
3	3	80	4
4	3	90	4
5	5	60	2
6	5	60	3
7	5	60	4
8	5	60	5
9	1	70	3
10	3	70	3
11	5	70	3

2.2 仿真结果分析

1) 滚筒转速对截齿温度场影响

图 6 为第 1~4 组仿真方案得到的截齿温度场云图, 截齿温度由合金头向齿体方向逐渐降低。在截齿截割煤岩过程中随着滚筒转速的增加, 温度云图高温区域 ($\geq 50^\circ C$) 面积会减小。截齿温度云图面积减小的原因有: (1) 在截割摩擦热的生成过程中同时伴随着向截齿内部的热传导, 而热传导需要时间, 滚筒转速越高, 截齿与煤岩体接触时间越短, 导致热传导范围越小, 从而截齿温度云图面积越小; (2) 在牵引速度不变而滚筒转速增加的情况下, 截割过程中的最大截深会减小, 从而使得截齿温度云图面积减小。

图 7 为不同滚筒转速下截齿齿尖节点的温度-时间变化曲线。由图可知, 随着截割时间增加, 截齿接触煤岩后齿尖温度迅速上升, 然后逐渐趋于稳定。稳定阶段齿尖温度小幅度上升到最高温后再小幅度下降, 这是截深随旋转角度变化导致摩擦面积变化的结果。截齿最高温度随着滚筒转速增大而增大, 这是由以下因素综合造成: 一是滚筒转速的增加使得截齿的截割速度增加, 从而截

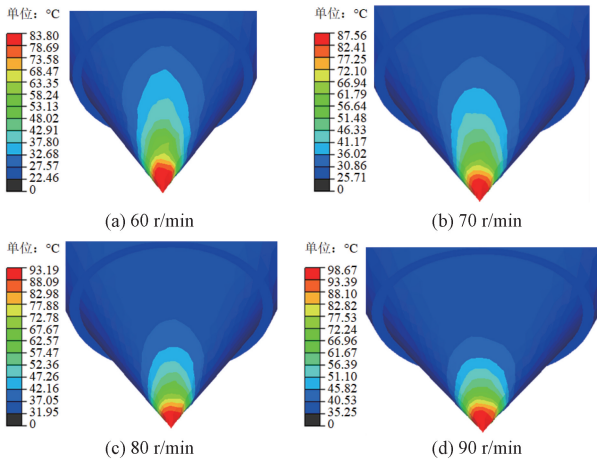


图 6 不同滚筒转速截齿仿真温度

Fig. 6 Simulated temperature cloud maps of cutting teeth at different drum speeds

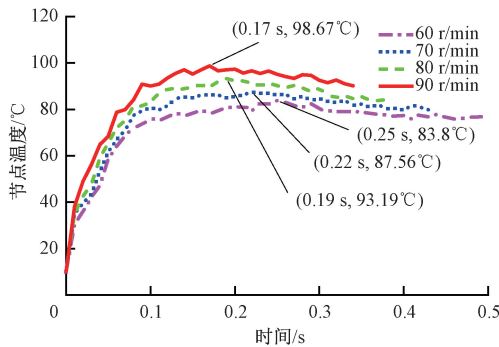


图 7 不同滚筒转速截齿仿真温度变化曲线

Fig. 7 Simulation temperature variation curves of cutting teeth at different drum rotational speeds

割力做功增加;二是转速增加使得截深减小,导致摩擦面积减小,从而摩擦做功有一定的减小。但是截齿整体温度会升高,这说明滚筒转速相比于摩擦面积对截齿温度的影响更加显著。

不同滚筒转速温度达到稳态的时间不同,转速越快达到稳态时间越短,截齿达到的最高温度越高。滚筒转速 60、70、80、90 r/min 条件下到达最高温度的时间分别为 0.25、0.22、0.19、0.17 s,最高温度分别为 83.80℃、87.56℃、93.19℃、98.67℃。

2) 牵引速度对截齿温度场影响

图 8 为第 5~8 组仿真方案得到的截齿温度场云图,可以看出在 5 m/min 时截齿齿体出现温度集中点,这说明齿体与一部分崩落的煤岩碎屑发生了接触,导致摩擦生热。在截割煤岩过程中,随着牵引速度变大截齿温度场的高温区域 ($\geq 50^\circ\text{C}$) 分布面积会增加。截齿温度场的分布面积增加是由于截深增加造成摩擦面积增加,且

相同时间内热传导范围增加,从而截齿温度场的分布面积增加。

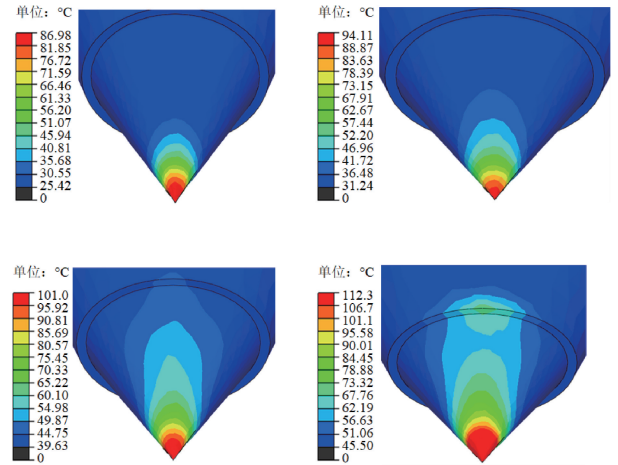


图 8 不同牵引速度截齿仿真温度

Fig. 8 Simulated temperature cloud maps of different traction speed picks

图 9 为不同牵引速度下截齿齿尖节点温度-时间变化曲线。由图 9 可知,最高温度随牵引速度增大而增加;牵引速度越快,温度曲线斜率越大,说明齿尖温度升温越快。截齿温度升高的原因为:牵引速度的增加使得截割过程中截割深度增加,从而摩擦面积增大导致摩擦做功增加,使截齿温度升高。牵引速度 2、3、4、5 m/min 条件下达到的最高温度分别为 86.98℃、94.11℃、101.04℃、112.27℃。

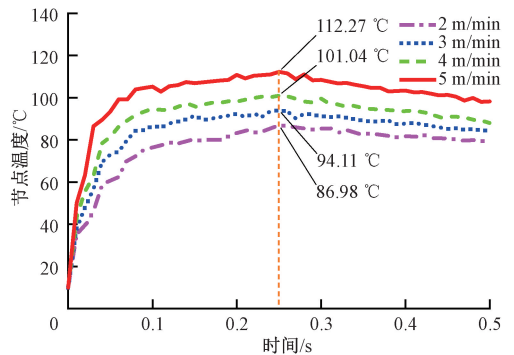


图 9 不同牵引速度截齿仿真温度变化曲线

Fig. 9 Simulated temperature variation curves of different traction speed picks

3) 煤岩坚固性系数对截齿温度场影响

图 10 为第 9~11 组仿真方案得到的截齿温度场云图,可以看出高温区域面积 ($\geq 50^\circ\text{C}$) 相差不大。图 11 为不同煤岩坚固性系数下截齿齿尖节点温度-时间变化曲线。由图 11 可知:煤岩坚固性系数越大,齿尖温度升温越快,煤岩坚固性系数 $f = 1、3、5$ 条件下达到最高温度分

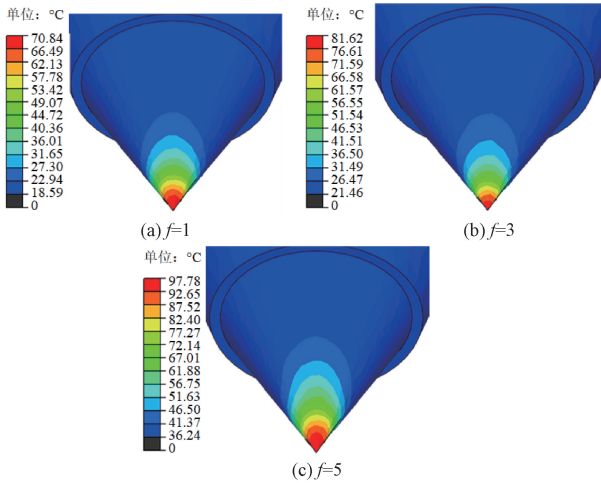


图 10 不同煤岩坚固性系数截齿仿真温度

Fig. 10 Simulated temperature cloud maps of different coal rock firmness coefficients by cutting teeth

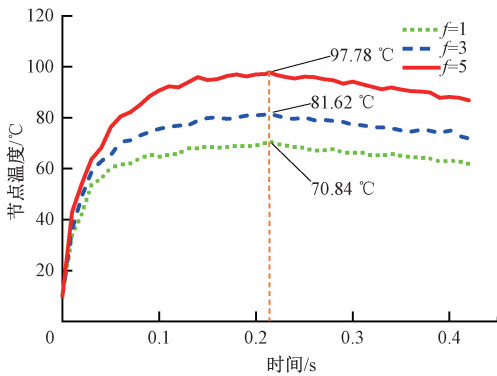


图 11 不同煤岩坚固性系数截齿仿真温度变化曲线

Fig. 11 Simulated temperature variation curves of different coal rock firmness coefficients of cutting teeth

别为 70.84℃、81.62℃、97.78℃。

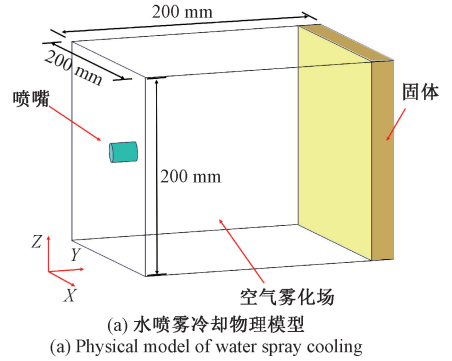
截齿温度场在相同时间内热传导范围相差不大, 从而截齿温度场的分布面积相似, 但煤岩硬度越大造成产热区热源密度越高, 使得云图整体温度越高。煤岩硬度越大其屈服强度与摩擦系数越大, 因此截齿克服阻力做功增加, 导致截齿最高温度升高。

3 喷雾条件下截齿温度场数值模拟

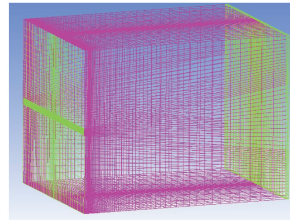
3.1 喷雾冷却模型建立

如图 12 所示为喷雾冷却系统固热耦合仿真模型。水喷雾冷却下的采煤机截齿割煤壁温度场变化过程比较复杂, 因此在不影响结果准确性的前提下, 对喷雾冷却过程模型进行适当简化。简化后所建立的几何仿真模型如图 12(a) 所示, 将截齿表面与煤壁表面简化为正方形平

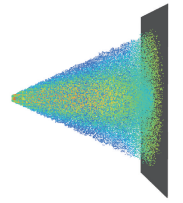
面, 整个模型包括固体热源、空气雾化场与喷嘴 3 个部分。计算域为 200 mm×200 mm×200 mm 的长方体区域; 左侧为喷嘴, 设置在中心轴, 喷嘴垂直喷射到固体热源表面; 右侧为边长 200 mm、厚 10 mm 的固体模拟热源, 用以模拟被水喷雾冷却的截齿与煤层材料, 其左侧面为待冷却面。



(a) Physical model of water spray cooling



(b) Grid partitioning



(c) Water spray particle trajectory

图 12 喷雾冷却系统流固热耦合仿真模型

Fig. 12 Fluid solid thermal coupling simulation model of spray cooling system

利用软件对几何模型进行网格划分, 处理完成后结果如图 12(b) 所示。根据水喷雾分布特点对空气雾化场网格进行优化, 在喷嘴出口及流固耦合的待冷却表面附近进行局部网格加密, 以确保网格质量并获得更好的计算精度。仿真模型的水喷雾液滴轨迹如图 12(c) 所示, 可以看到水雾呈实心锥状, 一部分液滴在固体表面聚集形成液膜, 一部分碰撞到固体表面反弹飞溅出边界。

3.2 喷雾冷却对流换热仿真结果分析

以第 1 组截齿与煤岩得到的仿真最高温度为例, 对截齿合金头和煤岩两种材料分别进行水喷雾冷却过程流体仿真, 计算收敛后得出水喷雾冷却材料表面的对流换热系数分布情况。

图 13 和 14 分别表示不同喷雾压力下截齿合金头与煤岩材料表面的对流换热系数云图。从图中可以看出, 随着喷雾压力的提升, 截齿和煤岩表面的对流换热系数呈现出上升趋势。随着压力的进一步增加, 换热系数提升的速度开始减缓。这一现象的原因在于, 提高喷雾压力会导致喷射速度的增加, 而随着速度的提高, 其热量交换效率会逐渐降低。

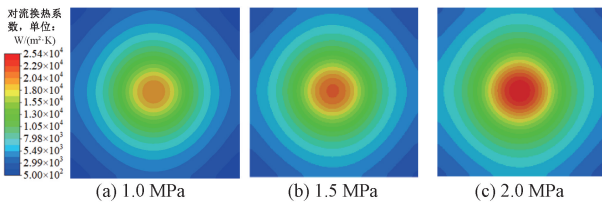


图 13 截齿合金头材料仿真对流换热系数

Fig. 13 Cloud diagram of simulated convective heat transfer coefficient for cutting tooth alloy head material

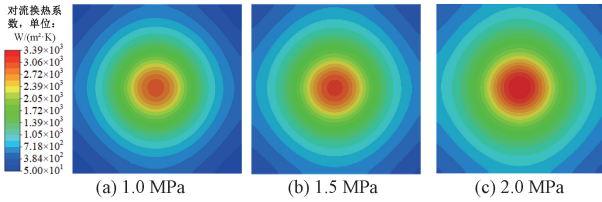


图 14 煤岩材料仿真对流换热系数

Fig. 14 Cloud map of simulated convective heat transfer coefficient for coal rock materials

在远离表面中心处,对流传热系数数值较小。截齿合金头材料表面中心在喷雾压力 1.0、1.5、2 MPa 条件下的对流换热系数达到最大值,分别为 20 240、22 870、25 420 W/(m²·K)。煤岩材料表面中心在喷雾压力 1.0、1.5、2.0 MPa 条件下的对流换热系数达到最大值,分别为 2 973、3 150、3 390 W/(m²·K)。

3.3 喷雾冷却对流传热理论计算结果分析

根据 1.4 节水喷雾冷却的对流传热系数计算公式,计算出截齿和煤岩表面对流传热系数的理论取值范围。表 4 给出了水喷雾冷却时各喷雾压力下截齿合金头及煤岩材料在喷雾中心处的对流传热系数理论计算值。

表 4 对流传热系数理论值

Table 4 Theoretical values of convective heat transfer coefficient

序号	喷雾压力/ MPa	$h_{\text{截齿}} /$ (W·(m ² ·K) ⁻¹)	$h_{\text{煤岩}} /$ (W·(m ² ·K) ⁻¹)
1	1.0	19 773	2 862
2	1.5	21 339	2 973
3	2.0	23 624	3 126

图 15 为对流传热系数的理论计算值和仿真值随喷雾压力变化曲线。该图显示出对流传热系数的计算值与仿真值有相似的变化趋势,喷雾压力越大,对流传热系数数值越大。每组仿真值都大于理论值,最大误差分别为 7.1% 与 7.8%,误差在较小范围内,可以认为结果具有一定可靠性。

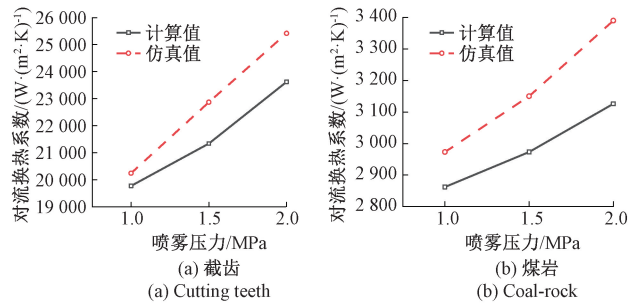
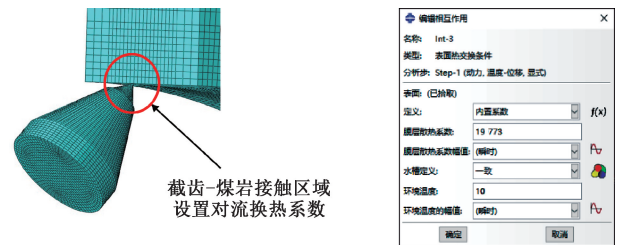


图 15 对流传热系数理论/仿真值对比

Fig. 15 Comparison of theoretical/simulation values for convective heat transfer coefficient

3.4 喷雾条件下截割过程仿真设置

图 16(a) 显示了水喷雾冷却下单截齿旋转截割全尺寸煤岩模型设置的细节,相较于常规条件重新设置了该模型中的热边界条件,主要模拟水喷雾对截割过程中截齿温度的影响。为了模拟水喷雾下截齿旋转截割煤岩过程中截齿的温度情况,将截齿未参加切削区域以及煤岩材料的非截割部分的温度设置为 10℃,并设置对流传热系数为空气自然对流的流传热系数。将截割区域的截齿与煤岩接触区域设置局部对流传热系数,进而模拟水喷雾冷却效果,该区域内的局部对流传热系数采用 3.2 节计算结果,软件设置界面如图 16(b) 所示。



(a) 喷雾冷却对流传热区域 (b) 对流传热系数设置

图 16 对流传热系数设置

Fig. 16 Convection heat transfer coefficient settings

3.5 喷雾条件下截齿温度仿真结果

表 5 给出了不同喷雾压力下的截齿温度仿真结果,其中每组工况与表 3 中相同组号的仿真参数一致。选取表 5 中第 1~4 组喷雾冷却后的截齿温度仿真结果与常规条件下进行对比,如图 17 所示。

可以看出,截齿温度在水喷雾条件下与常规条件下有着相同的变化趋势,水喷雾系统能够有效降低截齿温度 20% 以上,且喷雾压力越大,降温效果越明显;同时,可以减缓截齿材料失效导致表面出现磨损的过程,从而提高截齿工作使用寿命,保证采掘装备的工作效率。因此,在实际生产工况的允许范围内,需要尽量提高喷雾压力,

表5 不同喷雾压力下截齿最高温度仿真结果

Table 5 Simulation results of the maximum tooth temperature of pick under different spray condition

组号	1.0 MPa	1.5 MPa	2.0 MPa
1	64.62	59.34	55.10
2	69.41	61.42	55.61
3	72.12	64.23	58.72
4	76.46	68.12	59.52
5	67.92	58.17	53.46
6	73.91	66.72	58.30
7	78.41	69.22	62.33
8	85.44	73.24	68.90
9	54.69	50.01	45.72
10	62.96	58.39	53.70
11	76.43	66.23	56.85

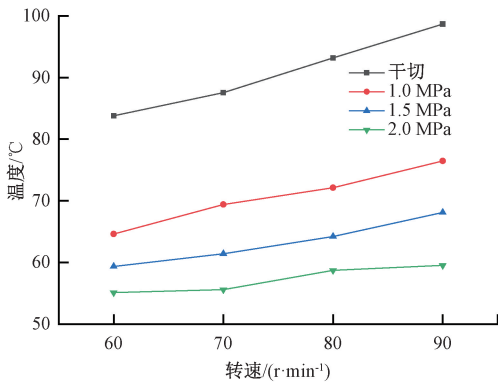


图17 喷雾条件下截齿仿真温度对比

Fig. 17 Comparison of simulated temperature of pick under spray condition

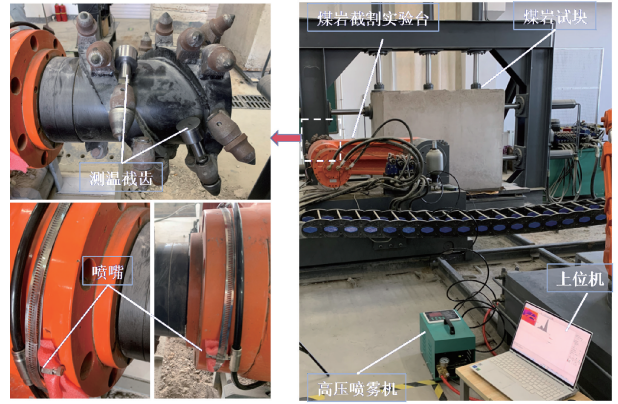


图18 滚筒截割煤岩温度采集实验台

Fig. 18 Drum cutting coal and rock temperature collection experimental platform

小。基于相似原理,获取的实验数据与实际情况会有一定差异性,但实验数据的变化规律可以全面反映采掘装备截齿温度场的实际分布情况。因此,基于上述实验台,可以进一步探讨不同工况下截齿温度场的变化规律,并验证截齿温度场理论模型与仿真分析的正确性与合理性。煤岩截割实验台与原型参数的比例系数如表6所示。

表6 煤岩截割实验台比例系数

Table 6 Proportional coefficient of coal-rock cutting experimental device

参数	单位	原型	比例模型
滚筒直径	mm	D	$D/2$
滚筒转速	r/min	n	$1.2n$
牵引速度	m/min	v	$0.6v$

将水泥、沙子、煤粉按照不同比例混合,充分搅拌均匀后浇注成尺寸1 500 mm×500 mm×1 000 mm的立方体,制备成坚固性系数 f 分别为1、3、5的煤岩试块。水喷雾系统采用的高压喷雾机额定压力为1~5 MPa,能够提供足够的压力和流量,产生稳定持续的喷雾源。雾化喷嘴选用压力式实心锥喷嘴,其喷雾角度为56~63°,喷口直径为0.8 mm。

4.2 截齿温度采集系统设计

由于截齿随滚筒旋转,截齿的温度数据通过有线方式传输具有一定困难性,为此,设计了存储式测温截齿系统,其原理如图19所示。热电阻采集温度信号,然后模数转换芯片将温度模拟信号转化为数字信号,传输进单片机进行温度信号处理与暂时存储,最后上位机与单片机串口通信对存储的温度数据进行读取。

对截割区域覆盖水喷雾,从而优化截齿的工作状态。

4 实验研究

4.1 实验台搭建

本文搭建的滚筒截割煤岩温度采集实验台如图18所示,主要由煤岩截割系统、截齿温度采集系统、水喷雾系统组成。其中,煤岩截割系统包括MG2×55/250-BWD型采煤机比例实验台和模拟煤岩试块等;截齿温度采集系统包括测温截齿、温度采集板和上位机等;水喷雾系统包括实心锥喷嘴和高压喷雾机等。

煤岩截割实验台以MG2×55/250-BWD型薄煤层采煤机为原型设计搭建,其尺寸参数按照相似原则进行缩

截齿温度选用铠装 PT100 热电阻进行测量,测温范围为 $-100^{\circ}\text{C} \sim +300^{\circ}\text{C}$,温度精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。存储式测温系统 PCB 电路板如图 20 所示,正面主要布置单片机、电源、串口通信相关元件,背面主要布置模数转换相关元件。存储式测温截齿结构包括截齿本身及电路板安装盒两部分。由于截齿齿柄直径较小,不能满足安装测温系统的需求,因此设计了电路板安装盒用于放置电路板与电池。测温截齿整体安装示意图如图 20 所示。

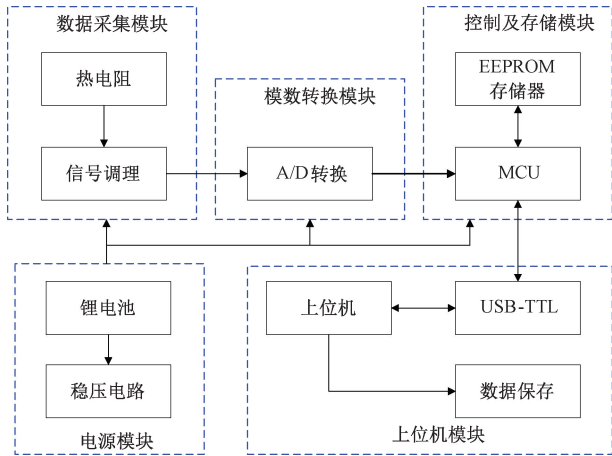


图 19 存储式测温截齿系统原理

Fig. 19 Schematic diagram of storage type temperature measurement and cutting gear system

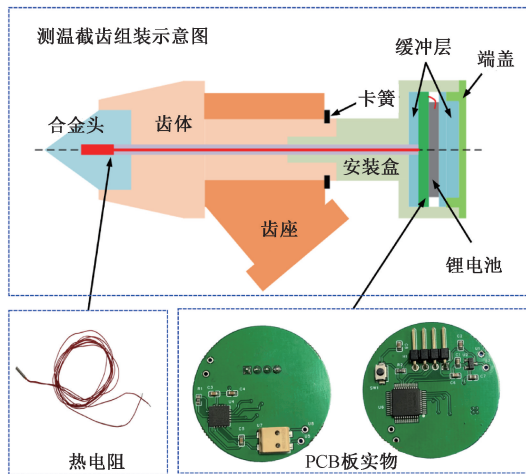


图 20 存储式测温截齿结构

Fig. 20 Structural diagram of storage type temperature measurement pick

4.3 实验方案

采用控制单因素变量法来分析不同工况参数对截齿温度场的影响,此外还增加有无水喷雾系统来分析水喷雾对截齿温度场的影响。具体实验方案参数如表 7 所

示,实验台设置的截割参数是根据表 6 中的比例系数将表 2 的仿真参数进行换算得来。环境温度为 10.3°C ,每组实验都需要将设备冷却至室温后进行。其中第 1~11 组为常规条件下的煤岩截割实验,第 12~14 组为喷雾条件下的煤岩截割实验,实验场景如图 21 所示。

表 7 实验方案

Table 7 Experimental schemes

实验组号	滚筒转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	牵引速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	煤岩坚固性 系数 f	喷雾压力/ MPa
1~4	72, 84, 96, 108	2.4	3	0
5~8	72	1.2, 1.8, 2.4, 3.0	5	0
9~11	84	1.8	1,3,5	0
12~14	72	2.4	3	1.0, 1.5, 2.0

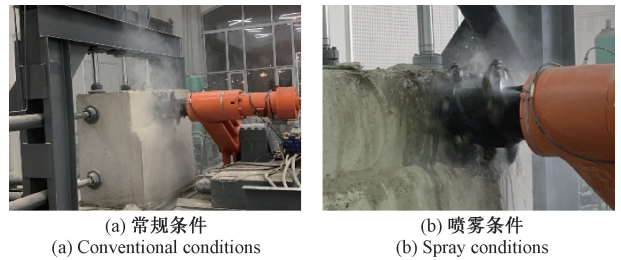
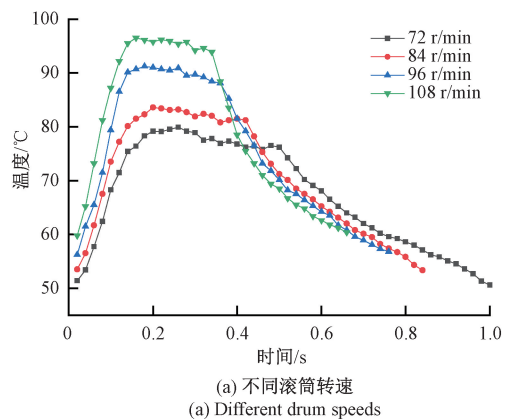


图 21 实验场景

Fig. 21 Experimental scenario

4.4 实验结果分析

当煤岩截割完成后,将测温截齿中的温度采集电路板拆下,读取存储系统保存的截齿温度数据。当截割达到稳定状态后,热电阻在某一截割周期内的实时测量结果如图 22 和 23 所示。图中曲线描述了截齿温度在一个截割周期内的温度变化情况,根据温度曲线变化特点可以分为升温阶段、稳态阶段及冷却阶段。



(a) 不同滚筒转速
(a) Different drum speeds

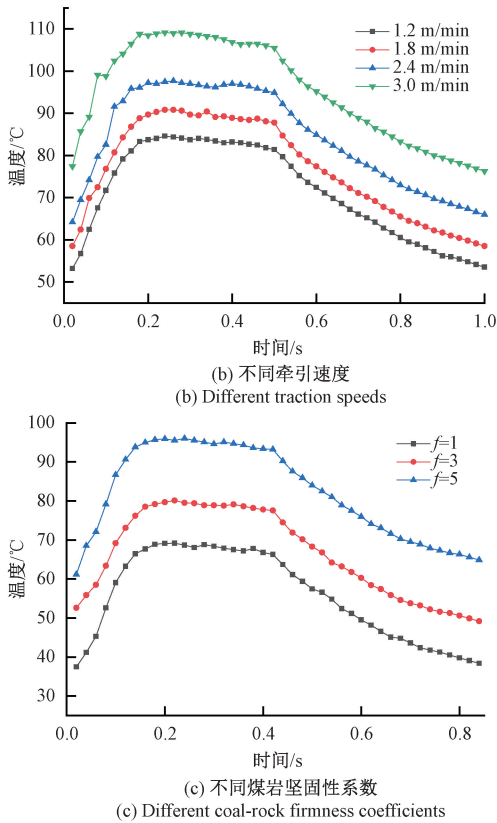


图22 常规条件下截齿实验温度变化曲线

Fig. 22 Temperature variation curves of tooth cutting experiment under conventional conditions

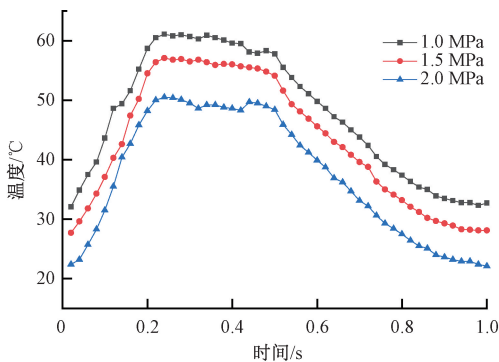


图23 不同喷雾压力截齿实验温度变化曲线

Fig. 23 Temperature variation curves of different spray pressure pick experiment

一个截割周期以截齿接触煤岩开始截割作为起点,旋转 360° 后为终点。在截割周期开始,齿尖温度由上一截割周期的冷却阶段进入迅速升温阶段;温度上升到一定程度后进入稳态阶段,这一阶段一直持续到截齿脱离煤岩;截齿脱离煤岩直到下一次接触煤岩期间为冷却阶段,这一阶段截齿温度稳定下降。整个齿尖温度变化过程与仿真结果具有相同的变化趋势。此外在温度处于稳

态阶段时,温度达到最高温度后会小幅度下降,这种现象也与仿真结果相符。

1) 常规条件截齿实验温度

从图22(a)可以看出,该截割周期内不同滚筒转速下载齿齿尖温度进入各阶段的时间点不同。滚筒转速越大,曲线整体温度越高,进入各阶段时间越快。随着滚筒转速由 72 r/min 增加到 108 r/min ,截齿实验温度由 79.8°C 上升到 96.7°C 。从图22(b)可以看出,牵引速度越大,曲线整体温度越高。随着牵引速度由 1.2 m/min 增加到 3.0 m/min ,截齿实验温度由 84.8°C 上升到 108.9°C 。从图22(c)可以看出,煤岩坚固性系数越大,曲线整体温度越高。随着煤岩坚固性系数由 $f=1$ 增加到 $f=5$,截齿实验温度由 67.7°C 上升到 95.2°C 。

2) 喷雾条件截齿实验温度

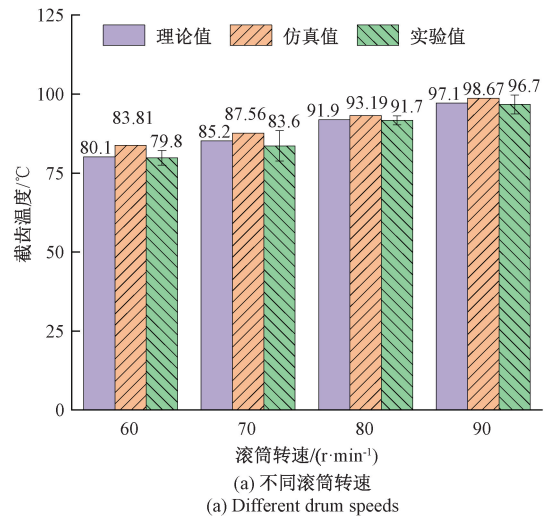
在常规条件基础上增加不同压力的水喷雾,得到截齿实验温度。从图23可以看出,随着喷雾压力由 1.0 MPa 增加到 2.0 MPa ,截齿温度由 62.1°C 降低到 52.0°C 。相较于常规条件,喷雾压力增加 1.0 MPa ,截齿齿尖温度降低 22.18% ;喷雾压力增加 1.5 MPa ,截齿齿尖温度降低 28.82% ;增加 2.0 MPa 压力的喷雾,截齿齿尖温度降低 34.84% ,降温效果明显。

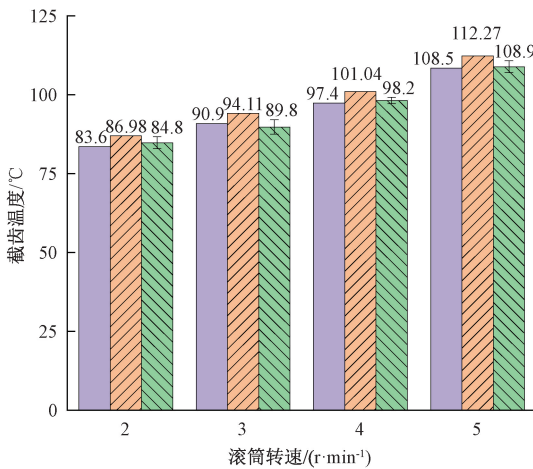
4.5 模型验证及分析

1) 常规条件

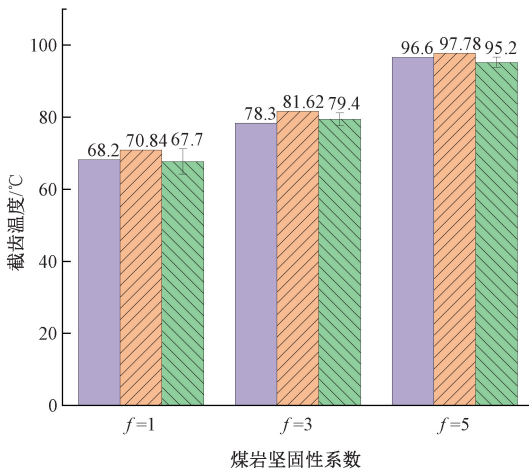
根据建立的常规条件下截齿温度场理论模型计算出各条件下的理论温度值,并与对应的仿真值、实验值对比,结果如图24所示。

截齿实验温度总体略小于理论与仿真温度,这是因为测温截齿内部的热电阻距离齿尖表面有 5 mm 距离,热量由齿尖表面传递到热电阻会有一些的热损失。截齿理论温度与实验温度最大误差为 1.9% ,截齿仿真温度与实验温度最大误差为 4.7% 。结果说明建立的常规条件下截齿温度场理论模型与仿真模型具有一定正确性。





(b) 不同牵引速度
(b) Different traction speeds



(c) 不同煤岩坚固性系数
(c) Different coal-rock firmness coefficients

图 24 常规条件下截齿理论/仿真/实验温度对比

Fig. 24 Comparison of theoretical/simulation/experimental temperatures for cutting under conventional conditions

2) 喷雾条件

喷雾条件下,截齿理论、仿真温度与实验结果的对比如图 25 所示。通过对比分析,得到不同喷雾压力下截齿仿真、截齿理论温度与实验温度的最大误差分别为 6% 和 4.6%,可以证明对流换热理论与仿真模型的正确性。误差原因为对水喷雾冷却模型进行了简化,造成实际截割过程中的对流换热系数与模型值存在一定差异。

5 结 论

1) 分析了采煤机截齿截割煤岩过程中截齿与煤岩相互作用几何干涉关系,考虑了水喷雾冷却对截齿表明对流换热系数影响,基于热源法建立了煤层截割过程中截齿温度场理论计算模型。

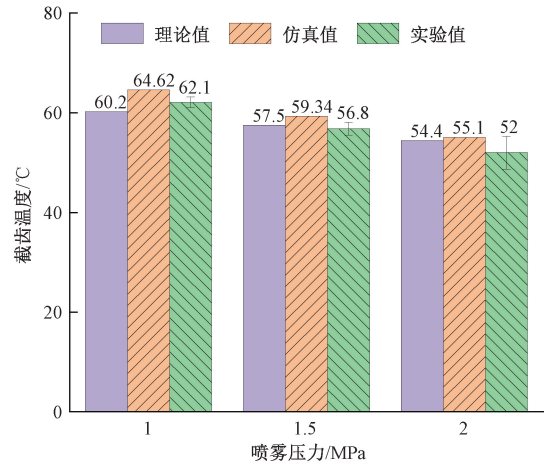


图 25 喷雾条件下截齿理论/仿真/实验温度对比

Fig. 25 Comparison of theoretical/simulation/experimental temperatures of pick under spray conditions

2) 建立了单个截齿旋转截割煤岩有限元模型,分析了不同截割参数和煤岩类型下截齿温度场特征与演化规律,仿真结果表明:滚筒转速、牵引速度、煤岩坚固性系数与截齿温度场最高温度呈正相关,且煤岩坚固性系数从 1 增加到 5,最高温度从 70.84℃ 增加至 97.78℃。

3) 基于 Fluent 软件建立了采煤机喷雾系统水喷雾冷却的简化模型,得到了截齿合金头材料表面的仿真对流换热系数分布云图,结果表明:表面喷雾中心位置对流换热系数最高,水喷雾压力与表面对流换热系数呈正相关性,水喷雾冷却系统可有效降低截齿温度 20% 以上。

4) 搭建了滚筒截割煤岩温度采集实验台,研制了截齿温度采集系统,验证实验结果表明:常规和喷雾条件下截齿理论模型计算温度、有限元仿真模型仿真温度与实验测量温度的误差均小于 6%,验证了截齿温度场理论模型与仿真模型的正确性与合理性。研究成果为建立基于温度场特征的煤岩性状识别方法提供重要参考价值。

参考文献

- [1] 李嘉豪,司全,王忠宾,等. 综放工作面煤矸识别技术及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1):1-15.
LI J H, SI L, WANG ZH B, et al. Coal gangue identification technology and its application in fully-mechanized coal mining face [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1):1-15.
- [2] 司全,谭超,朱嘉皓,等. 基于 X 射线图像和激光点云的煤矸识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9):193-205.
SI L, TAN CH, ZHU J H, et al. A coal-gangue recognition method based on X-ray image and laser point cloud [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9):193-205.

- [3] 李金乐,李珊,杨晓京,等. 单晶锗微切削温度场建模及实验分析[J]. 工程科学学报, 2020, 42(11):1499-1506.
- LI J L, LI SH, YANG X J, et al. Modeling and experimental analysis of micro-cutting temperature on single crystal germanium[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(11):1499-1506.
- [4] 肖强,王伏林,胡仲勋,等. 考虑切削参数和温度影响的ZM5镁合金刀-屑摩擦模型研究[J]. 工具技术, 2024, 58(8):113-117.
- XIAO Q, WANG F L, HU ZH X, et al. Study on friction model of ZM5 magnesium alloy chips considering influence of cutting data and temperature[J]. Tool Engineering, 2024, 58(8):113-117.
- [5] 王贵林,于爱兵,王家炜,等. 铲钻倒棱刃口几何参数对钻削温度的影响[J]. 工具技术, 2024, 58(7):41-46.
- WANG G L, YU AI B, WANG J W. Influence of geometric parameters of chamfered edge of spade drill on drilling temperature[J]. Tool Engineering, 2024, 58(7):41-46.
- [6] JIAO L, WANG X B, QIAN Y B, et al. Modelling and analysis for the temperature field of the machined surface in the face milling of aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81:1797-1808.
- [7] 岳玉霞,王秀山,李利军. 五轴数控机床的误差实时补偿控制器[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13):145-149.
- HE Y X, WANG X SH, LI L J. Real time error compensation controller for five axis CNC machine tools[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13):145-149.
- [8] 岳彩旭,都建标,刘献礼,等. 考虑时变性热强度和时变性热量分配比的铣刀前刀面瞬态温度场建模研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9):206-216.
- YUE C X, DU J B, LIU X L, et al. Modeling research on transient temperature field of rake face on end mills considering time-varying heat intensity and time-varying distribution ratio[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9):206-216.
- [9] DENG L CH, LI X ZH, CHEN Y W, et al. Investigations on cutting force and temperature field of pick cutter based on single factor and orthogonal test methods[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(1):619-645.
- [10] 张德义,刘送永,贾新庆,等. 基于红外热像的夹研巷道断面记忆截割试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10):3377-3385.
- ZHANG D Y, LIU S Y, JIA X Q, et al. Experimental study on memory cutting of roadway cross-section containing gangue based on infrared thermography[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10):3377-3385.
- [11] 庞国辉,王义亮. 镐形截齿截岩过程的温度场研究[J]. 煤矿机械, 2020, 41(6):29-32.
- PANG G H, WANG Y L. Research on temperature fields of conical pick cutting rock[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(6):29-32.
- [12] SHAO W, LI X SH, SUN Y, et al. An experimental study of temperature at the tip of point-attack pick during rock cutting process[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107:39-47.
- [13] 张强,王海舰,郭桐,等. 基于截齿截割红外热像的采煤机煤岩界面识别研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5):22-27.
- ZHANG Q, WANG H J, GUO T, et al. Study on coal-rock interface recognition of coal shearer based on, infrared thermal image of picks cutting[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5):22-27.
- [14] 张强,王海舰,王兆,等. 基于红外热像检测的截齿煤岩截割特性与闪温分析[J]. 传感技术学报, 2016, 29(5):686-692.
- ZHANG Q, WANG H J, WANG ZH, et al. Analysis of coal-rock's cutting characteristics and flash temperature for peak based on infrared thermal image testing[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(5):686-692.
- [15] SUN Y, LI X S, HARBERS C, et al. Wear and cutting temperature of thermally stable diamond composite tipped pick in hard rock cutting[J]. Wear, 2023, 523:204848.
- [16] DEWANGAN S, JOMY A P, NETHRAN G A, ASHWIN N G. Modelling and simulation of stress generation and temperature distribution in conical picks during linear coal-cutting process[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62:1458-1464.
- [17] LIU S F, LU SH F, WAN ZH J, et al. Development and application of a new temperature-measuring pick[J]. Measurement, 2020, 149:107034.
- [18] WANG Y Q, LIU J X, LIU K, et al. Modeling of temperature distribution in turning of Ti-6Al-4V with liquid nitrogen cooling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1/2):451-462.
- [19] 陈斯睿,孙兴伟,杨赫然,等. 基于改进支持向量机的

砂带磨损程度识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2):10-18.

CHEN S R, SUN X W, YANG H R, et al. Abrasion degree recognition of abrasive belt based on improved support vector machine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2):10-18.

[20] 何坤, 陈勇全, 李国龙, 等. 面齿轮蜗杆砂轮的成形修整工艺误差建模及补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10):38-47.

HE K, CHEN Y Q, LI G L, et al. A modeling and compensation method for forming dressing errors of the worm wheel for face gear grinding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10):38-47.

[21] 辛明泽, 孙兴伟, 张维锋, 等. 螺杆转子盘铣刀铣削表面粗糙度预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12):204-212.

XIN M Z, SUN X W, ZHANG W F, et al. Prediction of surface roughness of screw rotor disc milling cutter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12):204-212.

[22] 崔佳嘉, 马宏忠, 李楠, 等. 基于 COMSOL 的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4):48-55.

CUI J J, MA H ZH, LI N, et al. Simulation and analysis of vibration and noise of oil immersed transformer core based on COMSOL[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4):48-55.

作者简介



司垒, 2010 年于中国矿业大学获得学士学位, 2015 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为矿山装备智能化、特种环境机器人。

E-mail: lei. si@cumt. edu. cn

Si Lei received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from China University of Mining and Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at China University of Mining and Technology. His main research interests include the intellectualization of coal mine electromechanical equipment and special environment robots.



王忠宾, 1995 年于中国矿业大学获得学士学位, 1998 年于中国矿业大学获得硕士学位, 2002 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为中国矿业大学副校长、教授, 主要研究方向为矿山装备智能化、特种环境机器人。

E-mail: wangzbpaper@126. com

Wang Zhongbin received his B. Sc. and M. Sc. degrees both

from China University of Mining and Technology in 1995 and 1998, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2002. He is currently a professor and the vice president at China University of Mining and Technology. His main research interests include the intellectualization of coal mine electromechanical equipment and special environment robots.



戴剑博(通信作者), 2013 年于湖北汽车工业学院获得学士学位, 2020 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为中国矿业大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为煤矿高效智能开采技术与装备、智能矿山机器人。

E-mail: jianbodai@126. com

Dai Jianbo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hubei University of Automotive Industry in 2013, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2020. He is currently a lecturer and a master advisor at China University of Mining and Technology. His main research interests include efficient intelligent mining technology and equipment and intelligent mining robot.



魏东, 2015 年于东北大学获得学士学位, 2021 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为特种环境机器人。

E-mail: weidongmeee@cumt. edu. cn

Wei Dong received his B. Sc. degree from Northeastern University in 2015, and received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2021. He is currently a lecturer and a master advisor at China University of Mining and Technology. His main research interest is special environment robot.



顾进恒, 2012 年于中国矿业大学获得学士学位, 2015 年于中国矿业大学获得硕士学位, 2021 年于中国农业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学准聘副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能传感与智能控制技术。

E-mail: gujinheng@126. com

Gu Jinheng received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from China University of Mining and Technology in 2012 and 2015, and received his Ph. D. degree from China Agricultural University in 2021. He is currently a prospective associate professor and a master advisor at China University of Mining and Technology. His main research interests include intelligent sensing and control technology.