

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.01.009

采用射流冷却的撕碎机刀具热特性仿真分析*

顾振业¹, 顾书豪¹, 夏 鹏¹, 钱鹏飞^{1*}, 林 蒙², 谢方伟¹

(1. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 张家港市新贝机械有限公司, 江苏 张家港 215600)

摘要:针对撕碎机刀具长时间工作后因温度过高而导致其使用寿命下降的问题,将射流冷却技术应用到了撕碎机刀具中,通过冷却介质冲击撕碎机刀具表面进行了强制对流换热,从而降低了刀具温度。提出了一种新型撕碎机刀具结构,并基于该结构建立了在空气和水两种不同射流介质下的三维冷却模型;利用 Fluent 软件,选择合理的计算区域和边界条件,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,分析了不同冷却方式对撕碎机刀具热特性的影响。研究表明:该冷却系统采用水射流冷却能有效控制刀具温升,改善刀具温度的不均匀性;不同射流口压力下刀具的热特性仿真研究,可指导实际撕碎机刀具冷却系统参数的选取。

关键词:撕碎机刀具;射流冷却;数值模拟;热特性

中图分类号:TH122;TG729;TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)01-0049-05

Simulation analysis of thermal characteristics of shredder tool with jet cooling

GU Zhen-ye¹, GU Shu-hao¹, XIA Peng¹, QIAN Peng-fei¹, LIN Meng², XIE Fang-wei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Xinbei Machinery Co., Ltd., Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: Aiming at the problem that the service life of the shredder tool decreased due to the high temperature after working for a long time, the jet cooling technology was applied to the shredder tool, the shredder tool was impacted with cooling medium and its temperature was reduced by forced convection heat transfer. A three-dimensional cooling model under two different jet media, air and water, were established based on a new shredder tool structure, the influence of different cooling methods on the thermal characteristics of the shredder tool was analyzed by selecting the reasonable calculation area, boundary conditions and the standard $k-\varepsilon$ turbulence model with Fluent software. The results show that the cooling system can control the temperature rise of the tool effectively and improve the non-uniformity of the tool temperature, with water jet cooling. The simulation of the thermal characteristics of the tool under different pressure can guide the selection of the parameters of the actual shredder tool cooling system.

Key words: shredder tool; jet cooling; numerical simulation; thermal characteristics

0 引 言

撕碎机又被称为滚切式撕碎机,主要由刀片主轴、定刀、承载箱体、箱体支架、进料系统、推料系统以及电

器控制系统组成,常用于撕碎木材、橡胶、塑料及废弃管材等废弃物料^[1]。撕碎机在工作过程中,由于刀具不断撕扯物料,二者摩擦产生的热量会导致撕碎仓内温度逐步升高,此时刀具若继续在高温条件下工作,其

收稿日期:2019-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605194);流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-201819);张家港市产学研预研项目(2018-13)

作者简介:顾振业(1995-),男,江苏南通人,硕士研究生,主要从事流体传动与控制方面的研究。E-mail:852253995@qq.com

通信联系人:钱鹏飞,男,副教授,硕士生导师。E-mail: pengfei.qian@ujs.edu.cn

金属表面将会发生剧烈的氧化作用,从而导致刀具的机械性能和撕碎机仓内零件的几何尺寸受到影响,甚至还会烧坏撕碎仓内零件表面。尤其在夏季,工人们往往不得不停机等待或往撕碎仓中浇注冷水,待撕碎机冷却一段时间后,方才继续使用,这严重降低了撕碎机的工作效率。所以撕碎机在工作过程中,刀具温度的高低成为影响其工作稳定性和使用寿命的重要指标^[2]。

目前,人们通过有限元分析技术在降低刀具切削温度方面做了大量工作。文怀兴等^[3]通过 Advant-Edge 软件分析了常规冷却和高压冷却不同车削方式下对刀具温度的影响,结果表明高压冷却不仅可以显著降低刀具切削刃的温度,而且还可以减少刀具磨损;李天箭等^[4]提出了一种将结构拓扑优化设计与热流固耦合设计这两种设计分析方法相结合进行内冷车刀复合设计的方法,从仿真结果来看,与传统内冷刀具相比,在相同冷却流量下,刀具结构的整体刚度提高,在热变形减少的同时,刀具最高温度有所降低;杜劲等^[5]基于 Fluent 软件得出了涂层刀具在切削 H13 淬硬模具钢时涂层材料对刀—屑接触面传热的影响规律,研究发现了较厚的刀具涂层能够有效降低刀具体内温度,而且减小刀—屑实际接触面积有利于降低刀具整体温度。

为保证撕碎机长时间在高温环境下稳定工作,本文提出一种采用射流冲击的撕碎机刀具冷却结构,建立撕碎机刀具射流冷却模型,基于 Fluent 软件对仿真结果进行初步分析^[6]。

1 新型撕碎机刀具结构

本文以一种双轴卧式撕碎机为研究对象,如图 1 所示。

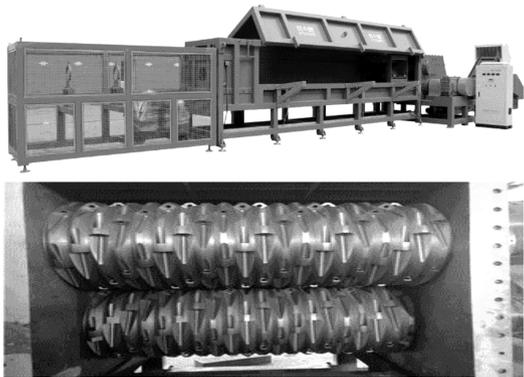


图 1 一种双轴卧式撕碎机

本研究所设计的新型撕碎机刀具冷却结构示意图如图 2 所示。

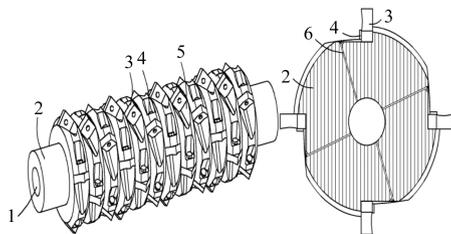


图 2 新型撕碎机刀具冷却结构示意图

1—冷却孔;2—刀具主轴;3—刀具;4—螺栓;5—刀盘;6—射流孔

该结构原理为:撕碎机刀具通过螺栓固定在刀具主轴的刀盘上,冷却流体(空气或水)经刀具主轴上的射流孔喷射到刀具表面,利用空气或水流的强制对流换热来降低刀具温度,从而提高刀具使用寿命,保证撕碎机能够长时间在高温环境下稳定工作。

2 撕碎机刀具射流冷却模型

2.1 物理模型

撕碎机刀具的射流冷却模型如图 3 所示。

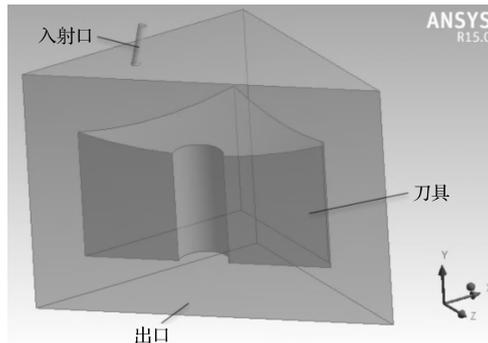


图 3 撕碎机刀具的射流冷却模型

其中,射流介质分别为空气或水,射流方向沿 y 轴负方向,刀具厚度 70 mm,射流距离 45 mm,出口区域为刀具四周。

为了简化模型,作如下假设:(1)射流口形状为圆孔型,直径 5 mm,与其他形状的射流口相比,圆孔型射流孔具有结构简单、易于加工等优点;(2)射流介质为不可压缩流体,同时忽略其粘度产生的热耗散;(3)由于该冷却方式为对称式射流冲击,同时降低仿真时间,取对称轴的一半作为计算区域;(4)被冲击刀具表面光滑。

2.2 控制方程

假设射流介质为不可压缩的定常流动,流体力学的基本控制方程如下^[7-9]:

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial(u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \Delta(\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \Delta(\mu \text{grad} \mu_x) + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \Delta(\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \Delta(\mu \text{grad} \mu_y) + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \Delta(\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \Delta(\mu \text{grad} \mu_z) + \rho f_z \quad (4)$$

(3) 能量守恒方程:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mu_x \frac{\partial T}{\partial x} + \mu_y \frac{\partial T}{\partial y} + \mu_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

式中: μ_x, μ_y, μ_z — x, y, z 三个方向上的速度分量, m/s; t —时间, s; ρ —密度, kg/m³; p —流体微元上的压强, Pa; f_x, f_y, f_z —3 个方向的单位质量力, m/s², 由于质量力只受重力影响, 沿 y 轴垂直向下, 故 $f_x = f_z = 0, f_y = -g$; μ —流体的动力粘度, Pa·s; C_p —比热容, J/(kg·K); T —热力学温度, K; λ —流体的导热系数, W/(m·K)。

此外, 为准确描述射流冲击的流场流动规律, 不论是空气射流还是水射流, 均采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 该模型的湍流能量输运方程和能量耗散输运方程分别为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (6)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (C_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: G_k —平均速度梯度引起的湍动能; G_b —由于浮力影响引起的湍动能; Y_M —可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; μ_t —湍流粘度; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ —默认值常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = 0.09$; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数, 默认值为 1.0 和 1.3。

另外, 对于水射流冷却模型, 为模拟水在空气中的射流冷却, 笔者在选择 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型和开启能量方程后, 选用 VOF 模型模拟水射流冷却, 并定义空气为基本相, 水为第二相^[10]。

2.3 边界条件

整个射流场的入口和出口均采用压力边界条件,

其中, 射流口压力为 0.1 MPa, 环境大气压为一个标准大气压, 出口相对压力为 0 Pa, 环境温度为 25 °C^[11-13]; 射流介质分别为空气和水, 撕碎机刀具材料为碳钢。

相关材料的物理性质具体如表 1 所示。

表 1 相关材料的物理性质

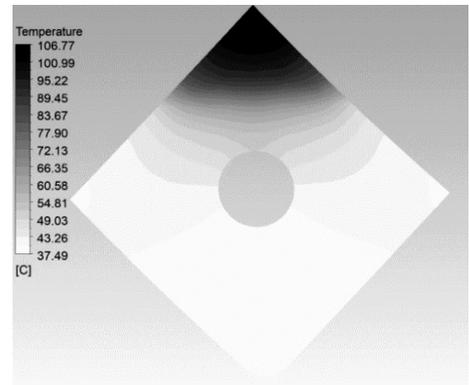
材料单位	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容 J/(kg·K)	导热系数 W/(m·K)
空气	1.225	1 006.43	0.024 2
水	998.2	4 182	0.6
碳钢	8 030	480	33

本文中的撕碎机主要用来切削 PVE 管材, 刀具主轴转速为 120 r/min, 通过金属切削仿真软件 Advant-Edge 进行刀具传热边界分析, 得到撕碎机刀具前端发热量为 10⁷ W/m³^[14]。

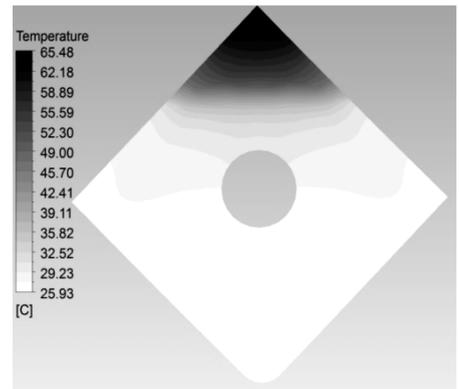
3 撕碎机刀具热特性分析

3.1 不同冷却方式对刀具冷却效果的影响

本文基于上文所建立的撕碎机刀具热流耦合分析模型, 在特定工况下对其进行有限元仿真计算, 得到不同射流介质下撕碎机刀具的温度云图, 如图 4 所示。



(a) 空气射流冷却



(b) 水射流冷却

图 4 不同射流介质下撕碎机刀具的温度云图

从图 4 中可以看出: 刀具在不同射流冷却方式下, 其冷却效果存在着显著差异。

为便于分析空气射流和水射流的冷却差异,本文选取撕碎机刀具表面作为刀具温度检测面,再根据仿真结果,提取出不同冷却方式下刀具表面上的温度数据,得到不同冷却方式下刀具表面温度分布,如图 5 所示。

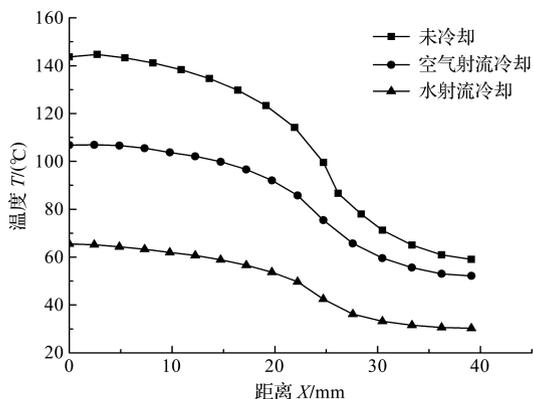


图 5 不同冷却方式下刀具表面温度分布
横坐标—表示离刀具表面刀尖至螺栓孔的距离

由于撕碎机刀具主要在前端面产生热量,在射流冷却模型中射流口指向刀具前端面,导致刀具前端面降温效果显著,而离前端面越远则降温效果越差。从图 5 可以看出:在未冷却前,撕碎机刀具表面最高温度位于刀具前端,最低温度位于刀具底部;在空气射流冷却模型中,与未冷却的撕碎机刀具相比,温度下降了 11% 到 26%;在水射流冷却模型中,同样与未冷却的撕碎机刀具相比,温度下降了 48% 到 55%。

此外,在研究不同冷却方式下刀具的冷却效果时,还需考虑刀具冷却时温度的不均匀性。因为刀具很可能由于热应力加剧而发生变形,进而影响刀具使用寿命。从图 5 可以看出各个曲线的平缓程度,结合具体数据:未射流冷却前刀具表面最大温差约为 83 °C,采用空气射流冷却方式后刀具表面最大温差为 54 °C 左右,而采用水射流冷却后刀具表面最大温差约为 35 °C。从仿真结果可知:撕碎机刀具在射流冷却后,刀具表面的温度不均匀性得到一定程度的改善,其中,采用水射流冷却的刀具表面的温度均匀性要好于空气射流冷却。

3.2 不同冷却方式对刀具热变形的影响

撕碎机刀具在工作过程中,刀具由于受到切削热的影响,温度升高而产生变形,从而导致刀具磨损,降低刀具使用寿命。因此,有必要分析该冷却模型以及不同冷却方式对刀具热变形的影响。

基于上文所建立的撕碎机刀具射流冷却模型,本文通过 Workbench 软件进行热流固耦合分析,进一步研究不同冷却方式对撕碎机刀具热变形的影响。

由于刀具通过螺栓固定在刀具主轴上,本研究在

静力学模块中对刀具螺栓孔施加约束,得到撕碎机刀具在不同冷却方式下刀具的总热变形对比,如图 6 所示。

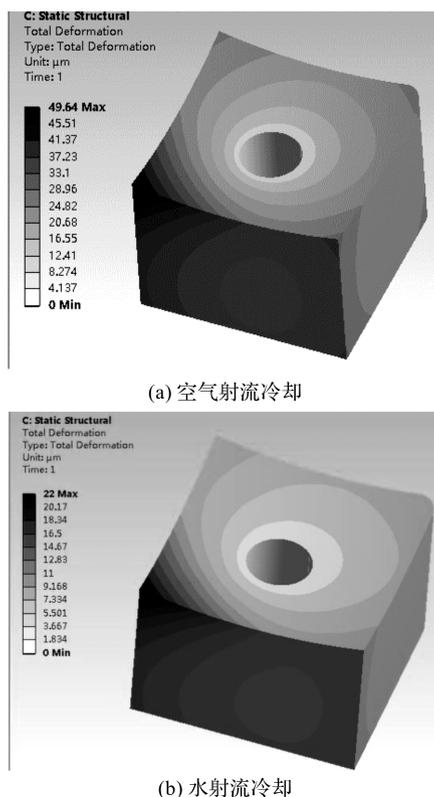


图 6 不同冷却方式下刀具的总热变形对比

由图 6 可以看出:刀具最大热变形发生在刀具前端,具体位于刀尖部位;在未冷却前,刀具最大热变形为 64.35 μm;在空气射流冷却后最大热变形下降为 49.64 μm,减少了 22.6%;在水射流冷却后最大热变形降至 22 μm,减少了 65.8%。由此可知:该冷却结构可使刀具最大热变形得到一定程度的改善,尤其是采用水射流冷却后的刀具最大热变形最小。

3.3 冷却参数对刀具热特性的影响

在本文中,撕碎机刀具温升和最大热变形的控制参数主要是射流口的压力,故采用有限元法研究射流口压力对刀具温升和最大热变形的影响。

当刀具主轴转速为 120 r/min(射流口直径 5 mm,射流介质 25 °C)时,在 5 组不同压力工况下(0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa 和 0.5 MPa),不同冷却方式下射流口压力与刀具温升的情况如图 7 所示。

不同冷却方式下射流口压力与刀具最大热变形的情况图 8 所示。

由图(7,8)可知:不管是空气射流冷却还是水射流冷却,刀具的温升和最大热变形都随着射流口压力的增加而下降且二者下降趋势基本一致。以空气射流冷却为例,射流口压力从 0.1 MPa 增至 0.2 MPa 后,刀

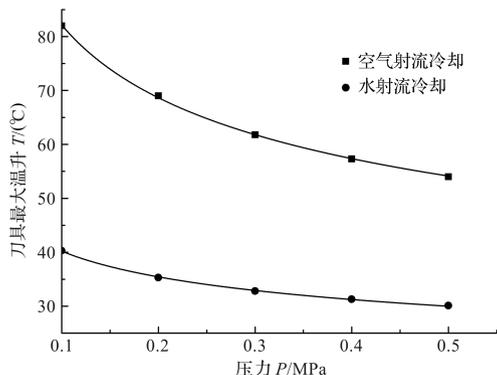


图7 不同冷却方式下射流口压力与刀具温升的情况

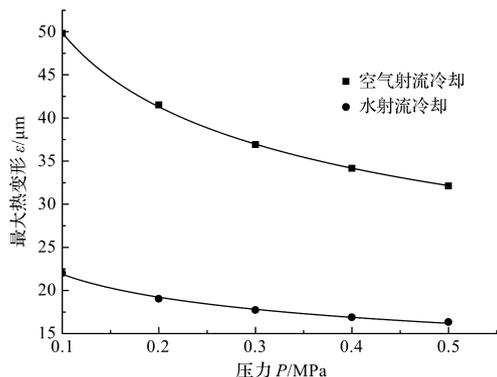


图8 不同冷却方式下射流口压力与刀具最大热变形的情况

具的温升降低了 13 °C,最大热变形降低了 8.3 μm;而射流口压力从 0.2 MPa 增至 0.5 MPa 过程中,刀具的温升只低了 15 °C,最大热变形仅降低了 9 μm。由此可见,射流口压力高于 0.2 MPa 后,继续提高压力对刀具温升和最大热变形的降低效果不显著。

4 结束语

针对撕碎机刀具长时间在高温下工作导致其使用寿命下降等问题,本文提出了一种采用射流冲击的撕碎机刀具冷却结构;为验证该冷却结构及不同射流介质对撕碎机刀具热特性的影响,本研究通过 Fluent 软件作了相应模拟,得出以下结论:

(1) 对于采用射流冲击的撕碎机刀具结构,无论是空气射流冷却还是水射流冷却都能显著降低撕碎机刀具的温度和热变形,尤其是刀具发热严重的前端部分,均降低了 20% 以上,而且刀具温度的不均匀性得到改善;

(2) 在相同工况下,采用水射流的冷却效果明显好于空气射流,而且水射流冷却后刀具温度的均匀性更好。故相较于空气射流,采用水射流的冷却方式更

能满足撕碎机刀具的冷却要求;

(3) 不论是空气射流还是水射流,随着射流口压力的逐渐增大,刀具的温升和最大热变形呈下降趋势且降幅趋于平缓。

该仿真研究可指导合理选取实际冷却系统参数,以控制撕碎机刀具的温升和最大热变形在设定的目标范围内。

参考文献(References):

- [1] 张家港市新贝机械有限公司. 简单介绍单轴撕碎机[EB/OL]. [2017-07-13]. http://www.xbjx08.com/newsshow_30.html.
- [2] 李友生,邓建新,张辉,等. 硬质合金刀具材料的抗氧化性能研究[J]. 材料工程,2009(2):34-37.
- [3] 文怀兴,马朝阳. 冷却方式对车削 45 钢结果影响的有限元分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(7):89-91.
- [4] 李天箭,刘文博,吴涛. 内冷车刀设计的结构和热复合分析方法及应用[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(4):886-893.
- [5] 杜劲,周婷婷,张静婕,等. 基于 Fluent 的涂层刀具切削热传导研究[J]. 工具技术,2018,52(5):51-55.
- [6] WANNASSI M, MONNOYER F. Fluid flow and convective heat transfer of combined swirling and straight impinging jet arrays[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015,78(2):62-73.
- [7] 朱红钧. ANSYS14.5 热流固耦合实战指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2014.
- [8] 史强,丁建宁,樊宝伟,等. 射流冷却超薄玻璃的数值模拟研究[J]. 常州大学学报:自然科学版,2017,29(1):12-21.
- [9] 王永强,任启乐,薛胜雄,等. 水射流新型应用技术与装备的研究[J]. 流体机械,2018,46(2):36-40.
- [10] 陆金刚,龚辰,闫龙龙,等. 高速水射流集束性的数值模拟及实验研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(8):1526-1529.
- [11] CSERNYEI C, STRAATMAN A G. Forced convective heat transfer on a horizontal circular cylinder due to multiple impinging circular jets[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016(105):290-303.
- [12] 张振,章巧芳. 高压喷嘴的射流仿真研究[J]. 机电工程,2013,30(2):185-187.
- [13] 薛胜雄,陈政,陈波,等. 超高压水切割多功能特征解析[J]. 流体机械,2017,45(11):17-21.
- [14] 杜宏益,何林,赵先锋,等. 基于 ANSYS 的内冷刀具流热固耦合分析(上)[J]. 现代制造工程,2016(6):13-16.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

顾振业,顾书豪,夏鹏,等. 采用射流冷却的撕碎机刀具热特性仿真分析[J]. 机电工程,2020,37(1):49-53.

GU Zhen-ye, GU Shu-hao, XIA Peng, et al. Simulation analysis of thermal characteristics of shredder tool with jet cooling[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(1):49-53.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>