

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2018.05.005

# 基于 ANSYS Workbench 的磨辊温度场有限元分析

李 聪, 武文斌, 林冬华, 黄奇鹏, 孟 乐

(河南工业大学 粮油机械研究所, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对布勒 MDDK1000/250 型辊式磨粉机 1M 喷砂辊温度场进行了有限元分析, 结果显示自磨粉机开始工作时起, 辊体内外温差逐渐缩小, 至 80 左右达到稳态, 辊面温度变化呈现先快后慢的趋势。而整个辊体热通量呈现先上升后下降后平稳的趋势。随着辊面温度逐渐达到稳态, 磨粉机整体的温度场基本保持稳定。研究结论对辊式磨粉机的设计提供理论依据并为同行提供参考。

**关键词:** 磨粉机; 磨辊; 辊面; 温度; 温度场

中图分类号: TS 211.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2018)05-0024-05

## Finite element analysis of roller temperature field based on ANSYS workbench

LI Cong, WU Wen-bin, LIN Dong-hua, HUANG Qi-peng, MENG Le

(Institute of Grain and Oil Machinery, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001)

**Abstract:** The finite element analysis of the temperature field of the 1M emery roller of the Bühler MDDK1000/250 roller mill was carried out. The results showed that the temperature difference between the inside and the outside of the roller gradually decreased from the start of the work of the roller mill to 80 or so. In the steady state, the roll surface temperature change tended to be fast at first and then slow down. However, the heat flux of the entire roll body showed a tendency of rising at first and then falling and then stabilizing. As the roll surface temperature gradually reached steady state, the overall temperature field of the roller mill remained basically stable. The research conclusions provide theoretical basis for the designer of roller mill and provide reference for peers.

**Key words:** mill; roller; roller surface; temperature; temperature field

中国是一个有着 13 亿人口的粮食大国, 在农作物的种植上有“南稻北麦”的说法。中国人对小麦粉的需求量很大, 因而对小麦粉生产设备和质量也提出了更高的要求。市场上众多的小麦粉生产设备中, 辊式磨粉机更为常见, 也是一系列制粉工艺中的核心和关键设备。磨辊是辊式磨粉机的“心脏”, 其性能直接影响小麦粉的质量及口感<sup>[1]</sup>。磨粉机正常工作时, 物料通过喂料辊均匀地进入轧区, 由于磨辊与物料之间的剪切, 挤压、和摩

擦力作用, 以及磨辊转速、轧距及速比等技术参数特性的不同, 工作时, 两对辊之间有很大的辊间压力, 磨辊对物料的挤压和摩擦会使磨辊和物料之间产生大量的摩擦热<sup>[2]</sup>。长时间的研磨使磨辊产生的热量聚集在辊体内和磨粉机腔体, 长时间工作的磨辊表面温度可达到 60~80 , 降低了小麦粉的质量和口感。高温也会使小麦粉中的蛋白质变性和淀粉糊化, 大大降低小麦粉的质量, 导致蛋白质变性、色泽差、口感不够细腻。另一方面, 高温造成小麦粉中的水汽蒸发, 水汽遇空气中小麦粉凝结成块, 粘在筛格上影响筛分效率。

针对以上问题, 以布勒 MDDK 1000/250 型

收稿日期: 2018-03-19

基金项目: 河南省重点研发与推广项目(2018304)

作者简介: 李聪, 1994 年出生, 男, 助理工程师, 硕士研究生。

通讯作者: 武文斌, 1959 年出生, 男, 教授, 博士生导师。

1M 磨粉机直径 250 mm、长 1 000mm 喷砂辊快辊为研究对象,基于 ANSYS Workbench 对磨辊瞬态温度场进行分析,探讨辊式磨粉机磨辊温升的变化机理,对降低温升预测辊体温度分布提高制粉质量显得尤其重要。

## 1 磨辊温度场数学模型

### 1.1 磨辊传热分析

磨辊与物料和空气之间有 3 种传热方式:热传导、热对流和热辐射。影响辊体温度场的因素主要有 3 种:磨辊辊面与物料之间的接触传热、磨辊与空气之间的对流传热和磨辊在空气中的热辐射。图 1 为磨辊的换热物理模型。

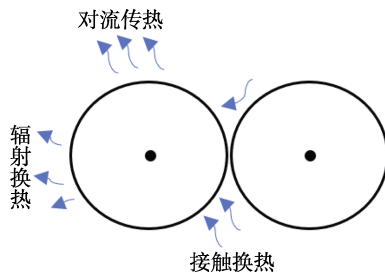


图 1 磨辊的换热物理模型

### 1.2 数学模型的建立

磨辊与物料相接触中输入热流主要来源于轧制区的摩擦热以及物料因塑性变形产生的变形热。因小麦制粉 1M 工艺中物料粒度较小,物料因塑性变形产生的变形热可忽略不计,因此可以将摩擦热看成等效热源,认为等效摩擦热源在辊面上均匀分布,磨辊辊面周向温度相等。考虑到磨辊表面沿径向传热,利用有限元分析方法建立三维磨辊瞬态温度场模型,计算磨辊辊体温度场分布。

#### 1.2.1 基本假设

在磨粉机工作过程中,磨辊承受持续性摩擦,磨辊内温度场变化复杂,为简化计算过程,减少计算时间,作如下假设<sup>[3]</sup>。

- (1) 工作过程稳定;
- (2) 不考虑变形,将辊体看成标准圆柱体高速匀速转动;
- (3) 由于强迫排风的流速较大,而且排风过程中,温升很小,因此可以近似认为排风温度为常数;
- (4) 磨辊材料材质均匀且为各向同性;

(5) 因物料为热的不良导体且辊速较高,可以认为摩擦生成热全部传给辊体;

(6) 磨辊与轴承配合面绝热,整个辊体空冷。

#### 1.2.2 导热偏微分方程

运用热力学第一定律和傅里叶导热定律得到直角坐标系中导热微元体的导热微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(T\rho c) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (1)$$

式中:  $\lambda$ —导热系数;  $c$ —导热体比热容;  $q$ —内热源强度;  $\tau$ —时间

采用坐标变换法得到圆柱坐标系下热传导的偏微分方程为<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(T\rho c) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \varphi \in [0, 2\pi] \quad (2)$$

式中:  $\rho$ —磨辊的材料密度;  $r$ —离散单元到磨辊轴心的距离;  $q$ —单位体积热源单位时间内发出的热量;  $\tau$ —时间

计算磨辊轴向截面温度场分布,磨辊在整个过程中的热传导方程可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{1}{h} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q}{\lambda} \quad (3)$$

式中:  $h$ —对流换热系数;  $q$ —内热源强度;  $\lambda$ —导热系数;  $T$ —温度;  $\tau$ —时间

将摩擦热作为内热源强度,则磨辊温度场的内部热传导方程为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \frac{q}{\rho c} \quad (4)$$

式中:  $T$ —温度;  $c$ —密度;  $t$ —时间;  $r$ —径向距离;  $y$ —横向距离

## 2 基于 ANSYS Workbench 的磨辊温度场有限元分析

### 2.1 模型的建立

针对快辊进行非稳态导热分析,所选平台为 Solidworks2012 及 ANSYS Workbench14.0。

在进行磨辊温度场有限元分析之前,需要利用 Solidworks2012 三维建模软件对磨辊进行三维建模,如图 2 所示,为布勒 MDDK1000/250 型 1M 磨粉机喷砂辊装配体三维模型。辊长 1 000 mm,

直径 250 mm ,辊体外层白口铸铁层选用材料为白口铸铁 ,内层灰口铸铁层选用材料为灰口铸铁 ,左右两轴选用材料为 45 号钢 ,左边齿轮选用材料为 45 号钢 ,右边带轮选用材料为灰铸铁。

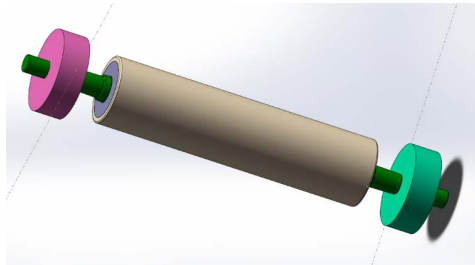


图 2 布勒 MDDK1000/250 型 1M 磨粉机喷砂辊装配体三维模型

### 2.2 模型导入及物性参数设置

打开 ANSYS Workbench14.0 ,在菜单栏 Units 下选择 mm 为单位。双击主界面工具箱 Analysis 下 Transient Thermal(瞬态热分析)模块导入 Solidworks 建模文件 ,双击 Engineering Data 进入辊体材料设置 ,新建材料库 :磨辊材料 ,内建三种材料 huikou (灰口铸铁) baikou (白口铸铁) 45 号钢 ,并设置三种材料热物性参数。

三种材料热物性参数如表 1 所示。

表 1 三种材料热物性参数

金属	温度/	比热/(J/kg)	导热系数/(w/m )	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
白口铸铁	20	188.325	20.925	7 500
	200	188.325	21.343 5	7 600
灰口铸铁	0	470	28.5	7 570
	20	470	39.2	7 570
	100	470	32.4	7 570
45 号钢	100	450	48.1	7 850
	200	450	46.5	7 850
	300	450	44.0	7 850

### 2.3 材料选取及网格划分

打开 Model 模型 ,在 Geometry 几何体下依次选择 part1 齿轮、part2 带轮、part3 左侧辊轴、part4 右侧辊轴、part5 辊体灰口铸铁层、part6 辊体白口铸铁层、在 Material 下 Assignment 将其材料依次选取为 45 号钢、huikou、45 号钢、45 号钢、huikou、baikou。

将 Physics Preference 分析环境设置为 Mechanical 结构 ,Relevance 相关性设置为 80% ,

Relevance Center 相关中心设置为 Fine 细密。划分网格结果如图 3 所示。

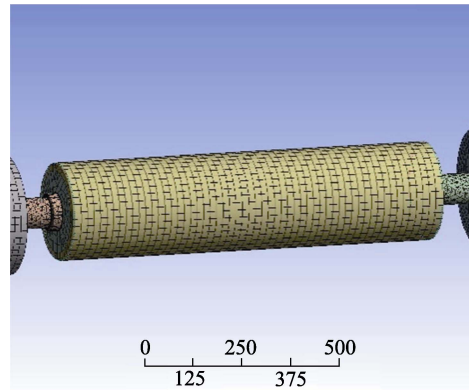


图 3 网格划分结果

网络划分结果如图 3 所示 ,节点数量 87 386 ,单元数量 28 034。节点和单元数量越多 ,网格划分越密 ,计算精度越高 ,同时计算时间将会延长。

### 2.4 边界条件参数输入及求解方法控制的设定

#### 2.4.1 初始条件和边界条件的确定

热传导方程描述的是温度与时间和空间的函数关系 ,只有引入初始条件和边界条件后才能进行求解。

##### i 初始条件

(1) 开始工作前辊体温度分布是均匀的 ,经实地测量辊体初始温度为 28.4 。

(2) 排风温度 17 。

##### ii 边界条件

根据牛顿冷却定律和傅里叶定律确定边界条件。其中空气对流换热系数考虑风速的影响 ,根据层流原理进行计算。

$$h_s(T_w - T_b) = -\lambda_r \frac{\partial T_0}{\partial n} \quad (5)$$

式中 :  $T_w$ —辊面温度 ;  $T_b$ —排风温度 ;  $h_s$ —空气对流换热系数 ;  $\lambda_r$ —辊体导热系数。

对于磨辊的辐射传热 :

$$-\lambda_r \frac{\partial T_w}{\partial n} = \varepsilon \sigma T_w^4 \quad (6)$$

式中 :  $T_w$ —辊面温度 ;  $\sigma$ —斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ,其值为  $5.76 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$  、  $\lambda_r$ —辊体导热系数 ;  $\varepsilon$ —辊体表面黑度

#### 2.4.2 求解方法控制的设定

将初始温度设为 28.4 ,设置为 90 000 s 内

分析 75 步, 20 min 计算一次。对流参数、环境温度及辐射参数可以根据实验中采集到的数据及磨辊实测温度, 利用数学模型计算得出。

点击 Heat Flow, 对辊面施加热载荷, 据计算其值为 1 665 W。添加辊面空气对流边界, 对流系数设为  $2.97687 \times 10^{-5} \text{ w/mm}^2$ , 辊面强制排风温度设为 17。添加齿轮部位空气对流边界, 对流系数设为  $4.31 \times 10^{-6} \text{ w/mm}^2$ , 齿轮外围空气温度据实验数据设为 23.4。添加带轮部位空气对流边界, 对流系数设为  $3.61 \times 10^{-6} \text{ w/mm}^2$ ,

带轮外围空气温度据实验数据设为 26.1。添加辊面、齿轮部位、齿轮部位热辐射边界, 辐射系数设为 0.38。

### 3 结果与分析

#### 3.1 仿真结果

磨辊温度场结果如图 4 所示, 此为 0 时刻磨辊温度场。

1 500 min 时刻磨辊温度达到稳态时温度场如图 5 所示。

磨辊最大温度变化曲线如图 6 所示。

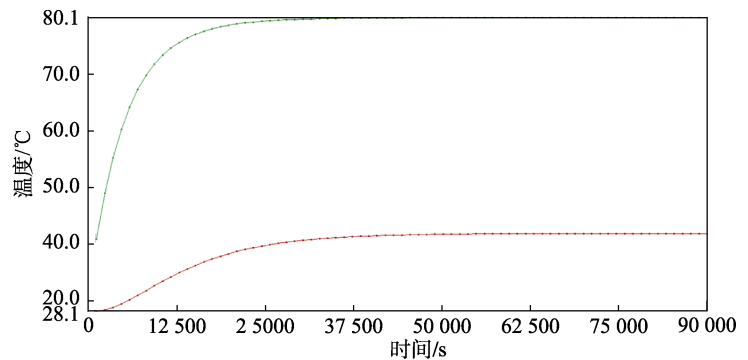
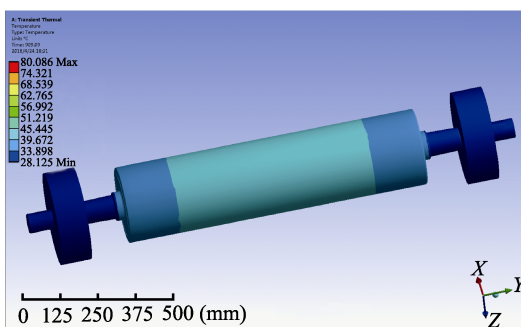


图 4 0 时刻磨辊温度场

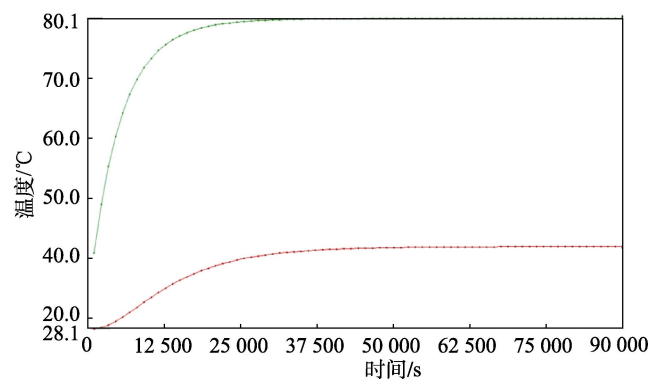
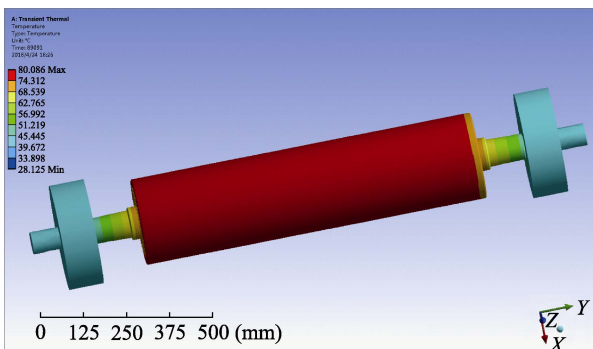


图 5 磨辊温度达到稳态时温度场

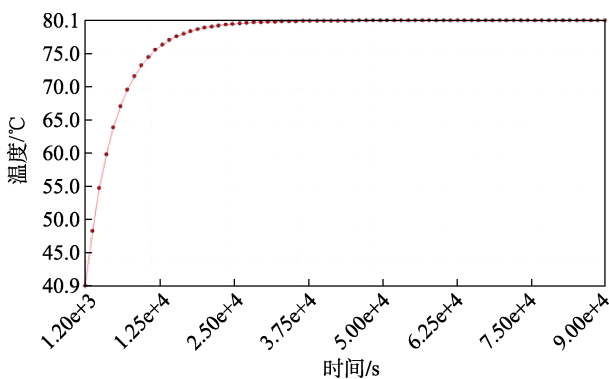


图 6 磨辊最大温度变化曲线

磨辊最大热通量变化曲线及三维渲染图如图 7 所示。

实验组在鹤壁浚县益民粉业公司对布勒 MDDK1000/250 型 1M 磨粉机快辊进行了辊面测温, 辊面温度达到稳态时的温度如表 2 所示。

因测试点较多, 磨辊表面温度取其平均值  $t_w=75$ 。

#### 3.2 讨论

从图 6 可以看出, 磨辊到达稳态时最大温度为 80.1, 与实际测量辊面温度 75 相对误差为 6.8%。实验与仿真二者结果虽存在误差, 但误差在合理范围内。同时也说明了理论计算推导、仿真分析及实验测试具有有效性, 得出的结论有

一定的实际价值。从磨辊最大温度变化曲线可以看出此时磨辊温度已达到稳态，磨辊温度场已恒定。从图 4、5、6 可以看出，辊面因与物料摩擦产生的热流自辊面向辊体内部传递，造成辊体中间区域热量囤积，于是中央囤积的热量沿轴向向辊体两侧端面及轴部传递。磨辊两端面热量持续沿辊轴向齿轮及带轮传递。从图 6 可以看出，磨辊最大温度呈现先快后慢的变化趋势，说明热流传递亦是先快后慢，是一个先易后难的过程。及至辊面温度达到稳态，辊面热辐射亦相应加强，

根据热力学第一定律，流入辊面的热量等于流出辊面的热量。

从图 7 可以看出磨辊最大热通量变化曲线呈现先上升后下降，后下降减缓趋于稳定的过程，中间出现了峰值。从图 7 可以看出磨辊内外温差最大出现在两侧轴头部位，根据傅里叶导热定律<sup>[7]</sup>：

$$Q_{\lambda} = \phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (7)$$

式中： $\phi$ —热流量； $\lambda$ —导热系数； $A$ —传热面积； $dt$ —温差； $dx$ —传热距离

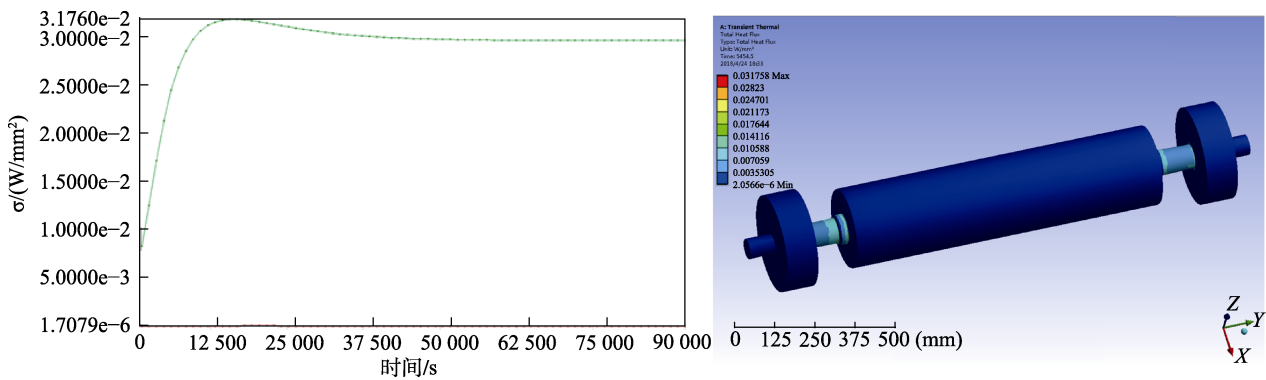


图 7 磨辊最大热通量变化曲线及三维渲染图

表 2 辊面温度达到稳态时的温度

测试点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温度/	75	75	76	76	75	75	74	77	76	75	73	74	76	75	73

在整个传热过程中，辊体导热系数、传热面积、传热距离均认为保持一定。磨辊最大热通量变化曲线先快速上升表明了辊体内部正在快速地囤积热量并向两轴部流动，随着辊体温度上高，即辊体各部位温差逐渐缩小，热通量变化曲线也将回落，回落时出现峰值。及至磨辊温度场达到稳定，热量的流入与流出亦处于动态平衡，热通量变化曲线渐趋平稳。

#### 4 结论

对布勒 MDDK1000/250 型 1M 喷砂辊辊面进行了有限元仿真分析与实际温度测量。通过对仿真及实验数据的分析，结果表明辊体温度自开始工作时起逐渐升高，热流自辊面向辊体内部传递，辊体中间区域热量囤积，囤积的热量沿轴向向辊体两侧端面及轴部传递，辊体内外温差逐渐缩小，渐趋平衡，至 75 左右达到稳态。各个测量点稳态温度相差不大，说明辊体温度较为均匀，磨

粉机的等温性能较好。对磨辊的温度测量有利于对磨辊温度场的进一步研究，也为磨辊的降温及粮机设计人员提供了依据。

#### 参考文献：

- [1] 李聪, 武文斌, 林冬华, 朱珊珊. 磨粉机磨辊粉碎摩擦热能分析计算研究[J]. 粮食加工, 2017, 42(4): 60-62.
- [2] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用技术[M]. 北京: 轻工业出版社, 2007(1): 1-3.
- [3] 徐国进, 周成, 王德, 李立彦. 上方侧注式双辊铸轧辊套温度场的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(4): 371-375.
- [4] 郑宏飞. 热力学与传热学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [5] 张克平, 王敏, 张炜, 孙步功. 磨粉机水冷式磨辊温度场数值模拟[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11): 62-65.
- [6] 杨利坡, 刘宏民, 彭艳, 王英睿. 热连轧轧辊瞬态温度场研究[J]. 钢铁, 2005(10): 41-44.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.