

# 啮合转子冷却系统有限元分析

汪传生, 王虎子, 胡纪全\*, 晁宇琦, 边慧光, 蔡 宁

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 利用Pro/E中的Pro/Mechanica模块对两种不同类型转子的冷却水道性能进行稳态模拟, 分析两种转子冷却水道的温度场及各个截面的温度场。结果表明, 带有螺旋角的螺旋结构迷宫式强制冷却方式对转子冷却效果较好, 增大了转子的冷却面积, 利于转子体表冷却。

**关键词:** 啮合转子; 冷却水道; 螺旋结构; 迷宫式强制冷却; Pro/Mechanica; 有限元分析

**中图分类号:** O241.82; TQ330.4<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2018)00-0000-04

在橡胶混炼过程中, 影响炼胶效率和质量的因素很多, 其中混炼温度是决定密炼机性能、生产能力和炼胶质量最重要的因素之一。提高混炼温度有助于橡胶与配合剂混合, 但混炼温度过高会降低机械的混合剪切作用, 导致混炼不均匀; 此外, 还会加剧橡胶分子的热氧化降解, 降低胶料物理性能, 并促使橡胶和炭黑之间产生过多的化学结合作用, 产生过多凝胶, 从而导致胶料可塑度下降, 表面粗糙度增大, 压延、挤出等工艺困难。另一方面, 如果混炼初期温度过低, 则会因胶料与密炼机工作部件的相对滑动而降低生产能力, 同时消耗更多能量<sup>[1-2]</sup>。因此, 为了在保证炼胶质量的同时降低能耗, 较好地控制密炼机工作过程中的混炼温度非常重要。

密炼机混炼温度难以控制, 这是因为混炼过程中摩擦剪切作用非常强烈, 且环境密闭, 生热量大但散热困难, 所以胶料升温极快, 容易产生过炼现象。慢速密炼机排胶温度一般控制在110℃左右, 快速高压密炼机排胶温度一般控制在160℃以上<sup>[3]</sup>。因此, 在密炼机混炼过程中采取有效的冷却方式极为必要, 加强对转子、密炼室壁以及压砣的冷却, 可进一步提高混炼质量。在炼胶过程中, 转子与密炼室壁间产生的热量最多, 而且难以散发, 因此转子冷却的好坏直接影响排胶温度和炼胶质

量, 这对高压快速密炼机尤为重要。

转子冷却形式不同, 冷却效果也不同。以前密炼机转子由于外形复杂且不规则, 一般采取转子内腔喷水冷却。采用此方法转子棱顶无法冷却, 而内腔因不能加工导致表面比较粗糙, 传热系数低, 冷却效果差。为进一步提高转子冷却效果, 国外厂家设计出强制循环冷却结构, 不但转子内表面可进行加工, 传热系数提高, 而且凸棱也能得到冷却。

本工作采用Pro/E软件对自行设计的新型啮合型转子(根径 340 mm, 外径 470 mm, 轴向长度 648 mm)进行三维结构造型设计。利用Pro/E软件中的Pro/Mechanica模块对转子两种不同冷却结构的冷却效果进行模拟分析, 为转子冷却结构的优化改进提供参考。

## 1 Pro/Mechanica热力学分析

Pro/Mechanica中的热力学分析模块专门用于进行零件和组建模式下的稳态和瞬态温度分布分析, 其结果可以返回结构分析模块中, 并进行灵敏度分析和优化设计<sup>[4]</sup>。

在Pro/Mechanica中, 其热力学分析流程可以概括为: (1) 建立模型(简化模型、分配材料、模型的理想化、施加热力载荷和约束); (2) 分析模型(建立分析、运行分析、获取结果); (3) 定义设计变量(定义参数、指定变化范围、预览形状变化); (4) 优化设计(建立敏感度研究、运行并获取结果、

**作者简介:** 汪传生(1960—), 男, 安徽安庆人, 青岛科技大学教授, 博士, 主要从事高分子材料加工机械的教学和科研工作。

\*通信联系人(hujiqianqdkj@126.com)

建立优化研究、运行并获取结果、升级模型)。

## 2 转子冷却结构有限元分析

### 2.1 数学模型

对于光滑管道紊流,可按迪图斯-贝尔特公式<sup>[5-6]</sup>进行计算:

$$N_u = 0.023R_e^{0.8}P_r^{0.4}$$

式中,  $N_u$ —努谢尔特准则;

$R_e$ —雷诺准数;

$P_r$ —普朗特准数。

对流换热系数( $\alpha$ )计算表达式<sup>[7-8]</sup>为

$$\alpha = N_u \frac{\lambda}{d}$$

式中,  $\lambda$ —材料热导率,  $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$ ;

$d$ —冷却水孔直径, mm。

经查, 40  $^\circ C$  时水的物理性能参数为: 比热容

4.174 103  $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$ , 密度( $\rho$ ) 0.992 2  $Mg \cdot m^{-3}$ ,  $\lambda$  0.635  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ , 动力粘度( $\mu$ )

$6.56 \times 10^{-4} N \cdot s \cdot m^{-2}$ , 运动粘度(动量扩散系数,  $\nu = \mu/\rho$ )  $6.58 \times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$ ,  $P_r$  4.31。

由于属于短管道传热, 通道内流动尚未充分发展, 层流内层较薄, 热阻力小, 换热系数计算得 1.28, 可求出:

$$R_e = V_d / \nu$$

$$V_d = uD$$

式中,  $V_d$ —水的流量;

$u$ —水流速度,  $1.18 m \cdot s^{-1}$ ;

$D$ —冷却水管直径, 20 mm。

经换热系数公式计算得到校正后的换热系数( $\alpha_r$ )为

$$\alpha_r = 1.28N_u \frac{\lambda}{d} = 7373.518 (W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$$

由于冷却水管的长度远大于冷却水通道孔径, 因此该换热系数不需修正。

图1是两种新型啮合转子强制循环冷却结构的实体造型, 管道模型通过三维软件布尔运算得到。采用将转子去除流道模型与流道模型装配到一起的有限元模型, 其中流道模型代表水蒸气。

### 2.2 定义材料属性

本研究转子选择线性材料45#钢, 相当于AISI 1045, 其主要属性如下: 密度  $7.827 Mg \cdot m^{-3}$ , 泊松比 0.27, 剪切模量  $7.7 \times 10^{10} Pa$ , 杨氏模量  $1.99 \times 10^{11} Pa$ , 极限张力强度  $1.24 \times 10^{12} Pa$ ,

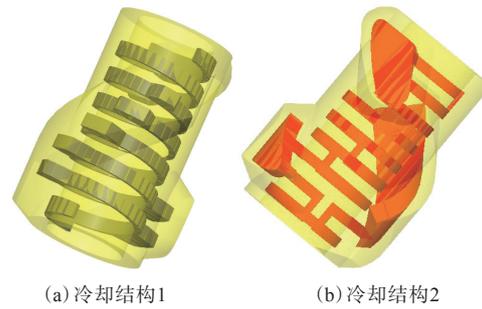


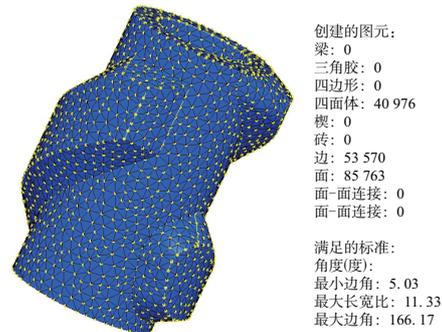
图1 两种新型啮合转子强制循环冷却结构及管道模型  
屈服强度  $3.556 \times 10^8 Pa$ , 热膨胀系数  $1.17 \times 10^{-5} K^{-1}$ , 比热容  $473.31 J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ , 热导率  $43.012 W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ 。

### 2.3 网格划分

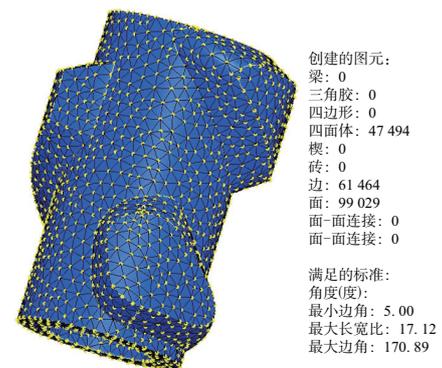
两种转子构型的有限元模型采用相同的参数建立。有限元模型的基本单元、节点信息、划分好的网格模型如图2所示。

### 2.4 载荷加载

在对流换热过程中, 热量的传递涉及两种机



(a) 冷却结构1



(b) 冷却结构2

图2 转子强制循环冷却结构有限元网格模型及网格节点数

理,一种是对流,即流体质点不断地运动、渗乱混合,热量从一处被带到另一处;另一种是导热<sup>[9-10]</sup>,主要指密炼机室壁和流体间、流体各层间存在温差,通过导热作用使热量得以传递。对流换热强度是一个比较复杂的物理现象,换热系数从数值上反映其综合强度。对有限元模型及每个域分别进行加载,胶料接触平面参数以试验研究所得排胶温度为参考,在转子外表面即胶料接触平面加载假定热载荷15 kW。与冷却水相接触的平面参数为: $\alpha_r$  7 373.518  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ,冷却水温度 40  $^{\circ}\text{C}$ ,转子热导率 43.012  $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,转子比热容 473.34  $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。载荷及对流加载完毕后的效果如图3所示。

### 2.5 模拟结果与分析

对有限元模型求解结果进行分析,通过软件计算得到不同冷却结构转子的温度场变化,结果如图4所示。

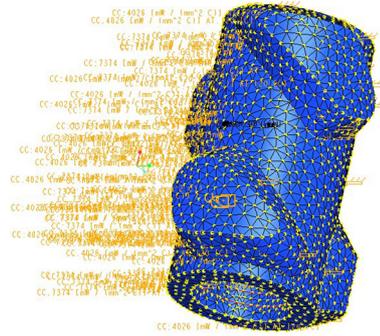
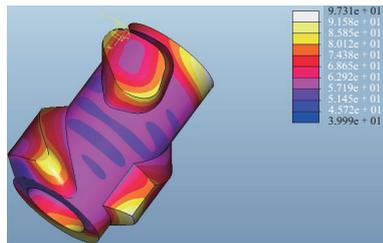


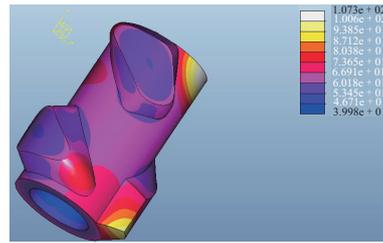
图3 加载模型显示示意

从图4可以看出:转子棱顶处的温度较高,热量比较集中,这是由于其表面换热面积较小,而且离中间水道距离较大;转子体外缘部分温度较高;转子体和长短棱的中间部位温度大体均等。

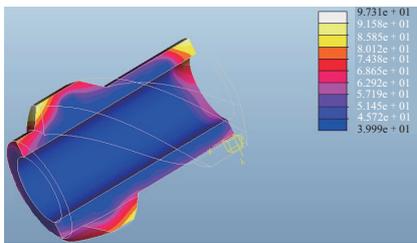
对比图4两种冷却结构温度场变化可以看出,冷却结构1的转子体最大温度比冷却结构2小、转子体表面(除转子棱)部分温度比冷却结构2更低,



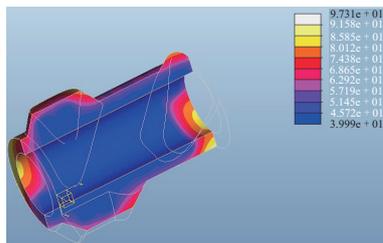
(a) 冷却结构1



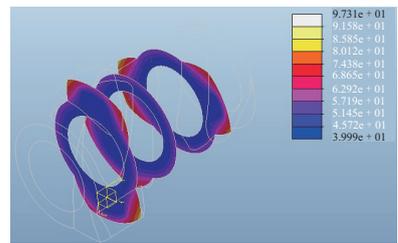
(b) 冷却结构2



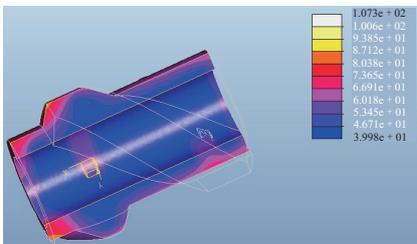
(c) 冷却结构1的XY截面



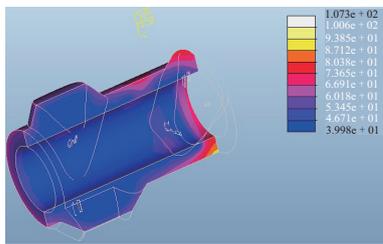
(d) 冷却结构1的XZ面



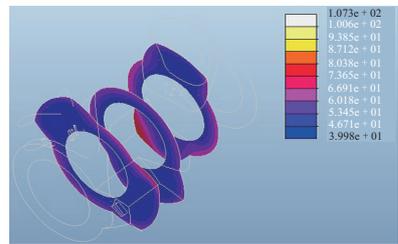
(e) 冷却结构1的YZ截面



(f) 冷却结构2的XY截面



(g) 冷却结构2的XZ面



(h) 冷却结构2的YZ截面

图4 不同冷却结构转子的温度场分布

这是由于其具有独特的带有螺旋角的螺旋结构,水在管道中流通顺畅,而且螺旋管道间间隙小,故水流循环快,进一步增强了其冷却效果。冷却结构1转子棱部分的冷却效果逊于冷却结构2,这主要是由于冷却结构1在转子棱处的结构不是一体,而是通过两条水道间隔冷却导致的。

### 3 结论

(1) 迷宫式强制冷却方式对转子冷却效果好。中间水道设计目的是作为回水通道,如果强度条件允许,可以增大中间水道的直径,以得到更好的换热效果。

(2) 转子冷却水道螺旋方式冷却,设计时应使水流运动的螺旋水道有一定的螺旋角,以增大水道长度,从而增大冷却面积,更有利于转子体表冷却。

(3) 转子冷却结构设计应尽量简单,以利于水流顺畅运动的同时减小水流进出口温差,使水温控制更为准确、灵敏,也为今后变温混炼提供良好的条件。

(4) 转子棱顶处的冷却结构尽可能设计成一

个小整体,采用两段冷却时需尽可能缩小两段间间隙尽可能小,以利于转子棱冷却。

### 参考文献:

- [1] 巫晓飞,汪传生,刘彩军,等.影响密炼机炼胶温度因素的探讨[J].特种橡胶制品,2002,23(5):40-42.
- [2] 边慧光,程耀华,胡纪全,等.超声波对胶料混炼效果影响的有限元分析[J].橡胶工业,2018,65(6):704-710.
- [3] 北京化工学院.聚合物传热学(理论基础)[M].北京:北京化工学院出版,1983.
- [4] 乔建军,王保平,胡仁喜,等.Por/ENGINEER Wildfire 5.0动力学与有限元分析从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [5] Middleman S. The Flow of High Polymers, Continuum and Molecular Rheology[M]. New York: Wiley-int, 1986.
- [6] White J L. Rubber Processing: Technology, Materials and Principles[M]. Munich: Hanser, 1995.
- [7] 孙宝忠.密炼机混炼过程中转子温度场的模拟研究[D].青岛:青岛科技大学,2008.
- [8] 边慧光,孙保忠,汪传生.二维平面内密炼机温度场分析[J].橡塑技术与装备,2007,33(3):1-5.
- [9] 汪传生,徐小林,潘弋人,等.新型啮合转子混炼过程有限元模拟分析[J].橡胶工业,2018,65(4):461-465.
- [10] 莫跃飞,胡纪全,边慧光,等.不同螺旋角同步转子混炼效果的有限元分析[J].橡胶工业,2017,64(8):493-497.

收稿日期:2018-06-25

## Finite Element Analysis of Meshing Rotor Cooling System

WANG Chuansheng, WANG Huzi, HU Jiquan, CHAO Yuqi, BIAN Huiguang, CAI Ning

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** The steady-state simulation of the cooling channel performance of two different types of rotors was studied by using Pro/Mechanica module in Pro/E, and the temperature fields of the two rotor cooling channels and each section were analyzed. The results showed that the spiral structure with a spiral angle of the labyrinth forced cooling method had better cooling effect on the rotor, which increased the cooling area of the rotor and facilitated the cooling of the rotor surface.

**Key words:** meshing rotor; cooling waterway; spiral structure; labyrinth forced cooling; Pro/Mechanica; finite element analysis