

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.05.009

面齿轮啮合轮齿本体温度场影响因素的仿真分析

王胜伟¹, 何 瑛², 何国旗¹, 周照领¹

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南理工职业技术学院 资源工程系, 湖南 湘潭 411104)

摘要: 建立了面齿轮传动本体温度场的热平衡方程, 研究了不同几何参数、工况下圆柱齿轮和面齿轮的本体温度场分布。研究表明: 面齿轮传动达到本体温度场时, 面齿轮的本体温度高于圆柱齿轮, 且本体温度与转速、负载、环境温度和齿面粗糙度呈正相关关系, 与齿轮的模数、压力角和齿数呈负相关关系。仿真结果也为面齿轮在乏油润滑状况下的寿命预测提供了初始的齿面节点温度数据。

关键词: 面齿轮传动; 圆柱齿轮; 面齿轮; 本体温度场

中图分类号: TH132.41

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)05-0043-07

Simulation Analysis of the Influencing Factors on Face-Gear Tooth Bulk Temperature in Meshing Process

Wang Shengwei¹, He Ying², He Guoqi¹, Zhou Zhaoling¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Department of Resources Engineering, Hunan Vocational Institute of Technology, Xiangtan Hunan 411104, China)

Abstract: The heat balance equation for the bulk temperature field of face-gear meshing was built, and the bulk temperature field distributions of cylindrical gear and face gear were studied under different geometric parameters and working conditions. Results indicated that face-gear bulk temperature was higher than that of cylindrical gear when the face-gear system reaching to bulk temperature. Moreover, the face gear bulk temperature showed a positive correlation with the rotate speed, load, environment temperature and gear surface roughness, and it showed a negative correlation with gear modulus, pressure angle and tooth numbers. The result provides initial temperature data of tooth surface nodes for the face-gear life prediction under the lack of lubrication conditions.

Keywords: face-gear driving; cylindrical gear; face gear; bulk temperature

0 引言

面齿轮传动是一种由圆柱齿轮与圆锥齿轮相啮合的新型齿轮传动^[1], 因其独特的分流特性, 正逐步替代锥齿轮传动而成为武装直升机的核心传动装置。在武装直升机的飞行过程中, 由于载荷和转速都较

大, 面齿轮传动齿面摩擦产生的热量也较大, 导致轮齿温度升高, 引起热弹性变形, 严重影响传动系统的可靠性^[2-4]。因此, 需要对面齿轮传动中圆柱齿轮和面齿轮的本体温度场进行综合分析研究。

本文研究了不同几何参数、工况下圆柱齿轮和面齿轮的本体温度场分布, 得到了齿面节点温度数

收稿日期: 2014-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375159), 湖南省高等学校科学研究基金资助项目(12A038, 13C379)

作者简介: 王胜伟(1989-), 男, 山西临汾人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为机械设计, E-mail: 531760493@qq.com

通信作者: 何 瑛(1969-), 女, 湖南湘潭人, 湖南理工职业技术学院高级工程师, 主要从事数字化制造理论与技术方面的教学与研究, E-mail: 503904249@qq.com

据,为面齿轮在乏油润滑状况下的寿命预测提供初始的齿面节点温度数据。

1 面齿轮传动轮齿的本体温度场

1.1 基本方程

根据 Block 理论^[5]可知,面齿轮传动过程中,各轮齿的温度均由齿轮本体温度和齿面瞬时接触温度两部分组成,其热平衡方程^[6]为

$$\int_0^{t+t'} \varepsilon \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) dt + \varepsilon \int_0^{t+t'} \left(\frac{\partial^2 T_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_B}{\partial z^2} \right) dt = \rho c \int_0^{t+t'} \left(\frac{\partial T_s}{\partial t} + \frac{\partial T_B}{\partial t} \right) dt, \quad (1)$$

式中: ε 是各齿轮材料的导热系数;

t' 是面齿轮旋转一周所用的时间;

T_s 为齿面瞬时接触温度;

T_B 为轮齿的本体温度;

ρ 是各齿轮材料的密度;

c 是各齿轮材料的比热容。

由于齿轮本体温度一定,因此

$$\frac{\partial T_B}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

齿面瞬时接触温度随着时间呈周期性变化,

$T(t) = T(t+t')$, 即

$$\int_0^{t+t'} \frac{\partial T}{\partial t} dt = \int_0^{t+t'} \frac{\partial T_s}{\partial t} dt = 0. \quad (3)$$

将式(2)~(3)代入式(1),得轮齿的本体稳态热平衡方程

$$\varepsilon \left(\frac{\partial^2 T_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_B}{\partial z^2} \right) t' = 0. \quad (4)$$

1.2 边界条件

圆柱齿轮和面齿轮的单齿不同计算区域的边界条件分别如图1和图2所示^[7-8]。

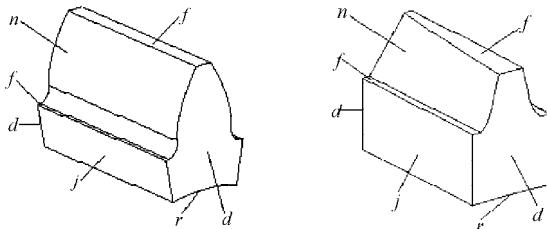


图1 圆柱齿轮单齿边界条件 Fig. 1 Boundary conditions of single tooth of cylindrical gear
图2 面齿轮单齿边界条件 Fig. 2 Boundary conditions of single tooth of face gear

1) 啮合工作齿面 (n 区)

$$-\varepsilon \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = h_n (T_B - T_0) - q. \quad (5)$$

2) 齿顶、齿根及非啮合工作齿面 (f 区)

$$-\varepsilon \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = h_f (T_B - T_0). \quad (6)$$

3) 齿轮端面 (d 区)

$$-\varepsilon \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = h_d (T_B - T_0). \quad (7)$$

4) 分齿截面 (j 区)

$$T_B |_{j1} = T_B |_{j2}, \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} |_{j1} = \frac{\partial T}{\partial \tau} |_{j2}. \quad (8)$$

5) 轮齿底面 (r 区)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0. \quad (9)$$

式(5)~(9)中: $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ 为相应各区域的温度梯度;

q 为啮合工作齿面输入的稳态热流;

h_n, h_f, h_d 为相应各区域的对流换热系数;

T_0 为环境温度;

$T_B |_{j1}, T_B |_{j2}$ 分别为齿轮两分齿截面上的温度。

2 摩擦热流量

面齿轮传动过程中,啮合齿面的摩擦热流量由相互啮合两齿面啮合区域的相对滑动速度、最大接触压力以及滑动摩擦系数共同确定^[9]。由于啮合齿面上产生的摩擦热流量向圆柱齿轮和面齿轮的分配不均匀,因此引入摩擦热流量分配因子 γ ^[10],即

$$\gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \rho_1 c_1 V_1}}{\sqrt{\varepsilon_1 \rho_1 c_1 V_1} + \sqrt{\varepsilon_2 \rho_2 c_2 V_2}}, \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_i, \rho_i, c_i (i=1, 2)$ 分别是两齿轮材料的导热系数、密度和比热容;

$V_i (i=1, 2)$ 是两齿轮在啮合点处的切向速度。

圆柱齿轮和面齿轮在齿面任意啮合区域获得的摩擦热流量分别为^[11]:

$$q_1 = \gamma \varphi P_D f V_r, \quad (11)$$

$$q_2 = (1-\gamma) \varphi P_D f V_r. \quad (12)$$

式(11)~(12)中: φ 为摩擦能到热能的转化系数;

P_D, f, V_r 分别为齿面啮合区域的最大接触压力、滑动摩擦系数和相对滑动速度,且

$$P_D = 0.375 \pi \sqrt{\lambda F (R_2 \pm R_1) / (\pi E_H R_1 R_2)},$$

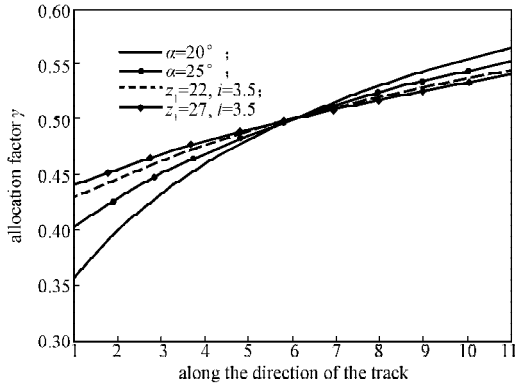
$$f = 0.011 \left[P_D^2 R_a / (\eta_d V_H) \right],$$

其中, λ 为齿间的载荷分配系数, F 为分度圆上的圆周力, $R_i (i=1, 2)$ 为两齿轮在啮合点处的曲率半径, E_H 为综合弹性模量,

$$E_H = (1-\sigma_1^2) / E_1 + (1-\sigma_2^2) / E_2,$$

σ_i , E_i 分别为齿轮所用材料的泊松比和弹性模量, R_a 为齿面粗糙度, η_0 为润滑油的动力粘度, V_H 为齿面滑动速度之和。

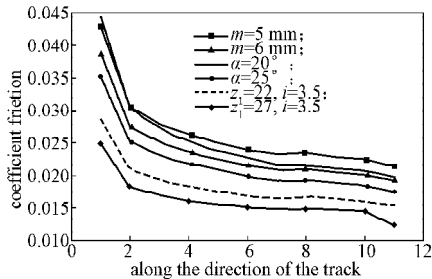
不同几何参数下, 摩擦热量分配因子 γ 和滑动摩擦系数 f 沿啮合区域的分布分别如图3和图4所示。



注: 参数 α , z_1 , i 分别表示压力角, 圆柱齿轮齿数, 传动比。

图3 不同参数下热量分配因子沿啮合区域的分布
Fig. 3 Distribution of heat flow allocation factor along meshing area under different parameters

由图3可知, 面齿轮与圆柱齿轮相互啮合时, 摩擦热量分配因子即圆柱齿轮的热量分配系数沿着啮合区域逐渐增大。相反, 面齿轮的热量分配系数则沿着啮合区域逐渐减小, 两者在啮合节点处相等。同时, 一定范围内, 齿数越多, 压力角越大, 摩擦热量分配因子的变化率越小。



注: m 表示模数。

图4 不同参数下滑动摩擦系数沿啮合区域的分布
Fig. 4 Distribution of sliding friction coefficient along meshing area under different parameters

由图4可知, 滑动摩擦系数沿着啮合区域整体呈逐渐减小的趋势, 且不同几何参数下, 滑动摩擦系数的值也不同。一定范围内, 模数、压力角越大, 齿数越多, 滑动摩擦系数的值越小。

3 齿轮传动轮齿本体温度场的有限元分析

以圆柱齿轮和面齿轮的单齿为研究对象, 其有限元模型分别如图5~6所示。圆柱齿轮、面齿轮的材料属性如表1所示。

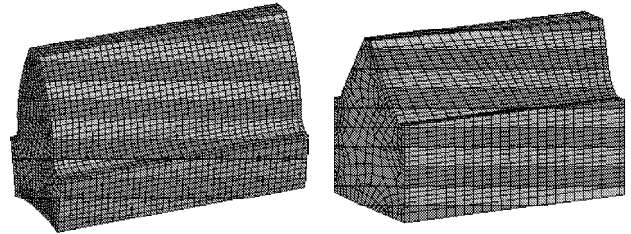


图5 圆柱齿轮单齿网格模型
图6 面齿轮单齿网格模型
Fig. 5 Meshing model of single tooth of cylindrical gear
Fig. 6 Meshing model of single tooth of face gear

表1 圆柱齿轮和面齿轮的材料属性

Table 1 The material properties of cylindrical gear and face-gear

齿轮名称	材质	弹性模量 E / ($\times 10^3$ MPa)	泊松比 μ
圆柱齿轮	16MnCr5	211	0.280
面齿轮	45 钢	209	0.269

齿轮名称	热导率 λ / (W / (m · K))	比热容 c / (J / (kg · K))	密度 ρ / (kg · m ⁻³)
圆柱齿轮	41	481	7 890
面齿轮	71	460	7 890

在面齿轮传动中, 圆柱齿轮和面齿轮本体温度的分布分别如图7~8所示(包括工作侧视图与非工作侧视图)。

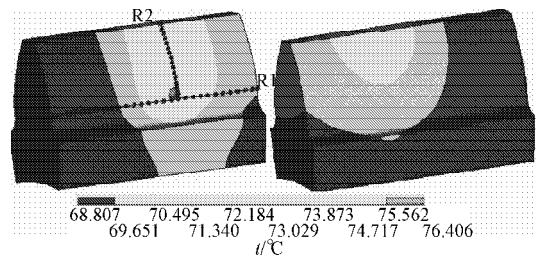


图7 圆柱齿轮本体温度场分布云图
Fig. 7 Distribution of bulk temperature of cylindrical gear

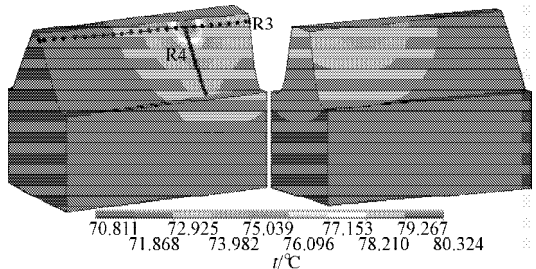


图8 面齿轮本体温度场分布云图
Fig. 8 Distribution of bulk temperature of face gear

取圆柱齿轮啮合齿面上的相应节点形成路径R1与R2; 取面齿轮啮合齿面上的相应节点形成路径R3与R4。将各路径上的节点温度数据导出并绘制成节点温度变化曲线, 如图9^[12]所示, 沿着路径R1与R2的节点温度如图a所示, 表示圆柱齿轮啮合齿面的本体温度; 沿着路径R3与R4的节点温度如图b所示, 表示面齿轮啮合齿面的本体温度。

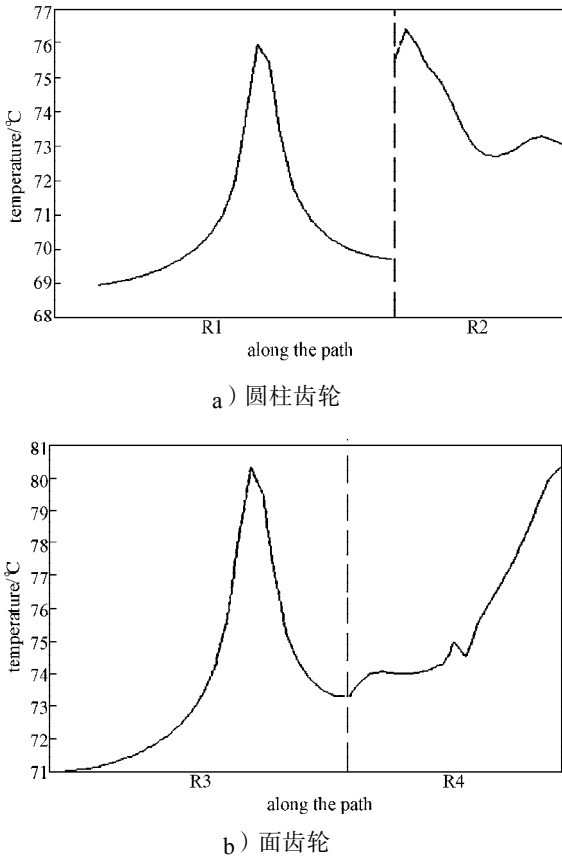


图9 啮合齿面的本体温度分布

Fig. 9 Distribution of bulk temperature of meshing surface

由图 7~9 可知, 面齿轮传动系统达到本体温度场时, 两齿轮的本体温度分布不均匀。由于出现边缘接触现象, 圆柱齿轮轮齿的最高温度区域分布在齿根以上附近区域, 最低温度区域远离齿面啮合区域; 面齿轮轮齿的最高温度区域分布在齿顶边缘附近区域, 最低温度区域亦远离齿面啮合区域。面齿轮的本体温度高于圆柱齿轮的本体温度。由于热传导使热流量由啮合区域向非啮合区域扩散, 两齿轮的本体温度沿着齿宽方向均呈抛物线型分布。同时, 由于不同啮合区域产生的摩擦热流量不同, 导致啮合区域的温度亦不同。

4 面齿轮传动轮齿本体温度场的影响因素分析

面齿轮传动的本体温度是一个多元影响量, 本文主要讨论不同工况 (齿轮转速、负载、环境温度) 和不同几何参数 (齿面粗糙度、模数、压力角、齿数) 对面齿轮传动本体温度的影响规律。

4.1 不同工况对本体温度场的影响

不同工况下面齿轮传动本体温度的分布分别如图 10~12 所示。

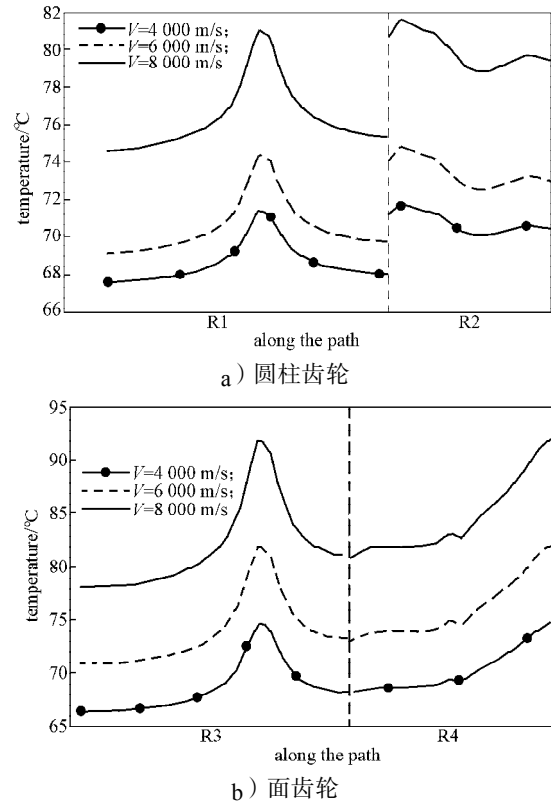


图10 齿轮转速对轮齿本体温度的影响

Fig. 10 Influence of gear velocity on bulk temperature of tooth

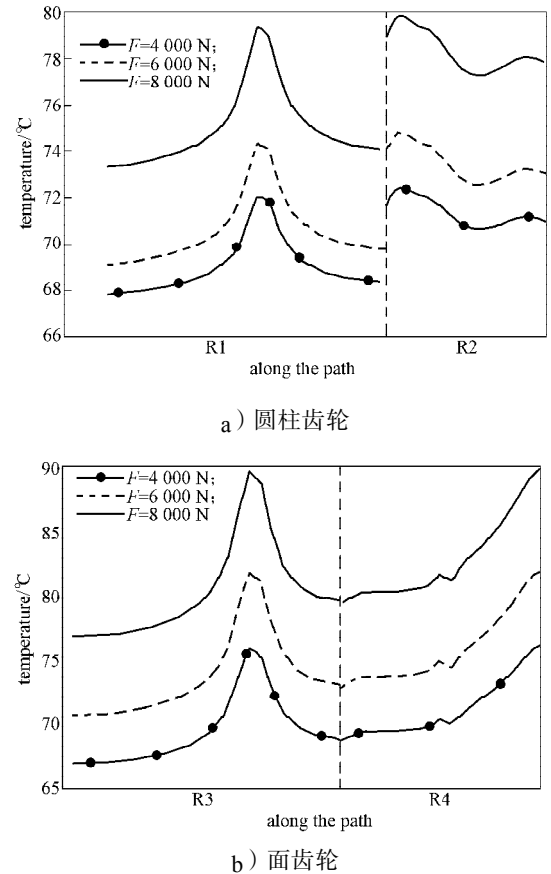


图11 载荷对轮齿本体温度的影响

Fig. 11 Influence of load on bulk temperature of tooth

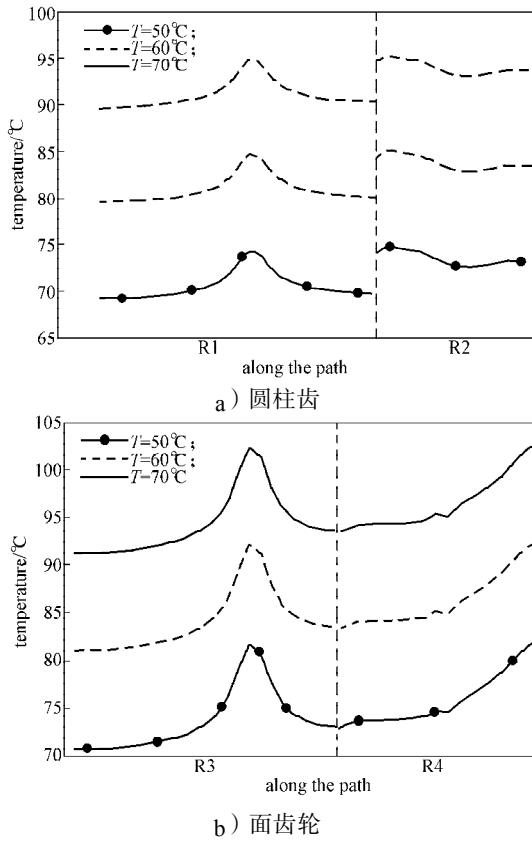


图12 环境温度对轮齿本体温度的影响

Fig. 12 Influence of ambient temperature on bulk temperature of tooth

由图 10~12 可知:

1) 面齿轮传动的本体温度随着齿轮转速、负载、环境温度的增加而升高, 因此, 本体温度与三者呈正相关关系。这是由于齿轮转速增加, 导致相对滑动速度变大; 负载增加直接使得齿面法向作用力增大, 它们最终都导致输入到圆柱齿轮和面齿轮中的热流量增多^[13], 使得本体温度上升。环境温度的升高将直接导致面齿轮传动的本体温度上升。

2) 当齿轮转速分别增大到 1.5 倍和 2 倍时, 面齿轮轮齿的本体温度分别增加了 7.62% 和 17.89%。当负载分别增大到 1.5 倍和 2 倍时, 面齿轮轮齿的本体温度分别增加了 9.74% 和 23.14%。同样, 齿轮转速和负载对圆柱齿轮本体温度场有类似的影响。因此, 在一定范围内, 当齿轮转速和负载增大相同的倍数, 负载的变化导致本体温度的温升量较大, 所以负载对本体温度的影响较齿轮转速大。

3) 当齿轮转速、负载和环境温度发生变化时, 本体温度场的分布状况基本保持不变。这是因为尽管三者发生变化, 导致啮合齿面上的产热量也随之变化, 但基本没有影响啮合区域在工作齿面的所处位置。因此, 齿轮转速、负载和环境温度的变化基本不影响本体温度场的分布情况。

4.2 不同几何参数对本体温度场的影响

不同几何参数下面齿轮传动本体温度的分布分别如图 13~16 所示。

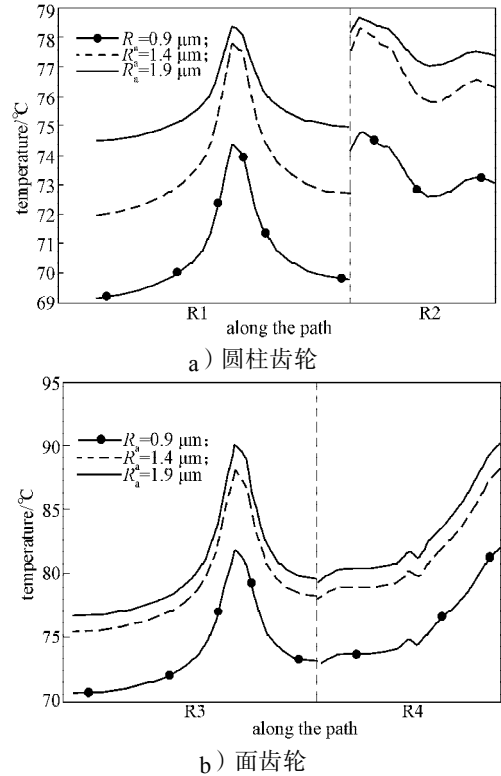


图13 齿面粗糙度对轮齿本体温度的影响

Fig. 13 Influence of gear surface roughness on bulk temperature of tooth

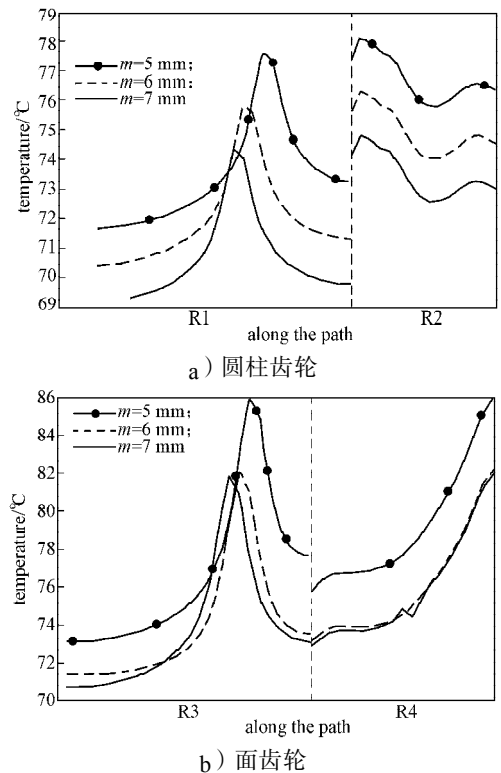


图14 模数对轮齿本体温度的影响

Fig. 14 Influence of modulus on bulk temperature of tooth

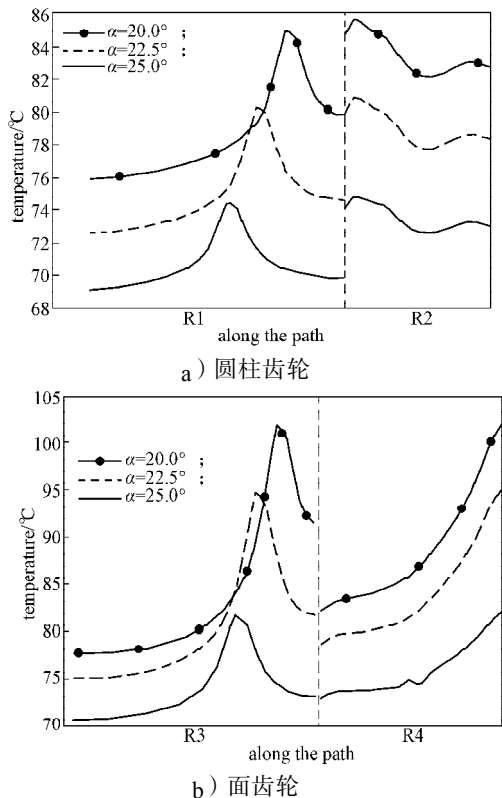


图15 压力角对轮齿本体温度的影响

Fig. 15 Influence of pressure angle on bulk temperature of tooth

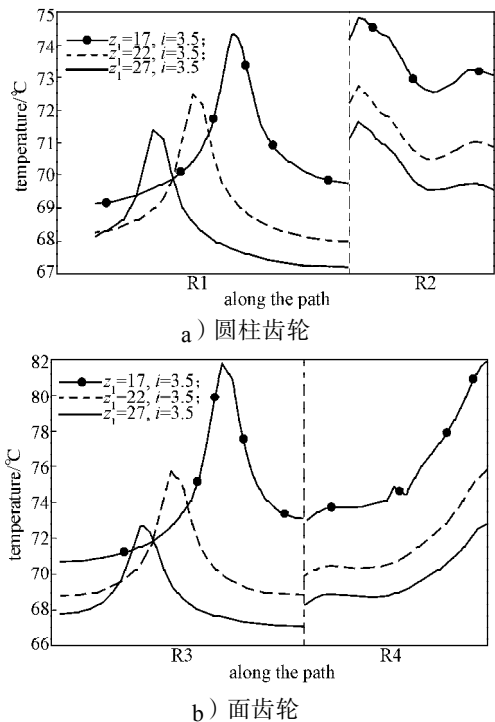


图16 齿数对轮齿本体温度的影响

Fig. 16 Influence of tooth number on bulk temperature of tooth

由图 13~16 可知:

1) 在一定范围内, 当齿面精度较高时, 降低齿面的加工精度将使得本体温度急剧上升, 导致热追赶现象较严重^[14]; 当齿面精度相对较低时, 降低齿

面的加工精度本体温度增加的幅值较小。

2) 本体温度随着齿轮的模数、压力角和齿数的增大而降低, 因此, 本体温度与三者呈负相关关系。由于齿面摩擦热流量的分配以及圆柱齿轮和面齿轮轮齿几何形状的不同, 当模数、压力角和齿数增大时, 两齿轮产生的温降量也不同。

3) 当齿轮的模数、压力角和齿数增大时, 面齿轮本体温度场的高温区域向大径端方向移动; 圆柱齿轮本体温度场的高温区域也相应地向另一端移动。这是由于当三者增大时, 工作齿面的啮合区域向面齿轮的大径端方向移动。

5 结论

1) 面齿轮传动达到本体温度场时, 两齿轮的本体温度均呈现不均匀分布, 且面齿轮的本体温度高于圆柱齿轮的本体温度。圆柱齿轮和面齿轮轮齿的最高温度区域分别位于齿根以上附近区域、齿顶边缘附近区域, 最低温度区域均远离齿面啮合区域。两齿轮的本体温度沿着齿宽方向均呈抛物线型分布。

2) 面齿轮传动的本体温度与齿轮转速、负载、环境温度和齿面粗糙度呈正相关关系; 与齿轮的模数、压力角和齿数呈负相关关系。

3) 齿轮转速、负载和环境温度的变化不影响面齿轮传动本体温度场的分布情况; 当齿轮的模数、压力角和齿数增大时, 面齿轮本体温度场的高温区域向面齿轮的大径端方向移动; 圆柱齿轮本体温度场的高温区域也相应地向另一端移动。

参考文献:

- [1] 朱如鹏. 面齿轮传动的啮合特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.
Zhu Rupeng. Research on Meshing Characteristics of Face-Gear[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [2] 何国旗, 严宏志, 胡威, 等. 面齿轮啮合过程中压力角对齿面摩擦生热的影响分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(9): 3415-3419.
He Guoqi, Yan Hongzhi, Hu Wei, et al. Influence of Pressure Angle on Friction Heat During Face-Gear Meshing Process[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(9): 3415-3419.
- [3] 肖来元, 易传云. 基于本体温度场的齿轮热弹性变形的综合研究[J]. 武汉城市建设学院学报, 1995, 12(4): 13-16.
Xiao Laiyuan, Yi Chuanyun. Comprehensive Research on

- Gear Thermal Elastic Deformation Based on the Bulk Temperature Field[J]. Journal of Wuhan Urban Construction Institute, 1995, 12(4): 13-16.
- [4] 邓小宝, 何国旗, 陈小文, 等. 面齿轮啮合过程中齿面温度仿真[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(6): 56-60. Deng Xiaobao, He Guoqi, Chen Xiaowen, et al. Tooth Surface Temperature Simulation of Face Gear Meshing Process[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(6): 56-60.
- [5] Patir N, Cheng H S. Prediction of the Bulk Temperature in Spur Gears Based on Finite Element Temperature Analysis [J]. ASLE Transactions, 1979, 22(1): 25-36.
- [6] 姚阳迪, 林腾蛟, 何泽银. 高速斜齿轮传动稳态温度场仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2009, 22(6): 9-12. Yao Yangdi, Lin Tengjiao, He Zeyin. Simulation and Analysis of Steady-State Temperature Field for High-Speed Helical Gear Transmission[J]. Mechanical Research & Application, 2009, 22(6): 9-12.
- [7] 邱良恒, 辛一行, 王 统, 等. 齿轮本体温度场和热变形修形计算[J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(2): 79-86. Qiu Liangheng, Xin Yixing, Wang Tong, et al. A Calculation of Bulk Temperature and Thermal Deflection of Gear Tooth About Profile Modification[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1995, 29(2): 79-86.
- [8] 肖来元, 杨元山. 齿轮体积温度场的延拓边界元法[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(增刊1): 58-62. Xiao Laiyuan, Yang Yuanshan. An Expanded Boundary Element Method for the Calculation of the Bulk Temperature Field in Gears[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995, 23(S1): 58-62.
- [9] 赖 锋, 林腾蛟, 邢惠斌, 等. 齿轮齿面温度场计算[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(3): 50-53. Lai Feng, Lin Tengjiao, Xing Huibin, et al. The Computational Research of the Gear's Tooth Surface Temperature[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(3): 50-53.
- [10] 龚宪生, 王欢欢, 张干清, 等. 行星齿轮轮齿本体温度场与闪温研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 209-216. Gong Xiansheng, Wang Huanhuan, Zhang Ganqing, et al. Analysis of Bulk Temperature Field and Flash Temperature for Planet Gear Teeth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 209-216.
- [11] 郁 晗. 齿轮接触应力和温度场分析[J]. 机械工程与自动化, 2013(5): 50-52. Yu Han. Contact Stress and Temperature Field Analysis of Gear[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(5): 50-52.
- [12] 罗善明, 王 伟, 王 建. 弧齿锥齿轮本体温度场及其敏感性分析[J]. 厦门理工学院学报, 2009, 17(3): 1-6. Luo Shanming, Wang Wei, Wang Jian. Simulation and Sensitivity Analysis of Bulk Temperature of Spiral Gear[J]. Journal of Xiamen University Technology, 2009, 17(3): 1-6.
- [13] 徐 超, 王家序, 欧阳格. 基于 ABAQUS 的滤波减速器的齿轮本体温度场分析[J]. 润滑与密封, 2012, 37(3): 49-52. Xu Chao, Wang Jiayu, Ouyang Ge. Analysis of the Bulk Temperature Field in Spur Gears of Filtering Gear Reducer Based on ABAQUS[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(3): 49-52.
- [14] 陈国定, 李剑新, 刘志全, 等. 斜齿轮非定常温度场的计算[J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(1): 11-14. Chen Guoding, Li Jianxin, Liu Zhiquan, et al. A Method for Calculating Transient Temperature in Helical Gears[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2000, 18(1): 11-14.

(责任编辑: 邓光辉)