

动态热电偶法测量齿面闪温分布实验研究

张有忱<sup>1)</sup> 孟惠荣<sup>2)</sup>

( 1) 北京化工大学机械工程学院, 北京 100029; 2) 中国矿业大学, 北京 100083)

摘 要: 用动态热电偶法测量齿面闪温分布, 设计制造可测出全齿面闪温的三片组合带电阻式齿轮结构。测试结果与理论计算结果基本一致。提出了利用动态热电偶测得的齿面闪温分布曲线计算齿面积分温度的方法。  
关键词: 齿轮; 闪温; 热电偶; 实验  
中图分类号: TH 132. 41

引 言

齿面瞬时接触温度  $T_B$  及齿面积分温度  $T_{int}$  是当今国际上衡量齿轮传动齿面胶合承载能力的两个基本参数。根据 ISO/DIS6336/4 可知:

$$T_B = T_M + \theta_{fla} \quad (\text{Blok 瞬温准则})$$
$$T_{int} = T_M + C_2 \theta_{flaint} \quad (\text{积分温度准则})$$

两者均与本体温度  $T_M$  及齿面闪温  $\theta_{fla}$  有关 ( $\theta_{flaint}$  为沿啮合线上各点的闪温积分)。其中  $T_M$  的测试并不困难, 而沿啮合线上各啮合点的闪温  $\theta_{fla}$  分布规律极难用常规的测试方法测出。这主要是由于齿面接触具有瞬时性, 通过接触点的时间不超过几毫秒, 一般温度传感器的响应时间不能满足测试要求。因此, 利用运转中的齿轮副本身作为热电偶, 通过接触点上产生的热电势的大小来度量表面温度值, 即动态热电偶法。

本实验采用三片组合式齿轮成功地测出一对齿在啮合过程中瞬态全齿面的闪温分布曲线, 图线清晰, 并利用实测的闪温分布曲线求出实际的齿面积分温度, 可供齿轮胶合承载能力计算时使用。

1 测试原理及测试系统

1.1 测试原理

测试原理如图 1 所示。图中,  $y$  为两齿轮齿沿啮合线上某啮合点  $y$  (测试系统的关键部位) 的齿面接触温度, 即实验中由齿轮副本身充当热电偶的热端温度;  $T_M$  为本体温度;  $T_{co}$  为热电偶冷端温度;

A, B 为集流环, 可把高速旋转轴上的微弱电信号取出; 沿啮合线分布的齿面温度及变化可从电子示波器上显示出来。

根据热电偶测温原理, 电子示波器上测到的电势是热端电势与冷端电势之差, 即

$$E_{AB}(y, T_{co}) = E_{AB}(y) - E_{AB}(T_{co})$$

接触点的热电势为

$$E_{AB}(y) = E_{AB}(y, T_{co}) + E_{AB}(T_{co})$$

由上式可知, 如果  $E_{AB}(T_{co})$  已知, 并从示波器上读出  $E_{AB}(y, T_{co})$ , 则可求出啮合点  $y$  的热电势  $E_{AB}(y)$ 。再通过事先作好的标定曲线, 就可换算出接触点的温度  $T_y$ 。

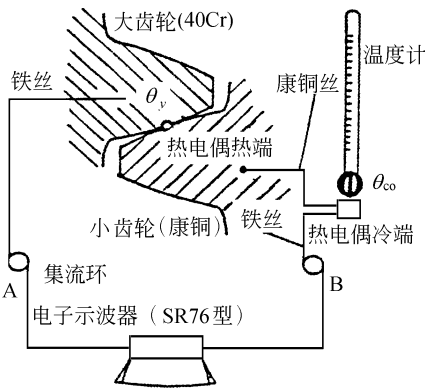


图 1 测试原理  
Fig. 1 Test principle

1.2 测试系统

测试装置是在国际通用的 FZG 型即国产 CL-100 型 (承德试验机厂生产) 齿轮实验机的基础上自行改装的。系统装置如图 2 所示。

收稿日期: 1999-03-10  
第一作者: 男, 1957 年生, 副教授, 工学博士

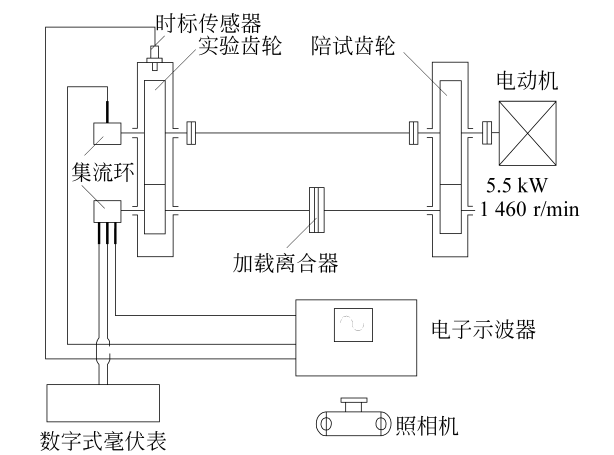


图 2 测试系统  
Fig. 2 Test system

为了形成热电偶，实验齿轮副是用两种不同材料制成，大齿轮用 40Cr 钢，小齿轮用康铜。实验齿轮有关参数见表 1，其中，润滑方式为油池润滑，润滑油采用 L-AN32。为了在双对齿啮合区仅测出其中一对齿各啮合点的热电势，对大齿轮结构作了改进。一般情况下，一对齿轮的端面重合度总大于 1，故存在双对齿啮合区，如图 3(a) 所示。此时同时存在两个啮合点，各点在各对齿面上所处的位置不同，齿面温度也不相同，于是，在两个不同啮合点产生两个不同的热电势  $E_1$ 、 $E_2$ ，再加上热电偶冷端产生的热电势  $E_3$ ，在整个回路中共有三个电势，即使把  $E_3$  视为常量，示波器测到的电压  $U_0$  也要随  $E_1$ 、 $E_2$  而变化。因此，当测到一个  $U_0$  时，就无法知道这两点分别的温度。为解决此问题，采用大齿轮分三片制造，片与片之间进行绝缘处理，且每片采用间隔齿的形式，中间片测量轮齿齿面闪温，两边侧片用以完成连续传动。

表 1 实验齿轮特性参数

Table 1 Characteristic parameter of test gears						
模数 / mm	齿数	压力角 / (°)	螺旋角 / (°)	变位系数	精度等级	
小齿轮	4.5	16	20	0	0.6	5 GM
大齿轮	4.5	24	20	0	- 0.246 8	5 GM

图 3(b) 中，当大齿轮的侧片处在单对齿啮合区时，由于侧片与中片绝缘，使得此时的测量电路处于开路状态，示波器所显示的电势差为开路电压，约在几十毫伏到几百毫伏之间变化。一般情况下，中片齿测量到的电势差仅仅是零点几毫伏到几毫

伏，于是就出现了电势的较大跳跃。示波器上的电势曲线从开路状态恢复到中片参加啮合有热电势输出状态时需要一定的时间，这个时间与齿轮中片处于开路、闭路之间的变换时间间隔处于同一数量级，示波器就不能正常显示出热电势波形。因此，初始实验齿轮结构的设计思路是正确的，但由于受到示波器性能(瞬态响应时间)的限制，使得原设计目的难以实现。为解决这一问题，在被绝缘的齿轮侧片与齿轮中片之间用一附加电阻连接起来，以减小电势的跳跃，原理如图 4 所示。

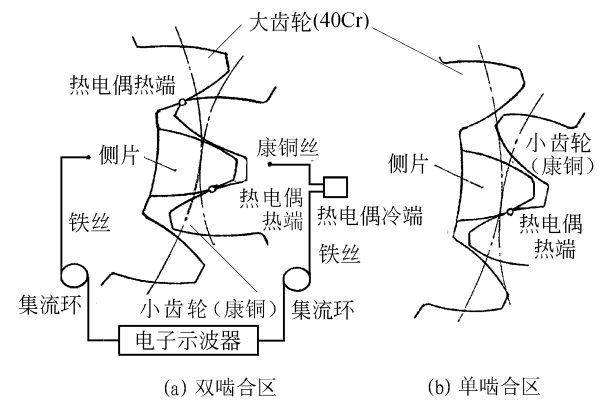


图 3 双、单啮合区时齿面温度测量示意图

Fig. 3 Sketch showing the measurement of tooth surface temperature in the area of double-tooth loading and single-tooth loading

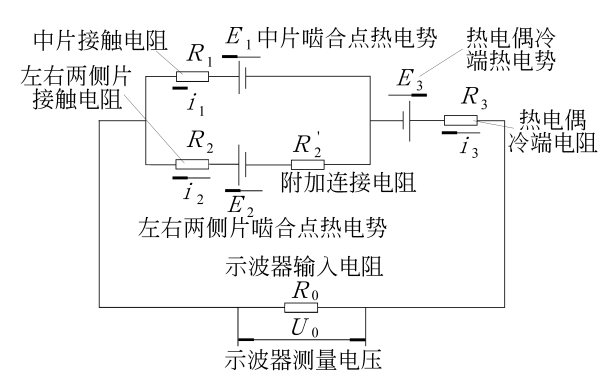


图 4 附加电阻后的热电势测量原理图

Fig. 4 Sketch showing the measurement of the thermal electric potential with additional electric resistance

通过电学理论分析，可导出如下公式：

$$U_0 = \frac{E_1 + \frac{R_1}{R_2 + R_2'} E_2 - \left[ 1 + \frac{R_1}{R_2 + R_2'} \right] E_3}{\frac{R_1}{R_0} + \left[ 1 + \frac{R_1}{R_2 + R_2'} \right] \left[ 1 + \frac{R_3}{R_0} \right]} \quad (1)$$

由于  $R_0 = 10^6$  , 而  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  仅处在  $0.1 \sim 10$  之间, 故  $R_0 \gg R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ , 于是

$$\frac{R_1}{R_0} \rightarrow 0, \frac{R_3}{R_0} \rightarrow 0$$

式(1)变为

$$U_0 = \frac{E_1 + \frac{R_1}{R_2 + R_2} E_2 - \left(1 + \frac{R_1}{R_2 + R_2}\right) E_3}{1 + \frac{R_1}{R_2 + R_2}} \quad (2)$$

由于所选用的连接电阻  $R_2$  处于  $10^3 \sim 10^4$  的数量级, 所以,  $R_1/(R_2 + R_2)$  处于  $10^{-4}$  左右。式(2)可近似变为

$$U_0 \approx E_1 - E_3 \quad (3)$$

当中片齿轮脱离接触时, 电路并非处于完全开路状态, 而是存在一个适当大的电阻, 使得此时示波器显示的电势差接近 0 电势, 当电路由开路再次变为闭路时, 电势曲线能很快恢复到零点几毫伏到几毫伏的热电势曲线附近。

理论证明, 大齿轮中片与侧片之间连接一附加电阻  $R_2$  后可基本上消除示波器受本身瞬态响应时间限制所带来的影响, 能够测量到一对齿沿全齿面的闪温, 并且不受双啮区时另一对齿面闪温的影响。实验证明, 采用连接电阻方法是切实可行的。

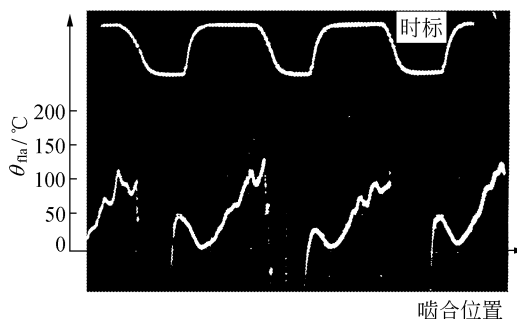
## 2 实验结果分析

### 2.1 闪温分布曲线的比较与分析

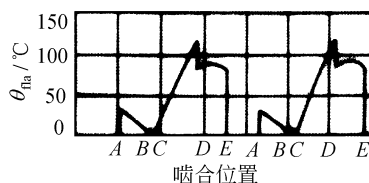
为便于分析实测闪温分布曲线与理论计算曲线相符合的程度, 首先根据 Blok 闪温公式计算出齿轮的闪温分布曲线, 如图 5(b) 所示。图 5(a) 为与之对应的实测闪温分布曲线。通过两个图曲线的比较发现, 用 Blok 闪温公式计算出的闪温分布曲线与实测闪温分布曲线形状趋势及大小基本符合。但实测的闪温分布曲线的末尾端较理论计算闪温分布曲线的末尾端相对高了一些, 原因是小齿轮齿顶附近的摩擦系数比闪温计算用的摩擦系数偏大<sup>[3]</sup>造成的。

为了考察整体齿轮与整体齿轮啮合时的闪温分布曲线情况, 本文采用大齿轮侧片与中片用一根导线直接连接起来, 作为整体齿轮处理, 以节省试件。测到的闪温分布曲线如图 6 所示。由于整体齿轮副啮合时, 在双啮区同时有两个啮合点的热电势输出, 此时测到的闪温曲线是经过合成的曲线, 如图 7 所示。在图中双啮区 DE 上有两条闪温曲线,

代表着同时存在的两个啮合点的闪温分布。如果假设两啮合点的接触电阻相同, 则示波器测到的啮合线上某点闪温热电势就是该点对应两热电势的平均值。所以此时测到的合成输出闪温分布曲线(见图 6)与图 5(a) 所示的闪温分布曲线有明显的不同。



(a) 测量温度分布曲线



(b) 理论计算温度分布曲线

图 5 齿面闪温分布曲线

Fig. 5 The tooth surface flash temperature distribution

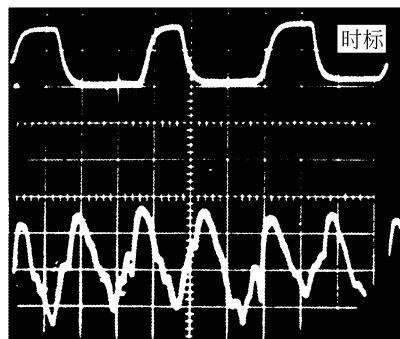


图 6 整体齿轮齿面闪温分布曲线

Fig. 6 The tooth surface flash temperature distribution of whole gear

### 2.2 利用实测闪温分布曲线求解齿面积分温度

#### 2.2.1 分片组合式结构齿轮齿面积分温度求解

利用把大齿轮做成分片组合式齿轮并在侧片与中片之间连接一附加电阻的方法, 就能测量到全齿面的闪温分布曲线。利用图 5(a) 全齿面闪温分布曲线求解齿面平均积分温度。计算步骤如下: (1) 从图 5(a) 中取出一波形曲线, 如图 8 所示,  $x$ 、 $y$  分别为波形

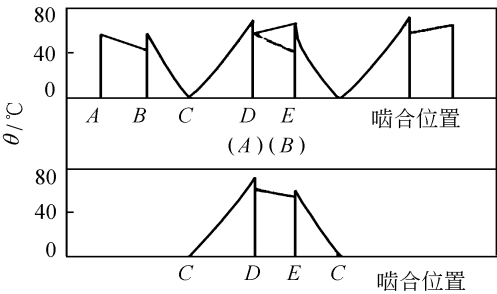


图 7 双啮区两啮合点热电势合成输出示意图

Fig. 7 The thermal electric potential composition output scheme in the area of double-tooth loading

曲线的横纵坐标；(2)过节点  $C$  (最低点) 作一直线为  $x$  坐标。并求曲线与  $x$  坐标之间所包围的面积  $S_1$ 、 $S_2$ 。此面积可用求积仪和数字积分仪求出。也可在坐标纸上数格求面积或称重求面积；(3)用所求得的面积  $S_1 + S_2$  除以曲线在横坐标上的投影长度  $AE$ ，而得到平均面积  $\bar{S}$ ；(4)用已标定好的温度标尺乘以  $\bar{S}$ ，求得积分温度  $\theta_{\text{flaint}}$ 。

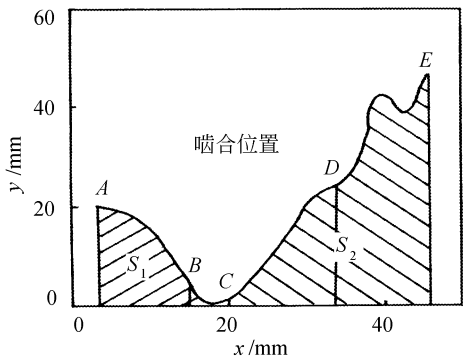


图 8 利用实测闪温曲线求解积分温度

Fig. 8 Computation of integral temperature by measured flash temperature curve

2.2.2 整体式齿轮副啮合时的积分温度求解 由于齿轮传动中存在单啮区与双啮区，若假定双啮区时两对同时啮合的齿面接触电阻相等，则在利用测到的温度分布曲线计算积分温度时，要特别注意到双啮区测到的温度是两对齿同时啮合的两个啮合点的闪温平均值。因此，在计算时，就要把双啮区温度曲线下所包围的积分面积乘以 2 计算。计算步骤如下：(1)由图 6 可见，相邻两节点  $C$  (最低点) 之间取出一个曲线波形，如图 9 所示；(2)计算小齿轮齿顶重合度  $\epsilon_1$  及小齿轮齿根重合度 (即大齿轮齿顶重

合度)  $\epsilon_2$ ，总重合度  $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$ ；(3)量取横坐标上两节点  $C$  之间的距离为  $l$ ；(4)从图形左边至右边量取三段长度  $(1 - \epsilon_2)l$ 、 $(\epsilon - 1)l$  及  $(1 - \epsilon_1)l$ ；(5)分别求  $(1 - \epsilon_2)l$ 、 $(\epsilon - 1)l$  及  $(1 - \epsilon_1)l$  所对应的三段曲线包围面积  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ；(6)求  $\bar{S} = (2S_2 + S_1 + S_3) / ((\epsilon - 1)l)$ ；(7)用以标定好的温度标尺乘以  $\bar{S}$ ，求得积分温度  $\theta_{\text{flaint}}$ 。

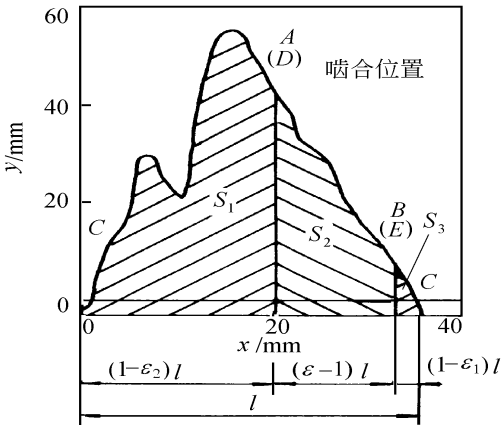


图 9 利用实测闪温曲线求解积分温度

Fig. 9 Computation of integral temperature by measured flash temperature curve

3 结 论

- (1)设计制造出可测出全齿面闪温的三片组合带电阻式齿轮结构。实验证明，这种结构是切实可行的。
- (2)测出钢(40Cr)对康铜制造的齿轮副齿面闪温分布曲线，曲线所表示的齿面闪温分布趋向与理论计算结果基本一致。
- (3)建立了利用动态热电偶测量到的齿面闪温分布曲线来计算齿面积分温度的一套方法。

参 考 文 献

[1] Niemann G, Lechner G. The measurement of surface temperature on gear teeth . Journal of Basic Engineering, 1965(11) : 641 ~ 651

[2] Terauchi Y, Miyao Y. On the measurement temperature flashes on gear teeth. Bulletin JSME, 1964 , 7(26) : 445 ~ 450

[3] 张有忱. 齿轮齿面摩擦系数变化的研究. 润滑与密封, 1990(5) : 22 ~ 25

## Visualization research of polymer melting mechanisms in intermeshing counter-rotating twin-screw extrusion

ZHU Lin-jie   GENG Xiao-zheng

(College of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract :** With visualization twin-screw extruder, the melting progressing of Polypropylene (PP) in intermeshing counter-rotating twin-screw extrusion was investigated. The influence of screw configurations and operational conditions on polymer melting were discussed. It showed that the structure and the conveying mechanism of screw elements were the decisive factors of polymer melting progressing. The solid-bed film melting and islands-sea melting were two typical melting models of polymer powder in intermeshing counter-rotating twin-screw extruder. The melting efficiency of polymer powder in islands-sea melting model was higher than that in the solid-bed film melting model.

**Key words :** polymer; melting; twin-screw extrusion; visualization technology

(上接第 41 页)

## Experiment research on measuring surface temperature on gear teeth by dynamic thermocouple method

ZHANG You-chen<sup>1)</sup>   MENG Hui-rong<sup>2)</sup>

(1) College of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2) China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract :** Surface temperature on gear teeth was measured by dynamic thermocouple method. A test gear construction consisting of three pieces and electric resistance was designed. Test results agreed with theoretical results on the whole. The method of calculating integral temperature by measured flash temperature curve was put forward.

**Key words :** gear; flash temperature; thermocouple; experiment

## 本刊诚征优秀外稿

本刊在今年“全国优秀高校自然科学学报及教育部优秀科技期刊”评比中荣获二等奖。并据中国科技信息研究所“中国科技期刊引证报告”,本刊 1998 年的影响因子为 0.143,居全国高校学报(自然科学版)第 32 位。为了更好地贯彻办刊宗旨,扩大刊物的影响,本刊拟从 2000 年开始,向国内外征求优秀稿件。文稿可选用中、英文撰写,要求具有创新性。来稿具体格式要求详见本刊的征稿简则。校外作者可通过邮局寄送文稿及软盘,或采用电子邮件投稿。对于校外来稿,本刊将尽快告知录用结果,优秀外稿将优先刊载。

欢迎广大校外作者踊跃投稿或来电查询各有关事宜。

e-mail: xuebao @ buct.edu.cn

Tel: (010) 64434926

北京化工大学学报编辑部