

齿轮磨损计算与测试方法及抑制技术

周长江¹, 汪红兵¹, 雷玉英¹, 刘忠明²

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;

2. 郑州机械研究所, 郑州 450000)

摘要: 齿轮是航空航天器、大型舰船、先进轨道车辆、电动汽车、智能机器人、高效能源机械等重大装备传动系的核心元件, 齿面磨损则是其最常见的失效形式. 有必要从理论与试验两方面, 研究齿面磨损量的确定方法及其抑制技术. 基于黏着磨损、疲劳磨损和能量磨损理论及材料磨损率, 对不同的齿面磨损模型及其计算方法进行分析. 按等效试件、比例试件和实际试件分3类试验方法, 分述其在齿轮磨损研究中的应用; 并对磨损量的常用测量技术, 即称重法、表面轮廓法、铁谱与光谱分析法进行探讨. 研究结果显示, 齿轮磨损量的预测需要根据摩擦副材料-结构特性、使役条件及其对应的失效形式选用合适的磨损模型和测算方法, 将理论分析、数值计算与测试技术密切结合. 在改进传统的硬齿面和润滑技术的同时, 固体润滑薄膜材料、耐磨减摩涂层和齿面复合强化等先进技术, 将为高性能齿轮产品及其装备的抗磨损设计提供重要的助力.

关键词: 齿轮传动; 齿面磨损计算方法; 齿面磨损测试方法; 磨损抑制技术

中图分类号: TH 132.4

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2018)07-0987-14

doi: 10.11936/bjtxb2018040011

Calculating and Measuring Methods for Gear Wear and Its Suppression Techniques

ZHOU Changjiang¹, WANG Hongbing¹, LEI Yuying¹, LIU Zhongming²

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: As core elements, gears are widely applied in aircrafts, large warships, advanced railway vehicles, electric automobiles, intelligent robots and power equipment. Since surface wear is a main failure mode of gear drives, the prediction methods and suppression techniques for tooth wear loss should be performed by both theoretical analysis and measuring techniques. According to adhesive wear, fatigue wear, energy wear theories, and material wear rate, different wear models and calculation methods for tooth surfaces were investigated first. Then, three tests (as equivalent, scale or real specimen in use) applied in investigation of gear wear, and weighing method, surface profiler, ferrography and spectral analysis were discussed. Results show that an available wear model and prediction method should be chosen according to the materials-structural characteristics, working conditions, failure modes of a gear drive, while the theoretical analysis, numerical simulation are combined with measuring techniques for determining the tooth wear loss. As the traditional hardened gears and lubrication techniques are improved, solid-film lubrication, wear-resistance and friction-reduction coating, and compound surface

收稿日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675168, 51775516); 湖南省重点研发计划资助项目(2016JC2001)

作者简介: 周长江(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事传动机械、机械摩擦与动力学方面的研究, E-mail: yangtsezhou@hnu.edu.cn

reinforcement are beneficial for the antiwear design of high-performance gears.

Key words: gear transmission; surface wear calculation method; surface wear measuring method; wear suppression technique

作为重要的机械基础元件, 齿轮被广泛应用于航空航天、轨道交通、海洋装备、能源机械等领域. 当前, 我国已成为世界齿轮制造大国, 2017年齿轮产品的产销规模已达2360亿元. 根据发达国家统计数据, 摩擦磨损消耗全世界约1/3的一次性能源, 60%的机械零部件因磨损而失效, 且50%以上的机械装备恶性事故与润滑失效或过度磨损相关^[1]. 对于高速、重载齿轮传动, 其功率损失主要源自齿面摩擦^[2-3]. 可见, 开展齿轮摩擦磨损研究, 具有显著的社会效益与经济效益. 复杂齿面的磨损计算、测试与抗磨设计将是高性能齿轮传动研究的重点与难点^[4].

磨损贯穿齿轮的全服役周期, 导致齿面材料持续损伤和脱落; 改变表面完整性和载荷分布, 增大传递误差和降低传动精度^[5-6]. 过度磨损还会引起振动与噪声^[7-9], 降低传动效率与平稳性, 诱发或加速齿轮失效^[10]. 随着齿轮向高速、重载、精密、高效与低噪等方向发展^[11], 传动系统对耐磨性的需求急剧增大. 齿轮磨损计算与测试技术的研究对于改善传动性能、增大承载能力、减少摩擦磨损及减振降噪等具有显著的意义. 齿轮磨损形式多样且机理各不相同, 很难建立一个普适的磨损模型或计算式. 测试齿面磨损量, 需加工等效试件或实际样件, 要求专门的试验机和特定的试验条件.

磨损抑制技术是以减小摩擦和降低磨损为目的的技术手段, 主要包括润滑、改性与改形. 润滑主要研究润滑介质的物理化学性质与摩擦副的几何、物理性能和工况参数之间关系. 改性是指通过各种表面涂层、镀膜和表面强化等手段改变齿轮表面的材料、结构和物理性质. 改形是指通过设计新齿形和轮齿修形, 或者利用表面微/纳加工手段改变表面的微观几何形态, 从而改善齿面接触性能. 对齿轮磨损的研究旨在揭示摩擦过程中运动阻力和能量耗散规律, 以及齿面损伤和材料流失的规律和机理, 寻求最有效的手段与技术来抑制磨损.

本文在现有的研究工作基础上, 对齿轮磨损计算方法与测试技术进行系统研究. 分别基于黏着磨损、疲劳磨损、能量磨损理论及材料磨损率, 对齿轮磨损最常用的几种计算方法进行探讨. 分析等效试件、比例试件和实际试件3类试验方法在齿轮磨损

测试中的应用; 对齿面磨损量称重法、表面轮廓法、铁谱与光谱分析法的工作原理进行分析.

1 齿轮磨损计算方法

Ludema^[12]统计了20世纪50—90年代的文献, 发现300多个磨损计算式. 这些式子或由不同的理论和假设推导所得, 或从特定的试验结果化归得出, 但大多不能直接用于齿轮的磨损量计算. 根据磨损机理, 齿轮磨损分为黏着磨损、疲劳磨损、磨粒磨损、化学磨损(或腐蚀磨损)、冲击磨损、微动磨损和冲蚀磨损. 其中, 前4种类型的磨损机理各不相同, 后3种磨损可视为前4种类型的组合^[13].

需特别指出的是, 齿轮磨损通常是几种机理共同作用的效果, 特定的结构参数与接触条件决定起主导作用的磨损机理. 接触状态发生变化, 磨损的类型可能发生转变. 下面针对齿轮传动中最为常见的几种磨损形式, 基于黏着磨损、疲劳磨损和能量磨损理论以及材料磨损率, 分别对齿面磨损的计算方法进行研究.

1.1 基于黏着理论的齿轮磨损计算

2个接触表面发生相对运动, 接触点黏着和焊合形成的黏着结点被剪断, 剪断的材料由一表面转移到另一表面上. 黏着磨损通常以小颗粒状从一个表面转移到另一个表面, 有时也会发生反黏附, 即被黏附的表面材料又回到原表面. 这种黏附和反黏附, 往往使材料以自由磨屑状脱落下来, 同时会沿着滑动方向产生不同程度的磨痕, 如图1所示. 按损坏程度, 黏着磨损分为轻微磨损、擦伤、咬焊、胶合等.

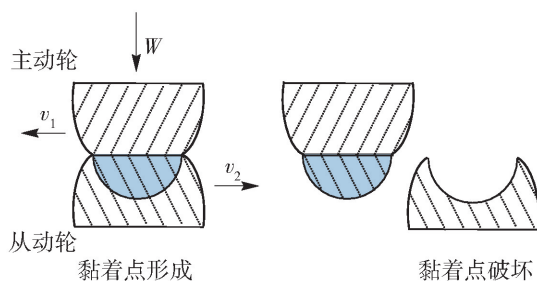


图1 黏着磨损计算模型

Fig. 1 Calculation model of adhesive wear

Holm^[14]、Burwell^[15]、Archard^[16]等先后提出过黏着磨损计算式,其中 Archard 磨损公式应用最为广泛,即

$$\frac{V}{s} = \frac{K}{3} \cdot \frac{W}{H} \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积; s 为滑移距离; W 为法向载荷; H 为较软材料的硬度; K 为量纲一的磨损系数。

式(1)中的磨损系数包含了摩擦副材料、润滑状态、接触温度等影响因素。摩擦副的材料和工况确定后,磨损系数为常量,可通过查表或者试验确定^[17]。式(1)经过变换,摩擦副表面任意一点 P 处的磨损深度为

$$h_p = \int_0^s k p ds \quad (2)$$

式中: k 为有量纲的磨损系数; p 为接触应力。

Anderson等^[18]将 Archard 的磨损公式推广到直齿轮磨损计算中,并提出了单点观测法。即把接触齿面离散成有限个观测点,通过单独计算每个观察点的磨损深度来表征齿面的磨损分布。该方法假设观测点在一个啮合周期内接触压力保持不变且滑移距离为定值,故观测点 P 处的磨损深度可表示为

$$h_{p,n} = h_{p,(n-1)} + k p_{p,n} s_p \quad (3)$$

式中: $h_{p,n}$ 和 $h_{p,(n-1)}$ 分别表示第 n 次和第 $n-1$ 次啮合后 P 点处的磨损深度; $p_{p,n}$ 为第 n 次啮合时 P 点的接触应力; s_p 为 P 点在单次啮合后的滑移距离。

Anderson^[19]在其博士论文中将轮齿啮合等效为半径连续变化的一对圆柱体接触,推导出了滑移距离 s_p 的解析式

$$\begin{cases} s_{p1} = 2a_H \cdot (1 - v_{p2}/v_{p1}) \\ s_{p2} = 2a_H \cdot (v_{p1}/v_{p2} - 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: s_{p1} 和 s_{p2} 分别为主动轮和从动轮在接触点处的滑移距离; v_{p1} 和 v_{p2} 分别为两齿轮在接触点处的切向速度; a_H 为 Hertz 接触半宽。

Anderson 的方法具有开创性,但未考虑观测点的接触应力和多次啮合后齿面形貌的改变。针对上述问题,Flodin等^[20]将观测点在一个啮合周期等分为 K 个时刻,计算每个时刻的接触应力和滑动速度;规定每经过 N 次啮合,更新齿面形貌并采用 Winkler 模型重算接触应力。于是,式(3)改写为

$$h_{p,n} = h_{p,(n-1)} + \Delta t \cdot k \cdot N \sum_{i=1}^K (p_{p_i} \cdot v_{p_i}) \quad (5)$$

式中: Δt 为单次啮合等分后的微元时间间隔; p_{p_i} 和 v_{p_i} 分别为每个啮合时刻的接触应力和滑动速度。

Flodin等^[21-22]随后将斜齿轮简化成多个沿轴

线堆叠并依次旋转微小角度的薄片直齿轮,将式(5)推广到斜齿轮磨损计算中。采用简化的 Winkler 接触模型估算接触压力,计算效率较高。但齿面接触弹性系数很难确定,且啮合齿对数目发生改变时,滑移距离的计算误差较大。针对该问题,Lundvall等^[23-24]将有限元法引入到磨损计算中,计算了直齿轮的齿面压力分布和滑移距离,但滑移距离的计算效率较低。Brauer等^[25]基于位置向量法建立了含误差直齿轮接触模型,推导出高效的滑移距离解析计算式;利用有限元法计算齿面压力分布,研究双侧啮合的齿面磨损。自此,滑移距离的解析计算与接触压力的有限元法分析相结合,在齿面磨损计算中被广为采用。Bajpai等^[26]根据精确的齿面坐标值和有限元接触模型,提出了考虑加工误差与齿廓修形的齿面磨损计算方法。Kahraman等^[27]基于 Bajpai 的方法,分析了不同的修形方法和修形量对斜齿轮磨损的影响。Park等^[28]将 Bajpai 的方法推广到准双曲面齿轮的磨损计算中,随后提出了半解析接触算法^[29]和表面插值算法^[30],显著地提高了滑移距离、接触压力和齿面磨损量的计算效率。最近,张俊等^[31]对直齿轮啮合偏差和微观修形对齿面磨损量的影响进行了研究;朱丽莎等^[32]考虑齿间动态载荷的分配,计算出齿面磨损量。

理想的齿轮润滑状态是完全弹流,但高速重载传动系统通常在混合或边界润滑下工作,接触压力由油膜和微凸体共同承担,其磨损过程与干摩擦的粗糙表面磨损有所差别。Wu等^[33]基于润滑膜的热解附机理建立了直齿轮磨损模型,较早开始研究弹流润滑对磨损的影响。Akbarzadeh等^[34]在 Wu 的基础上计算了微凸体和润滑膜所承担的载荷比,分析直齿轮在混合润滑中的稳态黏着磨损量。随后,Wang等^[35]对混合润滑的齿轮磨蚀进行仿真,指出磨损率主要由微凸体的瞬时接触压力与有效屈服应力的比值决定。Priest等^[36]改进了 Wu 根据油膜不足因子确定动态磨损系数的方法,提高了考虑润滑时齿面磨损量的计算效率。Masjedi等^[37]基于粗糙表面的弹塑性接触模型,推导出油膜厚度和微凸体接触比例的预测计算式,研究了微凸体分布方向对预测量的影响^[38]。随后,Masjedi等^[39-40]结合上述预测模型和润滑膜热解附理论,建立了混合润滑下界面摩擦因数和磨损率的计算模型,并用于直齿轮齿面稳态黏着磨损计算。此外,邹玉静等^[41]基于载荷分担理论,对斜齿轮进行混合热弹流润滑分析。

上述计算方法大多限于准静态工况,对动载荷

和啮合冲击的考虑不足. 实际上, 齿面动态接触过程中, 表面磨损与啮合力相互影响. 随着齿轮动力学的进展, 动载荷对齿轮磨损的影响受到了关注. 2001年, Kuang等^[7]将动载荷引入 Flodin等^[20]的模型, 研究了动载荷对齿轮磨损的影响. Yuksel等^[42]在 Bajpai等^[26]的模型中引入了动载荷, 并推广到行星齿轮系统的磨损计算. Wojnarowski等^[43]综合考虑轮齿刚度、法向背隙、齿面摩擦、转动惯量、变传动比等因素确定了动载系数, 并研究了上述因素与齿面磨损的相互作用. 文献[7, 42-43]的研究均表明, 系统的动态响应对齿面磨损具有显著影响. 此外, Ding等^[44]和 Liu等^[45]将 Priest等^[36]提出的动态磨损系数引入到直齿轮磨损计算中, 基于多因素激励非线性动力学模型, 研究了齿面磨损与系统动态响应之间的耦合作用. 结果显示: 齿面磨损在大幅改变系统振幅和频率的同时, 动态工况也会显著影响齿面磨损量及其分布. 另外, Ding^[5]在其博士论文中将动载荷引入到斜齿轮磨损计算, 发现动载荷对斜齿轮磨损量的影响较直齿轮小. Osman等^[46]提出了一种针对宽齿直齿轮和斜齿轮的轻微磨损计算模型, 并比较分析了准静态和动载荷下的齿轮磨损.

最近, 笔者^[47]基于反向圆锥滚子等效接触模型和 Archard 磨损计算通式, 提出了一种适用于标准斜齿轮齿面黏着磨损的计算方法. 由时变接触线长百分比和弯-扭-轴耦合动力学模型确定齿面载荷, 根据等效接触模型和 Hertz 接触理论计算齿面压力和滑移距离, 求出了准静态与动态载荷下的齿面磨损量. 通过将主动轮磨损曲线与文献[21-22]结果比较, 验证了计算方法的正确性, 进而分析了几何与工作参数对磨损量的影响.

基于黏着磨损理论计算齿面磨损量的方法, 大多基于 Archard 磨损公式. 本小节考虑了加工误差、安装误差和齿廓修形等因素, 重点阐述了式(1)在多种齿形磨损计算中的应用. 研究了不同润滑状态下和多种载荷(准静载荷或动载荷)条件下齿轮磨损的计算方法.

1.2 基于疲劳理论的齿轮磨损计算

齿轮副做纯滚动或滚滑复合运动, 粗糙表面的微凸体承受交变接触应力的作用而发生弹塑性变形, 表层材料出现疲劳剥落形成凹坑, 称为表面疲劳磨损. 疲劳磨损是裂纹形成和扩展的过程, 按照裂纹萌生位置的不同, 分为表层萌生疲劳磨损和表面萌生疲劳磨损. 前者多发生于一般质量的钢质滚动摩擦副, 后者多发生于高质量钢材构成的滑动摩擦

副, 通常这2种破坏方式同时存在. 此外, 按照剥落坑外形特征, 可将疲劳磨损分为鳞剥与点蚀. 润滑良好的闭式齿轮传动通常会出点蚀.

齿轮长期在循环交变接触应力的作用下运转, 容易引起表面疲劳剥落. 当循环交变接触应力次数不多, 接触应力较小时, 齿轮表面只产生少量的小麻点, 对机器正常运行几乎没有影响. 但当循环交变接触应力次数增多, 接触应力较大时, 接触疲劳磨损将导致传动系统失效. 基于克拉盖尔斯基^[48]提出的疲劳磨损计算式, 齿轮疲劳磨损计算模型如图2所示.

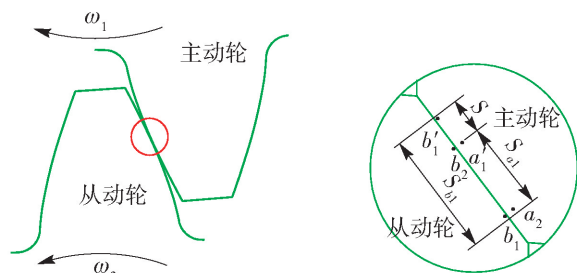


图2 齿轮疲劳磨损计算模型

Fig. 2 Calculation model of gear fatigue wear

在某一啮合时刻, 主动轮齿面上的点 a_1 和从动轮齿面上的点 b_1 处于接触状态. 经过短暂的时间后, 主动轮从接触点 a_1 运动到点 a'_1 , 移动距离为 S_{a1} ; 从动轮从接触点 b_1 运动到点 b'_1 , 移动距离为 S_{b1} . 主动轮的滑动系数 λ 可表示为

$$\lambda = \frac{|S_{b1} - S_{a1}|}{S_{a1}} \quad (6)$$

一次啮合过程中, 轮齿接触面内的滑动摩擦距离 S 为

$$S = 2a\lambda \quad (7)$$

式中 a 为赫兹接触半宽.

n 个周期总的摩擦距离为

$$L = Sntz_s \quad (8)$$

式中 z_s 为相啮合齿轮的副数.

磨损深度为

$$h = I_h L \quad (9)$$

式中 I_h 为磨损率.

齿面改性、润滑剂、工作状态等因素对磨损深度的影响可用多个系数表征, 此时疲劳磨损深度的表达式为

$$h = I_h Sntz_s W_M W_L W_P \quad (10)$$

式中: W_M 为齿面改性系数; W_L 为润滑系数; W_P 为载荷系数.

点蚀作为齿轮疲劳磨损最为常见的失效形式, 受到了传动界广为关注. 潘尔顺等^[49] 基于边界元理论, 提出用三次样条曲线拟合磨损后的齿面, 结合克拉盖斯基的疲劳磨损计算式, 分析直齿轮的疲劳磨损. 注意到齿面疲劳磨损与剥层磨损机理的相似性, 王淑仁等^[50] 建立了闭式齿轮传动的疲劳磨损模型, 给出了相关参数的计算方法. 宋永乐等^[51] 以点蚀校核标准 ISO/TR15144 - 1:2010 为基础, 对齿面微点蚀进行研究, 并指出齿面粗糙度、变位系数、油温对微点蚀具有明显的影响. Glodež 等^[52]、Flasker 等^[53] 提出了滚滑复合运动时接触表面点蚀的二维计算模型, 预测的直齿轮的点蚀形状与试验吻合良好. Aslantas 等^[54] 提出一种预测奥贝球铁直齿轮点蚀的数值模型, 考虑了晶相对点蚀的影响. Li 等^[55] 提出混合润滑状态下齿面微点蚀预测模型, 演示了微点蚀的演变进程. Brandão 等^[56-58] 结合微点蚀和轻微磨损建立了齿面疲劳磨损模型, 并根据 FZG 齿轮试验台的测试结果验证了上述模型.

齿轮疲劳磨损的计算模型, 建立在接触力学与断裂力学基础之上, 磨损率是其最为重要的参量. 由于影响疲劳磨损的因素较多, 磨损机理相当复杂, 建立一个与复杂传动系统高度契合的疲劳磨损计算模型困难较大. 实际齿轮传动中, 齿面黏着与疲劳通常是同时发生. 因此, 将 Archard 黏着磨损模型与表面疲劳接触失效模型相结合, 研究齿轮表面的复合磨损, 将成为一种趋势. 但如何识别接触表面的黏着区与点蚀区, 如何准确地给出 2 种磨损的权值, 是该方法的难点.

1.3 基于能量磨损理论的齿轮磨损计算

除了根据黏着磨损和疲劳磨损理论计算齿面磨损的方法, 能量磨损理论为齿轮磨损的定量计算提供了另一种思路^[59]. 1973 年, Fleisher 提出能量磨损理论, 其依据是摩擦过程中能量消耗会产生磨损. 能量磨损理论的基本观点是: 摩擦功大部分以热能的形式散失, 但仍有少部分以势能的形式储存在摩擦副材料中; 当一定体积的材料储能达到临界值时, 则以磨屑或磨粒的形式从基础表面剥落. 对于一定的磨损形式, 齿轮磨损可以解释为摩擦功转化与耗散的过程.

Fleisher 提出的摩擦功与磨损体积关系式为

$$E_R = \frac{\tau_y \cdot \Delta s}{\Delta h} \tag{11}$$

式中: E_R 为磨损单位体积所消耗的能量; τ_y 为单位面积上的摩擦力; Δs 为滑动距离; Δh 为磨损深度. 式

(11) 变形可得到线磨损度的计算式

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\tau_y}{E_R} \tag{12}$$

其中

$$E_R = \frac{nE_b}{K(\xi n + 1)\gamma} \tag{13}$$

式中系数 K, ξ, γ 与摩擦副材料的物理性质和组织结构有关, 临界摩擦次数 n 受载荷大小和材料吸收及存储能量的能力影响.

章易程等^[60] 推导了基于摩擦功原理的高副滑动磨损计算式, 其中齿轮副的相对运动关系如图 3 所示. 假定稳定工况下, 摩擦功 dW 与脱落材料的体积 dV 成正比, 则对于主动轮, 有

$$dV = kdW \tag{14}$$

式中 k 为磨损系数, 表示单位摩擦功产生的齿面磨损体积.

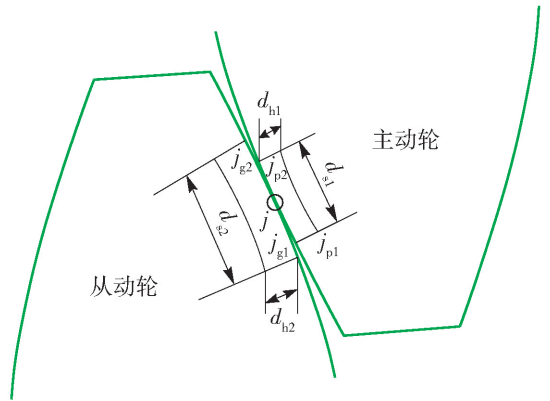


图3 齿轮副的相对运动

Fig.3 Relative motion of gear pair

M 个时间步长后, 齿面上一点 j 的磨损深度为

$$h_j = \frac{kf}{B} \sum_{i=1}^M (\lambda_{i,j} n_{i,j} N_{i,j} dt) \tag{15}$$

式中: B 为齿宽; n 为转速; λ 为主从动轮的相对滑动系数; N 为接触点上的正压力. 根据式(15), 考虑齿间动态载荷的齿轮副磨损计算结果, 与实际磨损分布比较符合.

1.4 基于材料磨损率的齿轮磨损计算

磨损率是衡量材料耐磨性的一个重要指标, 最直接的方法是通过试验获得. 一般来说, 材料的磨损率分为以下 3 类.

1) 线磨损率 K_1 . 线磨损率即摩擦副滑动单位距离所对应的界面法向尺寸的减少量. 若磨损过程中的移动距离为 s , 垂直表面的磨损厚度为 h , 则平均单位位移的磨损厚度为 h/s , 称为平均线磨损率. 对于随时间变化的磨损过程, 则磨损率用磨损厚度对

移动距离的导数表示,即 dh/ds . 线磨损率是一个量纲一的量,其表达式为

$$K_l = \frac{h}{s} = \frac{dh}{ds} \quad (16)$$

2) 体积磨损率 K_v . 体积磨损率是摩擦副滑动单位距离所对应的界面体积的减少量,单位为 m^2 . 若磨损体积为 V ,则体积磨损率可表示为

$$K_v = \frac{V}{s} = \frac{dV}{ds} \quad (17)$$

3) 质量磨损率 K_m . 质量磨损率是摩擦副滑动单位距离所对应的界面质量的减少量,其单位为 kg/m^3 . 若磨损质量为 M ,则质量磨损率可表示为

$$K_m = \frac{M}{sA_a} = \frac{dM}{A_a ds} \quad (18)$$

式中 A_a 为名义接触面积.

根据材料的磨损率,可求出该类材料的齿轮副在特定使役条件下的齿面磨损量. 标准安装的直齿轮和斜齿轮无负载接触时属于线接触,基于齿轮材料的磨损率,通过引入“磨损步长”,江亲瑜等^[61-62]提出了线接触零件磨损的计算模型,其计算原理如图4所示.

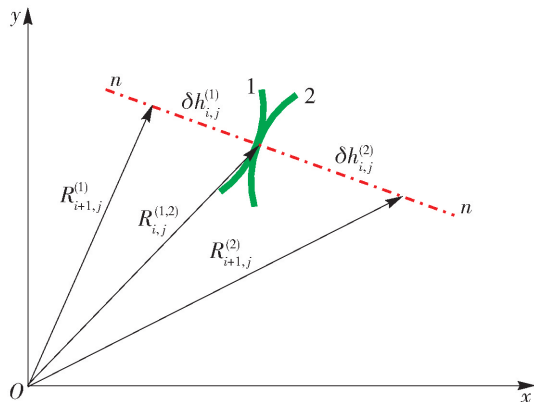


图4 线接触磨损计算模型

Fig. 4 Calculation model of line contact wear

图4所示为摩擦副1-2接触区内的某个接触点 j 在第 i 个磨损步长内的变位图,该摩擦副在 j 点处接触, $R_{i,j}^{(1,2)}$ 为第 j 个接点某个磨损步长之前的磨损矢径, $R_{i+1,j}^{(1)}$ 、 $R_{i+1,j}^{(2)}$ 分别为第 j 个接点经过一个磨损步长后的磨损矢径. 该磨损步长内的微元磨损量为

$$\delta h_{i,j}^{(1)} = L^{(1)} K^{(1)} n \delta t \quad (19)$$

$$\delta h_{i,j}^{(2)} = L^{(2)} K^{(2)} n \delta t \quad (20)$$

式中: $L^{(1)}$ 、 $L^{(2)}$ 分别为摩擦副1、2单位时间内的磨损, mm ; $K^{(1)}$ 、 $K^{(2)}$ 分别为摩擦副1、2的量纲一的材料磨损率; δt 为完成一个磨损步长所需的时间; N 为单位时间内摩擦副1、2相互接触的次数.

何荣国等^[63]基于线接触零件磨损模型建立斜齿轮磨损的计算模型,考虑温度影响计算不同啮合时刻的磨损量. 李宝良^[64]考虑温度和载荷对线接触齿轮磨损的影响,得到了线接触零件磨损的计算模型. 此后,宋文成^[65]采用线接触零件磨损计算式研究斜齿轮的磨损时,注意到机械功相近时直/斜齿轮的磨损量接近.

基于磨损率的齿轮磨损计算模型,通常是借助试验得到,而非直接基于磨损理论. 通过测试手段得到的磨损率,主要依赖摩擦副的材料-结构特性和试验条件. 针对特殊的摩擦副和使役条件,做一般性推广应用的难度较大,因此,较难建立一个通用性较强的齿轮磨损模型.

不同的使役条件下,磨损量计算方法略有差别. 闭式齿轮副在低速重载工况下或润滑不良时,齿间油膜(或边界膜)厚度不足以将界面轮廓峰完全隔开,此时极易发生粗糙峰接触而导致黏着磨损,计算时应以黏着磨损为主. 闭式齿轮副在润滑良好的情况下,若长期在低于材料弹性极限的交变应力下工作,极易发生齿面疲劳磨损,计算时应以疲劳磨损为主. 基于能量磨损和材料磨损率的齿面磨损计算模型,能够有效避免依靠单一磨损机理计算造成理论依据不充分的争议. 特别是在动态载荷下,能量磨损计算模型的准确度较高. 对于标准安装的线接触齿轮,通过试验获得齿轮副材料的磨损率后,可以快速地计算其齿面磨损量.

影响齿轮磨损的因素较多,磨损机理和实际工况密切相关,因此很难建立与实际传动系统完全相符的磨损预测模型. 上述关于齿轮磨损的计算方法,均存在一定的局限性:1) Archard黏着磨损模型虽然广泛应用,但是磨损深度和压力之间线性假定与实际工况存在较大的差别. 另外,磨损系数的确定难度很大. 2) 疲劳磨损计算模型依据关键参量磨损率而建立,通过滑动摩擦距离来计算磨损深度. 但疲劳磨损模型中3个系数(W_m 、 W_L 、 W_p)很难确定,且接触疲劳理论在应用于复杂齿轮传动系统时仍需进一步完善. 3) 基于能量磨损理论的齿轮磨损计算方法,将磨损视为部分摩擦功的转化与耗散过程,原理清晰且计算模型非常简明. 其难点在于如何精确地确定耗散摩擦功与转化为储存势能的摩擦功的比例因子. 4) 基于材料磨损率的齿轮磨损计算方法,其精确性较大程度依赖于磨损率. 由于摩擦副的磨损率与材料-结构参数及使役参数等诸多因素密切相关,故该方法的普适性通常受限于试

验. 可见, 建立精确的齿轮磨损预测模型, 除了针对摩擦副失效形式选用相适应的磨损机理, 更需要将理论计算方法与试验测试技术等密切结合.

2 齿轮磨损测试技术

在齿面磨损计算的发展中, 磨损量的测试技术起到了关键作用. 齿轮磨损的测试方法包含试验方法设计和磨损量测量技术两部分. 目前, 常用的齿轮磨损试验方法大致归为基于等效试件、比例试件和实际试件 3 种类型. 齿轮磨损测试的难点是测定磨损量, 其测定方法主要包括称重法、表面轮廓法、铁谱分析法和光谱分析法^[66].

2.1 基于等效试件的齿面磨损测试

基于接触点对综合曲率半径等效的原理配置摩擦副试件, 根据给定的工况条件在通用的摩擦磨损试验机上对等效试件进行试验. 通常采用四球试验机模拟点接触表面、圆盘试验机模拟线接触表面、销盘试验机模拟面接触表面的摩擦磨损状况. 下文则重点阐述基于等效试件在圆盘试验机上研究齿面的磨损机理及影响因素分析.

根据啮合点曲率半径等效原理, 直齿圆柱齿轮单对轮齿的啮合可等效为半径不断变化的一对圆盘接触^[67]. 常见的双圆盘试验机, 试件布置如图 5 所示. 上部圆盘(试件)和下部圆盘分别由单独的电机驱动, 模拟不同的齿面滑滚比. 下部圆盘修缘后可实现椭圆接触. 采用气动或液压加载系统通过加载杆对两圆盘施加法向力; 带有温度控制器的油泵提供润滑油并对油温进行控制, 将润滑油供应到接触点的入口侧以确保供油充足. 通过改变试件材料、工况(例如法向载荷和滑滚比)、润滑油油品、供油

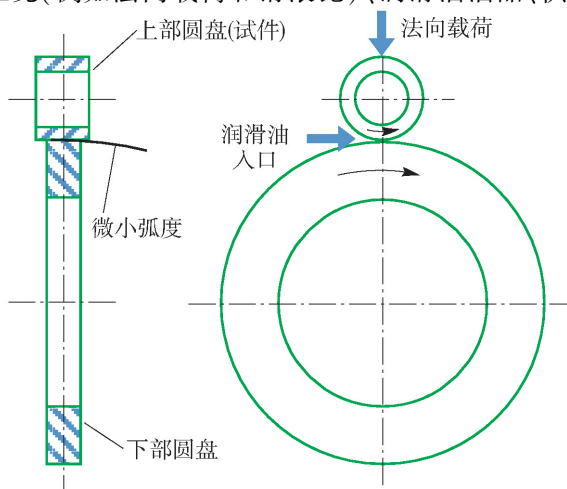


图 5 双圆盘试验机上试件的布置

Fig. 5 Specimen arrangement of the two-disk machine

量、油温等, 可模拟多种因素对齿面磨损的不同影响.

Wu 等^[68]在圆盘试验机上研究了滑滚比对齿面磨损率的影响, 结果表明: 在一定范围内, 磨损率随滑滚比的增大而降低; 继续增大滑滚比到某阈值, 磨损率反而迅速上升. 李宝良等^[69]研究了干摩擦和润滑不良时齿面载荷对磨损量的影响, 发现齿面磨损的质量随载荷接近似指数规律变化, 据此得到磨损量的载荷因子. Martins 等^[70]研究了高接触压力、大滑滚比及润滑不良的齿面碳铬复合涂层的磨损特性, 发现该涂层具有较好的减磨和抗胶合能力. Bergseth 等^[71]将 3 种不同的圆盘试件在 2 种润滑油中进行了磨损试验, 结果显示表面微观形貌和润滑剂之间的耦合对齿面磨损有不同程度的影响. 罗双强^[72]研究了干摩擦状态下载荷、速度、滑滚比和粗糙度对圆盘滚子试件磨损率的影响, 基于 Archard 磨损模型反推出磨损系数与时间的关系式.

通过等效试件在圆盘试验机上模拟齿轮磨损, 具有试件几何形状简单、试验参数易控制、结果重现性好、费用低等优点. 该方法存在的不足有: 1) 每对圆盘只能模拟齿廓上一个特定的啮合点, 受齿形参数和工作参数影响齿面上每个接触点的磨损理论上都不一样; 2) 无法反映轮齿啮合时的载荷波动或啮合冲击对齿面磨损的影响; 3) 圆盘试件间润滑油膜的形成机制与实际轮齿间动压油膜的形成机制不完全相同, 因此对磨损的影响也不尽相同.

2.2 基于比例与实际试件的齿面磨损测试

采用比例试件(齿轮几何尺寸、工作参数等按一定的比例缩小)或实际齿轮试件进行磨损测试, 需要在专门的摩擦磨损试验机或台架上进行, 其中以封闭功率流试验机居多. 该类试验机通常由电机驱动, 一般采用杠杆或液力加载, 在陪试齿轮和试验齿轮及 2 根传动轴之间形成封闭的功率流. 其测试原理如图 6 所示.

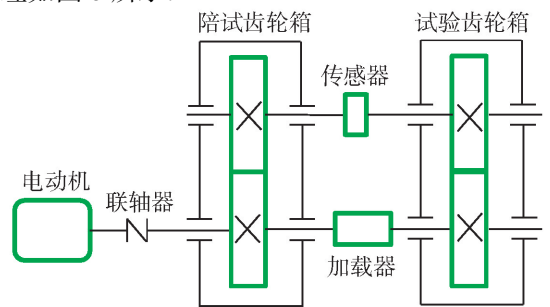


图 6 封闭功率流式齿轮磨损试验台

Fig. 6 Power flow closed gear wear test-bed

封闭功率流可实现部分能量的循环利用,电机输入的能量仅用来克服传动系统中各零部件之间的摩擦损耗.以FZG为代表的封闭功率流齿轮试验机,其试验齿对的加工与装配、试验速度、润滑油温度、加载力级等均已形成了较完善的标准,应用非常广泛.FZG试验机既能用于评定不同齿轮材质的抗磨损能力,还能用于评定齿轮或润滑油品的抗点蚀能力以及润滑剂的承载能力.

新齿形的耐磨性和齿面改性后抗磨损能力评估,通常需要借助磨损试验.Flodin^[73]对低速重载直齿轮进行轻微磨损试验,利用三维触针式测量仪器测出磨损前后的齿面形貌.对比结果显示:节圆附近的磨损量最小,齿根与齿顶处的磨损较为严重;啮合齿对数发生改变处,磨损量也有所增加.徐承俊等^[74]对渐开线标准齿轮和变位齿轮,以及摆线-渐开线复合齿形在低速重载下进行磨损对比试验,结果显示复合齿形的磨损量和磨损率均比渐开线齿形的小.Ahmed^[75]研究了圆弧齿轮硬化层深度、硬度及载荷对齿面磨损的影响,发现随着载荷的增加,磨损率缓慢增大;随着硬化层硬度和深度的增加,磨损率先减小后增大.韩志武等^[76]对仿生非光滑形态齿轮和正常光滑形态齿轮进行了磨损试验,发现前者较后者的耐磨性提高了20%.于敏等^[77]对改性前后的齿轮进行对比试验,发现经Mo离子注入改性后,齿轮的干运转能力有了较大提高.陈海峰等^[78]针对某型减速器圆柱齿轮磨损严重的问题,通过激光共聚焦显微镜、白光干涉仪和硬度计分别对齿轮的齿面微观形貌和表面硬度进行检测,发现主动轮、从动轮齿表面粗糙度与硬度不匹配是导致磨损失效的主要原因.

基于比例或实际试件的磨损试验,也常应用于油品对齿轮承重能力评估研究中.Höhn等^[79]分析了油温对4种失效模式(磨损、胶合、微点蚀、点蚀)的影响,认为温度升高一方面使润滑油黏度降低导致膜厚变薄,加速失效;另一方面会增强添加剂的化学活性,有利于润滑膜(层)的形成,延缓失效.Amarnath等^[80]分析了油膜厚度对轮齿刚度的影响,认为工作温升使轮齿的表面缺陷增大,加速齿轮的磨损.Krantz等^[81]基于NASA高速齿轮疲劳磨损试验,分析了润滑剂黏度和添加剂种类对齿面磨损的影响,发现磨损率与润滑油的黏度及油膜比厚成反比,且平均磨损率与接触疲劳寿命呈近似的指数关系.Brandão等^[82]测得了多种工况下直齿轮的平均磨损系数,对比结果表明:润滑油中基础油料的种类

对磨损系数的影响较大,油膜比厚对磨损系数的影响呈强非线性,载荷增大则会使磨损系数增大.Martins等^[83]研究了渗碳齿轮在2种工业齿轮油润滑下的抗微点蚀性能,证实使用酯润滑剂作为工业齿轮油的优点.

采用不同类型的试件进行齿轮磨损试验,各有其优缺点.基于等效试件的试验,环境条件和工况参数容易控制,试验数据的重复性较高,且试验周期短,试验条件的变动范围较宽,短时间可获得大量的数据.但由于试验条件与实际工况的一致性较差,且一对试件只能等效一个工作点,试验结果的实用性通常不太理想.因此,基于等效试件的磨损试验主要用于各类磨损机理及其影响因素的研究,以及齿面摩擦副材料、工艺和润滑剂性能的评价.基于比例试件的试验,试验条件接近实际工况,试验结果的可靠性较高.通过强化和控制试验条件,短时间内可获得足量的数据,亦可用于分析部分因素对磨损量的影响度.基于比例试件的磨损试验,大多用于校核等效试件试验数据的可靠性和齿轮抗磨损设计方案的有效性.基于实际试件的试验,测试数据的真实性和可靠性最好.但台架结构复杂,试验条件严苛,费用高、周期长;试验结果是多种影响因素的综合体现,有时很难对测试结果进行影响因素分析.应当指出,齿面磨损性能是齿轮传动系统在特定条件下的综合性能,试验结果的普适性往往较低.

2.3 齿面磨损量的测量方法

常用的齿轮磨损量测量方法包括称重法与表面轮廓法、铁谱与光谱分析法,以及齿轮测量中心法等.

称重法是通过称量试件试验前后的质量变化来确定磨损量,其优点是原理简单且易于操作.缺点则是:轮齿磨损量较小,需要使用高感量的分析天平;受测量范围的限制,称重法仅适用于小试件;多次停机测量,反复拆装、清洗、烘干使得操作烦琐;难以确定磨损位置及其分布.表面轮廓法需要使用高精度的表面轮廓仪,通过直接测量磨损前后齿廓的变化来确定磨损量.该方法最大的优点是可以确定齿面上磨损量的分布,但测量过程较复杂、被测件的尺寸和形状受测量范围限制.

油液铁谱分析是利用高梯度强磁场的作用,将油样中的微小磨粒有序地分离,并借助不同的仪器对磨屑的形状、大小、成分、分布密度等进行定性和定量观测,判断试件的磨损状况.光谱分析则是通过测定油液中各种物质的发射或吸收光谱来确定物

质的成分和质量分数.铁谱分析包括油液取样、铁谱制谱、磨粒分析等,主要仪器是铁谱仪.胡元哲^[84]等系统性地介绍了铁谱分析的原理、样品的制备方法和分析步骤,对齿轮、滚动轴承与滑动轴承3种摩擦副在磨合磨损、正常磨损、异常磨损阶段磨粒的辨识特征进行了分析.Feng等^[85]基于可视化铁谱仪和磨粒分布指数,提出对齿面的磨损状况进行在线定量分析与监测.油液光谱分析则是通过测定油液中各种元素发射或吸收的光谱来检测元素的类型和质量分数.可检测油液中磨粒的成分及质量分数,判断零部件磨损状态及变演;亦可检测油液中添加剂的状况及油污程度.Atkin等^[86]通过快速加载齿轮磨损试验,比较研究了原子吸收光谱法、X射线荧光光谱、颗粒计数法和铁谱等多种状态监测方法在齿面磨损与点蚀检测中的有效性.Yardley等^[87]提出以润滑油中的磨粒数量,作为矿用齿轮传动发生严重疲劳破坏时的损伤度评价指标.Wu等^[88]根据三维磨屑模型和磨屑提取、追踪与重构算法,提出了一种在线的磨屑分析方法.

需要指出的是,光谱分析只能检测尺寸范围为 $0.1 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 的磨屑,而铁谱分析可检测从 $1.0 \mu\text{m}$ 到上百 μm 量级的微粒.因此,铁谱分析在齿轮磨损测试中应用更广.但铁谱分析过程较复杂,比较依赖操作水平,且分析结果具有一定的随机性.

齿轮测量中心采用坐标测量原理,通过测量磨损前后齿轮的实际坐标值并进行比较即可得出磨损量.齿轮测量中心一般由主机、数控单元、数据采集单元、通信接口、计算机及外设、测量软件和数据处理软件等组成,具有高效率、高精度、易操作、可维修、可升级等特点^[89].其测量对象广泛,不局限于渐开线或直线齿廓,还可测量齿轮刀具、锥齿轮、蜗轮和蜗杆等回转类零件.由于具有突出的优势,齿轮测量中心在很多大型复杂机构中都得到了应用^[90].

针对磨损故障信号的非平稳性特点,可利用振动信号诊断齿面磨损^[91-92].特定工况下的齿轮副,通过齿轮磨损的机理分析,识别磨损发生时的传动特征.即从已知故障到征兆(由因求果),是齿轮正问题的求解过程.诊断齿轮磨损时,若根据故障特征反推可能的磨损类型,则是由果求因,是齿轮反问题的求解过程.齿面磨损会显著影响系统的动态性能,通过测定齿轮副的动态特性,分析时域内的各频率成分等与齿面磨损相关的信息,为齿轮的磨损故障诊断提供一种新思路.振动分析是齿轮故障诊断

的一种手段,若能建立齿面磨损量与振动信号间的强关联性,基于动态信号分析齿面磨损度则不失为一种有效的方法.

3 齿轮磨损抑制技术

齿轮磨损的计算方法与测试技术都是手段,其最终目的是为了提提高齿面的抗磨损能力,延长传动系统的服役周期.高耐磨性与可靠性将成为新一代高性能齿轮的关键技术特征,抗磨损设计与制造将会成为新的研究热点.除了开发先进的齿轮材料,改进传统的硬齿面技术(喷丸、渗碳、渗氮、碳氮共渗等)和润滑方式,下列新技术特别值得关注^[1,93-95].

1) 微观磨损机理研究.由于齿面磨损在宏尺度上的多样性和多元化,因此较难形成统一的齿面材料去除机制.随着材料科学向微纳尺度的深入,未来应试图从微观或分子-原子层面解释齿面磨损机理,构建磨损过程的量化模型,为齿面磨损抑制技术的开发提供理论基础.

2) 固体润滑薄膜材料.固体润滑薄膜材料是将固体润滑剂覆盖在齿轮副的摩擦表面,使其成为具有一定自润滑性能的干膜,获得良好的润滑效果.它分为硫属化合物、软金属和碳基固体润滑薄膜等多种类型.其中,碳基薄膜能够改善齿面的耐磨性和耐腐蚀性,在齿轮抗磨损设计上具有广泛的应用前景.

3) 齿面耐磨减摩涂层.耐磨减摩涂层分为单组分涂层、多元和多层复合涂层、梯度和超点阵,以及具有纳米结构的涂层、智能涂层等.至今为止,尚未形成公认的摩擦学表面涂层理论和设计标准.齿面耐磨减摩涂层,可能是提升齿轮表面性能的重要潜在技术.

4) 齿轮复合强化技术.将传统技术和新技术相结合,如将齿轮表面经过“等离子渗氮+类金刚石膜”复合强化后,表面硬度与耐磨性均比采用镀类金刚石膜的强化效果要好.复合强化在新一代齿轮表面强化技术开发中具有显著的优势.

表面强化技术可以提高齿面的硬度和耐磨性,但齿面磨损仍然不可避免.基于表面处理后的力学性能,分析其各种强化方法下的微观磨损机理.从材料的原子级去除机理、材料的低损伤甚至无损伤去除机制,以及磨损过程量化模型的构建,建立较完善的磨损数值计算模型,并通过分级试验来验证计算模型的正确性.基于成熟的理论和模型实现齿面

磨损的量化研究,以指导高性能齿轮产品及其装备的抗磨损设计.

4 结论

1) 齿轮磨损的相关参量众多,很难建立与实际系统完全相符的磨损预测模型.即使是应用最为广泛的 Archard 黏着磨损模型、疲劳磨损模型或基于能量磨损理论的齿面磨损计算模型,均存在诸多局限性.

2) 基于等效试件、比例试件和实际试件的3类齿面磨损试验,分级设置,各有其侧重点和目的,且各具优缺点.齿面磨损是齿轮系统在特定条件下多种因素综合作用的结果,因此试验结果的普适性往往较低.

3) 齿轮磨损量的测量技术按离线和在线测量分为两大类.离线测量的称重法与表面轮廓法,以及在线测量的铁谱与光谱分析法,按操作复杂度,测量范围、精度,以及与实际齿面磨损的相符度等各具特点但又有各自的不足.

4) 精确预测齿轮磨损量及其分布律,需要针对特定的失效形式选用相适应的磨损模型、试验方法和待测量,需要将理论分析、数值计算方法与试验测试技术密切结合.改进传统的硬齿面和润滑技术的同时,固体润滑薄膜材料、齿面耐磨减摩涂层和齿轮复合强化等先进技术,将为高性能齿轮产品及其装备的抗磨损设计提供重要助力.

参考文献:

- [1] 中国科学技术协会. 2014—2015 机械工程学科发展报告:摩擦学[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2016: 3.
- [2] MASATOSHI Y, CHOTARO N, RYOZO N, et al. Study on frictional loss of spur gears (concerning the influence of tooth form, load, tooth surface roughness, and lubricating oil) [J]. Tribology Transactions, 1991, 34(1): 138-146.
- [3] MICHLIN Y, MYUNSTER V. Determination of power losses in gear transmissions with rolling and sliding friction incorporated [J]. Mechanism & Machine Theory, 2002, 37(2): 167-174.
- [4] 周长江. 多种载荷下齿轮弯曲强度与齿面摩擦因数的计算方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
ZHOU C J. Research on calculating methods for bending strength under various loading conditions and the coefficient of friction on surface on gear teeth[D]. Changsha: Hunan

- University, 2013. (in Chinese)
- [5] DING H. Dynamic wear models for gear systems [D]. Ohio: The Ohio State University, 2007.
- [6] ATANASIU V, OPRISAN C, LEOHCHI D. The effect of tooth wear on the dynamic transmission error of helical gears with smaller number of pinion teeth [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 657: 649-653.
- [7] KUANG J H, LIN A D. The effect of tooth wear on the vibration spectrum of a spur gear pair [J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2001, 123(3): 311-317.
- [8] CHOY F K, POLYSHCHUK V, ZAKRAJSEK J J, et al. Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system [J]. Traffic, 2015, 15(9): 895-914.
- [9] MACKALDENER M, FLODIN A, ANDERSSON S. GDN-5 Robust noise characteristics of gears due to their application, manufacturing errors and wear (gear dynamics and noise) [C] // The Proceedings of the JSME International Conference on Motion and Power Transmissions. Kyoto: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2017: 21-26.
- [10] CHEN Y, MATUBARA M. GSD-2 Effect of automatic transmission fluid on pitting fatigue strength of carburized gears (gear strength and durability) [C] // The Proceedings of the JSME International Conference on Motion and Power Transmissions. Kyoto: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2001: 151-155.
- [11] 赵韩, 吴其林, 黄康, 等. 国内齿轮研究现状及问题研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 11-20.
ZHAO H, WU Q L, HUANG K, et al. Status and problem research on gear study [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 11-20. (in Chinese)
- [12] LUDEMA K C. Mechanism-based modeling of friction and wear [J]. Wear, 1996, 200(1/2): 1-7.
- [13] 王振廷, 孟君晟. 摩擦磨损与耐磨材料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013: 49-50.
- [14] 赵源, 高万振, 李健. 磨损研究及其方向[J]. 材料保护, 2004, 37(增刊1): 18-34.
ZHAO Y, GAO W Z, LI J. Study on wear and its direction[J]. Materials Protection, 2004, 37(suppl 1): 18-34. (in Chinese)
- [15] BURWELL J T. On the empirical law of adhesive wear [J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23(1): 18-28.
- [16] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.
- [17] 桂长林. Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法

- [J]. 润滑与密封, 1990(1): 12-21.
- GUI C L. The Archard design calculation model and its application methods [J]. *Lubrication Engineering*, 1990 (1): 12-21. (in Chinese)
- [18] ANDERSON S, ERIKSSON B. Prediction of the sliding wear of spur gears [C] // Proceedings of the Fourth Nordic Symposium on Tribology NORDTRIB'90. [S. l.]: [s. n.], 1990: 10-13.
- [19] ANDERSON S. Partial EHD theory and initial wear of gears [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1975.
- [20] FLODIN A, ANDERSON S. Simulation of mild wear in spur gears [J]. *Wear*, 1997, 207(1/2): 16-23.
- [21] FLODIN A, ANDERSON S. Simulation of mild wear in helical gears [J]. *Wear*, 2000, 241(2): 123-128.
- [22] FLODIN A, ANDERSON S. A simplified model for wear prediction in helical gears [J]. *Wear*, 2001, 249(3/4): 285-292.
- [23] LUNDEVALL O. Simulation of contact, friction, and wear in gears-a finite element approach [D]. Linköping: Linköping University, 2000.
- [24] LUNDEVALL O, KLARBRING A. Simulation of wear by use of a nonsmooth newton method-a spur gear application [J]. *Mechanics of Structures and Machines*, 2001, 29 (2): 223-238.
- [25] BRAUER J, ANDERSSON S. Simulation of wear in gears with flank interference-a mixed FE and analytical approach [J]. *Wear*, 2003, 254(11): 1216-1232.
- [26] BAJPAI P, KAHRAMAN A, ANDERSSON N E. A surface wear prediction methodology for parallel-axis gear pairs [J]. *Journal of Tribology*, 2004, 126(3): 597-605.
- [27] KAHRAMAN A, BAJPAI P, ANDERSSON N E. Influence of tooth profile deviations on helical gear wear [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(4): 1311.
- [28] PARK D, KAHRAMAN A. A surface wear model for hypoid gear pairs [J]. *Wear*, 2009, 267(9/10): 1595-1604.
- [29] PARK D, KOLIVAND M, KAHRAMAN A. Prediction of surface wear of hypoid gears using a semi-analytical contact model [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2012, 52(52): 180-194.
- [30] PARK D, KOLIVAND M, KAHRAMAN A. An approximate method to predict surface wear of hypoid gears using surface interpolation [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2014, 71: 64-78.
- [31] 张俊, 卞世元, 鲁庆, 等. 准静态工况下渐开线直齿轮齿面磨损建模与分析 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53 (5): 136-145.
- ZHANG J, BIAN S Y, LU Q, et al. Quasi-static-model-based wear analysis of spur gears [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53 (5): 136-145. (in Chinese)
- [32] 朱丽莎, 向磊, 邹常青. 齿间动态载荷分配下的齿轮磨损分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(5): 1-7.
- ZHU L S, XIANG L, ZOU C Q. Wear analysis of gears under dynamic load distribution between gear teeth [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(12): 1-7. (in Chinese)
- [33] WU S, CHENG H S. Sliding wear calculation in spur gears [J]. *Journal of Tribology*, 1993, 115(3): 493-500.
- [34] AKBARZADEH S, KHONSARI M M. Prediction of steady state adhesive wear in spur gears using the EHL load sharing concept [J]. *Journal of Tribology*, 2009, 131(024503): 1-5.
- [35] WANG W, WONG P L, GUO F. Application of partial elasto-hydrodynamic lubrication analysis in dynamic wear study for running-in [J]. *Wear*, 2004, 257(7/8): 823-832.
- [36] PRIEST M, TAYLOR C M. Automobile engine tribology - approaching the surface [J]. *Wear*, 2000, 241(2): 193-203.
- [37] MASJEDI M, KHONSARI M M. Film thickness and asperity load formulas for line-contact elasto-hydrodynamic lubrication with provision for surface roughness [J]. *Journal of Tribology*, 2012, 134(1): 1-10.
- [38] MASJEDI M, KHONSARI M M. Mixed elasto-hydrodynamic lubrication line-contact formulas with different surface patterns [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2014, 228(8): 849-859.
- [39] MASJEDI M, KHONSARI M M. An engineering approach for rapid evaluation of traction coefficient and wear in mixed EHL [J]. *Tribology International*, 2015, 92: 184-190.
- [40] MASJEDI M, KHONSARI M M. On the prediction of steady-state wear rate in spur gears [J]. *Wear*, 2015, 342: 234-243.
- [41] 邹玉静, 常德功. 基于载荷分担理论的渐开线斜齿轮热混合弹流润滑分析 [J]. *摩擦学学报*, 2015, 35 (4): 495-504.
- ZOU Y J, CHANG D G. Mixed thermoelasto-hydrodynamic analysis of helical gears based

- on load sharing concept [J]. *Tribology*, 2015, 35(4): 495-504. (in Chinese)
- [42] YUKSEL C, KAHRAMAN A. Dynamic tooth loads of planetary gear sets having tooth profile wear [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2004, 39(7): 695-715.
- [43] WOJNAROWSKI J, ONISHCHENKO V. Tooth wear effects on spur gear dynamics [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2003, 38(2): 161-178.
- [44] DING H, KAHRAMAN A. Interactions between nonlinear spur gear dynamics and surface wear [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2007, 307(3/4/5): 662-679.
- [45] LIU X, YANG Y, ZHANG J. Investigation on coupling effects between surface wear and dynamics in a spur gear system [J]. *Tribology International*, 2016, 101: 383-394.
- [46] OSMAN T, VELEX P. Static and dynamic simulations of mild abrasive wear in wide-faced solid spur and helical gears [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2010, 45(6): 911-924.
- [47] 周长江, 雷玉英, 汪红兵, 等. 准静态与动态载荷下渐开线斜齿轮齿面粘着磨损计算[J/OL]. *机械工程学报*: 1-14 [2018-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20171121.1423.042.html>.
ZHOU C J, LEI Y Y, WANG H B, et al. Adhesive wear models for helical gears under quasi-static and dynamic loads [J/OL]. *Journal of Mechanical Engineering*, 1-14 [2018-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20171121.1423.042.html>. (in Chinese)
- [48] 克拉盖尔斯基 И В. 摩擦磨损计算原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 285-290.
- [49] 潘尔顺, 王殊轶. 渐开线圆柱齿轮啮合过程中磨损的计算机仿真[J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(3): 415-418.
PAN E S, WANG S Y. Computer simulation of wear in meshing process of involute cylindrical gear [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(3): 415-418. (in Chinese)
- [50] 王淑仁, 闫玉涛, 殷伟俐, 等. 齿轮啮合摩擦疲劳磨损的计算模型[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(8): 1164-1167.
WANG S R, YAN Y T, YIN W L, et al. Calculation model of fatigue wear-off in gear engagement [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2008, 29(8): 1164-1167. (in Chinese)
- [51] 宋永乐, 李光福, 陈晓金, 等. 兆瓦级风电齿轮箱齿轮微点蚀分析[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(1): 120-125.
SONG Y L, LI G F, CHEN X J, et al. Analysis of gear micropitting for megawatt-class wind turbine gearbox [J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(1): 120-125. (in Chinese)
- [52] GLODEŽ S, REN Z, FLAŠKER J. Simulation of surface pitting due to contact loading [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1998, 43(1): 33-50.
- [53] FLAŠKER J, FAJDIGA G, GLODEŽ S, et al. Numerical simulation of surface pitting due to contact loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(7): 599-605.
- [54] ASLANTAS K, TASGETIREN S. A study of spur gear pitting formation and life prediction [J]. *Wear*, 2004, 257(11): 1167-1175.
- [55] LI S, KAHRAMAN A. A micro-pitting model for spur gear contacts [J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 59(2): 224-233.
- [56] BRANDÃO J A, SEABRA J H O, CASTRO J. Surface initiated tooth flank damage: part I numerical model [J]. *Wear*, 2010, 268(1/2): 1-12.
- [57] BRANDÃO J A, MARTINS R, SEABRA J H O, et al. Calculation of gear tooth flank surface wear during an FZG micropitting test [J]. *Wear*, 2014, 311(1/2): 31-39.
- [58] BRANDÃO J A, MARTINS R, SEABRA J H O, et al. An approach to the simulation of concurrent gear micropitting and mild wear [J]. *Wear*, 2015, 324: 64-73.
- [59] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 350-351.
- [60] 章易程, 田红旗, 唐进元, 等. 基于摩擦功原理的高副滑动磨损的研究[J]. *中国机械工程*, 2010(3): 344-347.
ZHANG Y C, TIAN H Q, TANG J Y, et al. Study on sliding wear of high pair based on friction work principles [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010(3): 344-347. (in Chinese)
- [61] 江亲瑜. 零件磨损过程及寿命预测的数值仿真[J]. *润滑与密封*, 1997(6): 29-30.
JIANG Q Y. Numerical simulation of wear process and lifetime prediction of mechanical components [J]. *Lubrication Engineering*, 1997(6): 29-30. (in Chinese)
- [62] 江亲瑜, 李曼林. 线接触零件磨损过程的数值仿真及试验研究[J]. *大连交通大学学报*, 1998(3): 27-32.

- JIANG Q Y, LI M L. Numerical simulation and experiments study of wear process of line contact components [J]. Journal of Dalian Railway Institute, 1998(3): 27-32. (in Chinese)
- [63] 何荣国, 江亲瑜, 姚一富. 渐开线斜齿圆柱齿轮磨损的数值仿真. 润滑与密封[J], 2007, 32(3): 88-91.
- HE R G, JIANG Q Y, YAO Y F. Numerical simulation of tooth wearing for involute helical cylindrical gears [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(3): 88-91. (in Chinese)
- [64] 李宝良. 线接触磨损数值仿真及应用研究: [D]. 大连: 大连交通大学, 2010.
- LI B L. Research of numerical simulation and application of line contact wear [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [65] 宋文成. 高精度同步传动中斜齿轮磨损的数值计算 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- SONG W C. Numerical calculation of helical gear wear in high-precision synchronous transmission [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [66] 王淑仁, 闫玉涛, 丁津原. 渐开线直齿圆柱齿轮啮合磨损试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 146-149.
- WANG S R, YAN Y T, DING J Y. Experimental study on mesh-wear of involute spur gears [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2004, 25(2): 146-149. (in Chinese)
- [67] 周长江, 唐进元, 钟志华, 等. 齿轮传动齿面摩擦因数计算方法的研究[J]. 润滑与密封, 2006(10): 185-191.
- ZHOU C J, TANG J Y, ZHONG Z H, et al. Studies on the calculation of teeth surface friction coefficients in gear drive [J]. Lubrication Engineering, 2006(10): 185-191. (in Chinese)
- [68] WU S, CHENG H S. A sliding wear model for partial-EHL contacts [J]. Journal of Tribology, 1991, 113(1): 134-141.
- [69] 李宝良, 江亲瑜. 渐开线齿面齿表面磨损规律的理论研究与实验研究[J]. 润滑与密封, 2006(6): 26-28.
- LI B L, JIANG Q Y. Theory and test research on wearing rules for involute gear tooth surface [J]. Lubrication Engineering, 2006(6): 26-28. (in Chinese)
- [70] MARTINS R C, SEABRA J O, AMARO R I, et al. Carbon/chromium low friction surface coating for gears application [J]. Industrial Lubrication & Tribology, 2005, 57(57): 233-242.
- [71] BERGSETH E, OLOFSSON U, LEWIS R, et al. Effect of gear surface and lubricant interaction on mild wear [J]. Tribology Letters, 2012, 48(2): 183-200.
- [72] 罗双强. 线接触滑/滚复合磨损实验和理论研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- LUO S Q. Experimental and theoretical research on wear under liner contact and rolling-sliding [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [73] FLODIN A. Wear investigation of spur gear teeth [J]. Lubrication Science, 2000, 7(1): 45-60.
- [74] 徐承俊, 黄微, 范迅, 等. 复合齿形齿轮的耐磨性研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(5): 97-99.
- XU C J, HUANG W, FAN X, et al. Research on wearing capacity of composite tooth profile [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 97-99. (in Chinese)
- [75] AHMED M M E. Surface capacity of gears of circular-arc tooth-profile [J]. Wear, 1996, 193(2): 146-154.
- [76] 韩志武, 董立春, 王玉洁, 等. 齿面微观形态对齿轮耐磨性能影响的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(6): 503-506.
- HAN Z W, DONG L C, WANG Y J, et al. Experimental investigation on anti-wear function of gear surface with microcosmic form [J]. Tribology, 2008, 28(6): 503-506. (in Chinese)
- [77] 于敏, 戴振东, 薄玉奎, 等. 提高直升机齿轮传动干运转能力的离子注入技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(1): 11-15.
- YU M, DAI Z D, BO Y K, et al. Ion implantation for improving survivability of helicopter gear transmission under oil out condition [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(1): 11-15. (in Chinese)
- [78] 陈海锋, 唐进元, 周伟华. 某减速器圆柱齿轮磨损失效分析[J]. 机械传动, 2018, 42(2): 100-104.
- CHEN H F, TANG J Y, ZHOU W H. Analysis of wear process in aeronautic spur gear [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(2): 100-104. (in Chinese)
- [79] HÖHN B R, MICHAELIS K. Influence of oil temperature on gear failures [J]. Tribology International, 2004, 37(2): 103-109.
- [80] AMARNATH M, SUJATHA C, SWARNAMANI S. Experimental studies on the effects of reduction in gear tooth stiffness and lubricant film thickness in a spur geared system [J]. Tribology International, 2009, 42(2): 340-352.
- [81] KRANTZ T L, KAHRAMAN A. An experimental investigation of the influence of the lubricant viscosity and additives on gear wear [J]. Tribology Transactions,

- 2005, 21(1): 138-148.
- [82] BRANDÃO J A, CERQUEIRA P, SEABRA J H O, et al. Measurement of mean wear coefficient during gear tests under various operating conditions [J]. *Tribology International*, 2016, 102: 61-69.
- [83] MARTINS R, SEABRA J. Micropitting performance of mineral and biodegradable ester gear oils [J]. *Industrial Lubrication & Tribology*, 2008, 60(6): 286-292.
- [84] 胡元哲. 齿轮箱磨粒在铁谱片上的识别特征[J]. *润滑与密封*, 2006(3): 148-150.
HU Y Z. Identifying character of wear particle of gear case on the ferrogram[J]. *Lubrication Engineering*, 2006(3): 148-150. (in Chinese)
- [85] FENG S, FAN B, MAO J, et al. Prediction on wear of a spur gearbox by on-line wear debris concentration monitoring[J]. *Wear*, 2015, 336: 1-8.
- [86] ATKIN M L, DOYLE E D. The condition monitoring of heavily loaded spur gears [J]. *Wear*, 1983, 88(1): 115-124.
- [87] YARDLEY E D, MORETON G. An attempt to quantify the limits of failure detection by ferrography [J]. *Wear*, 1983, 90(2): 273-279.
- [88] WU H, KWOK N M, LIU S, et al. A prototype of on-line extraction and three-dimensional characterisation of wear particle features from video sequence [J]. *Wear*, 2016, 368: 314-325.
- [89] 石照耀, 费业泰, 谢华锬. 齿轮测量技术 100 年——回顾与展望[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(9): 13-17.
SHI Z Y, FEI Y T, XIE H K. 100 years of gear measurement technology—Review & prospect [J]. *Engineering Science*, 2003, 5(9): 13-17. (in Chinese)
- [90] 石照耀, 林虎, 林家春, 等. 大齿轮测量: 现状与趋势[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(10): 35-44.
SHI Z Y, LIN H, LIN J C, et al. Current status and trends of large gears metrology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(10): 35-44. (in Chinese)
- [91] HU C, SMITH W A, RANDALL R B, et al. Development of a gear vibration indicator and its application in gear wear monitoring [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, 76/77: 319-336.
- [92] ZHANG R, GU F, MANSAF H, et al. Gear wear monitoring by modulation signal bispectrum based on motor current signal analysis[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 94: 202-213.
- [93] 温诗铸. 材料磨损研究的进展与思考[J]. *摩擦学报*, 2008(1): 1-5.
WEN S Z. Research progress on wear of materials [J]. *Tribology*, 2008(1): 1-5. (in Chinese)
- [94] 钱茂林, 田煜, 温诗铸. 纳米摩擦学 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 7-10.
- [95] WANG Y, GUO J, GAO K, et al. Understanding the ultra-low friction behavior of hydrogenated fullerene-like carbon films grown with different flow rates of hydrogen gas [J]. *Carbon*, 2014, 77: 518-524.

(责任编辑 吕小红)