

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.033

微齿轮齿面磨损行为及仿真分析

魏 东, 魏沛堂, 刘怀举, 朱才朝

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 微型齿轮作为微机电系统(MEMS)的关键零部件, 齿面磨损是影响其服役性能及失效形式的主要因素之一。为了研究微齿轮齿面磨损机理, 基于 Archard 磨损理论, 利用 ABAQUS 二次开发 UMESHMOTION 子程序, 结合 ALE 自适应网格技术, 建立了微齿轮齿面磨损有限元分析模型, 得到了不同啮合周期下的齿面磨损分布规律, 并进行了试验验证。基于构建的有限元模型, 考虑主、从齿面磨损的相互作用, 分析了不同材料性能(弹性模量)及材料配对方式对齿面磨损分布及大小的影响。研究表明, 微齿轮齿面磨损最严重的地方发生在靠近齿根的基圆附近, 齿顶附近磨损较轻; 与材料性能相比, 不同材料配对对微齿轮磨损大小影响更显著。

关键词: 微齿轮; Archard 磨损理论; UMESHMOTION; 磨损仿真

中图分类号: TH132.413

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)04-022-09

Wear behavior and simulation analysis of micro gear tooth surface

WEI Dong, WEI Peitang, LIU Huaiju, ZHU Caichao

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Micro gear is the key element of micro-electro-mechanical system(MEMS). The tooth surface wear is one of the main factors affecting its service performance and failure mode. In order to study the wear mechanisms of micro gear, the UMESHMOTION subroutine in ABAQUS is developed based on the Archard wear theory, and a finite element analysis model of the wear in micro gear is established combining with ALE adaptive mesh technology. Then, the tooth surface wear distribution under different meshing periods is obtained and verified. Based on the constructed finite element model, considering the interaction of the master and slave tooth surface wear, the influence of different material properties (modulus of elasticity) and material pairing on the tooth surface wear distribution are analyzed. The results show that the most serious wear of the micro gear tooth surface occurs at the base circle near the tooth root, and the wear near the tooth tip is lighter; compared with the material properties, different material pairing has a more significant effect on the wear of the micro gear.

Keywords: micro gear; Archard wear theory; UMESHMOTION; wear simulation

收稿日期:2020-08-12 网络出版日期:2020-11-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008200);留学人员回国创业创新支持计划(cx2019163)。

Supported by National Key R&D Program of China (2020YFB2008200) and the Innovative Program for the Returned Overseas Chinese Scholars (cx2019063).

作者简介:魏东(1996—),男,重庆大学硕士研究生,主要从事微齿轮传动及摩擦学研究。

通信作者:魏沛堂,男,重庆大学副教授,博士生导师,主要从事齿轮细观力学及表征研究,(E-mail) peitangwei@cqu.edu.cn。

微型齿轮作为微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)中的重要组成部分,其模数范围通常在 0.1 mm 及以下,具有传动比大、质量轻和结构紧凑等特点,能够实现微小空间要求下运动和动力的传递^[1],广泛应用于航空航天、生物医学、通讯等领域^[2]。随着微机电系统的飞速发展,微齿轮需求不断扩大,微齿轮的重要性日益凸显。

随着微齿轮需求的不断增加,微齿轮制造技术得到了长足的发展,目前,有关微齿轮的研究主要集中在加工制造方面。Chinn 等^[3]利用 LIGA 技术成功制备直径 0.264 mm 的镍及镍合金材料微齿轮;Wang 等^[4]利用改进的微细电火花加工技术,精确制备了模数 0.1 mm 的金属微齿轮;Loh 等^[5]利用金属粉末注射成型技术成功制备了模数 0.08 mm 的微齿轮。除此以外,激光烧蚀^[6]、微磨料水射流^[7]等先进成型技术也被应用于微齿轮加工。随着微齿轮制造技术的发展,微齿轮服役性能的相关研究也逐渐发展起来。Ali 等^[8]对比了传统电火花与微细电火花加工对微齿轮尺寸精度及表面粗糙度的影响,发现微细电火花技术能够有效提升微齿轮的尺寸精度同时还能降低表面粗糙度。Wang 等^[9]针对微齿轮的微观接触特性展开研究,分析了其接触啮合过程中的能量转换及耗散。Zhang 等^[10]采用表征试验研究微齿轮疲劳失效原因,发现齿面磨损是引起疲劳失效的原因之一。微齿轮副摩擦磨损性能是影响整个系统传动的关键问题。

在微齿轮摩擦磨损行为及其机理研究方面,国内外学者开展了相关试验研究工作。Niza 等^[11]利用自主开发的微齿轮啮合试验平台,对模数 0.065 mm 的 SK4 钢和金属玻璃材料微齿轮进行了干摩擦条件下的啮合传动试验,结果表明齿面的过度磨损导致了微齿轮传动失效,并指出渐开线微齿轮啮合原理同样遵循宏观渐开线齿轮啮合理论。Ishida^[12]等对润滑油条件下的直径 2.4 mm 微型电机进行了寿命试验,发现微型电机内部的微齿轮齿面过度磨损是导致整个传动系统故障的主要原因。日本木更津工业大学高桥秀雄团队^[13-15]利用自主搭建的微齿轮耐久性能试验台,对模数 0.1 mm 的金属微型齿轮开展了耐久性试验,对比了不同工况下的微齿轮失效形式,发现齿面磨损是引起传动失效的主导因素。在微齿轮的摩擦磨损理论研究方面,Hegadekatte^[16]等通过微销盘、微双盘摩擦磨损试验获得的微尺度下的滑/滚磨损系数,并利用基于 Archard 磨损公式开发的全局增量模型(GIWM)进行了微行星轮系磨损仿真,结果表明磨损最严重的位置发生在节线以下,节线处磨损最小,同时磨损会引起啮合线的偏离,对微齿轮的长期运转性能有着重要影响。重庆大学石万凯、王旭等^[17-18]采用经典 Archard 磨损公式,结合 JKR 理论及 GW 粗糙度模型,建立了考虑表面形貌的微齿轮磨损数值仿真模型,并提出了改善微齿轮齿面磨损的方法。已有的相关研究得到了微齿轮的磨损失效形式,但是其微观磨损机制尚不明确,同时针对磨损仿真,磨损演化、材料性能及配对等因素影响也不明确。

针对微齿轮磨损失效问题,笔者采用一种自适应有限元方法,基于 Archard 磨损模型,利用 ABAQUS 二次开发 UMESHMOTION 子程序并结合 ALE 自适应网格技术,建立了微齿轮齿面磨损有限元模型。考虑接触齿面间的相互磨损作用,研究了微齿轮齿面磨损分布规律,分析了材料性能及材料配对方式对其磨损分布及大小的影响,并借助相关试验验证了微齿轮磨损分布规律。

1 有限元仿真方法

1.1 研究对象

为进行微齿轮磨损行为及仿真研究,以深圳兆威机电有限公司生产的微齿轮作为研究对象,该微型齿轮具备大批量生产优势,主要应用于智能手机摄像头升降减速机构(图 1(a))。该微齿轮通过金属粉末注射技术(metal powder injection molding, MIM)成型,通过将微米级金属粉末颗粒按一定配比与黏结剂均匀混合,制备出具有流变特性的喂料,然后利用注塑机将喂料注入微齿轮模具成型出微齿轮毛坯,最后将毛坯进行脱脂(脱除黏结剂)、烧结,最终成型出高致密度微齿轮。微齿轮材料为铁镍合金,主要成分如图 1(b)所示,其几何与材料性能参数如表 1 所示。

表 1 微齿轮几何与材料性能参数

Table 1 Geometric and material performance parameters of micro gear

模数/ mm	齿数	压力角/ (°)	齿宽/ mm	齿顶高系数	齿顶系数	泊松比	弹性模/ GPa
0.1	13	20	0.9	1	0.25	0.27 ^[17]	119 ^[17]

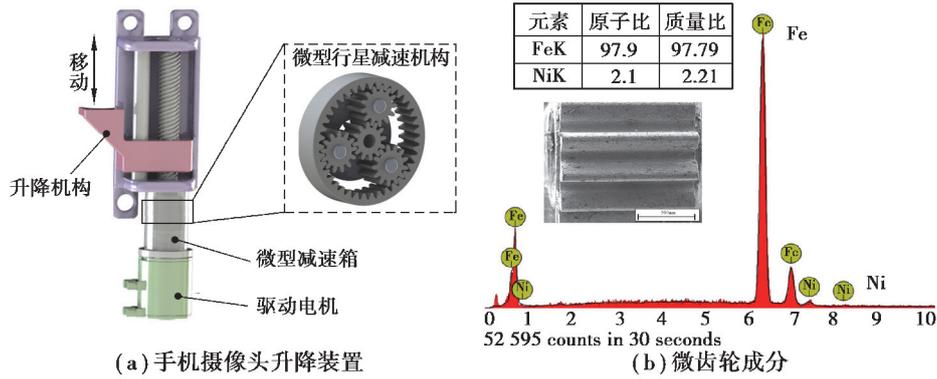


图 1 手机摄像头升降装置及微齿轮样品成分
Fig. 1 Mobile phone camera lifting device and micro gear sample composition

1.2 Archard 磨损模型

笔者建立了 Archard 磨损模型以进行微齿轮磨损仿真分析。基于物体表面接触是多个表面微凸体接触作用的假设^[19], 经典 Archard 磨损理论是从微观角度出发提出的一种磨损理论, 广泛应用于中大模数齿轮等为代表的宏观元件的磨损分析^[20-22], 以及微型齿轮^[16]、微型轴承^[23]和微型枢轴^[24]等的磨损分析。Hegadekatte 等^[16]基于 Archard 磨损模型开展了微齿轮磨损分析, 磨损量预测结果与试验结果吻合良好。经典 Archard 磨损公式基于接触应力及相对滑动距离是影响接触面磨损的主要因素假设, 可描述为

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

式中: V 为磨损量, mm^3 ; W 为接触法向力, N ; H 为磨损材料的表面硬度, N/mm^2 ; s 为滑动距离, mm ; K 为接触面量纲为一磨损系数。将其应用于小局部面积区域磨损, 公式(1)可描述为

$$h = k p s, \quad (2)$$

式中: h 为磨损深度, mm ; $k = K/H$ 为有量纲磨损系数, mm^2/N ; p 为接触压力, MPa 。文中采用文献^[16]在微齿轮研究中通过滑滚实验获得的微尺度下的磨损系数 $k = 13.5 \times 10^{-9} \text{mm}^2/\text{N}$ 。

在磨损有限元分析中, 将连续的磨损过程离散化, 即将整个磨损过程分成多个磨损增量的累积, 同时假设齿面接触磨损过程中, 在每一个非常小的增量步中, 接触点处的压力和磨损系数被认为是一个常数, 即节点 i 的磨损深度为

$$h_{i,n} = h_{i,n-1} + k p_{i,n} \Delta s_{i,n}, \quad (3)$$

式中: $h_{i,n}$ 为节点 i 在第 n 个增量步的磨损总深度; $h_{i,n-1}$ 为节点 i 在第 $n-1$ 个增量步的磨损总深度; $p_{i,n}$ 为节点 i 在第 n 个增量步的接触压力; $\Delta s_{i,n}$ 为节点 i 在第 n 个增量步的相对滑动位移增量。考虑到节点发生磨损后, 网格需要重画会提高计算时间成本, 为了降低计算代价, 假设在 ΔN 次啮合周期内, 每个啮合周期内的磨损量都是相同的, 则节点 i 在经历 ΔN 次啮合周期后, 其总磨损深度为

$$h_{i,n} = h_{i,n-1} + \Delta N k p_{i,n} \Delta s_{i,n}. \quad (4)$$

1.3 磨损面几何特征更新

利用 ABAQUS 有限元软件进行磨损仿真时, 通过移动接触节点来描述磨损行为。接触节点的移动量由 Archard 磨损公式计算得到, 移动方向可由用户自定义, 默认为接触法向。两者均通过 ABAQUS 中的 UMESHMOTION 用户子程序实现。当接触节点移动量过大时, 如图 2 所示, 会出现网格畸变、甚至负体积现象, 进而影响有限元结果。因此, 需要对这些单元重画网格。网格重画过程是利用 ABAQUS 中 ALE (arbitrary lagrangian-eulerian) 自适应网格技术实现。ALE 自适应网

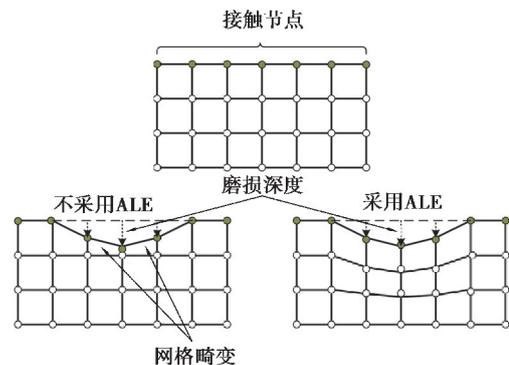


图 2 ALE 自适应网格技术
Fig. 2 ALE adaptive mesh technology

格技术结合了纯拉格朗日和欧拉算法特征,能够使网格脱离材料而独立流动,在不改变网格原有拓扑的情况下,保证分析过程中的网格质量^[25]。

1.4 磨损仿真流程

通过开发 ABAQUS UMESHMOTION 磨损子程序并结合 ALE 自适应网格技术实现微齿轮齿面磨损仿真。图 3 为磨损仿真流程图。在解决非线性接触问题后,UMESHMOTION 子程序根据求解后的初始有限元模型访问接触点信息并记录节点接触压力、节点相对滑动位移及节点坐标等数据,然后根据 Archard 磨损公式计算磨损深度和方向。在每个增量步计算结束后,将计算值应用于该节点的移动,然后通过 ALE 自适应网格技术进行网格重画并更新磨损面几何特征。在下一个磨损周期里,记录新的接触面各节点的状态变量,重新开始计算,直至整个磨损周期结束。

1.5 有限元模型

采用 ABAQUS 隐式静态分析方法模拟二维微齿轮副的啮合磨损过程,为提高计算效率,齿轮对简化成三齿对接触模型,如图 4 所示。主动轮施加转动,从动轮施加扭矩(0.3 mN·m),齿轮材料均设置为各向同性线弹性材料,接触面设置为有限滑动面对面接触。为了便于收敛,细分了加载过程。一个完整的加载过程包括 5 个分析步:1)小转角预接触,限制从动轮的转动与移动,赋予主动轮一个微小的角度,以便两个齿面形成微小接触;2)预加载,限制从动轮的转动与移动并施加扭矩,赋予主动轮微小的角度,形成接触力作用;3)滚动加载,保持从动轮的扭矩不变,主动轮圆心处施加转角,让两个齿轮啮合传动,4)卸载,限制从动轮的移动与转动,并使从动轮扭矩降为 0,限制主动轮的转动与移动;5)主、从动轮恢复初始位置。

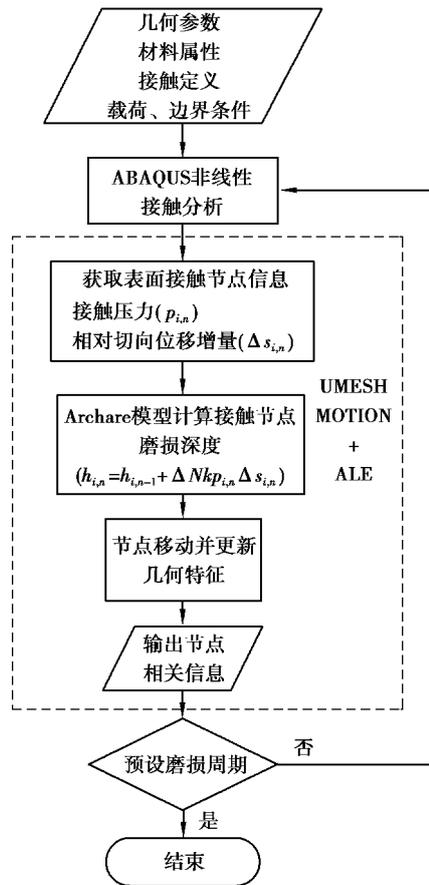


图 3 磨损仿真流程图
Fig. 3 Flow chart of wear simulation

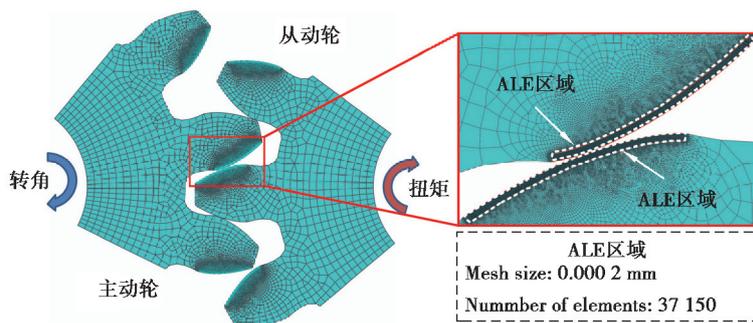


图 4 微齿轮磨损有限元模型
Fig. 4 Finite element model of micro gear wear

为实现主、从面的相互磨损作用,采用对称主从面方法,同时在进行磨损分析前,对预设磨损区域设置为 ALE 区域并添加相应约束。为了降低计算成本,文中只考虑中间齿轮对的磨损情况。为保证计算结果可靠,对接触区域进行了网格细化,考虑到网格单元的适应性,选择 CPE4 平面单元,细化区域网格大小为 0.000 2 mm,数量为 37 150 个。

2 结果与讨论

2.1 齿面接触压力及相对滑动位移分布

图 5 表示的是微齿轮齿面接触压力及相对滑动位移分布。其中,横坐标表示由基圆起始沿齿廓方向的渐开线曲线距离。同时微齿轮对啮合起点出现在距基圆约 $0.5 \mu\text{m}$ 处。可以看到,最大接触压力出现在单双齿啮合区过渡位置,最大值为 330 MPa ,然后分别沿着基圆、齿顶和节线位置方向逐渐下降,节线位置接触压力为 292 MPa 。主、从动齿轮齿面相对滑动位移最大值约为 $4.5 \mu\text{m}$,均出现在靠近齿根的基圆附近,节线位置相对滑动位移几乎为 0,即为纯滚动状态,同时沿着基圆-节线-齿顶方向呈现先下降后上升再下降的趋势。

2.2 齿面磨损分布及验证

2.2.1 微齿轮齿面磨损分布

图 6,7 分别表示不同磨损循环次数下微齿轮主、从齿面磨损深度分布。可以看到,随着循环次数的累积,磨损深度逐渐增加。同时主、从齿面磨损最严重的地方均出现在靠近齿根的基圆附近,8 000 次循环后磨损深度最大值约为 $0.06 \mu\text{m}$,其次是单双齿啮合过渡区位置,节线位置磨损深度几乎为 0。在微齿轮啮入啮出过程中,靠近齿根的基圆附近具有较大的接触压力以及相对滑动位移(图 5 所示),进而使得磨损深度最大值出现在基圆附近,相应地,尽管节线位置存在着一定的接触压力,但由于滑动距离几乎为 0,所以磨损深度也几乎为 0。

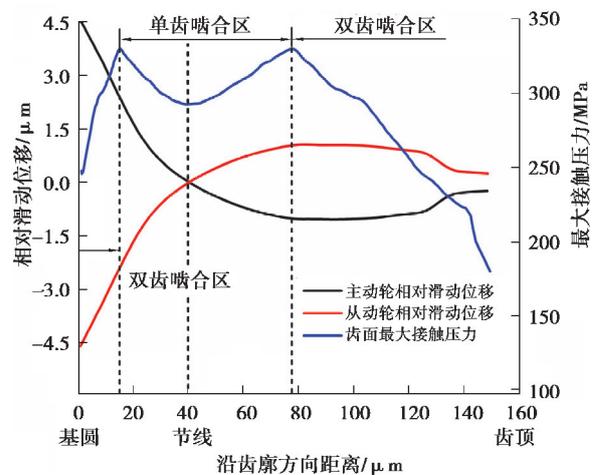


图 5 齿面接触压力和相对滑动位移分布

Fig. 5 Tooth surface contact pressure and relative sliding displacement distribution

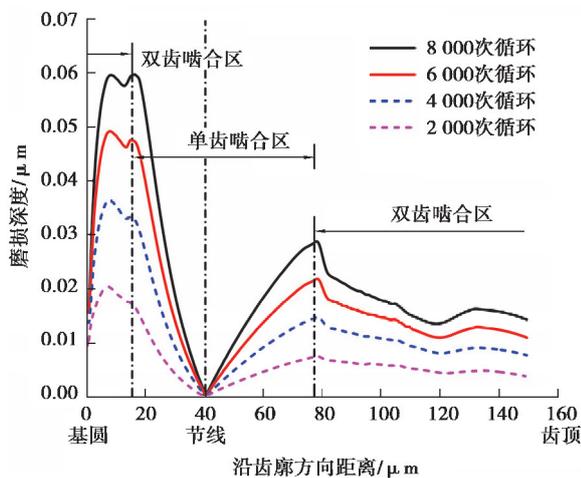


图 6 主动轮齿面磨损分布

Fig. 6 Wear distribution of driving gear tooth surface

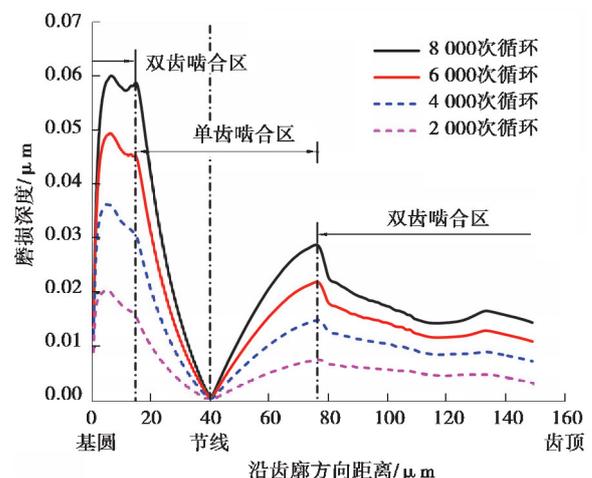


图 7 从动轮齿面磨损分布

Fig. 7 Wear distribution of driven gear tooth surface

图 8 表示的是微齿轮主、从齿面最大磨损深度变化。可以看到,主、从齿面最大磨损深度大小及变化基本一致,最大磨损深度并非随着循环次数的增加而线性增加,其斜率(磨损速率)随着磨损循环次数的增加而缓慢降低。这和 Brauer 等^[22]在宏观齿轮磨损分析中得到的结果类似,齿面磨损可能会改善齿面的接触情况,进而降低其磨损速率。

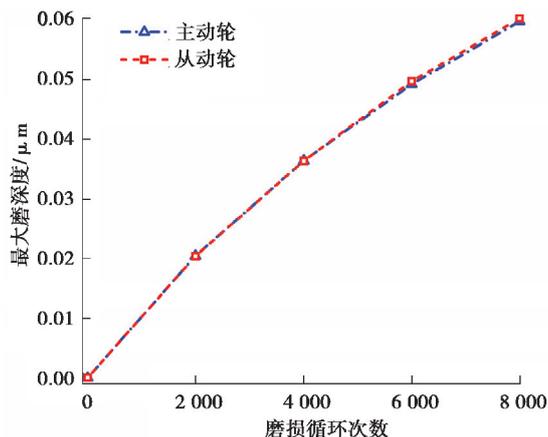


图 8 主、从齿面最大磨损量变化

Fig. 8 Changes in the maximum wear of the master and slave tooth surfaces

2.2.2 微齿轮齿面磨损试验表征

为了验证微齿轮磨损有限元模型的正确性,将微型减速箱中服役后的微型齿轮进行了齿面 SEM 检测。微减速箱在服役时,会添加润滑脂以改善其接触状况,因为润滑脂量极少,文中暂未考虑润滑脂的影响。利用 Phenom XL 台式扫描电镜(图 9)对超声波酒精清洗后的微型齿轮进行齿面观察,观察结果如图 10 所示,可以明显看到,齿顶附近和靠近齿根的基圆附近均发生了不同程度的磨损,且靠近齿根的基圆附近磨损程度大于齿顶附近磨损程度,这和仿真结果得到的磨损分布规律具有相似性。在齿顶附近(图 10(b)),可以看到存在较多的磨痕,在靠近齿根的基圆附近(图 10(a)),存在着显著的材料流动,表现出黏着磨损特征,这和 Ishida 等^[12]在金属玻璃材料微齿轮摩擦磨损试验中观察到的现象类似,同时周边也存在着磨痕。微齿轮在啮合传动过程中,齿面粗糙峰处于反复的滑滚作用,进而形成磨粒磨损,由于齿根附近接触压力大,同时啮合的微齿轮副是同种材料,齿根附近齿面更易出现材料黏着现象,进而产生黏着磨损。

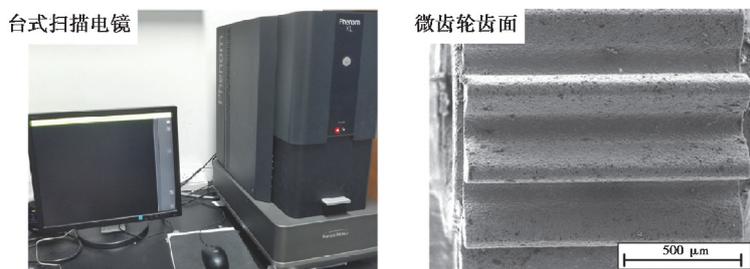
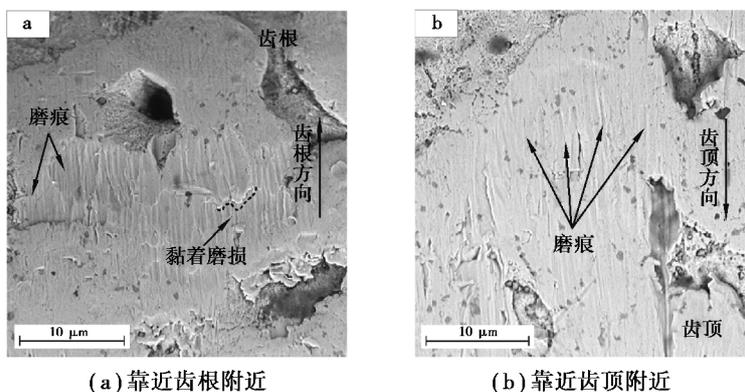


图 9 微齿轮齿面 SEM 检测

Fig. 9 SEM inspection of micro gear tooth surface



(a) 靠近齿根附近

(b) 靠近齿顶附近

图 10 微齿轮齿面不同位置处的磨损

Fig. 10 Wear at different positions of the micro gear tooth surface

2.3 参数影响

2.3.1 不同弹性模量下齿面磨损分布及大小

为分析材料性能对微齿轮齿面磨损分布及大小的影响,选择 3 种铁镍合金材料,弹性模量分别为 125, 119, 100 GPa^[18]。从图 8,9 可以看到,随着材料弹性模量的增大,经过 2 000 次磨损循环后,微齿轮齿面磨损虽有所减轻但效果不明显,即微齿轮在实际工作中,选择不同弹性模量的铁镍合金材料对其磨损程度并不会产生显著影响。

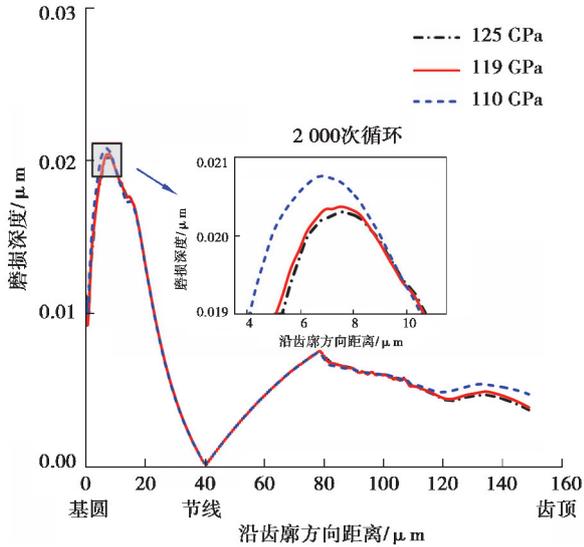


图 11 不同弹性模量下主动轮磨损分布
Fig. 11 Wear distribution of driving gear under different elastic modulus

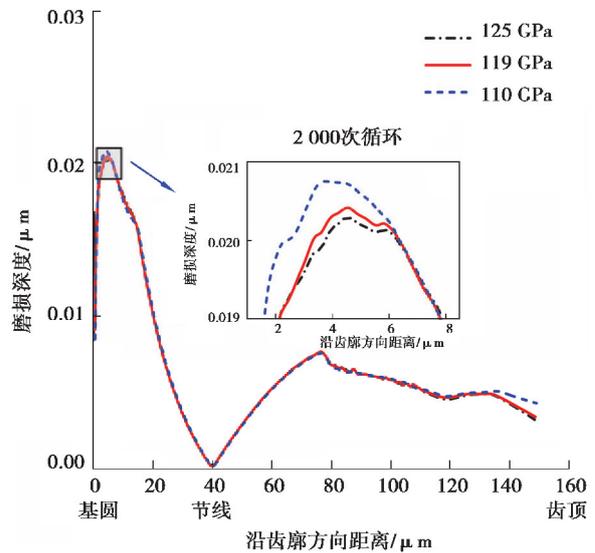


图 12 不同弹性模量下从动轮磨损分布
Fig. 12 Wear distribution of driven gear under different elastic modulus

2.3.2 不同材料配对下齿面磨损分布及大小

不同配对方式会影响齿轮副的摩擦磨损性能,笔者以粉末冶金材料微齿轮与工程应用中常见的 PEEK 材料微齿轮进行配对。图 13 表示的是粉末冶金与 PEEK 微齿轮配对下的齿面磨损分布,主动轮材料为铁镍合金,弹性模量为 119 GPa,泊松比 0.27;从动轮材料选择 PEEK550G^[26],弹性模量为 4.0 GPa,泊松比 0.4,磨损系数为 $36.0 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{N}$ 。从图中可以看到,与铁镍合金-铁镍合金材料配对下磨损分布类似,基圆附近磨损程度最严重,节线靠近齿顶次之,节线区域磨损最小。同时 PEEK 材料齿面磨损程度高于铁镍合金材料,尤其在基圆附近差异最大。由于铁镍合金材料弹性模量、表面硬度高于 PEEK 材料,前者的耐磨性能优于后者,导致 PEEK 微齿轮齿面磨损更为严重。

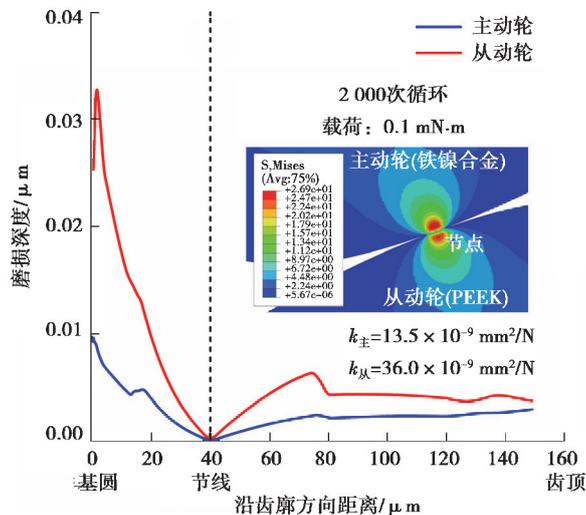


图 13 金属-PEEK 配对齿面磨损分布

Fig. 13 Wear distribution of metal-PEEK paired tooth surface

3 结 论

针对微齿轮磨损失效问题,考虑主、从齿面的相互磨损作用,利用 ALE 自适应网格技术,编写了 UMESHMOTION 子程序,建立了微齿轮自适应磨损有限元模型。研究了微齿轮的磨损分布规律分析了材料性能及材料配对方式对磨损分布及大小的影响,并通过试验进行了相关验证,得到的结论如下:

1) 研究发现微齿轮齿面磨损最严重的地方出现在靠近齿根的基圆附近,节线靠近齿顶次之,节线区域磨损几乎可忽略,与试验结果吻合良好。同时,最大磨损深度并非随着循环次数的增加而线性增加,其斜率(磨损速率)随着磨损循环次数的增加而缓慢降低。

2) 铁镍合金微齿轮齿面在齿根附近及齿顶附近磨损形式存在差异,齿根附近表现出黏着磨损及磨粒磨损,齿顶附近表现为磨粒磨损。

3) 选择较大弹性模量的铁镍合金材料对降低微齿轮磨损程度并没有显著影响,考虑铁镍合金材料与 PEEK 材料配对情况下,PEEK 微齿轮磨损更为严重。

参考文献:

- [1] 彭云峰. 微齿轮副的粘附接触及其力学分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Peng Y F. Analysis of the adhesive contact of micro-gear pair[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] Chaubey S K, Jain N K. State-of-art review of past research on manufacturing of meso and micro cylindrical gears[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 702-728.
- [3] Chinn D, Ostendorp P, Haugh M, et al. Three dimensional imaging of LIGA-made microcomponents[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4): 813-821.
- [4] Wang Y K, Chen X, Wang Z L, et al. Fabrication of micro gear with intact tooth profile by micro wire electrical discharge machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 137-147.
- [5] Loh N H, Tor S B, Tay B Y, et al. Fabrication of micro gear by micro powder injection molding[J]. Microsystem Technologies, 2008, 14(1): 43-50.
- [6] Youn S W, Takahashi M, Goto H, et al. Fabrication of micro-mold for glass embossing using focused ion beam, femto-second laser, excimer laser and dicing techniques[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 326-330.
- [7] Luo W S, Wang C Y, Wang J, et al. The development of micro abrasive waterjet machining technology[J]. Advanced Materials Research, 2011, 188: 733-738.
- [8] Ali M Y, Mustafizul Karim A N, Adesta E Y T, et al. Comparative study of conventional and micro WEDM based on machining of meso/micro sized spur gear[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(5): 779-784.
- [9] Wang Z L, Shen X J, Chen X Y. Mechanical characteristic analysis of micro gear mechanism[J]. Integrated Ferroelectrics, 2015, 161(1): 112-122.
- [10] Zhang D Y, Liu S G, Liu B L, et al. Investigation on bending fatigue failure of a micro-gear through finite element analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 31: 225-235.
- [11] Niza M E, Komori M, Nomura T, et al. Test rig for micro gear and experimental analysis on the meshing condition and failure characteristics of steel micro involute gear and metallic glass one[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(12): 1797-1812.
- [12] Ishida M, Takeda H, Nishiyama N, et al. Wear resistivity of super-precision microgear made of Ni-based metallic glass[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 449/450/451: 149-154.
- [13] 鈴木朋也, 高橋美喜男, 板垣貴喜, など. 微小平歯車の負荷特性に及ぼす潤滑油の影響[C]//2016年度年次大会論文集. 日本機械学会, 2016: S1140105.

- Suzuki T, Takahashi M, Itagaki T, etc. Effect of lubricating oil on the load characteristics of micro spur gears [C]//2016 Annual Conference Proceeding. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2016: S1140105. (in Japanese)
- [14] 田嶋洋人, 鈴木朋也, 高橋美喜男, など. 微小歯車の負荷特性に関する研究(りん青銅の場合)[C]//2017 年度精密工学会春季大会. 日本精密工学会, 2017: 947-948.
- Tajima H, Suzuki T, Takahashi M, et al. Study on load characteristics of micro gears (in the case of phosphor bronze) [C]//2017 Annual Conference of the Japan Society for Precision Engineering. The Japan Society for Precision Engineering, 2017: 947- 948. (in Japanese)
- [15] 田嶋洋人, 高橋美喜男, 板垣貴喜, など. 微小平歯車の負荷特性に関する研究:回転速度および潤滑油性状の影響[C]//2018 年度年次大会論文集. 日本機械学会, 2018: S1120303.
- Tajima H, Takahashi M, Itagaki T, et al. Study on load characteristics of micro spur gears: effects of rotational speed and lubricating oil properties[C]//2018 Annual Conference Proceeding. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2018: S1120303. (in Japanese)
- [16] Hegadekatte V, Hilgert J, Kraft O, et al. Multi time scale simulations for wear prediction in micro-gears[J]. *Wear*, 2010, 268(1/2): 316-324.
- [17] 石万凯, 王旭, 韩振华, 等. 渐开线微齿轮磨损仿真分析[J]. *机械传动*, 2016, 40(4): 10-14.
- Shi W K, Wang X, Han Z H, et al. Simulation of wear in involute micro gear[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2016, 40(4): 10-14. (in Chinese)
- [18] 王旭. 微齿轮粗糙齿面磨损分析及齿廓优化设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- Wang X. Wear analysis and tooth profile optimization of micro gears with rough tooth surfaces[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [19] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 981-988.
- [20] 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)
- [21] Flodin A, Andersson S. Simulation of mild wear in spur gears[J]. *Wear*, 1997, 207(1/2): 16-23.
- [22] 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.
- [23] Demiri S, Boedo S, Holsen L S. Wear characteristics of large aspect ratio silicon microbearing systems[J]. *Wear*, 2014, 312(1/2): 58-69.
- [24] Williams J A. Friction and wear of rotating pivots in MEMS and other small scale devices[J]. *Wear*, 2001, 251(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12): 965-972.
- [25] Bose K K, Penchaliah R. 3-D FEM wear prediction of brass sliding against bearing steel using constant contact pressure approximation technique[J]. *Tribology Online*, 2019, 14(4): 194-207.
- [26] 肖博升. PEEK 及 CF/PEEK 摩擦磨损性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- Xiao B S. Study on friction and wear properties of PEEK and CF/PEEK[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)