

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.223

喷油润滑下 PEEK 齿轮的疲劳失效临界转变关系

胡新磊, 李 静, 刘怀举, 魏沛堂, 卢泽华, 吴 若

(重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要: 聚醚醚酮 (polyetheretherketone, PEEK) 齿轮是高性能聚合物齿轮, 广泛应用于汽车、无人机、机器人等领域。然而 PEEK 齿轮失效的形式和机理复杂, 导致其在动力传动场合应用缺乏合理的设计依据。针对 PEEK 齿轮失效机理不明和基础数据缺失的问题, 开展了喷油润滑下 PEEK 斜齿轮疲劳性能试验, 计算了 PEEK 齿轮接触和弯曲应力, 并通过扫描电镜等设备进行了失效表征。发现喷油润滑下 PEEK 齿轮失效形式主要为齿面点蚀和齿根疲劳断裂; 讨论了喷油润滑下 PEEK 齿轮齿面点蚀与齿根疲劳断裂的失效机理, 发现了 PEEK 齿轮接触疲劳失效与弯曲疲劳失效之间的临界转变关系, 并提出了 PEEK 齿轮失效形式的评估方法。当 PEEK 齿轮接触应力与弯曲应力之比低于 1.02 时, PEEK 齿轮主要发生齿根疲劳断裂; 接触应力与弯曲应力之比高于 1.10 时, PEEK 齿轮主要发生齿面点蚀破坏; 接触应力与弯曲应力之比在 1.02~1.10 之间时, 存在齿面接触疲劳与齿根弯曲疲劳的临界失效转变点。

关键词: 聚醚醚酮 (PEEK) 齿轮; 承载能力; 齿轮温度; 失效形式

中图分类号: TH132.417

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)11-027-10

Critical transition relations for fatigue failure of PEEK gear under oil-jet lubrication

HU Xinlei, LI Jing, LIU Huaiju, WEI Peitang, LU Zehua, WU Ruo

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Polyetheretherketone (PEEK) gears are high-performance polymer gears widely used in automobiles, drones, robots, and other fields. However, the complex failure mechanism of PEEK gears and the lack of basic data on loading capacity lead to a shortage of a reasonable design basis in power transmission applications. To address the unclear failure mechanism and the lack of fundamental durability data of PEEK gears, fatigue performance tests of PEEK helical gear pairs under oil-jet lubrication were carried out, and the contact stress and bending stress were calculated. The failure mechanism were investigated by using scanning electron microscopy and other equipment. Experimental results show that the primary failure modes of PEEK gears under oil-jet lubrication were tooth surface pitting failure and tooth root fatigue fracture. The critical transition relationship between PEEK gear contact fatigue failure and bending fatigue failure was identified, and an evaluation method for the failure form of PEEK gears was proposed. When the ratio of contact stress to bending stress of the PEEK

收稿日期: 2022-07-15 网络出版日期: 2023-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175041); 2022 年重庆市研究生科研创新项目 (CYB22008)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52175041), and Chongqing Postgraduate Research and Innovation Project (CYB22008).

作者简介: 胡新磊 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事聚合物齿轮服役性能研究, (E-mail) 2628986426@qq.com。

通信作者: 刘怀举, 男, 教授, 博士研究生导师, (E-mail) huaijuliu@cqu.edu.cn。

gear was smaller than 1.02, the PEEK gear mainly suffered from root fatigue fracture; when the ratio of contact stress to bending stress was larger than 1.10, the PEEK gear mainly suffered from tooth surface pitting failure. When the ratio was in the range from 1.02 to 1.10, there was a critical failure threshold between tooth surface contact fatigue and root bending fatigue.

Keywords: polyetheretherketone (PEEK) gear; loading capacity; gear temperature; failure modes

聚合物齿轮与金属齿轮相比,具有质量轻、噪声小、成本低等优点,在过去数十年间逐渐替代金属齿轮应用于汽车、家电、办公用具等运动传递场合^[1-3]。随着新型聚合物材料及其齿轮制造技术的进步,聚合物齿轮的承载能力不断提高,传递功率从以往不足 10 kW 提高到接近 30 kW^[4],满足了新能源汽车轮边减速器、无人机电传动系统等动力传动需求^[5],有望推动齿轮传动“以塑代钢”。然而在动力传动过程中聚合物齿轮的失效行为受载荷工况、环境温度、润滑方式等因素的综合影响,其失效机理尚不明确,导致聚合物齿轮在动力传递场合应用受限。

近几十年来科研人员对聚合物齿轮的失效行为展开了大量研究。由于聚合物齿轮具有自润滑性,经常在干接触场合使用。Mao 等^[6-7]和 Li 等^[8]基于自主研发的聚合物齿轮磨损试验台探究了材料类型、加工方式、输出扭矩等因素对干接触下聚合物齿轮磨损性能的影响,发现输出扭矩对干接触下聚合物齿轮的失效行为起主导作用。干接触下聚合物齿轮主要发生磨损失效且寿命较短,难以满足动力传递场合对承载能力和服役寿命的需求,因此,改善润滑状态并提高聚合物齿轮承载能力逐渐成为聚合物齿轮研究的重点。Zorko 等^[9]开展了不同润滑条件下钢-PEEK 齿轮副运转试验,发现相同载荷下与干接触相比,脂润滑可降低 PEEK 齿轮齿体温度,将齿轮的平均寿命延长 1.23 倍。Zhong 等^[10]开展了油润滑下聚甲醛(polyoxymethylene, POM)齿轮承载能力试验,发现在接触应力和剪切应力作用下,裂纹在齿轮齿面次表层萌生和扩展,最终发展为齿面疲劳裂纹和点蚀的接触疲劳失效。卢泽华等^[11]研究了润滑和载荷状态对 POM 齿轮服役性能的影响,发现干接触下 POM 齿轮主要发生磨损失效,油润滑下主要发生疲劳失效,且油润滑下 POM 齿轮运行温度显著降低,承载能力明显提高。Yu 等^[12]对比了干摩擦和油润滑条件下 POM 齿轮副磨损行为的差异,发现干摩擦条件下随着磨损积累,齿轮齿面节线区域形成隆起,而油润滑下齿面无严重损伤,油润滑大幅提高了 POM 齿轮的承载能力。显然,油润滑通过降低摩擦、增强散热等功效,提高了聚合物齿轮的承载能力,延长了服役寿命,成为动力传递场合聚合物齿轮的首选润滑方式。

油润滑降低了聚合物齿轮齿面磨损失效概率,使疲劳失效成为主导失效形式^[13-14]。Illenberger 等^[15]研究了影响油润滑 PEEK 齿轮齿面损伤行为的应力条件,发现在充足的油润滑下,齿根承载能力足够时,齿轮失效形式以点蚀破坏为主。Illenberger 等^[16]通过功率封闭式齿轮试验台开展了不同材料(纯料 PEEK 和 30% 碳纤维增强 PEEK)齿轮齿面承载能力的试验,发现输出扭矩 43 N·m 下 30% 碳纤强化 PEEK 齿轮和 PEEK 齿轮均发生点蚀失效。Blais 等^[17]开展了聚合物齿轮的弯曲疲劳试验研究,试验表明齿轮裂纹在裂纹萌生后扩展非常迅速,因此,齿轮的裂纹萌生寿命更适合用于评估齿轮的弯曲疲劳寿命。Lu 等^[18]开展了油润滑下钢-PEEK 齿轮运转试验,发现在轻载和中等载荷下,油润滑 PEEK 齿轮出现点蚀以及点蚀引起的齿面断裂,重载下发生齿根疲劳断裂。相比于聚合物齿轮磨损研究,聚合物齿轮疲劳相关研究较少,且集中于对单一疲劳失效形式的研究。然而,聚合物齿轮在动力传递场合应用中疲劳失效影响因素较多,其失效进程受接触疲劳、弯曲疲劳等不同疲劳失效形式竞争影响。目前,关于油润滑下聚合物齿轮疲劳失效竞争和转变的研究较少,动力传递聚合物齿轮抗疲劳设计尚停留在经验式粗放设计阶段,导致工程实际中聚合物齿轮疲劳失效事故频发。

针对在动力传递领域中油润滑下聚合物齿轮疲劳失效形式与载荷工况之间关联规律不明的问题,笔者开展油润滑下 PEEK-PEEK 齿轮副运转型疲劳试验,分析 PEEK 齿轮运行温度演化和疲劳失效行为,辨识 PEEK 齿轮接触应力、弯曲应力与疲劳失效行为之间的关系,以支撑动力传递聚合物齿轮的失效形式预估。

1 喷油润滑下 PEEK-PEEK 齿轮疲劳性能运转试验

1.1 试验齿轮参数

试验齿轮材料均为 PEEK,材料牌号为 HPG 140GRA,具有耐高温、高耐磨性和耐腐蚀性,在苛刻工况下可保持高机械强度和尺寸稳定性。其力学性能如表 1 所示。

表 1 试验齿轮材料性能参数

Table 1 The material properties of the test gear

| 弹性模量(40 °C) E/MPa | 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 抗拉强度(23 °C) R_m/MPa | 玻璃态转化温度 $T/^\circ\text{C}$ |
|----------------------------|---|------------------------------|----------------------------|
| 3 600 | 1.3 | 95 | 143 |

表 2 所示为 PEEK-PEEK 齿轮副几何参数,代表了汽车发动机典型动力传动应用场景。试验齿轮为渐开线圆柱斜齿轮,采用注塑成型,主动轮左旋,从动轮右旋。

表 2 PEEK-PEEK 齿轮副主要几何参数

Table 2 Main geometric parameters of the PEEK-PEEK gear pair

| 模数 m_n/mm | 齿数 | 压力角 $\alpha_n/^\circ$ | 中心距 a/mm | 齿宽 b/mm | 传动比 |
|--------------------|----|-----------------------|-------------------|------------------|-----|
| 1.898 | 28 | 13.796 | 54 | 15 | 1 |

1.2 齿轮疲劳性能运转试验台与检测

PEEK 齿轮疲劳试验采用的多用途传动性能试验台如图 1 所示。该试验台由 2 个主轴箱、2 个驱动电机、导轨和监测系统组成。主动轮主轴箱可沿导轨移动以调整齿轮中心距,移动精度可达 $1\ \mu\text{m}$ 。通过监控振动信号,可实现自动停机功能。

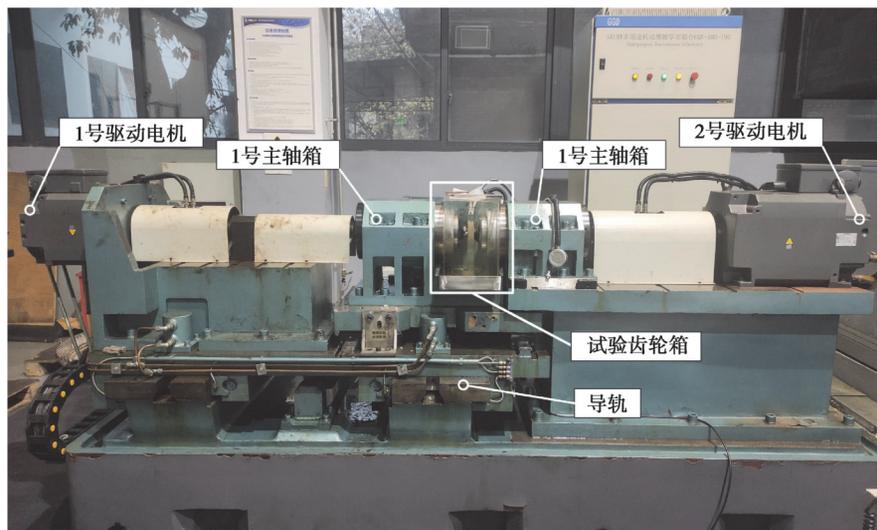


图 1 多用途传动性能试验台

Fig. 1 Multipurpose transmission performance test rig

PEEK 齿轮疲劳试验过程中的润滑油为牌号 HX7 PIUS 5W-40 的发动机极压润滑油,其基本性能参数如表 3 所示。试验采用喷油润滑,为了确保齿轮副之间的良好润滑状态,喷油量控制在 $0.6\pm 0.2\ \text{L}/\text{min}$,以连续供油方式直接对啮合区域进行润滑。

表 3 试验润滑油的基本性能参数

Table 3 The basic parameters of test lubricating oil

| 运动黏度(100 °C) $/(mm^2\cdot s^{-1})$ | 运动黏度(40 °C) $/(mm^2\cdot s^{-1})$ | 动力黏度 $\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ | 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 14.7 | 89.5 | 5 471 | 0.841 |

PEEK 齿轮疲劳试验流程如图 2 所示。试验共设置 6 个载荷级,输出扭矩 T_2 分别为 15、20、25、30、35、40 N·m。试验前将 PEEK 齿轮置于浓度 95% 的乙醇溶液中进行超声波清洗,用氮气吹干后置于标准环境(温度 23 ± 2 °C,环境湿度 $50\% \pm 5\%$)静置 88 h 后,用克林贝格 P26 精密齿形综合测量仪测量齿轮精度,试验齿轮的平均精度符合 GB/T 10095 中 10 级精度要求;同时用德国马尔 M 系列便携式粗糙度仪 M300C 检测齿轮粗糙度,随机选取齿轮的一个轮齿齿面测 3 次,齿面轮廓算术平均偏差 R_a 的平均值为 $0.279 \mu\text{m}$ 。正式试验后,采用红外线热成像仪(Fotric, 238)监控试验齿轮副运行温度,每隔 10^5 次循环记录一次齿轮齿体温度和出油口润滑油温度,每次记录 3 个温度值,并以平均值作为该时刻的稳定温度,齿轮失效后,利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析其齿面疲劳损伤微观特征。

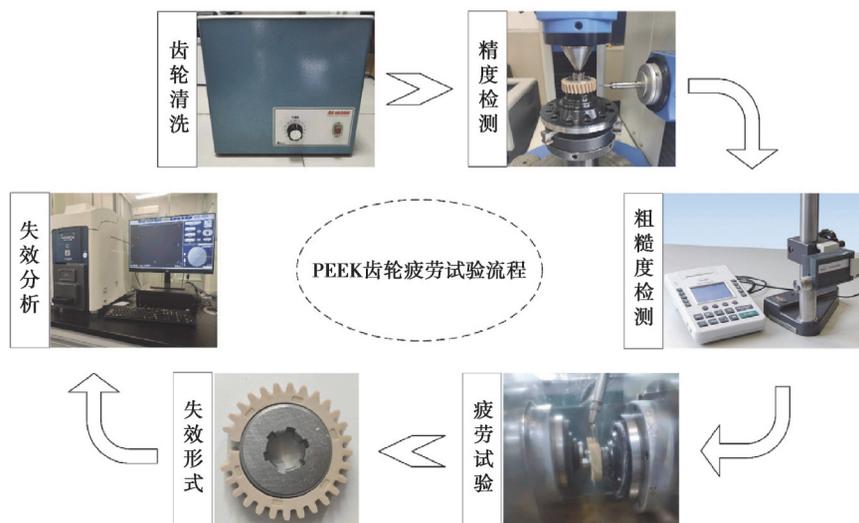


图 2 PEEK 齿轮疲劳试验流程

Fig. 2 The fatigue test process of PEEK gear

1.3 PEEK 齿轮强度计算方法

载荷是影响聚合物齿轮失效形式的关键因素之一,轻载和中等载荷条件下,PEEK 齿轮以点蚀失效为主,重载条件下 PEEK 齿轮更容易发生齿根疲劳断裂^[18]。根据广泛应用于国际聚合物齿轮行业的德国聚合物齿轮强度计算手册 VDI 2736-2^[19],计算不同输出扭矩下齿轮接触应力、弯曲应力和相关系数。

PEEK 齿轮的最大齿面接触应力计算公式为

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\epsilon Z_\beta \sqrt{\frac{2T_2 K_H (u+1)}{bd_1^2 u}} \quad (1)$$

式中: Z_E 为弹性影响系数; Z_H 为区域系数; Z_ϵ 为重合度系数; Z_β 为螺旋角系数; T_2 为输出扭矩, N·mm; K_H 为齿面载荷系数; u 为传动比; b 为齿宽, mm; d_1 为分度圆直径, mm。

弹性影响系数 Z_E 考虑了材料特性的弹性模量 E 和泊松比 μ 对接触应力的影响,计算公式为

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left[\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right]}} \quad (2)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为配对两齿轮材料的弹性模量, MPa; μ_1 、 μ_2 分别为配对两齿轮材料的泊松比。

根据齿轮材料参数、几何参数和 VDI 2736 计算出接触应力计算中的相关系数如表 4 所示。相比于钢-PEEK 齿轮^[18], PEEK-PEEK 齿轮副的弹性影响系数 Z_E 更低,相同载荷下接触承载能力更高。

PEEK 齿轮的最大齿根弯曲应力计算公式为

$$\sigma_F = K_F Y_{Fa} Y_{Sa} Y_\epsilon Y_\beta \frac{2T_2}{bd_1 m_n} \quad (3)$$

式中: K_F 为齿根载荷系数; Y_{Fa} 为斜齿轮的齿形系数; Y_{Sa} 为应力修正系数; Y_ϵ 为重合度系数; Y_β 为螺旋角系数;

m_n 为法向模数, mm。

表 4 试验齿轮齿面接触应力相关系数

Table 4 Values of correlation coefficients of contact stress on the tooth surface of test gear

| 载荷系数 K_H | 区域系数 Z_H | 弹性影响系数 Z_E | 重合度系数 Z_ϵ | 螺旋角系数 Z_β |
|------------|------------|--------------|--------------------|-----------------|
| 1.1 | 2.898 | 26.12 | 0.855 | 0.998 |

根据齿轮材料参数、几何参数和 VDI 2736 计算出弯曲应力计算中的相关系数如表 5 所示。

表 5 试验齿轮齿根弯曲应力相关系数

Table 5 Test gear root bending stress correlation coefficient values

| 载荷系数 K_F | 齿形系数 Y_{Fa} | 应力修正系数 Y_{Sa} | 重合度系数 Y_ϵ | 螺旋角系数 Y_β |
|------------|---------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| 1.1 | 3.16 | 1.41 | 0.554 | 0.964 |

2 试验结果与讨论

润滑油通过带走聚合物齿轮啮合过程中产生的热量和在齿面形成油膜减少齿面摩擦而降低聚合物齿轮的运行温度^[11], 提高聚合物齿轮的承载能力。本节阐述了试验过程中 PEEK 齿轮齿体的运行温度、润滑油温度和齿轮失效形式, 分析了油润滑下载荷对 PEEK 齿轮承载能力和服役性能的影响。

2.1 温度与应力状态分析

使用红外线热成像仪测量每个载荷级下齿轮运转过程中的齿体温度, 热成像仪发射率设置为 $\epsilon = 0.95$ ^[9]。齿轮副运转图片与热成像图片如图 3 所示, 齿轮与主轴箱连接盘的温度明显高于齿轮副, 这主要是由于润滑油只对齿轮副进行润滑降温, 而连接盘依靠空气对流降温, PEEK 齿轮副主动轮与从动轮齿体温度具有较好的一致性。

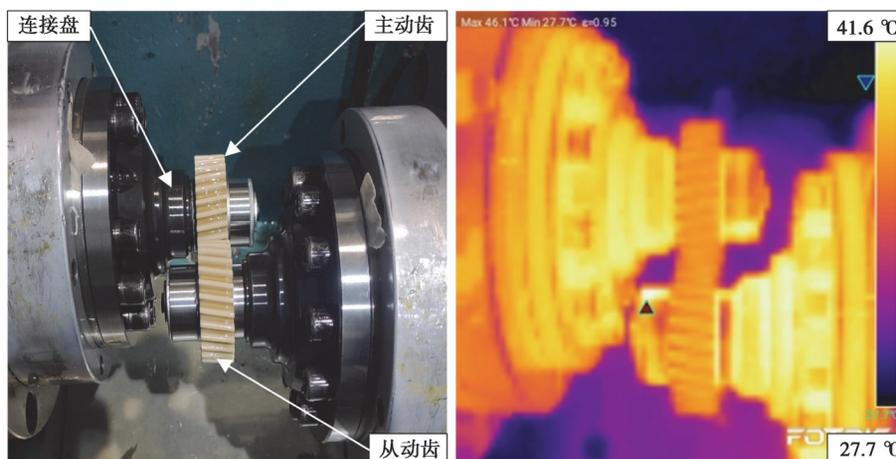


图 3 齿轮副运转图片与热成像图片

Fig. 3 Gear operating and thermal images

试验过程中分别记录了 PEEK 齿轮齿体温度和润滑油温度, 当输出扭矩 T_2 为 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, PEEK 齿轮齿体温度和润滑油温度随循环次数 N 的变化趋势如图 4(a) 所示。试验开始后, 齿轮齿体温度和润滑油温度快速升高, 在 N 达 1×10^6 附近趋于稳态, 直到疲劳失效时齿轮齿体温度和润滑油温度基本不发生变化, 进而确定不同载荷级下齿轮齿体和润滑油的稳态温度选取范围。图 4(b) 为各载荷级下润滑油和齿轮齿体稳态温度, 可见不同载荷级下油温基本不变, 稳定在 $32 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 齿轮齿体温度基本稳定在 $42 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。油润滑下可以忽略载荷对 PEEK 齿轮齿体温度的影响。

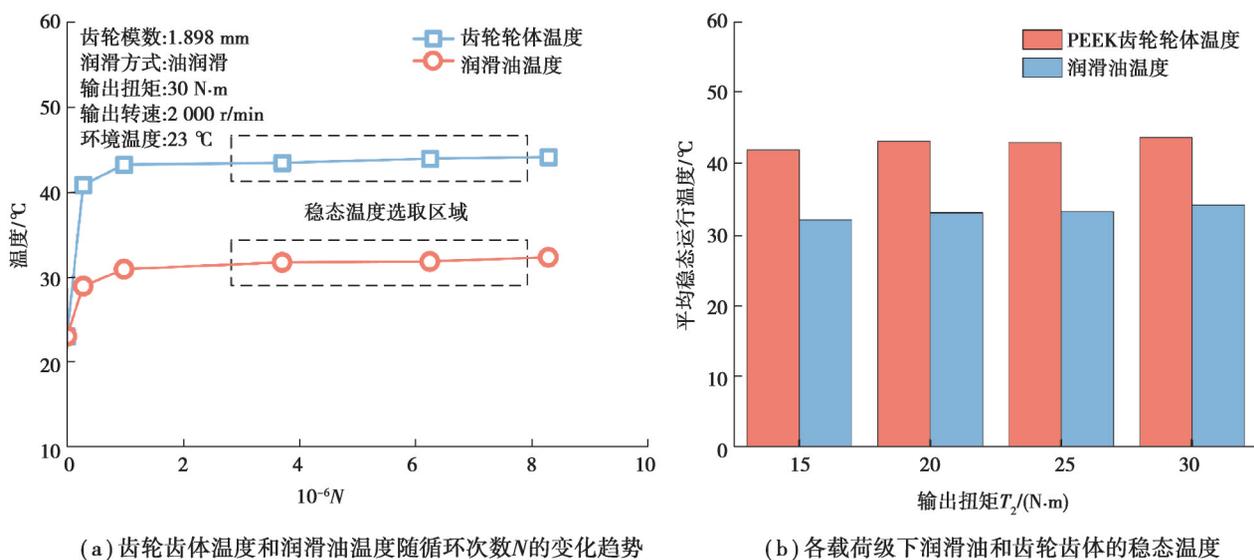


图4 润滑油温度和齿轮齿体温度

Fig. 4 Temperatures of lubricating oil and gear wheel

2.2 PEEK 齿轮失效形式

PEEK 齿轮试验过程中,当试验齿轮循环次数超过 10^7 或符合失效标准时停止试验。PEEK 齿轮在试验中发生齿面点蚀和齿根疲劳断裂 2 种失效形式,如图 5 所示。输出扭矩 T_2 为 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时齿轮发生接触疲劳失效,表现为节线附近的齿面点蚀破坏;输出扭矩 T_2 为 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时齿轮发生弯曲疲劳失效,表现为齿根疲劳断裂破坏。



图5 PEEK 齿轮疲劳失效

Fig. 5 PEEK gear fatigue failure

图 6 为电子扫描显微镜下,输出扭矩 T_2 为 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时 PEEK 齿轮齿面点蚀的微观形貌,可以看出齿面点蚀主要集中在齿轮齿面节线附近,齿根区域和齿顶区域基本没有出现点蚀,但存在轻微划痕。根据 Zhong 等^[10] 的研究可知,啮合齿轮副在节线处只存在滚动,在齿根和齿顶区域都存在相对滑动,这是导致齿顶和齿根区域出现轻微划痕的可能原因。齿轮运行过程中在节线附近的赫兹接触应力高于齿根和齿顶区域,因而导致 PEEK 齿轮齿面节线区域发生点蚀破坏。齿轮齿面节线处的点蚀区域分布着大量疲劳裂纹和点蚀坑,疲劳裂纹主要萌生在齿轮次表层,在齿轮表面循环应力作用下,次表层的初始裂纹逐步扩展并向各个方向延伸,当多个裂纹汇集延伸到齿面时,则形成点蚀坑^[20-21]。

图 7 展示了 PEEK 齿轮的典型齿根疲劳断裂特征。输出扭矩 T_2 为 $35 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,PEEK 齿轮的最终失效形式为齿根疲劳断裂,如图 7(a) 所示,重载条件下,齿根弯曲应力超过局部弯曲疲劳强度,齿根圆角处出现裂纹,裂纹由承载齿面齿根表面向齿根内部扩展,导致齿根疲劳断裂,其裂纹萌生的危险位置与 30° 切线位置一致^[22]。输出扭矩 T_2 为 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,齿轮最终发生齿根处整齿断裂,复原断齿齿廓如图 7(b) 所示,发现齿根疲劳断裂处与图 7(a) 中裂纹位置具有良好的 consistency。

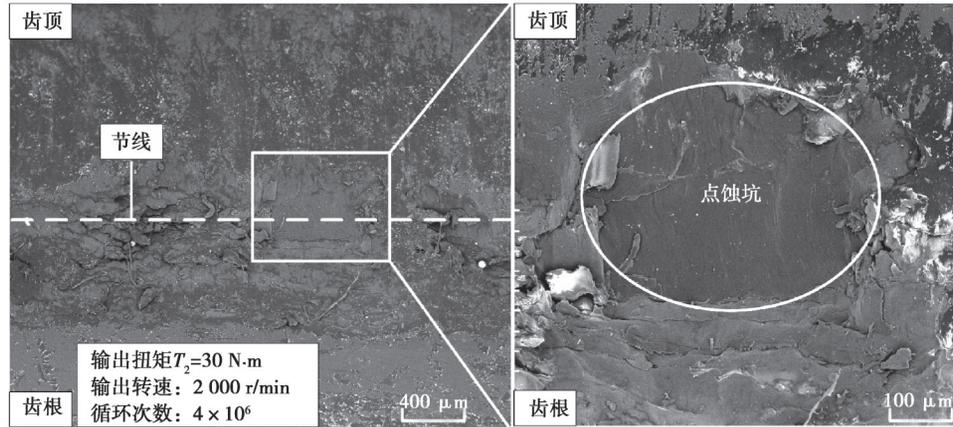
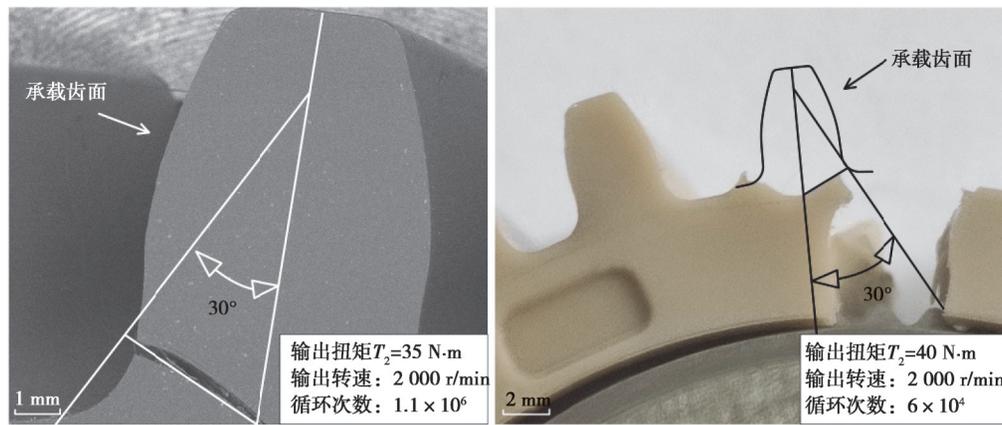


图 6 PEEK 齿轮点蚀齿面微观形貌

Fig. 6 PEEK gear pitting surface micromorphology



(a) PEEK 齿轮齿根疲劳断裂微观形貌

(b) PEEK 齿轮齿根疲劳断裂宏观形貌

图 7 PEEK 齿轮齿根疲劳断裂宏微观形貌

Fig. 7 Macro and micro features of PEEK gear root fracture

根据式(1)(3)和表 4、表 5 计算 PEEK 齿轮在不同载荷级下的齿面接触应力与齿根弯曲应力,结果如图 8 所示。随着输出扭矩增大,PEEK 齿轮齿根弯曲应力升高的速度比 PEEK 齿轮齿面接触应力升高更快。

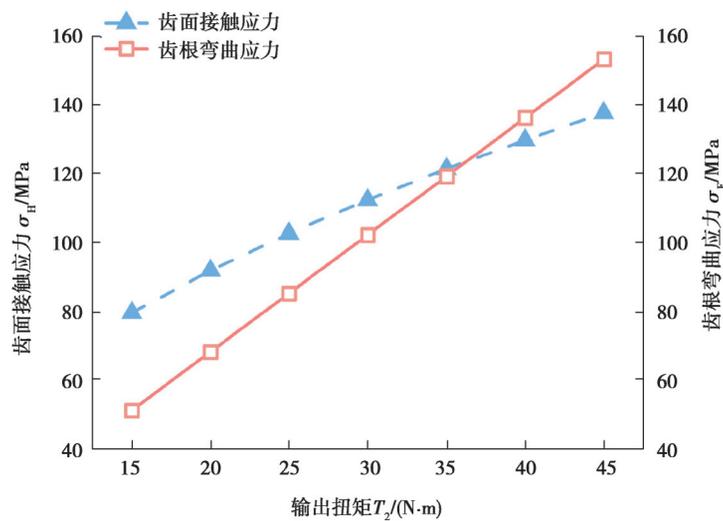


图 8 不同载荷级下 PEEK 齿轮齿面接触应力与齿根弯曲应力

Fig. 8 Contact stress and root bending stress of PEEK gear under different load levels

为了更好地反映PEEK齿轮的齿面接触应力与齿根弯曲应力随输出扭矩的变化趋势对齿轮疲劳失效形式的影响,提出了PEEK齿轮失效转变点 k ,定义 k 为PEEK齿轮齿面接触应力与齿根弯曲应力之比:

$$k = \frac{\sigma_H}{\sigma_F} \quad (4)$$

图9为不同输出扭矩下PEEK齿轮失效转变点 k 的变化趋势。随输出扭矩不断增高, k 值不断减小,且 k 的变化幅度随输出扭矩的增大而减小。当 $k > 1.10$ 时,齿轮以齿面点蚀失效为主,当 $k < 1.02$ 时,齿轮以齿根疲劳断裂失效为主,故 k 在1.02~1.10范围内存在PEEK齿轮齿面点蚀和齿根疲劳断裂的临界失效转变点。

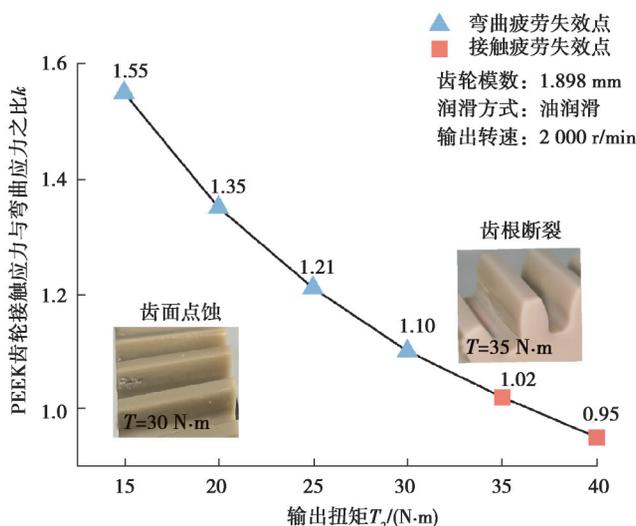


图9 PEEK齿轮失效转变点 k 变化趋势图

Fig. 9 Failure transition point k of PEEK gears

聚合物齿轮的使用寿命在很大程度上取决于其齿根承载能力。如果载荷超过局部弯曲疲劳强度,齿根圆角区域出现裂纹,最终导致齿根疲劳断裂^[15],而且齿根疲劳断裂失效从齿根圆角裂纹萌生到最终断齿失效需要的循环次数比齿面次表层裂纹萌生到最终齿面点蚀失效需要的循环次数更少,齿根疲劳断裂失效更快。聚合物齿轮的齿根疲劳断裂会显著影响传动系统的传动性能,甚至导致传动系统完全失效,损伤设备甚至危及人身安全。通过试验估算出PEEK齿轮齿面点蚀和齿根疲劳断裂的失效形式临界转换点,可以为预估PEEK齿轮失效形式提供支撑。

2.3 PEEK齿轮疲劳寿命

图10为16副PEEK齿轮疲劳试验在不同输出扭矩下的疲劳寿命。当输出扭矩低于30 N·m时,PEEK齿轮主要发生接触疲劳失效,在输出扭矩15 N·m和25 N·m下都存在寿命越出点;输出扭矩高于35 N·m时,PEEK齿轮全部发生弯曲疲劳失效,尤其在输出扭矩40 N·m时,PEEK齿轮的弯曲疲劳寿命急剧降低,平均寿命仅为循环次数 1.8×10^5 ,较输出扭矩30 N·m时约降低1个数量级。

基于16组PEEK齿轮疲劳试验数据,绘制了PEEK齿轮的接触疲劳 $S-N$ 曲线和弯曲疲劳 $S-N$ 曲线,如图11所示。接触疲劳失效试验点和弯曲疲劳失效试验点分布存在明显分界,且接触疲劳失效试验点相对集中,弯曲疲劳失效试验点相对分散,说明PEEK齿轮弯曲疲劳寿命随输出扭矩的升高变化显著。当PEEK齿轮的最大齿根弯曲应力低于102.22 MPa时,齿轮齿根疲劳强度足够,这时主要发生由齿面最大接触应力主导的接触疲劳失效;而当齿轮齿根最大弯曲应力高于119.26 MPa时,齿轮全部发生弯曲疲劳失效,可见PEEK齿轮的弯曲疲劳强度极限范围在102.22~119.26 MPa之间。图11中PEEK齿轮最大齿面接触应力为79.50 MPa和102.63 MPa时,齿轮循环次数均超 10^7 ,齿轮寿命超出,然而当齿面接触应力为91.80 MPa时,齿轮的平均疲劳寿命约为 8.86×10^6 ,所以PEEK齿轮的接触疲劳强度极限范围在79.50~91.80 MPa之间。当齿根弯曲应力升高20 MPa,齿轮疲劳寿命约降低一个数量级;齿轮齿面接触应力低于112.43 MPa时,PEEK齿轮的接触疲劳寿命基本稳定在同一数量级。从图10可以看出,当输出扭矩超过35 N·m后,PEEK齿轮全部发生弯曲疲劳失效,且其弯曲疲劳寿命几乎全部低于循环次数 3×10^6 ,与金属齿轮获取弯曲疲劳强度极限时设定的循环基

数一致,因此,PEEK 齿轮弯曲疲劳强度极限循环基数可近似设置为 3×10^6 。由于试验齿轮并未按照标准 GB/T 14229-2021“齿轮接触疲劳强度试验方法”和 GB/T 14230-2021“齿轮弯曲疲劳强度试验方法”中基础数据测定推荐的试验齿轮参数进行设计,该 PEEK 齿轮疲劳 $S-N$ 曲线存在一定局限性。针对不同结构参数的 PEEK 齿轮,本文中获得的疲劳 $S-N$ 曲线可作一定参考,精确的齿轮疲劳 $S-N$ 曲线还需重新进行试验获取。

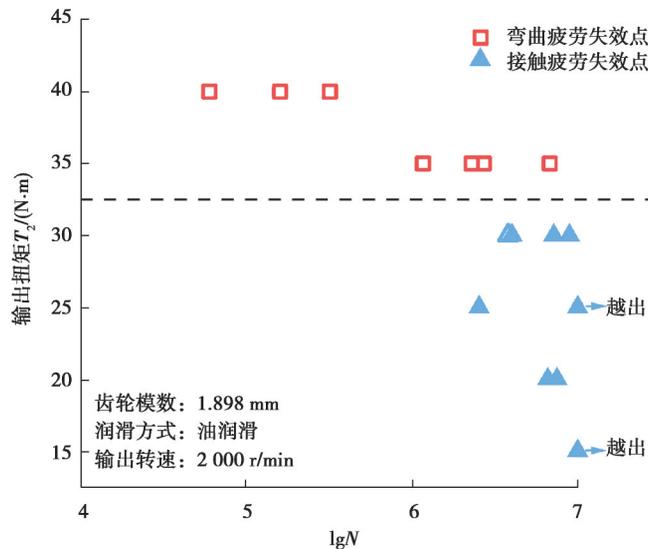


图 10 不同输出扭矩下的 PEEK 齿轮失效形式及疲劳寿命

Fig. 10 PEEK gear failure forms and fatigue life at different output torques

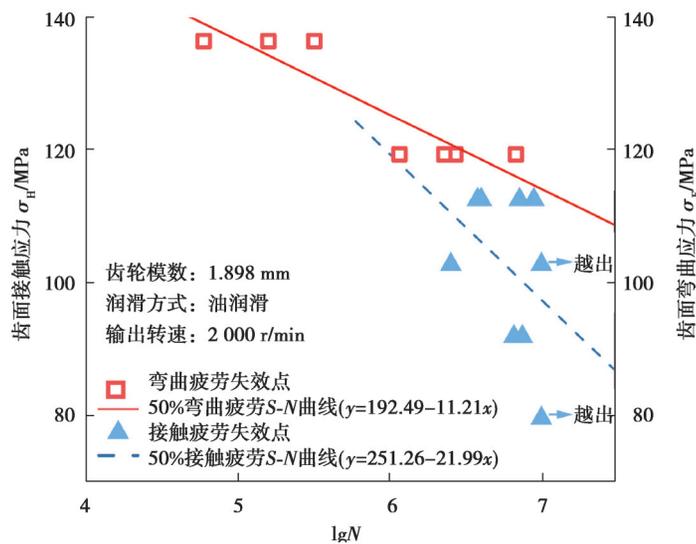


图 11 油润滑下 PEEK 齿轮的接触和弯曲疲劳 $S-N$ 曲线

Fig. 11 Contact and bending fatigue $S-N$ curves of peek gears under oil-jet lubrication

3 结 论

针对油润滑下聚合物齿轮疲劳失效形式与运行载荷之间关联规律不明的问题,开展油润滑下 PEEK-PEEK 齿轮疲劳试验。发现油润滑下 PEEK 齿轮疲劳失效形式随载荷增加发生变化,进而提出了 PEEK 齿轮失效转变点 k (齿轮齿面接触应力与齿根弯曲应力的比值),并确定了 PEEK 齿轮齿面点蚀和齿根疲劳断裂失效临界转变点 k 的范围,为高承载聚合物齿轮的可靠设计和失效分析提供理论依据。主要结论如下:

1) 轻、中载下油润滑 PEEK 齿轮主要发生接触疲劳失效,重载下则发生弯曲疲劳失效。在输出扭矩低于 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时油润滑 PEEK 试验齿轮发生齿面点蚀,而高于 $35 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时试验齿轮发生齿根疲劳断裂。

2) PEEK 齿轮的齿面点蚀和齿根疲劳断裂失效临界转换点 k 在 $1.02 \sim 1.10$ 范围内。当 k 低于 1.02 时,PEEK 齿轮发生齿根疲劳断裂;当 k 高于 1.10 时,发生齿面点蚀。

3) 当循环基数为 10^7 时,油润滑下 PEEK 齿轮的接触疲劳强度极限范围在 $79.50 \sim 91.80 \text{ MPa}$ 之间;油润滑

下PEEK齿轮弯曲疲劳极限循环基数约为 3×10^6 ,其弯曲疲劳强度极限范围在102.22~119.26 MPa之间。

参考文献

- [1] Mao K, Li W, Hooke C J, et al. Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears[J]. *Wear*, 2009, 267(1/2/3/4): 639-645.
- [2] Kurokawa M, Uchiyama Y, Nagai S. Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone: Part 2[J]. *Tribology International*, 2000, 33(10): 715-721.
- [3] Dighe A D, Mishra A K, Wakchaure V D. Investigation of wear resistance and torque transmission capacity of glass filled polyamide and PEEK composite spur gears[J]. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2014, 3(3): 299-303.
- [4] Hasl C, Illenberger C, Oster P, et al. Potential of oil-lubricated cylindrical plastic gears[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2018, 12(1): JAMDSM0016.
- [5] Terashima K, Tsukamoto N, Nishida N. Development of plastic gear for power transmission: economical methods for increasing load-carrying capacity[J]. *Bulletin of JSME*, 1986, 29(247): 256-259.
- [6] Mao K, Langlois P, Hu Z, et al. The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears[J]. *Wear*, 2015, 332: 822-826.
- [7] Mao K, Hooke C J, Walton D. The wear behaviour of polymer composite gears[J]. *Journal of Synthetic Lubrication*, 1996, 12(4): 337-345.
- [8] Li W, Wood A, Weidig R, et al. An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements[J]. *Wear*, 2011, 271(9-10): 2176-2183.
- [9] Zorko D, Kulovec S, Duhovnik J, et al. Durability and design parameters of a steel/PEEK gear pair[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 140: 825-846.
- [10] Zhong B, Zhang R, Wei P, et al. The durability performance of polyketone gears under various lubrication conditions[J]. *Journal of Tribology*, 2022, 144(9): 091203.
- [11] 卢泽华, 刘怀举, 朱才朝, 等. 润滑和载荷状态对聚甲醛齿轮服役性能的影响[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(17): 2047-2054.
Lu Z H, Liu H J, Zhu C C, et al. Optimal design of load sharing performance of megawatt level offshore wind turbine gearbox under multi-operating conditions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(17): 2047-2054. (in Chinese)
- [12] Yu G, Liu H, Mao K, et al. Examination on the wear process of polyformaldehyde gears under dry and lubricated conditions[J]. *Friction*, 2021, 9(3): 538-550.
- [13] Lu Z, Liu H, Zhang R, et al. The simulation and experiment research on contact fatigue performance of acetal gears[J]. *Mechanics of Materials*, 2021, 154: 103719.
- [14] Zhong B, Song H, Liu H, et al. Loading capacity of POM gear under oil lubrication[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2022, 16(1): JAMDSM0006.
- [15] Illenberger C M, Tobie T, Stahl K. Damage mechanisms and tooth flank load capacity of oil-lubricated PEEK gears[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022: 139(30): e52662.
- [16] Illenberger C M, Tobie T, Stahl K. Operating behavior and performance of oil-lubricated plastic gears[J]. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2022, 86(3): 557-565.
- [17] Blais P, Toubal L. Single-gear-tooth bending fatigue of HDPE reinforced with short natural fiber[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 141: 105857.
- [18] Lu Z, Liu H, Zhu C, et al. Identification of failure modes of a PEEK-steel gear pair under lubrication[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 125: 342-348.
- [19] Thermoplastic gear wheels - cylindrical gears - calculation of the load-carrying capacity: VDI 2736 Blatt 2 [S]. Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 2014.
- [20] Lu Z, Liu H, Wei P, et al. The effect of injection molding luncker defect on the durability performance of polymer gears[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 180: 105665
- [21] Fajdiga G, Glodež S, Kramar J. Pitting formation due to surface and subsurface initiated fatigue crack growth in contacting mechanical elements[J]. *Wear*, 2007, 262(9/10): 1217-1224.
- [22] Zorko D. Investigation on the high-cycle tooth bending fatigue and thermo-mechanical behavior of polymer gears with a progressive curved path of contact[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 151: 106394.

(编辑 罗 敏)