

塑料齿轮传动高承载技术发展与应用

刘怀举* 卢泽华 朱才朝

重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室,重庆,400044

摘要: 围绕塑料齿轮承载能力及在动力传动领域应用的问题,介绍了塑料齿轮的失效形式与承载能力,给出了目前的材料与工艺水平下塑料齿轮承载的基础数据,从新材料应用、润滑等工况条件改善、材料-结构-工况协同设计等方面阐述了提高塑料齿轮承载能力的措施,介绍了高承载塑料齿轮在汽车发动机传动、轻型车辆主传动、小型航发附件机匣传动等动力传动场景的应用实践和潜力。

关键词: 塑料齿轮;承载能力;协同设计;失效形式

中图分类号: TP182

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



State-of-the-art and Trend of High Loading Capacity Plastic Gear Drives

LIU Huaiju* LU Zehua ZHU Caichao

State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing, 400044

Abstract: Focusing on the loading capacity and applications in power transmission of plastic gears, the failure modes and loading capacity under the current materials and technology levels were introduced. The strengthening measures for improving loading capacity of plastic gears were elaborated from the application of new materials, lubrication improvement, collaborative design, and so on. The applications and potential of plastic gears scenarios in power transmissions such as automobile engines, vehicle reducers, and aeroengine accessory gearboxes were introduced, which has important reference significance for promoting the development of high load plastic gear technology and applications.

Key words: plastic gear; load carrying capacity; collaborative design; failure mode

0 引言

齿轮是机械工业重要的基础件。相对于金属齿轮,塑料齿轮具有质量小、噪声小、耐磨损、成形高效、成本低等优点,但早期的塑料齿轮存在尺寸稳定性、精度和寿命等问题,主要用于仪器、仪表、玩具、打印机等行业的轻载传动场合,且大多数局限于运动传递。随着新材料的开发、制造技术的发展、新型结构的设计、润滑条件的改善,塑料齿轮正逐步用于动力传递,有望在更多应用领域实现动力传动齿轮的“以塑代钢”。

塑料齿轮与金属齿轮相比具有显著优势:

①注塑成形的塑料齿轮成本远低于机加工的金属齿轮,大批量生产的成本优势尤其明显;②轻量化优势,大多数塑料齿轮的材料密度为钢铁材料密度的 $1/4\sim 1/7$,而传动的功率密度至少比金属传动大1倍,因此受到航空装备、特种车辆、电动汽车等领域中齿轮传动轻量化设计的青睐;③具有良好的自润滑特性,在很多轻载场合可采用干接触或乏油润滑,摆脱了对外部润滑的依赖,使塑

料齿轮具有很好的环保性和成本优势;④具有防腐、降噪等优势,尤其适用于在高速齿轮传动。

然而,塑料齿轮也存在一些明显的短板,限制了其工程应用:①材料力学性能弱、成形加工一致性差、齿轮设计水平不足、产品制造精度低等问题导致早期的塑料齿轮承载能力显著低于金属齿轮;②与钢铁等金属材料相比,塑料刚度偏小,塑料齿轮轮齿在中重载荷的啮合过程中会发生较大的变形,导致传动精度低和传动误差大,进而影响疲劳可靠性和振动噪声水平;③塑料对温度较为敏感,塑料性能在大多数金属材料适用的温度范围内可能发生显著变化,很多动力传动齿轮的服役温度达 $100\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$,塑料在该温度范围内可能发生性能退化。

面对以上问题,如何通过材料、设计、制造、基础数据建设等技术环节的改善来提高塑料齿轮的承载能力,已成为塑料齿轮在动力传动领域发展、推动“以塑代钢”的主要挑战。本文面向齿轮传动行业发展趋势——“以塑代钢”,围绕塑料齿轮的承载能力问题,结合国内外相关研究进展,介绍了塑料齿轮的承载能力水平、提高承载能力的措施、高承载塑料齿轮的研发要点与应用等方面的内

容,以期推动高承载塑料齿轮技术及应用的发展。

1 塑料齿轮的研究现状

以德国慕尼黑工业大学齿轮中心(FZG)、美国国家航空宇航局(NASA)、英国威格斯(Vic-trex)公司、日本京都工艺纤维大学、重庆大学等为代表的国内外研究机构和企业开展了高承载塑料齿轮的研究,持续探索塑料齿轮更高的承载能力,建设积累塑料齿轮的基础数据,不断扩展塑料齿轮的动力传动应用场景。FZG开展了塑料齿轮承载能力的试验研究,探索了其在电动汽车传动系统应用的可行性,主导制订了国际广泛应用的塑料齿轮设计指南VDI 2736,筹备主办了影响力越来越大的高性能塑料齿轮国际学术会议。重庆大学开展了POM、POK、PEEK、复合材料齿轮耐久测试、失效表征、加速试验方法与自主软件开发等系列研究工作,承担了国内首个高承载PEEK齿轮的国家自然科学基金,并与FZG、卢布尔雅那大学、华威大学、Victrex公司、兆威机电股份有限公司、中研高分子材料股份有限公司开展了合作。北京工业大学开发了塑料齿轮精度测量设备和综合性能试验台架,主导了我国注射成形塑料齿轮精度标准的制订。

提高承载能力和建立设计规范始终是塑料齿轮领域的研究重点和热点。FZG、千叶工业大学等科研机构开展了尼龙齿轮承载能力的系列试验,探索了塑料齿轮的设计方法^[1],相关试验数据和设计方法被编入专著《机械零件》^[2]。1981年,FZG主导完成了塑料齿轮设计的VDI 2545《热塑性齿轮规范》。英国于1987年推出了塑料齿轮强

度设计国家标准——BS 6168《非金属直齿轮规范》。在20世纪,塑料齿轮主要由聚甲醛和尼龙制成,这两类材料占据当时塑料齿轮市场80%~90%的份额。20世纪末,玻璃纤维、碳纤维等复合材料的应用发展,以及尼龙等材料改性工艺的进步使塑料齿轮的传递功率从初始的不足0.2 kW突破到超过10 kW。1999年,日本率先开展了干接触下碳纤维增强PEEK齿轮的承载能力试验,使干接触塑料齿轮的承载能力提高了50%以上^[3]。21世纪初,PPS、PA46等耐高温塑料的应用使塑料齿轮可在80℃以上的环境温度下传递运动和动力。2011年,PEEK齿轮首次用于汽车发动机动力传动系统^[4],使动力传递塑料齿轮长期服役的环境温度超过100℃。2014年,FZG发布的VDI 2736《热塑性齿轮规范》代替了VDI 2545《热塑性齿轮规范》,并成为目前国际主流的塑料齿轮设计参考。2018年,FZG开发的油润滑下动力传递塑料齿轮的传递功率突破30 kW,满足小型城市车辆动力传递的需求,该塑料齿轮在新能源汽车轮边减速器的应用扩展了塑料齿轮动力传动的应用范围^[5]。2019年,塑料齿轮精度标准——GB/T 38192《注射成形塑料圆柱齿轮精度制》的发布填补了我国塑料齿轮标准的空白,目前正在加紧制定塑料齿轮的强度标准。近年来,重庆大学、兆威机电股份有限公司等单位持续开展高承载塑料齿轮失效机理研究、基础数据建设、数据驱动主动设计,并与FZG、Victrex公司等开展国际交流合作,使我国的高承载塑料齿轮技术在某些方面与国外同步。图1所示为高承载塑料齿轮技术发展与应用历程。

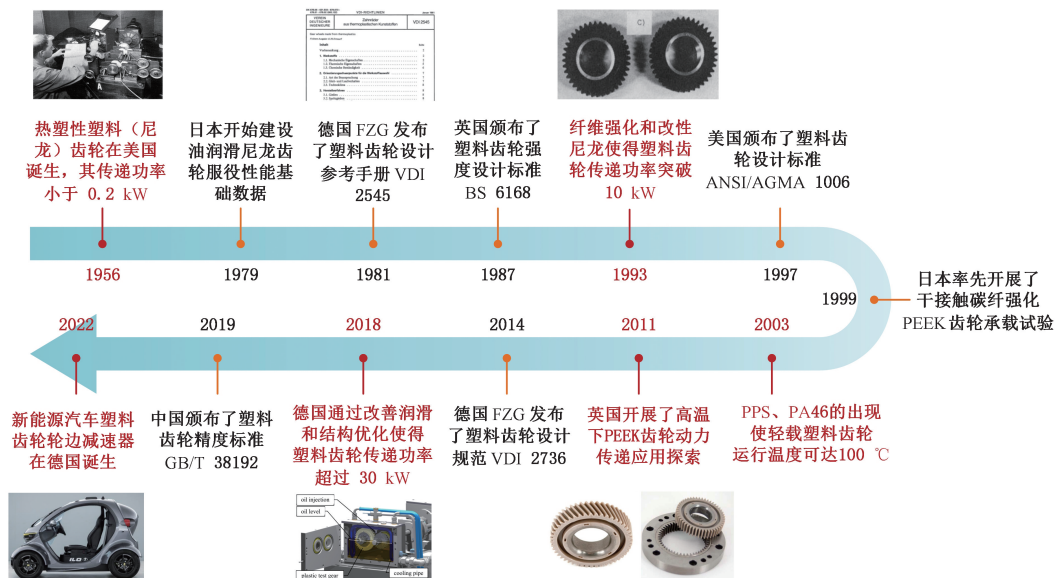


图1 高承载塑料齿轮技术发展与应用历程

Fig.1 History of the development and application of high-loading-capacity plastic gears

2 塑料齿轮的承载能力

塑料齿轮的承载能力是塑料齿轮的一个基础数据。设计人员对塑料齿轮的承载能力的有限认识限制了动力传递齿轮的“以塑代钢”。因此本节详细介绍当前塑料齿轮承载能力相关的试验技术、失效形式、计算方法,以及常见材料的承载能力。

2.1 试验技术

同金属齿轮类似,塑料齿轮承载能力的获取主要依赖试验测试,因此试验测试技术与装备的开发成为塑料齿轮承载能力研究的前提。以 FZG 齿轮试验机、DU 齿轮试验机为代表的齿轮耐久测试台架在金属齿轮承载能力研究中被广泛应用,并成为众多齿轮标准规范指定的测试台架。相比之下,塑料齿轮承载能力测试台架缺少相关规范,各种类型、规格的试验台架均有用于塑料齿

轮测试。Victrex 公司的塑料齿轮承载能力试验台^[6]配备了轴编码器(分辨力 0.0007 rad)和扭矩传感器,能在扭矩 60 N·m、转速 6000 r/min 的工况下测试齿轮,可获取与轮齿变形、齿面磨损和齿轮总体性能相关的数据,能测试不同配对方式的性能差异,促进了塑料齿轮材料适配性的研究。德国、中国^[7-8]、斯洛文尼亚等国的研究机构将 FZG 齿轮试验机用于塑料齿轮测试。滑滚可变接触疲劳试验机^[9]可用于 PEEK、POM、POK 等材料塑料齿轮的耐久测试和加速疲劳试验方法的开发。具备在线磨损率测试功能的功率封闭式塑料齿轮试验台^[10]已成功应用于干/脂/油润滑条件下塑料齿轮磨损率和服役性能的测量。电子伺服疲劳试验机(最大加载频率 10 Hz、最大加载力 1000 kN)可用于塑料齿轮齿根弯曲疲劳性能的测试^[11]。表 1 列出了典型塑料齿轮承载能力试验台的相关参数。

表 1 典型塑料齿轮承载能力试验台相关参数^[7~11]

Tab.1 Relative parameters of typical plastic gear test rigs^[7~11]

试验台类型	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	其他参数	研制单位
功率封闭式试验台	7.5	3000	温度范围:25~120 °C	慕尼黑工业大学
	3.7	5000	中心距:60 mm	华威大学
功率开放式试验台	30	3000	温度范围:25~200 °C	重庆大学
	70	10 000	油润滑	NASA
	0.4	1400	干/脂润滑	卢布尔雅那大学
	1.6	1500	中心距:30~50 mm	京都工艺纤维大学
	25	6000	中心距:50~150 mm	Victrex 公司
脉动加载试验台			最大频率:10 Hz	魁北克大学

2.2 失效形式与承载能力

明确塑料齿轮的承载能力之前,首先需要辨识其失效形式(图 2)。塑料齿轮的失效机理比金属齿轮复杂,显著的热力耦合效应是导致塑料齿轮失效复杂的主要原因,如部分塑料齿轮可能发生热熔化、热变形、热胀卡滞等失效。油润滑条件下,塑料齿轮的失效以齿轮接触疲劳失效和弯曲

疲劳失效为主。一般认为,油润滑条件下的塑料齿轮失效与材料类型、强化手段、配对方式、载荷工况、齿形几何、注塑缺陷等因素密切相关。注塑工艺参数设置不当会使塑料齿轮局部非均匀收缩、齿根区域存在缩孔缺陷。受较大载荷作用时,塑料齿轮齿根区域受缩孔处应力集中的影响,弯曲疲劳失效风险增大^[12]。目前,高承载的动力传递塑料齿轮应用越来越多,油润滑塑料齿轮失效与承载能力的研究受到国内外研究机构的重视,成为塑料齿轮领域研究的热点。

VDI 2545 首次提供了油润滑下 PA 66 齿轮在齿面温度 20~120 °C 的齿面接触疲劳,以及 POM、PA 66 齿轮的齿面和齿根强度极限参考取值。VDI 2736 增加了油润滑 PBT 齿轮在 20~100 °C 的接触疲劳 σ -N 曲线(应力-寿命曲线)及 60 °C 的齿根强度极限。2018 年,FZG 开展了 60 °C、80 °C 下模数 1~3 mm 的油润滑 POM 齿轮弯曲疲劳性能测试,绘制了考虑载荷作用的弯曲疲劳 σ -N 曲线。2022 年,FZG 绘制了 80 °C、120 °C 下油润滑 PEEK 和 30% 碳纤增强 PEEK 齿轮接

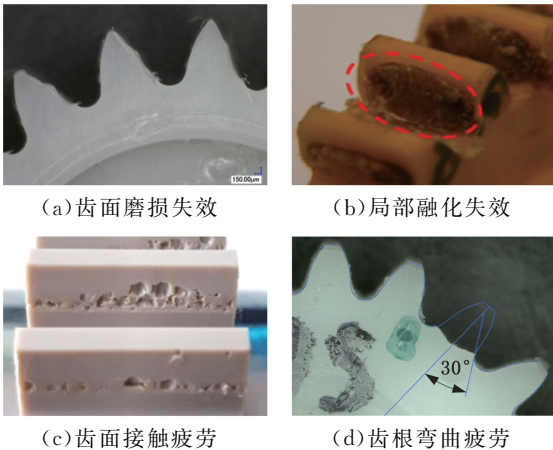
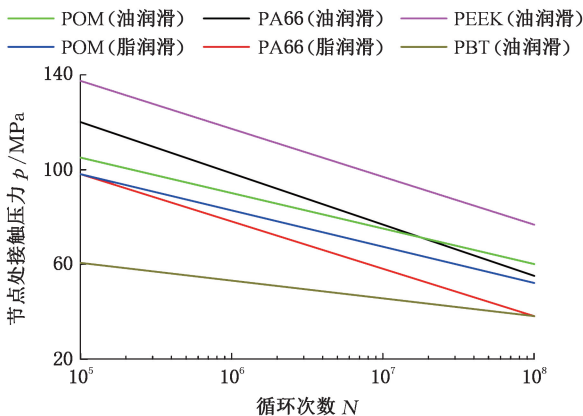


图 2 塑料齿轮的典型失效形式

Fig.2 Typical failure modes of plastic gears

触的疲劳 $\sigma-N$ 曲线。以 FZG 为代表的国外研究机构在塑料齿轮承载能力基础数据领域长期深耕,不仅支撑了国际塑料齿轮设计指南的制定,更为高承载塑料齿轮传动装置的研发和应用提供了数据支撑。然而,FZG 的塑料齿轮耐久性能试验并未完全覆盖动力传递领域中的高承载塑料齿轮失效和承载能力的基础数据。VDI 2736 认为油润滑 POM 齿轮难发生接触疲劳失效,未提供油润滑 POM 齿轮的接触疲劳 $\sigma-N$ 曲线。重庆大学通过试验发现 POM 齿轮在油润滑下存在点蚀和齿面断裂,绘制了油润滑下 20~100 °C 的 POM 齿轮接触疲劳 $\sigma-N$ 曲线,填补了 VDI 2736 中 POM 齿轮接触疲劳数据的空白^[13-14],并对比了 40 °C 时油润滑 POK 齿轮与 POM 齿轮的齿面接触疲劳性能差异。同时,根据试验绘制了 40 °C 油润滑 PEEK 齿轮的接触疲劳 $\sigma-N$ 曲线,提出了基于等效当量载荷的塑料齿轮承载能力评价方法,对比了相同温度、载荷和循环次数下油润滑 PA66、POK、POM 和 PEEK 齿轮的齿面承载能力,发现 PEEK 齿轮齿面的承载能力远高于其他塑料齿轮,如图 3 所示,具备动力传递的应用潜力。此外,基于自主研发的滑滚可变接触疲劳试验机测试了油润滑下 PEEK 齿轮的耐久性能,发现 PEEK 试验齿轮超过 300 万次循环的失效以接触疲劳失效为主。动力传递的 PEEK 齿轮循环次数通常超过 1000 万,评估承载能力时应更多考虑齿面承载能力。



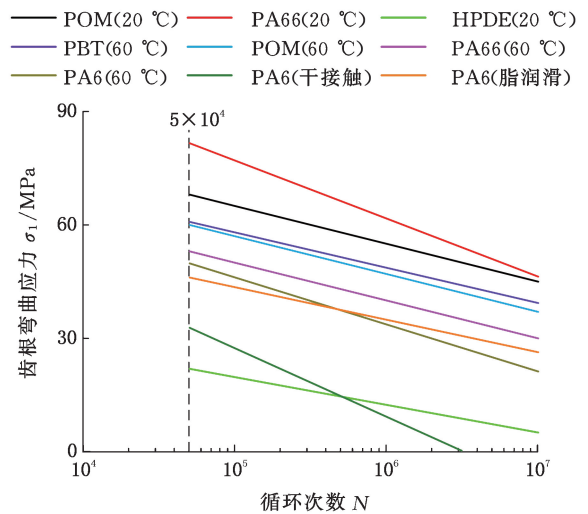
注:图来自 VDI 2736:2014-06 和笔者实验数据

图 3 塑料齿轮的接触疲劳 $\sigma-N$ 曲线(40 °C)

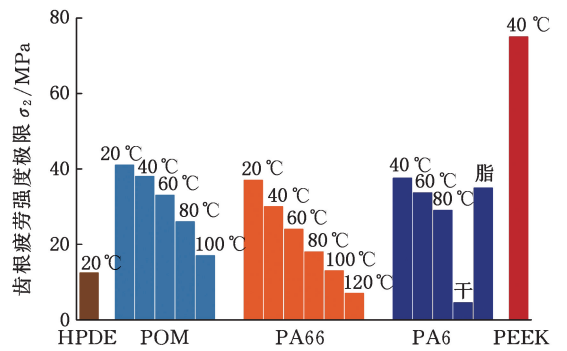
Fig.3 Contact fatigue $\sigma-N$ curves of plastic gears(40 °C)

弯曲疲劳性能研究中,Nyltech 公司基于功率封闭式齿轮试验台开展了 70 对 PA 6 纯料齿轮、162 对纤维增强 PA 6 齿轮的运转型弯曲疲劳试验,绘制了油温 40 °C、60 °C、80 °C 的弯曲疲劳 $\sigma-N$ 曲线^[15]。Vikram Sarabhai 航天中心研究了循环频率对塑料齿轮齿根弯曲疲劳性能的影响,

绘制了循环频率 5 Hz、10 Hz 下的 PA 66 齿轮和 20%长玻纤增强 PA 66 齿轮的齿根弯曲疲劳 $\sigma-N$ 曲线,发现高循环频率可延长塑料齿轮的齿根弯曲疲劳寿命,且对纤维增强齿轮的效果更明显^[16]。图 4 所示为常见塑料齿轮弯曲疲劳性能的基础数据。塑料齿轮弯曲疲劳试验研究集中在干运转工况,而干运转工况的运行温度、应力状态、循环频率等因素与油润滑状态存在较大差异,难以直接支撑动力传递塑料齿轮应用。目前,以弯曲疲劳 $\sigma-N$ 曲线和疲劳强度极限为代表的的基础数据极为匮乏,亟待开展更多基于运转型试验的塑料齿轮弯曲疲劳性能测试。



(a)塑料齿轮齿根弯曲疲劳 $\sigma-N$ 曲线



(b)塑料齿轮齿根弯曲疲劳强度极限(循环次数: 3×10^7)

注:图来自 VDI 2736:2014-06 和笔者实验数据

图 4 常见塑料齿轮弯曲疲劳性能基础数据

Fig.4 Bending fatigue data of typical plastic gears

尽管开展了塑料齿轮失效形式与承载能力的诸多研究,但高承载塑料齿轮的失效机理复杂和影响因素众多使承载能力数据建设面临严峻挑战。塑料齿轮的基础数据建设工作是其动力传递、实现“以塑代钢”的关键,因此,持续开展高承载塑料齿轮的服役性能试验,获取高承载塑料齿轮承载能力基础数据,是塑料齿轮研究的一项重要工作。

2.3 塑料齿轮承载能力计算方法

按照失效部位的不同,塑料齿轮承载能力主要分为齿面接触承载能力和齿根承载能力。齿根弯曲疲劳失效对塑料齿轮长期服役的安全性和可靠性影响最大。一旦发生齿根弯曲疲劳失效,齿轮将在服役过程中产生较大冲击载荷,导致整个齿轮逐渐丧失承载能力。直齿轮齿根的弯曲疲劳失效主要表现为齿根处的全齿折断,斜齿轮的弯曲疲劳失效主要表现为局部折断。为避免齿根弯曲疲劳失效,需要对齿轮弯曲疲劳承载能力进行设计和校核。这是高承载塑料齿轮设计的关键环节之一。

目前,包括 VDI 2736 的塑料齿轮强度设计手册均基于悬臂梁理论评估齿根承载能力。VDI 2736 的塑料齿轮齿根承载能力计算方法源于金属齿轮强度设计标准 DIN 3990,在考虑塑料齿轮大变形、低热导率和温度相关性的影响后,对相关参数和 $\sigma-N$ 曲线数据进行修正。VDI 2736 的塑料齿轮齿根弯曲应力 σ_F 的计算公式为

$$\sigma_F = K_F Y_{Fa} Y_{Sa} Y_\epsilon Y_\beta \frac{2T_1}{b_w d_1 m_n} \quad (1)$$

式中: K_F 为弯曲应力载荷系数; Y_{Fa} 为齿形系数; 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; T_1 为输出扭矩; b_w 为齿宽; d_1 为分度圆直径; m_n 为法向压力角。单对齿啮合区外界点的载荷作用于轮齿齿顶区域的假设是确定齿形系数 Y_{Fa} 和应力修正系数 Y_{Sa} 的前提,并被日本塑料齿轮齿根承载能力评估标

准 JIS B 1759—2019 采纳。以 ISO 6336、GB 3480 等为代表的金属齿轮齿形系数和应力集中系数确定方法常假定危险截面为过齿廓根部左右两侧过渡曲线与 30° 切线相切点的截面。

工程实际应用中,基于 VDI 2736 评估塑料齿轮齿根承载能力时,计算的齿根应力远大于许用应力的塑料齿轮仍可正常服役。针对 VDI 2736、ISO 6336 在齿根承载能力计算方法上的差异,ZORKO^[17]指出,塑料齿轮齿根发生弯曲疲劳失效时,危险截面仍可采用 30° 切线法确定。LANDI 等^[18]基于 30° 切线法推导了塑料齿轮任意齿根圆角曲线的齿形系数与应力集中系数的方程,结合 VDI 2736 的齿根应力计算方法,使新的齿根应力解析计算方法所得结果与有限元结果保持了良好的一致性。上述研究表明,在评估塑料圆柱齿轮的齿根承载能力时,如果齿根区域不存在明显的气孔、熔接痕等缺陷,可基于 ISO 6336 的 30° 切线法确定塑料齿轮危险截面。

塑料齿轮齿根处的应力状态复杂,基于解析公式的齿根承载能力评估方法没有全面考虑载荷作用下的实际啮合状态、齿根区域纤维取向、塑料老化程度、注塑过程缺陷分布等因素对齿根承载能力的影响,因此,现阶段的齿根承载能力计算仍依赖数值分析和设计人员经验。塑料齿轮服役性能的数值分析流程如图 5 所示。

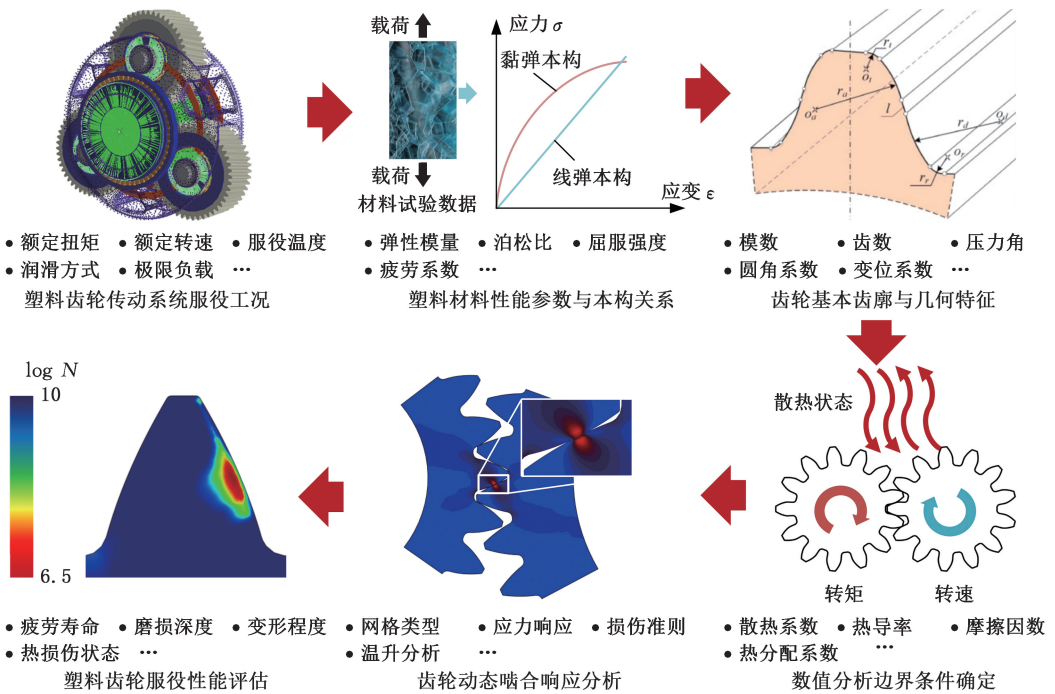


图 5 塑料齿轮承载能力的典型数值分析流程

Fig.5 Typical numerical analysis procedure for load carrying capacity of plastic gears

在塑料齿轮齿根应力仿真方面,伯明翰大学在 20 世纪 90 年代开展了塑料齿轮试验与齿根应

力仿真研究,着重讨论了载荷分配系数对齿根弯曲应力的影响^[19]。HASL 等^[20]通过数值方法模

拟了不同弹性模量的塑料齿轮受载情况和齿根应力,提出考虑载荷作用的重合度系数修正公式。LU 等^[12]考虑塑料的热力耦合效应,建立了基于最大主应变多轴疲劳损伤的塑料齿轮齿根弯曲疲劳寿命预估方法。最大主应变多轴疲劳损伤准则可表示为

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_{i,F})^b + \epsilon'_f (2N_{i,F})^c \quad (2)$$

式中: $\Delta \epsilon_1$ 为最大主应变; $N_{i,F}$ 为齿根材料点处弯曲疲劳寿命; σ_m 为临界面上平均正应力; σ'_f 、 ϵ'_f 分别为疲劳强度系数和疲劳延性系数; b 、 c 分别为疲劳强度指数和疲劳延性指数。

基于此失效准则,重庆大学结合工业 CT 对注塑齿轮齿根缩孔分布进行了表征,阐明了齿根附近的缩孔缺陷对齿根承载能力的影响,发现齿根处缩孔尺寸的增大会显著降低重载工况下塑料齿轮的齿根弯曲强度。

URBAS 等^[21]将人工智能技术应用到塑料齿轮非渐开线齿形的设计,结合随机森林和 Ada-

Boost 算法开发了渐进式接触曲线齿轮的齿根应力计算模型,以代替数值分析模型用于计算齿根弯曲应力。张秀华等^[22-23]在齿轮接触疲劳试验数据的基础上,结合人工智能算法分析了表面完整性与齿轮接触疲劳性能之间的关系,推导了考虑表面完整性的齿轮接触疲劳寿命预测公式。CHEN 等^[24]提出物理规则引导的人工神经网络疲劳寿命预测模型,避免了纯数据驱动带来的预测结果失真,提高了数据利用率。关于金属齿轮疲劳分析的人工智能技术的蓬勃发展为塑料齿轮人工智能技术的发展提供了有益参考。然而,塑料齿轮服役性能影响因素众多,失效模式复杂多变,这对塑料齿轮服役性能基础数据的质量和数量均提出了较高要求。在基础数据质量和数量有限的情况下开展承载能力分析,是高承载塑料齿轮人工智能技术需要解决的关键问题之一。塑料齿轮人工智能分析流程如图 6 所示。

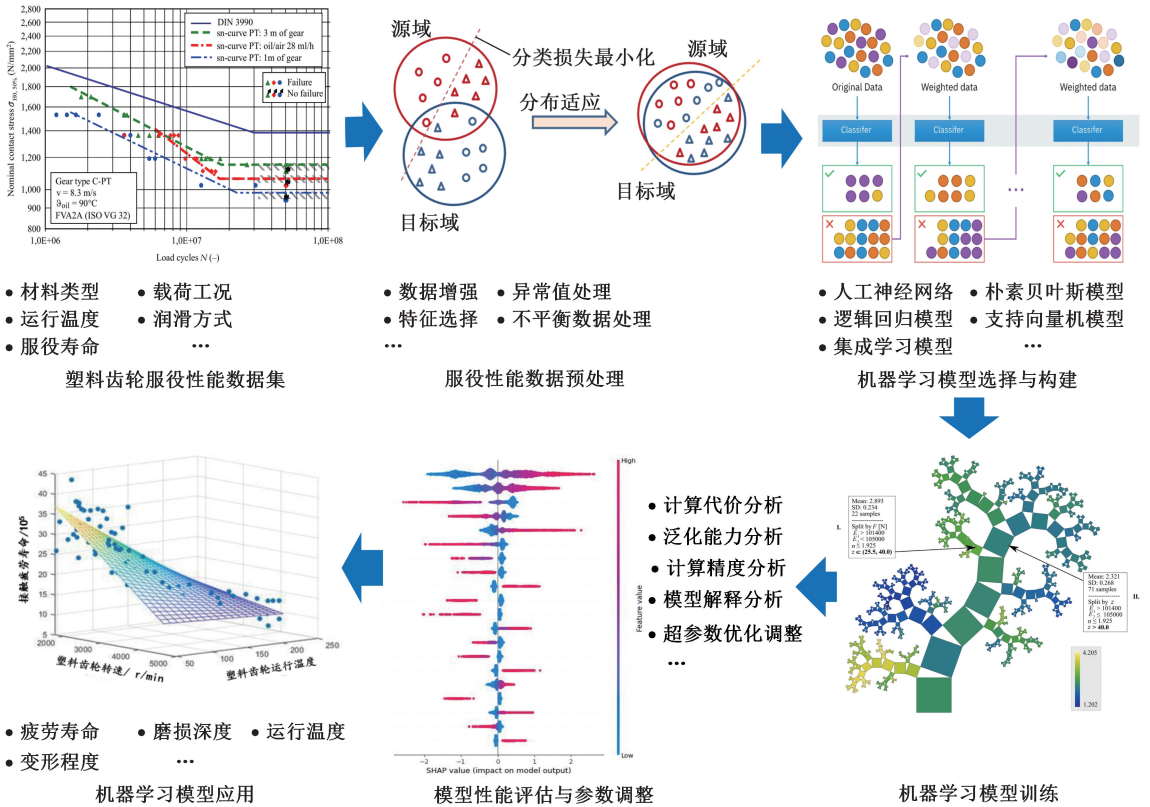


图 6 基于人工智能的塑料齿轮承载能力分析流程

Fig.6 Artificial intelligence analysis procedure for load carrying capacity of plastic gears

塑料齿轮在运动传递中的接触疲劳失效较为少见,润滑油极大减小了齿轮在动力传递中发生磨损和热失效的可能,因此接触疲劳失效成为主导高承载塑料齿轮失效的主要形式。VDI 2736 沿用金属齿轮设计标准 DIN 3990 的齿轮赫兹接触压力计算公式,将节点处赫兹接触应力

$$\sigma_H = K_H Z_E Z_H Z_\epsilon Z_\beta \sqrt{\frac{2(u+1)T_1 K_H}{ub_w d_1^2}} \quad (3)$$

式中: K_H 为接触应力载荷系数; 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; u 为传动比。

作为评价塑料齿轮接触疲劳的重要指标。尽管基于赫兹接触理论的塑料齿轮接触应力与基于材料

线弹性本构关系的塑料齿轮数值接触分析之间的差异不大,但对大部分塑料而言,其材料本构关系多具有热黏弹塑性特征。ČERNE 等^[25]基于材料黏塑性本构关系建立了塑料齿轮的接触分析模型,发现基于黏塑性本构模型与线弹性本构模型的塑料齿轮接触应力最大值的相对误差超过 20%。ROTHEMUND 等^[26]指出,螺旋角、齿面局部温度等因素也会导致齿面接触应力的解析值与仿真值出现较大的差异。

聚合物材料的弹性模量差异大,相同扭矩下的接触压力明显不同,因此基于赫兹接触应力的金属齿轮齿面承载能力评估方法难以对比不同材料聚合物齿轮的齿面承载能力。对此,胡新磊等^[27]提出一种基于标称齿轮当量载荷的聚合物齿轮齿面承载能力评价方法,消除了聚合物齿轮在材料弹性模量上的差异,为评估不同材料齿轮的齿面承载能力提供了可行手段。

润滑状态对塑料齿轮接触承载能力的影响关系研究较少,LU 等^[28]在 Brown-Miller 多轴疲劳准则基础上引入润滑修正系数,建立了考虑润滑和温度作用的塑料齿轮接触疲劳寿命模型,分析了运行温度和接触应力对塑料齿轮接触疲劳性能

的影响,并使 POM 齿轮的接触疲劳寿命仿真值与试验值的相比误差不超过 3 倍分散带。在该模型中,考虑润滑作用的 Brown-Miller 多轴疲劳损伤准则可描述为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = C_1 \frac{\lambda\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_{f,H})^b + C_2 \epsilon'_f (2N_{f,H})^c \quad (4)$$

式中: $\Delta\gamma_{\max}/2$ 为最大剪应变幅值; $\Delta\epsilon_n/2$ 为临界面上的正应变幅值; $N_{f,H}$ 为齿面材料点处接触疲劳寿命; C_1 、 C_2 为材料常数。

尽管塑料齿轮齿面承载能力解析公式和数值模型均考虑了运行温度的影响,但与齿根承载能力分析类似,现有的塑料齿轮齿面承载能力分析方法仍存在表面完整性作用规律不明、外界载荷作用类型不全等问题。因此,在试验基础上完善塑料齿轮承载能力的计算方法是推动“以塑代钢”的一项关键工作。

3 提高承载能力的措施

提高承载能力一直是塑料齿轮研究不断追求的目标,现已摸索总结出新材料与复合材料的应用、润滑条件的改善、材料-工艺-结构协同等措施,如图 7 所示。

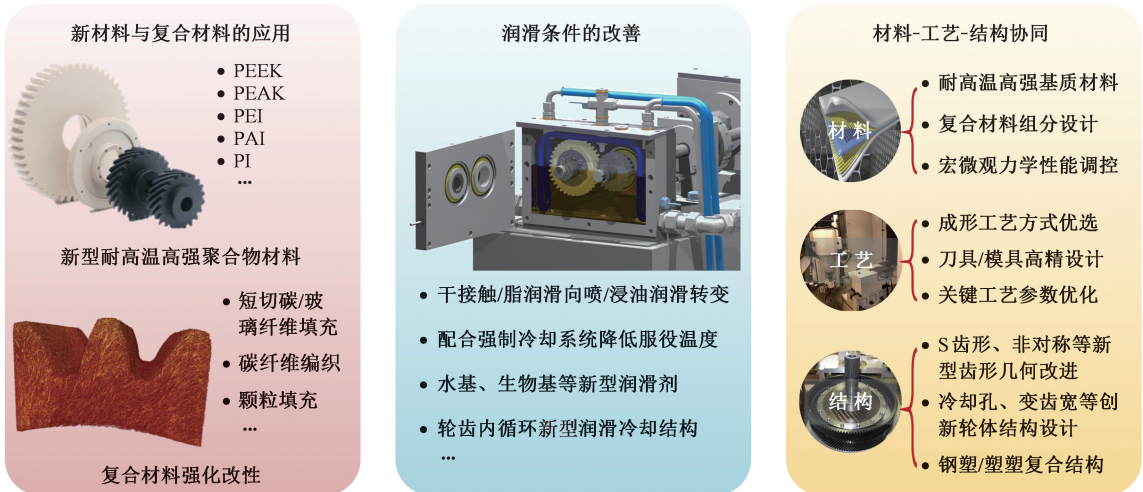


图 7 塑料齿轮提高承载能力的措施

Fig.7 Measures to increase the load carrying capacity of plastic gears

3.1 新材料与复合材料的应用

材料是决定塑料齿轮承载能力的首要因素。本世纪初受限于材料和生产成本,POM 和尼龙是塑料齿轮的主流材料,占据了全球塑料齿轮市场的 90% 份额。POM 齿轮和尼龙齿轮的承载能力有限,难以满足动力传动应用需求。随着材料成形工艺和减重降噪需求的提高,以 PEEK 为代表的高性能塑料和以短切碳纤维、玻璃纤维等为强化相的树脂基复合材料开始用于制造齿轮,使塑料齿轮传动系统的承载能力显著提高。

PEEK 具有较好的耐热性、耐磨性、耐疲劳性,且热稳定性和保持性优越,在航空航天、医疗器械和工业领域大量应用,具备高承载塑料齿轮应用潜力。VICTREX 公司生产的 PEEK 树脂及加工型材代表了国际最高水平。自“七五”国家重点科技攻关计划和“863”计划实施以来,我国持续攻关 PEEK 的自主研发,逐渐形成以吉林中研、吉大特塑、浙江鹏孚隆等为代表的 PEEK 材料厂家。

2011 年,Victrex 公司与塑料齿轮制造商

Kleiss 齿轮公司合作开发了汽车发动机 PEEK 平衡轴齿轮。2013 年, Victrex 公司与伯明翰大学合作开展了高性能 PEEK 齿轮传递效率的研究, 设计了汽车发动机 PEEK 行星齿轮箱^[29]。2016 年, Victrex 公司通过了汽车制造质量标准认证, PEEK 齿轮替代金属齿轮用于汽车发动机逐渐得到行业认可。2018 年, 赢创(Evonik)成立了摩擦学试验中心, 搭建了塑料齿轮专用试验台, 并开展 PEEK 齿轮承载能力系列试验, 支撑了 PEEK 齿轮在梅赛德斯-奔驰汽车质量平衡器变速箱的应用。总体上, PEEK 齿轮具有化学性能稳定、质量小、消声减振性能好、维修保养方便等优点, 但存在价格高、成形加工困难, 生产需要用特种注塑设备等缺点。上述问题都在不断尝试解决, 因此采用以 PEEK 齿轮为代表的高性能塑料齿轮是齿轮传动领域推动“以塑代钢”的重要解决方案。

近些年来, 复合材料逐渐用于塑料齿轮, 其中, 玻璃纤维增强和碳纤维增强是最常见的复合材料齿轮改性方式。MOHSENZADEH 等^[30]测试了含纳米炭黑颗粒的注塑 POM 齿轮在不同扭矩下的磨损和热行为, 与未增强的齿轮相比, 纳米炭黑增强的 POM 齿轮表现出更好的耐磨性和耐热性。ZORKO 等^[31]试验研究了碳纤维编织聚合物复合材料齿轮的性能, 扭矩 0.4~0.8 N·m、转速 1400 r/min、无润滑试验条件下, 编织 CFRP 齿轮的疲劳寿命比相同载荷下的 PEEK 齿轮高 6 倍。BRAVO 等^[32]鉴于塑料及其复合材料的应用引发的一些可持续性问題, 制备了桦木纤维强化的半生态聚乙烯齿轮和全生物来源聚乙烯齿轮, 并测试了不同载荷工况下两种齿轮的运行温度和疲劳寿命, 论证了制备全生物来源聚乙烯齿轮的可行性。ILLENBERGER 等^[33]采用功率封闭式齿轮试验台对模数 3 mm 的 PEEK 纯料与碳纤增强 PEEK 圆柱直齿轮齿的面承载能力进行了测试, 发现 PEEK 齿轮在动力传动系统中具有应用潜力。

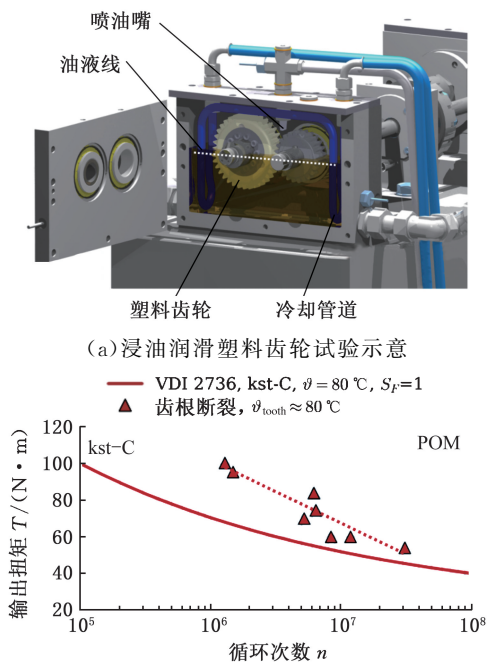
需要注意的是, 复合材料齿轮的承载能力是否优于纯树脂齿轮尚未有定论。目前来看, 复合材料齿轮的承载能力与基料类型、改性方法、加工质量、服役环境等多种因素有关, 其高承载研究仍有很长的路要走。

3.2 润滑条件的改善

20 世纪中叶至本世纪初, 为发挥材料的自润滑性能, 塑料齿轮常服役于无接触或脂润滑状态。随着塑料齿轮进入高功率、高精度的传动领域, 设计人员开展了在油润滑、脂润滑和干接触中选择

合适的塑料传动润滑方式。油润滑有助于减少塑料齿轮的摩擦热, 形成良好的润滑油膜, 提高齿轮承载能力。普通干接触的塑料齿轮材料含有聚四氟乙烯、SiO₂ 或石墨等润滑剂, 但其摩擦因数仍然大于有润滑齿轮的摩擦因数。需要注意的是, 有些润滑剂会引起塑料齿轮性能和尺寸的显著变化, 因此必须谨慎选择润滑剂。润滑油的部分添加剂可能造成塑料的化学腐蚀, 因此在相对低的接触压力下, 建议选择非极压润滑油。

油润滑能显著提高塑料齿轮的承载能力已被多个研究机构证实。FZG 发现油润滑塑料齿轮在转速 2200~3000 r/min 区间可传递 30 kW 的功率, 满足小型车辆的动力传递需求^[5]。不采用油润滑的塑料齿轮在干运转试验中的功率传递能力仅 4 kW, 因此油润滑塑料齿轮在功率传递上具有潜力, 如图 8 所示。



(b) 80 °C 油温下 POM 齿轮弯曲断裂失效数据

图 8 油润滑塑料齿轮传动潜力^[5]

Fig.8 Potential for power transmissions of oil-lubricated plastic gears^[5]

卢泽华等^[34]开展了干接触/油润滑下 POM 齿轮的承载能力试验, 测量了服役过程中的轮齿温度、磨损量、齿廓精度和齿面形貌, 通过分析断口形貌、磨损特征和温度场确定了 POM 齿轮的磨损模式和失效形式, 证实了油润滑可显著抑制齿面温升、提高 POM 齿轮承载能力(扭矩 T 与寿命 N), 如图 9 所示。

吴若等^[35]开展了喷油润滑下 PEEK 滚子和齿轮的接触疲劳试验, 绘制了二者的疲劳 $\sigma-N$ 曲线, 发现 PEEK 滚子比齿轮的接触疲劳极限高,

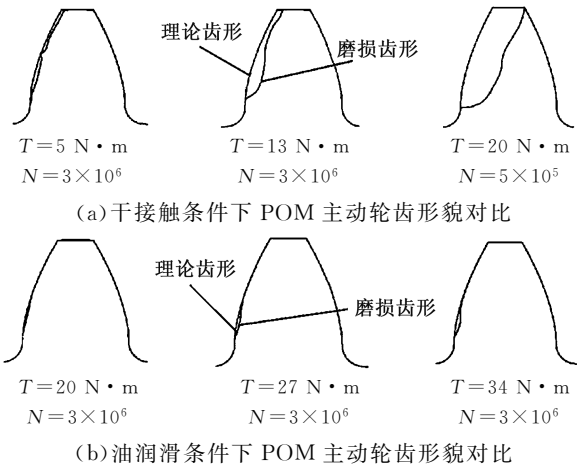


图 9 干接触/油润滑下 POM 齿轮失效对比
Fig.9 Comparison of POM gear failure under dry contact/oil lubrication

获得了滚子接触疲劳与齿轮接触疲劳性能之间的转换关系,探索了通过聚合物材料滚动接触疲劳试验预测其齿轮接触疲劳寿命的可行性。

3.3 材料-工艺-结构协同

除了新材料和油润滑的应用,结构的改进和材料-工艺-结构协同设计也是提高塑料齿轮承载能力的有效措施,如图 10 所示。

3.3.1 齿形几何的改进

通过几何结构的改进提高承载能力是金属齿轮的通用方法。相比于金属齿轮,塑料齿轮的几何结构改进措施更多。这是由于塑料齿轮常用模塑成形生产工艺,齿形几何不受范成法刀具结构和切削轨迹的限制,而仅取决于注塑成形时模具型腔的尺寸。相比于标准渐开线齿轮,非渐开线



图 10 塑料齿轮材料-工艺-结构协同设计

Fig.10 Material-process-structure collaborative design for plastic gears

齿轮在啮合特性、摩擦磨损、疲劳寿命等方面往往有更好的表现,因此 S 齿形、非对称齿形等非标准渐开线齿形在塑料齿轮中得到应用。

S 齿形的一个重要特征是齿轮在啮合开始区域和啮合结束区域的凸凹接触,减少了啮入和啮出冲击,从而保证了较好的啮合接触特性。HLEBANJA 等^[36]对具有渐进弯曲接触路径的新齿轮进行研究,测试了渗碳、渗氮钢制齿轮的性能,与渐开线齿轮相比,新齿轮具有更高的齿面承载能力。ZORKO 等^[17]对具有渐进弯曲接触路径的 S 齿形聚合物齿轮的高周疲劳进行了研究,测试结果表明 S 齿形比渐开线齿轮具有更高的耐久性,0.6 N·m 载荷下的寿命提高 100%。

非对称齿形也在塑料齿轮上得到应用。LITVIN 等^[37]提出了基于渐开线与双圆弧齿廓的非对称齿形结构,并将其与渐开线齿形结构齿轮对比,证实了非对称齿轮可有效降低齿根弯曲应力,进而提高齿轮承载能力。ANAND MOHAN 等^[38]采用齿轮脉动模拟运转试验台开展了非对称塑料齿轮的齿根承载能力测试,发现非对称齿轮的齿根承载能力比对称塑料齿轮高 2 倍以上。DEMET 等^[39]通过单齿弯曲疲劳试验发现,相比于压力角 20°/20°的对称齿轮,20°/22°的非对称齿轮在相同扭矩下实现了接近 90%的寿命提升。

KOIDE 等^[40]在无润滑和脂润滑条件下对注

塑加工的正弦曲线和渐开线塑料齿轮进行了耐久测试,测量了齿面温度和传递效率,发现无润滑的正弦曲线齿轮具有更低的齿面温度和更高的传递效率,脂润滑条件下没有观察到正弦曲线齿轮的优越性。

3.3.2 成形工艺的改进

塑料齿轮的成形工艺可分为切削加工、模塑成形和增材制造。塑料齿轮加工方式的选择需要根据生产批量、齿轮精度、齿轮体积、材料类型、服役性能等因素综合评判。从齿轮精度来看,模塑成形塑料齿轮的精度一般为 ISO 1328 的 10~12 级,部分可达 7 级;切削加工的成形精度一般在 7~10 级,最高可达 4 级;增材制造的成形精度一般为 12 级。从齿轮生产成本来看,模塑成形在大批量下的生产成本最低,切削加工在中小批量有较好的经济性。

中小批量和高几何精度的塑料齿轮主要采用滚齿、插齿或切齿工艺加工挤出成形的棒材或板材。受材料机加工过程中受力变形大、材料热胀吸湿等因素影响,塑料齿轮在滚齿工艺参数、刀具结构、性能设计、精加工等方面与金属齿轮存在一定差异。齿轮机床制造商 Helios 提出了高速滚齿与双滚刀相结合的塑料齿轮滚齿加工方案,滚齿转速超过 10 000 r/min,在保证齿轮精度等级的同时避免了毛刺、强度降低等负面影响。

塑料齿轮模塑成形的常用方法包括挤出成形、注塑成形、压制成形、浇铸成形等。塑料齿轮早期的大批量生产方式以压制成形和浇铸成形为主,随着注塑设备的发展和相关工艺的成熟,注塑成形成为塑料齿轮目前最为主流的模塑成形方法。塑料黏度高、收缩率难控制,因此控制塑料齿轮的成形精度一直是塑料齿轮行业的挑战。YOON 等^[41]采用超临界流体减小塑料流动时的黏度,并通过加压模具减小塑料的收缩率,使塑料齿轮的齿顶圆跳动控制在 40 μm 以内,齿面粗糙度不超过 0.5 μm 。SOLANKI 等^[42]通过试验和数值分析研究了注射成形工艺参数对齿轮成形精度的影响,发现随着注射时间、填充时间的延长,齿轮收缩率减小;随着冷却时间的延长,收缩率增大。URBAS 等^[43]提出了评价塑料齿轮注塑几何精度稳定性的成形跳动性能指标,高精度 3D 轮廓仪表征和齿轮注塑工艺试验证明该指标可有效评估塑料齿轮成形精度的一致性。对纤维强化塑料齿轮而言,纤维取向、纤维直径、界面强度等纤维性能对塑料齿轮注塑工艺参数确定、成形几何精度和最终服役性能都有重要影响。SENTHIL-

VELAN 等^[44-45]通过模流分析和表征手段对 20% 玻纤强化的 PA 66 齿轮在注塑成形过程中的纤维取向、熔接痕区域等注塑特征进行分析,发现纤维沿齿廓的方向分布可抑制齿廓不均匀收缩,提高塑料齿轮的成形精度和服役性能。LKT 研究所基于高动态变模温控制技术,实现了塑料齿轮轮齿结晶形态的调控,提高了塑料齿轮的承载能力^[46],但基于动态变模温的塑料齿轮注塑成形技术尚未成熟,亟需开展深入研究。

尽管增材制造可突破传统刀具、模具的局限,大幅度降低小批量塑料齿轮的生产成本,并赋予塑料齿轮极大的设计自由度,但与其他成形方式相比,成形精度、制造效率和材料类型等方面不占优势,目前在塑料齿轮中的应用和研究较少。ZHANG 等^[47-48]评估了齿轮成形精度为 12 级的 5 种增材尼龙齿轮的服役性能,发现 PA 618 齿轮具有最佳的耐磨性能,采用遗传算法和人工神经网络对塑料齿轮增材制造工艺参数进行优化,优化后的 PA 618 齿轮耐磨性能提高了 3 倍。

3.3.3 轮体结构的改进

热累积可能导致塑料齿轮热损伤,开冷却孔、变齿宽等结构改进措施可实现热控制,有助于提高齿轮承载能力。MENDI 等^[49]将金属弹簧压缩后置入模具来制备金属弹簧强化塑料齿轮,发现金属弹簧在轮齿竖直方向引入的残余压应力使塑料齿轮的服役寿命增加 30 倍。DÜZCÜKOĞLU^[50]采用 FZG 齿轮试验机,在齿轮节线速度 8.24 m/s 下研究了冷却孔对塑料齿轮齿面热累积和磨损的影响,发现在轮体上开冷却孔可提高热传导能力、降低齿面温度、提高承载能力。SINGH 等^[51]研究了提高塑料齿轮性能的若干技术并开展了齿轮试验验证,发现齿宽修整可降低齿轮表面温度 10~15 $^{\circ}\text{C}$ 、减小齿轮的磨损率,在尼龙齿轮内插入钢销可降低齿面温度 3~10 $^{\circ}\text{C}$ 并显著提高服役寿命。

3.3.4 复合结构的应用

复合结构齿轮传动也是提高传动系统可靠性和轻量化程度的重要技术手段。复合结构齿轮的轮齿、腹板、轮毂齿体结构由不同的金属或塑料材料组合构成。NASA 格伦中心采用碳纤维复合材料取代轴界面和齿轮轮毂之间的结构材料,在转速 10 000 r/min、负载扭矩 62.5 $\text{N}\cdot\text{m}$ 下进行耐久性测试,并同步采集其振动模态和噪声信息。齿轮循环次数超过 3 亿证明该复合结构齿轮具有良好的减重效果,并已用于旋翼机传动系统。NASA 开展了旋翼机主减速器复合结构齿轮的

全尺寸耐久测试,传递功率 2460 kW 是迄今为止复合结构齿轮所传递的最大功率,且复合结构齿轮的热性能在这种全尺寸大功率应用场景下没有受到不良影响。GAUNTT 等^[52]研究了复合材料和铺层顺序对复合结构齿轮谐振频率的影响,发现复合结构齿轮比全钢制齿轮减重 14.7%~18.4%,某些模式下的固有频率低 23.5%。SIM 等^[53]开展了钢塑复合结构齿轮的试验与仿真研

究,发现复合结构齿轮可将振动加速度幅值减小 42.3%。

4 高承载塑料齿轮的应用

近些年,各大研究机构探索了塑料齿轮在汽车发动机、电动自行车主传动、新能源车车主传动、小型航发附件机匣传动等场景应用的可能,如图 11 所示。



图 11 高承载塑料齿轮的典型应用

Fig.11 Typical applications of high-loading-capacity plastic gear

4.1 汽车发动机传动应用

汽车发动机内部的零部件处于高温、高振动(加速度超过 30g)、显著动载荷、长循环周期、腐蚀性流体介质污染等极端恶劣的工作环境,对塑料齿轮的应用带来极大挑战。

KLEISS 等^[54]探索了 PEEK 齿轮在汽车发动机平衡轴中的应用,使齿轮振动噪声下降 3 dB,质量减小 69%,生产周期缩短 2/3。赢创的 PEEK 齿轮通过了汽车发动机领域的系列测试和评估,用于梅赛德斯-奔驰的质量平衡器变速箱。

NITSCH 等^[55]探索了复合结构聚合物齿轮在发动机平衡轴中的应用,讨论了材料和轮体结构的影响,强调了材料选择、轮体和轮齿设计优化的重要性,提出一种 2K 即齿圈和轮体使用不同塑料的设计方案。齿轮的每个功能部件都可根据实际应力类型和水平发挥材料的潜能。塑料纯料齿圈具有良好的阻尼、低摩擦和磨损性能,同时显著提高了传动系统的 NVH(噪声、振动与声振粗糙度)性能。纤维增强的复合材料轮体提供所需的刚度,抑制与注塑工艺、吸水率和温度变化相关的尺寸变化。上述两种部件与创新的制造工艺相结合,带给塑料齿轮动力传动应用新的可能性。

4.2 新能源车车主传动应用

REITSCHUSTER 等^[56-57]将聚合物齿轮用于轻型新能源汽车的主传动系统,测试得到 PEEK 齿轮在 80 °C、失效率 10%下的接触疲劳 $\sigma-N$ 曲线,根据 WLTP 循环载荷谱和 $\sigma-N$ 曲线证实聚合物齿轮在最大输入扭矩 57 N·m、齿面最大赫兹接触压力 122 MPa 状态下的应用是可行的,且没有观察到齿根断裂或齿面磨损导致的过早失效。

4.3 小型航发附件机匣传动应用

LU 等^[58-59]将高承载塑料齿轮用于小型航发附件机匣传动系统,建立了航空高承载塑料齿轮的综合性能评价方法,综合考虑航空齿轮传动系统在安全性能、振动性能、轻量化等方面的需求,以齿宽、变位系数、压力角、齿顶高系数等齿轮几何参数为优化对象,开展了小型航发机匣塑料齿轮传动设计,使传动系统质量至少减小 20%,论证了塑料齿轮在小型航发机匣中的应用可行性。

5 高承载塑料齿轮传动设计的注意事项

尽管塑料齿轮在动力传动等承载领域的应用尚不普遍,但随着新材料、新工艺、新结构、协同技术的发展,承载齿轮“以塑代钢”的趋势越来越明

确,因此有必要归纳高承载塑料齿轮传动设计的注意事项。

5.1 突破常规的齿轮设计认知

机械传动设计人员通常沿用的金属齿轮设计思路,以及对塑料齿轮低承载的固有认知,是制约高承载塑料齿轮传动设计的重要因素。随着材料科学和成形技术的发展,塑料齿轮的承载能力大幅提升,其轻量化、低成本、低噪声等优势为动力传递领域带来了新的可能。但齿轮传动“以塑代钢”并非简单的材料替换,需要突破常规齿轮设计的认知,通过合理的材料-结构-性能协同设计来实现高承载塑料齿轮传动。

传统观念认为塑料和承载存在“矛盾”,对塑料齿轮的认识停留在玩具类应用的场合,存在几何精度不足、无法承受载荷、耐温性能差等缺陷。事实上,随着材料、工艺、结构和润滑的改善,塑料齿轮在很多场合已能实现高承载应用,具备几十甚至上百 kW 的传递能力,稳定运行温度超过 100 °C。塑料齿轮设计也不再受金属齿轮设计规范的限制,例如金属齿轮通常会限制横纵比不超过 1,而塑料齿轮可实现全齿接触,能接受 2 或 3 的横纵比;注塑突破了塑料齿轮加工能力的限制,几乎可实现任意齿形和结构的高效加工,批量生产 S 齿形和非对称齿形塑料齿轮。

塑料齿轮传动设计时需要考虑低刚度、大热胀、高热敏等材料特性。材料弹性模量低导致塑料轮齿的啮合刚度较小,设计时需要留出比金属齿轮更大的齿侧间隙,以避免“卡滞”。塑料的黏弹性使得应变率对材料力学性能有显著影响,设计时需要考虑加载速度与静载蠕变效应。此外,金属齿轮只有一组几乎与温度无关的 $\sigma-N$ 曲线,塑料齿轮需要不同温度的 $\sigma-N$ 曲线,这导致塑料齿轮的数据建设、强度评估与寿命预测更加复杂、困难。针对上述问题已有一些研究:提高材料结晶度可将塑料刚度提高 25%~50%,短碳/玻纤强化可将刚度提高 5~10 倍;通过量化温度对服役性能的影响,构建基于热力等效转换关系的塑料齿轮服役性能评估方法,开展循环热-应力载荷作下塑料齿轮的加速疲劳试验,使塑料齿轮试验效率至少提高 50%。

5.2 加强基础数据建设

相比于金属齿轮,塑料齿轮发展较晚、材料众多、结构多变、加工与工艺方式多元,因此基础数据的建设水平尚不能支撑动力传递领域“以塑代

钢”的正向设计,弹性模量、蠕变特性、承温能力、磨损系数、疲劳强度、失效图谱等基础数据几乎空白,耐久设计只能依赖工程经验和后期试验。目前,以 VDI 2736 为代表的塑料齿轮设计指南尽管提供了 PA 66、POM 的一些数据,但未涵盖以 PEEK、纤维强化塑料为代表的高承载塑料齿轮的基础数据。基础数据的建设涉及试验测试技术、试验装置开发、试验评价方法的完善、试验标准规范的制订修订、基础试验数据的积累、数据库软件的开发、数据驱动的应用等系列研究工作,需要集中更多资源、投入更多精力来保障塑料齿轮行业的健康稳定发展。

5.3 加强设计分析方法创新

塑料齿轮传动的设计准则、分析方法亟待创新。德国、日本等走在塑料齿轮传动设计标准制定的前列。1981 年,VDI 2545 指南发布,这是有报道的塑料齿轮计算标准化的首次尝试,但由于缺乏计算准确性,VDI 2545 在 1990 年被撤销。2014 年出现的 VDI 2736 替代标准 VDI 2545。新标准考虑了齿根应力计算的应力修正系数等因素,不但给出轮体设计和塑料齿轮制造的有关信息,还包含温度计算和承载能力计算的方法,并将计算扩展到交错轴螺旋蜗杆,同时,新增了塑料齿轮数据的建设方法。但该标准存在如下局限:①齿根弯曲承载能力等的计算基于 DIN 3990—1987 的方法 C,忽略了载荷下轮体变形的影响,可能引入较大误差;②塑料齿轮的温度计算基于尼龙齿轮试验数据提出的经验公式,没有考虑塑料齿轮的热力耦合作用、滞后生热效应等因素,计算存在较大误差,未被工程界广泛接纳;③缺乏 PEEK、纤维强化塑料等高承载塑料齿轮用潜在材料的基础数据;④未考虑材料强度计算的寿命系数对材料许用应力的影响,直接将齿轮试验获得的齿轮强度特征值作为许用应力,同时,未考虑材料吸湿程度、润滑剂特性、材料膨胀特性、时间老化特性等因素,这使得工程师在设计过程中仍大量依赖个人经验;⑤仅适用于标准圆柱齿轮、斜齿轮-蜗杆传动副,较难扩展至非标准塑料齿轮的承载能力评估;⑥主要针对热塑性纯料塑料齿轮,未考虑纤维强化、材料填充等工程常用塑料齿轮的材料改性技术对塑料齿轮承载能力的提升作用,因此在设计材料改性塑料齿轮时,工程师主要依靠个人经验和试验数据。尽管如此,VDI 2736 仍是目前国际上为数不多的塑料齿轮设计计算参考的主要准则。2016 年,日本推出了塑料齿轮齿根承载能力设计标准 JIS B 1759。该

标准在 VDI 2736 的基础上增加齿根圆角系数和腹板系数,并引入齿根弯曲强度寿命系数来修正许用弯曲应力,评估了温度特性、润滑特性和配对特性对塑料齿轮许用齿根应力的影响。鉴于高性能塑料齿轮在航空航天、新能源汽车等领域动力传递的重要性,我国于 2019 年发布了塑料齿轮精度标准,并已于 2024 年发布了《GB/T48846—2024 塑料齿轮承载能力计算》。

尽管有为数不多的设计标准或规范可以遵循,但科学合理的高承载塑料齿轮设计仍需在标准、规范外扩展应用其他的分析方法,如轮齿接触分析、温度仿真模拟、复合材料齿轮力学分析、有限元方法和软件的应用等。ABAQUS 等商业有限元软件内置了一些用于聚合物力学行为研究的本构模型,并提供了本构、磨损等二次开发接口,可实现塑料齿轮与复合材料齿轮的更精确力学仿真。CATHELIN 等^[60]在线性域采用黏弹性模型,提出一种预测塑料圆柱齿轮力学性能的数值方法并对其进行了试验验证。MILER 等^[61]以模数、齿宽、主动轮齿数和变位系数为设计变量,以轮齿温度、磨损量和最大变形量为边界条件,对塑料圆柱直齿轮副进行多目标优化设计,提高了传递效率和轻量化程度,并通过台架试验验证了多目标优化的可行性。重庆大学引入润滑因子修正了 Borwn-Miller 多轴疲劳损伤准则,建立了基于材料热弹塑性本构关系的塑料齿轮热力耦合疲劳寿命的数值模型,其预测疲劳寿命与试验寿命的比值在 3 倍分散带内^[28],指导了注塑缩孔缺陷齿轮、S 齿形塑料齿轮等疲劳性能的评价^[62]。

塑料齿轮的设计、分析、计算和仿真方法虽已取得进展,但还应进一步贴近塑料齿轮的工程需求,紧密结合设计标准,建立更精确、适用性更广的公式、图表、标准、规范,推动塑料齿轮设计和应用的创新及行业的发展进步。

5.4 强化材料-工艺-结构协同设计

塑料齿轮的特性使得强化材料-结构-工况协同设计成为高承载塑料齿轮传动的必由之路。相比于金属齿轮,塑料齿轮更需要协同材料、结构、工况、工艺等因素,实现最优的综合性能。

TAVČAR 等^[63]针对设计人员对聚合物材料特性缺乏了解,以及不同几何和工况参数之间存在复杂非线性关系的问题,开发了聚合物齿轮优化算法来实现齿数、齿宽、螺旋角和模数等几何参数的优化,阐明了设计参数对应力、体积、温度、磨损、变形、成本等目标的影响规律,并基于此编制了塑料齿轮结构参数优化设计软件。目前,塑料

齿轮材料-工艺-结构协同设计尚处于起步阶段,对纤维强化等强化改性技术、制造工艺参数调控、宏微观结构参数优化等的研究有待进一步深入。

6 结论

1)以 PEEK 材料为代表的高性能聚合物材料、喷/浸油润滑方式的引入、钢塑复合结构的创新设计使塑料齿轮的传递功率超过 30 kW,满足部分动力传动的承载需求。随着塑料齿轮承载基础数据的持续建设、材料-结构-工艺协同设计、热力耦合多场数值仿真、多目标优化与数据驱动等技术的发展与应用,动力传动领域的“以塑代钢”发展趋势将愈加明显。

2)相比于金属齿轮,塑料齿轮在材料本构与力学响应、失效评价与寿命预测、齿廓形状与结构设计、加工工艺与试验测试等方面均有显著差异,亟待深入研究塑料齿轮的创新设计,开发塑料齿轮高精成形工艺,建立塑料齿轮高效试验与表征体系,完善塑料齿轮承载能力评估方法,为动力传递领域的塑料齿轮研发提供支撑。

3)为进一步推动高承载塑料齿轮传动应用,建议加强以 $\sigma-N$ 曲线和温升演变为代表的基础数据建设、材料-工艺-结构协同设计优化、设计标准规范的制订/修订、产品试制与示范验证等工作。

参考文献:

- [1] HACHMAN H, STRICKLE E. Nylon Gears[J]. Konstruktion, 1966, 3(18):81-94.
- [2] NIEMANN G, WINTER H. Maschinenelement [M]. Berlin:Springer-Verlag, 1983.
- [3] KUROKAWA M, UCHIYAMA Y, NAGAI S. Performance of Plastic Gear Made of Carbon Fiber Reinforced Poly-ether-ether-ketone [J]. Tribology International, 1999, 32(9):491-497.
- [4] HOSKINS T J, DEARN K D, KUKUREKA S N, et al. Acoustic Noise from Polymer Gears—a Tribological Investigation[J]. Materials & Design, 2011, 32(6):3509-3515.
- [5] 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.
- [6] WOOD A K, WILLIAMS V, WEIDIG R. The Relative Performance of Spur Gears Manufactured from Steel and PEEK[J]. Gear Technology, 2012, 3(1):58-65.
- [7] LU Zehua, LIU Huaiju, ZHU Caichao, et al. Iden-

- tification of Failure Modes of a PEEK-Steel Gear Pair under Lubrication[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 125:342-348.
- [8] YU Guoda, LIU Huaiju, MAO Ken, et al. An Experimental Investigation on the Wear of Lubricated Steel against PEEK Gears[J]. *Journal of Tribology*, 2020, 142(4):041702.
- [9] LU Zehua, LI Zhenghao, LIU Huaiju, et al. An Accelerated Fatigue Test Method of Polymer Gears Based on Thermostress Conversion Relation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 266:108388.
- [10] MAO K, CHETWYND D G, MILLSON M. A New Method for Testing Polymer Gear Wear Rate and Performance[J]. *Polymer Testing*, 2020, 82:106323.
- [11] BLAIS P, TOUBAL L. Single-gear-tooth Bending Fatigue of HDPE Reinforced with Short Natural Fiber[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 141:105857.
- [12] LU Zehua, LIU Huaiju, WEI Peitang, et al. The Effect of Injection Molding Lunker Defect on the Durability Performance of Polymer Gears[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 180:105665.
- [13] ZHONG Bingbing, ZHANG Renhua, WEI Peitang, et al. The Durability Performance of Polyketone Gears under Various Lubrication Conditions [J]. *Journal of Tribology*, 2022, 144(9):091203.
- [14] ZHONG Bingbing, SONG Hailan, LIU Huaiju, et al. Loading Capacity of POM Gear under Oil Lubrication[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2022, 16(1):JAMDSM0006.
- [15] CRIPPA G, DAVOLI P. Comparative Fatigue Resistance of Fiber Reinforced Nylon 6 Gears [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1995, 117(1):193-198.
- [16] KODEESWARAN M, VERMA A, SURESH R, et al. Bi-directional and Uni-directional Bending Fatigue Performance of Unreinforced and Carbon Fiber Reinforced Polyamide 66 Spur Gears[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, 17(8):1025-1033.
- [17] 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.
- [18] LANDI L, STECCONI A, MORETTINI G, et al. Analytical Procedure for the Optimization of Plastic Gear Tooth Root[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 166:104496.
- [19] van MELICK I H G H. Tooth-bending Effects in Plastic Spur Gears[J]. *Gear Technology*, 2007, 8:58-66.
- [20] HASL C, LIU Hua, OSTER P, et al. Method for Calculating the Tooth Root Stress of Plastic Spur Gears Meshing with Steel Gears under Consideration of Deflection-induced Load Sharing[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 111:152-163.
- [21] URBAS U, ZORKO D, VUKAŠINOVIĆ N. Machine Learning Based Nominal Root Stress Calculation Model for Gears with a Progressive Curved Path of Contact[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 165:104430.
- [22] ZHANG Xiuhua, WEI Peitang, PARKER R G, et al. Study on the Relation between Surface Integrity and Contact Fatigue of Carburized Gears[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 165:107203.
- [23] 张秀华, 刘怀举, 朱才朝, 等. 基于数据驱动的零部件疲劳寿命预测研究现状与发展趋势[J]. *机械传动*, 2021, 45(10):1-14.
ZHANG Xiuhua, LIU Huaiju, ZHU Caizhao, et al. Current Situation and Developing Trend of Fatigue Life Prediction of Components Based on Data-driven[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(10):1-14.
- [24] CHEN Jie, LIU Yongming. Probabilistic Physics-guided Machine Learning for Fatigue Data Analysis [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 168:114316.
- [25] ČERNE B, LORBER R, DUHOVNIK J, et al. Influence of Temperature- and Strain Rate-dependent Viscoplastic Properties of Polyoxymethylene on the Thermo-mechanical Response of a Steel-polyoxymethylene Spur Gear Pair[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25:101078.
- [26] ROTHEMUND M, OTTO M, STAHL K. Applicability of Classic Analytical Calculation Approaches for the Design of Plastic Gears[J]. *Forschung Im Ingenieurwesen*, 2023, 87(3):987-995.
- [27] 胡新磊, 刘怀举, 魏沛堂, 等. 基于标称齿轮当量载荷的聚合物齿轮齿面承载能力评价方法[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(24):2927-2935.
HU Xinlei, LIU Huaiju, WEI Peitang, et al. An Evaluation Method for Tooth Surface Load Capacity of Polymer Gears Based on Nominal Gear Equivalent Load[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(24):2927-2935.
- [28] LU Zehua, LIU Huaiju, ZHANG Renhua, et al. The Simulation and Experiment Research on Con-

- tact Fatigue Performance of Acetal Gears[J]. *Mechanics of Materials*, 2021, 154:103719.
- [29] DEARN K D, HOSKINS T J, ANDREI L, et al. Lubrication Regimes in High-performance Polymer Spur Gears [J]. *Advances in Tribology*, 2013, 2013:987251.
- [30] MOHSENZADEH R, SHELESH-NEZHAD K, CHAKHERLOU T N. Experimental and Finite Element Analysis on the Performance of Polyacetal/Carbon Black Nanocomposite Gears[J]. *Tribology International*, 2021, 160:107055.
- [31] ZORKO D, TAVČAR J, ŠTURM R, et al. Investigation of the Durability and Performance of Autoclave-cured, Woven Carbon Fiber-reinforced Polymer Composite Gears in Mesh with a Steel Pinion [J]. *Composite Structures*, 2021, 273:114250.
- [32] BRAVO A, TOUBAL L, KOFFI D, et al. Gear Fatigue Life and Thermomechanical Behavior of Novel Green and Bio-composite Materials VS High-performance Thermoplastics [J]. *Polymer Testing*, 2018, 66:403-414.
- [33] 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.
- [34] 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 Zehua, LIU Huaiju, ZHU Caizhao, et al. Effects of Lubrication and Loading Levels on POM Gear Durability Performance[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(17):2047-2054.
- [35] 吴若, 魏沛堂, 谢怀杰, 等. 喷油润滑聚醚醚酮的接触疲劳性能[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(2):221-228.
WU Ruo, WEI Peitang, XIE Huaijie, et al. Contact Fatigue Performance of PEEK under Oil-injected Lubrication[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(2):221-228.
- [36] HLEBANJA G, HLEBANJA J, OKORN I. Research of Gears with Progressive Path of Contact [C] // *Proceedings of ASME 2000 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. San Diego, 2020:215-221.
- [37] LITVIN F L, LIAN Qiming, KAPELEVICH A L. Asymmetric Modified Spur Gear Drives: Reduction of Noise, Localization of Contact, Simulation of Meshing and Stress Analysis [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 188(1/3):363-390.
- [38] ANAND MOHAN N, SENTHILVELAN S. Preliminary Bending Fatigue Performance Evaluation of Asymmetric Composite Gears[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 78:92-104.
- [39] DEMET S M, ERSOYOĞLU A S. An Analysis of the Effect of Pressure Angle Change on Bending Fatigue Performance in Asymmetrical Spur Gears [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2021, 235(9):2142-2150.
- [40] KOIDE T, YUKAWA T, TAKAMI S, et al. Tooth Surface Temperature and Power Transmission Efficiency of Plastic Sine-curve Gear[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2017, 11(6):JAMDSM0082.
- [41] YOON J D, CHA S W, CHONG T H, et al. Study on the Accuracy of Injection Molded Plastic Gear with the Assistance of Supercritical Fluid and a Pressurized Mold[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2007, 46(9):815-820.
- [42] SOLANKI B, SINGH H, SHEOREY T. Effect of Injection Molding Cycle Time on Shrinkage and Weight of Manufactured Polymer Gear[C] // *Conference: International Conference on Advancements and Futuristic Trends in Mechanical and Materials Engineering*. Punjab, 2022:621-630.
- [43] URBAS U, ZORKO D, VUKAŠINOVIĆ N, et al. Comprehensive Areal Geometric Quality Characterisation of Injection Moulded Thermoplastic Gears[J]. *Polymers*, 2022, 14(4):705.
- [44] SENTHILVELAN S, GNANAMOORTHY R. Influence of Reinforcement on Composite Gear Metrology[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(9):1198-1209.
- [45] SENTHILVELAN S, GNANAMOORTHY R. Fiber Reinforcement in Injection Molded Nylon 6/6 Spur Gears [J]. *Applied Composite Materials*, 2006, 13(4):237-248.
- [46] DRUMMER D, O. KOBES M, MERKEN D, et al. Wie das Spritzgießen den Verschleiß bei Zahnrädern Reduziert [J]. *Maschinen Markt*, 2011, 20:13-19.
- [47] ZHANG Ye, PURSSELL C, MAO Ken, et al. A Physical Investigation of Wear and Thermal Characteristics of 3D Printed Nylon Spur Gears[J]. *Tribology International*, 2020, 141:105953.
- [48] ZHANG Ye, MAO Ken, LEIGH S, et al. A Parametric Study of 3D Printed Polymer Gears[J]. *The International Journal of Advanced Manufac-*

- turing Technology, 2020, 107(11):4481-4492.
- [49] MENDI F, CAN H, KÜLEKCI M K. Fatigue Properties of Polypropylene Involute Rack Gear Reinforced with Metallic Springs[J]. Materials & Design, 2006, 27(5):427-433.
- [50] DÜZCÜKOĞLU H. Study on Development of Polyamide Gears for Improvement of Load-carrying Capacity[J]. Tribology International, 2009, 42(8):1146-1153.
- [51] SINGH P K, SIDDHARTHA, SINGH A K. An Investigation on the Effects of the Various Techniques over the Performance and Durability of Polymer Gears [J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2):1606-1614.
- [52] GAUNTT S M, CAMPBELL R L. Characterization of a Hybrid (Steel-Composite) Gear with Various Composite Materials and Layups[C]// AIAA Scitech 2019 Forum. Reston, Virginia, 2019: 0146.
- [53] SIM E, KIM C, KWAK K S, et al. Optimum Interface Shape and Vibration Test for a New Transmission Helical Gear Composed of Steel and Aramid/Phenol Composite[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(4):1629-1634.
- [54] KLEISS R, FERFECKI F J. Designing a Polymer Gear for Use in the Environment of an Internal Combustion Engine [C] // Proceedings of ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Washington D C, 2012:515-521.
- [55] NITSCH C, HÖHN B-R, STAHL K. Prospects of Compound-gears for E-mobility Applications Conference on Future Automotive Technology:Focus Electromobility [C] // Conference on Future Automotive Technology. München, 2013:611-616.
- [56] REITSCHUSTER S, ILLENBERGER C M, TOBIE T, et al. Application of High Performance Polymer Gears in Light Urban Electric Vehicle Powertrains [J]. Forschung Im Ingenieurwesen, 2022, 86(4):683-691.
- [57] REITSCHUSTER S, TOBIE T, STAHL K. Experimental Verification of High-performance Polymer Gears in an Electric Vehicle Powertrain [J]. Forschung im Ingenieurwesen, 2023, 87(3):881-890.
- [58] LU Zehua, LIU Chang, LIAO Changjun, et al. Conceptual Design and Optimization of Polymer Gear System for Low-thrust Turbofan Aeroengine Accessory Transmission [J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 11(1):212-229.
- [59] LU Zehua, CHEN Yiming, LIU Huaiju, et al. A High-power-density Design Method for Polymer Gear Systems via an Adaptive Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III and Surrogate Sub-models [J]. Materials & Design, 2024, 240:112875.
- [60] CATHELIN J, LETZELTER E, GUINGAND M, et al. Experimental and Numerical Study of a Loaded Cylindrical PA66 Gear [J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(4):041007.
- [61] MILER D, HOIĆ M, ŠKEC S, et al. Optimisation of Polymer Spur Gear Pairs with Experimental Validation [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(6):3271-3285.
- [62] WU Ruo, WEI Peitang, LU Zehua, et al. A Comparative Study of Fatigue Behavior between S-shaped and Involute POM Gears [J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2022, 9(6):2483-2494.
- [63] TAVČAR J, ČERNE B, DUHOVNIK J, et al. A Multicriteria Function for Polymer Gear Design Optimization [J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2021, 8(2):581-599.

(编辑 张 洋)

作者简介:刘怀举*,男,1986年生,教授、博士研究生导师。研究方向为高性能齿轮传动设计。发表论文 120 余篇。E-mail: huaijuliu@cqu.edu.cn。

本文引用格式:

刘怀举,卢泽华,朱才朝.塑料齿轮传动高承载技术发展与应用[J].中国机械工程,2025,36(1):2-17.

LIU Huaiju, LU Zehua, ZHU Caichao. State-of-art and Trend of High Loading Capacity Plastic Gear Drives [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):2-17.