

## 塑料齿轮及其成型制造技术进展

李福海, 王 达, 王 建

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:**以传递运动和动力为主要功能的齿轮在机械装备中具有举足轻重的作用。与金属齿轮相比,塑料齿轮具有质量轻、运行噪音小、耐磨性好、自润滑性能好、耐腐蚀等诸多优点,而且具有易成型、制造成本低、设计灵活等特点。与传统金属齿轮的成型制造方法相比,塑料齿轮因塑料原料种类及性能差别较大,成型制造方法也有很大差异。通过查阅塑料齿轮相关文献资料,总结了不同塑料齿轮的特点、性能及应用,分析了注塑成型、3D打印和机加工成型等塑料齿轮的主要制造方法。

**关键词:** 齿轮; 塑料; 复合材料; 注塑成型; 3D打印; 机加工

**中图分类号:**

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7555(2022)11-000

齿轮是机械设备中用来传递运动和动力的关键零件。随着机械制造技术的快速发展,金属齿轮在制造和应用方面的适用性逐渐跟不上现代制造业的发展速度。金属齿轮是由切削、磨削等成形技术加工而成,存在机加工误差、造价高,且制作安装难度很大。随着新材料的不断涌现,塑料齿轮的应用越来越广泛。在玩具、医疗器械、电子电器、国防军事、航空航天等领域,均能见到塑料齿轮的身影。相对于金属齿轮,塑料齿轮质量轻、运行噪音小、耐磨性好、自润滑性能好,可通过模塑成型、增材制造和机加工等多种途径进行加工和批量生产,这些优点都是金属齿轮所不具备的。构成塑料齿轮的塑料本身就具有润滑的功能,可降低啮合齿轮间齿面的摩擦系数,达到润滑的效果,以此可节省成本,降低维修费用。另外,一些尺寸较小的塑料齿轮,相比于金属齿轮装备更为方便,但是塑料齿轮同时也有很多缺点。由于受塑料性能的限制,塑料齿轮的齿面强度差,在齿轮啮合的过程中会发生不同程度的失效,甚至断齿;塑料齿轮的抵抗变形能力会随着温度的升高而变化;由于塑料齿轮的热导性比金属齿轮的差,在两齿轮聚合物-金属齿轮或者聚合物-聚合物齿轮啮合的过程,会因为摩擦等原因产生大量的热,但是热量却无法从聚合物齿轮齿面快速

消散,齿轮会因为温度升高而发生永久的变形。从“以塑代钢”的角度出发,就需要使用合适的材料来代替金属,减少产品的质量,但不减弱其强度,并能提高其耐腐蚀性、介电性能等,并充分发挥塑料齿轮的可设计性、自润滑性能。为提高齿轮的强度性能,可以在塑料齿轮中添加提高强度和热性能的增强材料—玻璃纤维和碳纤维<sup>[1,2]</sup>。添加纤维后的塑料齿轮的力学性能得到显著增强,可提升塑料齿轮在啮合过程中的使用寿命。本文通过对塑料齿轮材料的发展、成型技术和失效检测与评价等方面的研究进行调研和综述,旨在为塑料齿轮的更新发展和研究提供可用的技术参考。

### 1 塑料齿轮的种类

塑料齿轮的主要作用是传递运动和动力。在不同的工况环境下,需要对制作塑料齿轮的材料进行综合考虑,比如齿轮使用性能、工艺性能和经济性等。塑料齿轮的成型材料可以分为通用塑料、工程塑料和特种工程塑料及其为基体的纤维增强塑料复合材料等。随着新材的不断涌现,塑料齿轮相比于金属齿轮的优势更为明显,还可以加入不同的填料来改变纯塑料齿轮的属性,提高齿轮的使用性能和寿命。

## 1.1 通用塑料齿轮

用于齿轮的普通通用塑料有聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯等,如 Fig.1 所示。它们的产量大,价格低,用途广泛,但是同时也有很多的缺点,比如表面硬度低,容易被划伤;在环境应力的作用下会发生开裂,导致失效;在齿轮啮合的过程中,由于热膨胀系数大,会产生大量的热,更容易发生蠕变,导致永久变形。因此,通用塑料齿轮不适合用于承载能力高的场合,但适合用于制造玩具和医疗器件的齿轮。

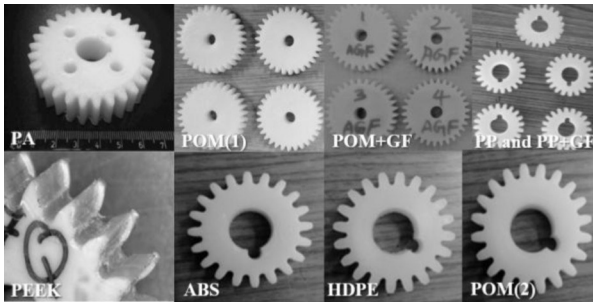


Fig.1 Plastic gears<sup>[3-8]</sup>

通用塑料齿轮在强度、散热和承载方面表现较差,导致齿轮制造成型加工一般不使用单纯的通用塑料,而是用共混物进行注塑成型。普通塑料与其他原料结合,可提高塑料齿轮的综合性能。Chen 等<sup>[9]</sup>对低密度聚乙烯共混物制成齿轮的磨损行为研究中,磨损产生的碎屑会在钢表面上形成转移膜,可减少制品表面的磨损,提高制品强度。通用塑料制成的齿轮容易发生失效,因此,生产齿轮一般使用工程塑料或者性能更高的塑料。

## 1.2 工程塑料齿轮

工程聚合物是一种特殊的、高性能的合成塑料,具有优良的综合性能,刚性大,蠕变小,力学强度高,耐热性好,电绝缘性好,可在环境苛刻的场合下长期使用。设计得当可以被塑造成机械功能强的半精密部件或结构部件,并为替代金属齿轮实现“以塑代钢”提供可能。工程塑料又可以细分为通用工程塑料和特种工程塑料 2 类,其中可以成型齿轮的工程塑料有聚酰胺(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚甲醛(POM)、丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚物(ABS)和热塑性弹性体、聚酰亚胺(PI)、聚苯硫醚(PPS)、聚酯(PBT)、聚醚醚酮(PEEK)和液晶聚合物(LCP)等<sup>[10]</sup>。

**1.2.1 聚酰胺齿轮:**聚酰胺(PA)材料具有热塑性材料的硬度,有良好的抗冲击性能和冲击韧性。某些情况下比金属性能更好,已经广泛应用于齿轮、凸

轮和轴承的制作。但是它的热变形温度相对较低;制品在放置后有较大的吸水性,产生的残余应力会造成制品表面缺陷,改变表面的厚度,使屈服强度增大,韧性降低;使用过程中也会产生蠕变性。因此,为提升 PA 的性能,可进行共混改性来得到不同性能的共聚 PA。

PA 齿轮在结晶度方面,属于半结晶材料,可实现从固体到熔体的急剧转变。PA 在注塑成型时会受到结晶度的影响,Russell 和 Beaumont<sup>[11]</sup>通过对注塑成型 PA66 齿轮的研究发现,注塑过程中模具温度对制品的结晶度影响较大,球结晶在结晶过程中会有大小的变化,甚至最终导致制品的缺陷。Apichartpattanasiri 等<sup>[12]</sup>在不同注射参数下,使用 PA66 材料的圆盘进行磨损机制研究,改变模具温度可以获得不同的微观球晶结构,球晶随壁面温度升高而变大。因此,为得到合适的制品,需要通过机加工方式来改善齿轮表面形貌。测试过程中,不同滑移率下,齿轮表面结晶处会产生不同程度的重结晶,并随着时间而增加。

PA 齿轮在啮合磨损过程中存在热应力的问题,决定齿轮寿命的关键因素在于齿轮齿侧的热聚集,需要对齿轮的热应力进行预测,并将聚集的热消散出去,从而降低齿轮的啮合温度。从齿轮的磨损行为出发,明确热应力产生的区域,首先需要观察的是 PA 齿轮失效形式,Mao 等<sup>[13]</sup>研究中发现,PA 齿轮在高负载(10 N·m 以上)条件下的磨损行为主要分为 3 个阶段:初始磨合阶段、线性磨损阶段和最后断裂阶段。初始磨损阶段历程较短,但是磨损量非常高;线性磨损阶段的磨损率较低;最后断裂阶段的齿面磨损率会迅速增加。不同驱动材料的齿轮与 PA 齿轮啮合时,会对 PA 齿轮齿面产生不同形式磨损,当乙醛材料作为驱动轮时,PA 齿轮齿面会有高热磨损,导致齿轮压力角增大,磨损加重,因此驱动齿轮材料在磨损失效中起着关键的作用。

PA 齿轮具有良好的润滑性,但在高负载情况下,齿轮的寿命会缩短、失效会增多。因此,仅凭借 PA 齿轮自身润滑性是不够的。为减少齿轮间的啮合磨损,Tavčar 等<sup>[14]</sup>研究发现,以聚四氟乙烯(PTFE)作为润滑剂会显著降低啮合摩擦系数,将 PTFE 添加到 PA 后,观察到摩擦明显减少,并实现 60% 以上的摩擦系数降低和 41% 的工作温度降低,可在提高寿命的同时获得更大的扭矩动力,而在 PTFE<sup>[15]</sup>与聚甲醛的结合应用中,却发现其不能显著提高齿轮的摩擦学性能。

**1.2.2 聚甲醛齿轮:**随着塑料齿轮的应用越来越多,应用要求已经从齿轮精度转向承载性能。聚甲醛(POM)材料良好的力学性能,可以集精度和承载为一身应用到齿轮的注塑成型。作为高结晶的线型聚合物,它是耐热塑胶的典范。通过注塑成型,POM材料可以制成坚硬致密的抗疲劳、抗磨损齿轮,具有冲击性好,摩擦系数小,自润滑性能好的优势,因此,POM是聚合物齿轮的首选工程材料。其缺点是成型制品时有收缩的趋势,并且容易产生缺陷。

在POM齿轮的成型工艺条件方面,注塑过程中的注射速度、模具温度、锁模压力和冷却时间对POM齿轮的注塑成型有着重要的影响。Postawa等<sup>[16]</sup>对注塑过程中各个参数的分析发现锁模压力对于POM齿轮的成型质量和加工收缩率的变化有很大的影响,并会反映在结晶度上。Kamal等<sup>[17]</sup>对POM的微注射制品分析中,同样得出注射速度、模具温度和冷却时间都会对POM制品的结晶产生影响,造成的制品缺陷和结晶行为会影响齿轮的力学性能,因此,良好的工艺组合可提高POM齿轮成型质量。

在POM齿轮的磨损失效方面,齿轮磨损会影响到齿轮的寿命,磨损与齿轮间的磨损系数有着紧密的联系,但磨损系数的评估的影响因素有很多需综合考虑。Matkovič等<sup>[18]</sup>对POM齿轮磨损系数的研究中,获得了齿轮磨损系数的评估方法,并对7种基于实际齿轮确定磨损系数的测试方法进行总结,但是在实验进程中存在评估误差,主要是因为实际磨损的不确定性。因此,确定聚合物齿轮的磨损系数需要从实际的齿轮实验中摸索。

不同材料的齿轮的磨损机制不同,为探究不同材料齿轮啮合过程中的磨损机制,Evans等<sup>[19]</sup>获得POM直齿轮与钢齿轮副啮合时的磨损机制,较软的聚合物必然是材料磨损的一方。该研究使用涂片的方式开展实验,涂片的作用是检测齿轮间产生的扭矩,即产生的扭矩超过其弹性极限便会发生永久

变形,从而获得磨损机制特征,提出基于聚合物非线性特性的迭代模型来描述POM齿轮的磨损机制,该模型可以获得每个负载下的永久和塑性变形。此外,通过磨损预测模型来确定磨损过程中的去除材料量。

**1.2.3 聚碳酸酯齿轮:**聚碳酸酯(PC)材料属于无色的玻璃态无定型聚合物,具有高冲击强度、尺寸稳定性好、蠕变小和良好的加工成型性能等优点<sup>[20]</sup>。但是在较高温度的影响下PC易发生老化,因此在较高温度下使用此种材料需要对制品表面进行保护,进而延长PC的使用寿命<sup>[21]</sup>。PC制成的齿轮,由于材料无色透明,齿轮外观会十分精美,并且可安装在精密仪器仪表中<sup>[22]</sup>,进行齿轮传动或者作为工艺装饰品,但其制成的齿轮会存在径向的齿形变,对于此种缺陷,需要进行精确地齿轮模拟仿真才可获得。Tang等<sup>[23]</sup>在不同材料、不同测量力和不同材料弹性形变的条件下,进行MATLAB的仿真计算,获得齿轮的齿径向形变算法和齿轮几何传动误差值。由于仿真过程没有考虑齿轮工况的,因此其效果相对理想化,实际中要对PC材料的齿轮进行表面处理,以减少齿面磨损。

**1.2.4 聚醚醚酮齿轮:**由于对聚合物齿轮的要求越来越高,就需要使用工程塑料达到齿轮工况要求,聚醚醚酮(PEEK)具有优异的力学、化学和热性能,比其他特种工程塑料更有优势<sup>[24-26]</sup>。高温下的PEEK材料拉伸强度和弯曲模量依旧很高,并表现出可靠的耐蠕变和抗疲劳的性能,可以长期在200℃的高温下使用。PEEK齿轮也可在较大负载条件下实现动力传输,是当今模塑齿轮中的顶级工程材料。

PEEK齿轮在性能方面表现优良,在牙科中也有许多潜在的用途,PEEK所具有较低的弹性模量和优良拉伸性能都接近人体骨骼,适合作为牙齿的替代物。但仍需对磨损失效进行探究分析,需要考虑载荷大小、环境条件以及滑移率等条件,并针对

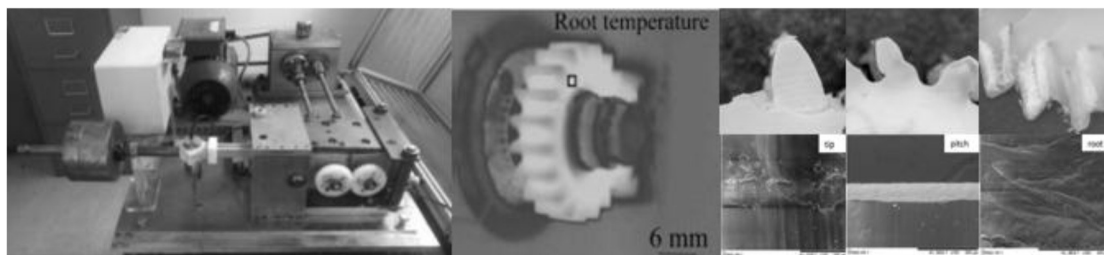


Fig.2 Wear test and failure detection<sup>[8,28-30]</sup>



性地开展实验分析,如 Fig.2 所示。Hoskins 等<sup>[27]</sup>在使用双盘模拟 PEEK 齿轮的滚动滑动接触研究中,获得一种齿轮的动态响应方法。将 2 个 PEEK 圆盘相互接触碰撞,随着载荷和滑移率的增加,PEEK 圆盘的磨损、摩擦和温度也会增加(其磨损率明显低于其他聚合物的磨损),发现在高滑移率和高负载条件下的失效主要是表面熔化和接触疲劳失效,因此,为设计出高性能的齿轮接触条件,需要将获得的结果与实际齿轮啮合过程联系起来。

**1.2.5 聚苯硫醚齿轮:**聚苯硫醚(PPS)具有硬度高,尺寸稳定性好,耐疲劳和耐化学性能的优点,是高温、腐蚀性环境中齿轮的首选材料,现在 PPS 齿轮已应用到汽车、特殊流体泵等苛刻的工作条件下<sup>[31]</sup>。PPS 可以与其他聚合物相互结合,从而达到良好的力学和摩擦性能,齿轮的磨损和传动性能也可得到提升。Chen 等<sup>[32-34]</sup>使用注塑机将 PA66 与 PPS 共混物注塑成型圆柱形摩擦副,进行磨损实验。获得了最优力学性能的共混物比例是 PA66/PPS(70/30),最小磨损的共混物比例是 PA66/PPS(80/20),并且磨损量会随着混合物中 PPS 含量的增多而增加。进一步开展了碳纤维(CF)增强 PA66/PPS 共混物的磨损性能实验,研究发现,当 CF 含量低于 30%时,CF 会导致摩擦副的耐磨性变差,而当 CF 含量高于 30%时,会显著改善了摩擦副的磨损性能。另外,将聚四氟乙烯(PTFE)加入到 PA66/PPS 共混物中,发现共混物的力学性能下降,耐磨性却有很大的提高。Kim 等<sup>[35]</sup>研究发现,在 PPS 中加入乙烯丙烯酸丁酯(EBA)混合物,在齿轮接触表面 PPS 少的条件下,摩擦系数会随着 EBA 的含量增加而降低,磨损机制从黏附磨损模式转变为磨料磨损模式,从而提高齿轮的寿命。

### 1.3 纤维增强塑料齿轮

塑料齿轮具有质量轻、易成型、噪音小的优点,但同时也有强度低、耐磨性差等缺点,因此制造塑料齿轮需要更高性能的材料,可以通过向材料中加入不同添加物的方式来提高其强度。塑料齿轮的添加物一般分为 2 类,一类是减少摩擦,另一类是提高耐热性和力学性能。使用聚四氟乙烯、石墨烯和硅氧烷等可以减少齿轮啮合时的摩擦;添加碳纤维和玻璃纤维可以提升齿轮的强度和热性能;提升耐磨性、降低齿轮的摩擦系数,可以使用芳族聚酰胺纤维。纤维具有拉伸强度高和吸收冲击能量好的优点,是一种简单有效提高齿轮强度的方法,为聚合物齿轮代替金属齿轮提供坚实的基础。

**1.3.1 碳纤维增强塑料齿轮:**碳纤维(CF)的拉伸强度和模量高,具备优异的拉伸性能、低密度、高热稳定性以及良好的导热和导电性,设计自由度高,可以根据要求进行设计。碳纤维广泛应用于各个领域,将碳纤维加入塑料齿轮中,由于碳纤维自身的刚性,可以改善齿轮的摩擦性能,在实现齿轮轻量化的基础上,提高齿轮的齿轮稳定性和耐磨性。

根据碳纤维含量和种类的不同,对齿轮的增强效果和磨损失效表现不同。Kurokawa 等<sup>[36]</sup>对不同 CF 增强的 PEEK 齿轮进行研究和评价,CF 增强齿轮会因配对齿轮的种类、有无润滑剂等因素导致齿面产生不同磨损。干燥的稳定状态下,齿轮的磨损率很小;涂抹润滑剂后,也会因为啮合齿轮的不同而产生不同的磨损,研究人员推测是 PEEK 与 CF 的亲性和 CF 磨屑在啮合区介入的差异以及 CF 的特性对齿轮影响,但仍需进一步验证分析。

Kurokawa 等<sup>[37]</sup>在另一篇文章的研究表明,使用 PEEK 与 3 种聚丙烯腈(PAN)型 CF 和 2 种沥青型 CF 共混而成的 5 种不同的 PEEK/CF 齿轮,对比 2 种 CF 增强齿轮中,发现在最初涂抹润滑脂时,相同类型的 PEEK/CF 齿轮组合,其磨损性会因 CF 种类的不同而有不同失效表现,磨损会因为 CF 的密度增加而减少。

在齿轮中填充材料方面,不同纤维和物质加入聚合物齿轮中会有不同的效果。Schroeder 等<sup>[38]</sup>在对 PEEK、CF 增强 PEEK 和填充石墨、PTFE 和 CF 增强 PEEK 进行摩擦学测试,发现未填充 PEEK 齿轮在实验中表现出较大的磨损;CF 增强 PEEK 齿轮也表现出很低的耐磨性,具有更高的滑动和微磨料耐磨性;往 CF 增强的 PEEK 齿轮中再添加 PTFE 齿轮和石墨后,齿轮的摩擦系数急剧下降,表现出高擦伤性和几乎没有磨损的耐磨性,主要是因为填充有石墨和 PTFE 的碳纤维 PEEK 齿轮的保护性摩擦层,从复合材料转移到另一个齿轮上导致的。因此,CF 增强齿轮的性能虽然有所提高,但是在啮合过程中的磨损失效仍然存在着不可预知性,需要对齿轮的磨损失效形式、温度和润滑条件等进行全面的研究。

**1.3.2 玻璃纤维增强塑料齿轮:**由于玻璃纤维(GF)的直径小,在与基体材料结合后,表现出强度高、性能优良和产品设计自由度大的特点。在特定的应力水平和转速条件下,GF 填充增强齿轮与未填充增强齿轮相比,GF 填充齿轮强度、模量和导热性均表现优良,疲劳寿命延长。注塑制品内部纤维分布均匀,拉伸性能和抗弯强度均有较大提

高,在汽车,航空航天和采矿等领域,被广泛应用在各种机械部件中。

GF的填充含量对齿轮性能提升有不同效果。Mao等<sup>[8]</sup>发现28%的GF增强POM齿轮与未填充GF的POM齿轮相比性能显著增强,在负载能力方面,齿轮的承载提高50%;在表面结晶度方面,POM齿轮的结晶度会下降20%,并从SEM图像中获得GF增强POM齿轮的结晶度没有变化。实验测试后,POM齿轮内部纤维长度会减小,这是高负载情况下纤维断裂所致,导致局部弯曲阻力显著下降和齿轮齿面快速热失效。

不同GF取向会影响到齿轮的啮合磨损。为获得最佳性能的纤维填充齿轮,Kunishima等<sup>[39]</sup>对GF增强PA66进行摩擦学研究,在高接触压力下、滑动和润滑条件下,GF沿垂直取向时,在对应钢啮合的材料上,观察到较大的侵蚀,造成纤维剥落和齿面划伤,这主要是摩擦和蠕变增加的原因;当纤维平行于滑动方向排列时磨损增加;在润滑油存在的情况下,磨损产生的碎屑导致的磨损会明显少于接触温度升高而产生的磨损。

**1.3.3 芳纶纤维增强塑料齿轮:**芳纶纤维是一种合成纤维,具有超高的强度、高模量、质量轻等优点,可在高温下不分解,不融化,是很好的绝缘和抗老化材料。芳纶纤维填充齿轮可以使齿轮的质量减少,使得齿轮朝小型化和高性能方向发展。

在芳纶纤维的效果方面,可以在与GF和CF的比较中得到,在Kukureka等<sup>[40]</sup>对芳纶纤维、GF和CF增强PA66的双盘机试验中,GF和CF增强的材料可以使摩擦系数显著下降,而芳纶纤维不会改变PA66材料的摩擦性。芳纶纤维的磨损与时间呈线性关系,这导致增强PA材料制得制品的磨损率会随时间的变化而不断提高。在两圆盘接触表面上,芳纶

纤维会迅速地从接触表面移除,只留下基体材料,这种效果与提高材料的摩擦系数相似,造成磨损率显著高于未填充增强的材料,可能芳纶纤维只是抑制某些部位的裂纹扩展,导致磨损的碎片是大而薄的薄片。

齿轮的磨损特性决定着齿轮的应用工况。Gordon等<sup>[41]</sup>对PA46和PA46/芳纶纤维复合材料进行滑动滚动接触试验,在2%滑移率的条件下,PA46+15%芳纶纤维的摩擦系数最低,但在较高的负载和速度下却有着稳定的磨损率。实验发现,在任何载荷和速率条件下,PA46+芳纶纤维复合材料都会出现点蚀和大裂缝,最终断裂而失效。因此,PA46+芳纶纤维齿轮适合在低载荷和低速的工况下使用。

## 2 塑料齿轮的成型加工

### 2.1 注塑成型

塑料齿轮正朝着更大尺寸、更复杂的形状和更高强度的方向发展,注塑加工的优势就可以体现出来。在保证齿轮制造精度的情况下,可以通过“一模多腔”,实现快速大批量生产,还可对注塑齿轮进行优化设计,得到质量优化的齿轮,还可不考虑加工工具的选择切换<sup>[42]</sup>。在注塑成型齿轮中,由于模具的设计成本较高,需要保证模具设计的合理性。如果要改变齿轮形貌,需对注塑模具进行重新设计,如图3所示。Mao等<sup>[8]</sup>设计了铝制齿轮模具,嵌件采用弧形浇口设计,并将顶针机构用于轮廓的设计,可有助于减少制品壁厚、缩短冷却时间。

在注塑工艺条件方面,不同的工艺条件决定了制品的成品率和重复率。由于齿轮大小和注射材料的不同,需要对注塑条件(模具温度、注射温度、注射速度和注射压力等)进行设计和实验调试,以获得最佳的熔体流动过程和充分的熔体对流换

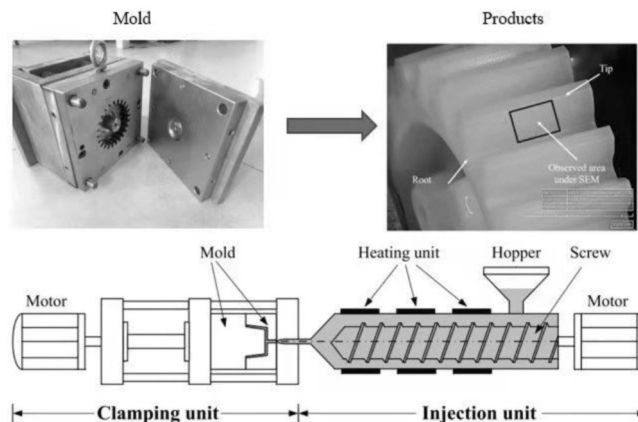


Fig.3 Injection molded gear<sup>[19,41]</sup>

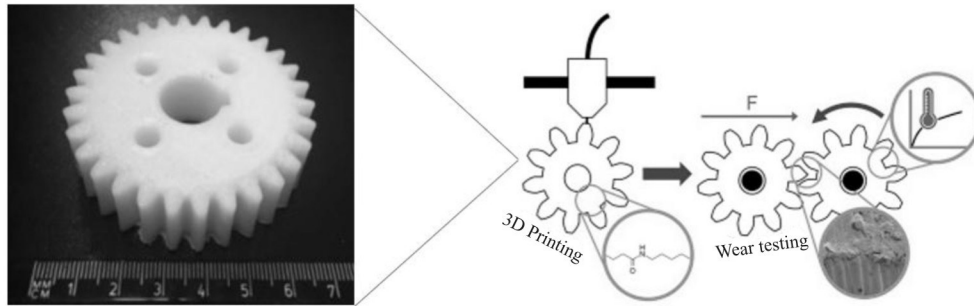


Fig.4 3D printed gear<sup>[3]</sup>

热。在各注射工艺参数下,彭亚运等<sup>[43]</sup>在对PEEK材料微型齿轮注塑成型时,发现模具内部温度对制品有影响,并获得影响成型的主次因素顺序—模具温度、熔体温度、注射速度和注射压力。注塑工艺的调试不仅只有温度的单一条件影响,注射速度和保压压力也是需要考虑的因素, Lee等<sup>[44]</sup>使用微注射成型的方法制造聚合物制品,通过控制保压压力和注射速度,可以获得高质量制品,并提高制品的重复精度。在DSC分析中,将碳纳米管加入制品中可以促进PLA的晶体转变,使制品表面模量和硬度提高。

在Berer等<sup>[24]</sup>研究注塑PEEK辊的点蚀磨损中,润滑剂存在的条件下,点蚀量会增加,这与先前的研究有所冲突。因此,通过使用拉曼光谱进行的化学分析发现,润滑剂对PEEK的特性没有影响,并指出PEEK可以抵抗所有常见的化学影响。通过详细的微观分析,发现注塑辊表面存在预裂纹。在采用合适的注塑成型工艺后,PEEK辊的表面质量得到改善,辊的疲劳寿命增加了2~3倍,可看出注塑工艺对成型齿轮的重要性。

## 2.2 3D 打印

对于3D打印<sup>[45]</sup>的齿轮,不再需要传统的刀具、夹具和机床或任何模具,就能直接从计算机图形数据中生成任何形状进行打印,不受设备大小的限制。在加工的过程中,也不会有材料的浪费,不需要剔除边角料,并充分提升材料的利用率。但是对于3D打印的齿轮需要研究其在设定负载条件下表现出来的性能、复杂的热机械行为和超弹性和黏弹性行为等。

目前,用于3D打印的材料远远不够,一些材料虽然能进行3D打印,但并不具有环保性,这些材料的使用也就受到限制。在未来仍需要进行多种材料的开发利用,以获得更好性能的齿轮。现在的高精度3D打印机比较贵、打印时间较慢,不能实现大

批量生产制造,这些技术缺陷在3D打印齿轮方面,仍然需要进行针对性的研究开发。

在3D打印齿轮的磨损性能方面,3D打印材料不同对磨损失效有不同的影响,Zhang等<sup>[3]</sup>使用5种尼龙材料(尼龙618、尼龙645、合金910、Onyx和Markforged尼龙)制备3D打印尼龙正齿轮,与尼龙66注塑齿轮作比较。磨损实验发现,3D打印齿轮的磨损行为大多发生在齿轮节线上,大多是齿面的熔化,但并没有材料脱落。在中低扭矩条件下,尼龙618打印制造的齿轮具有最佳的耐磨性能,这可能是热力学行为和每层之间的烧结效果导致的。为提升齿轮强度,可在打印材料中添加不同的共混物进行打印成型齿轮。Gbadeyan等<sup>[4]</sup>通过在丙烯腈丁二烯苯乙炔层上引入不同质量百分比的纳米黏土逐层打印齿轮,如图4所示。纳米黏土质量分数为2%的直齿圆柱齿轮的抗冲击性、抗拉伸、抗弯曲性和DMA的力学性能较好,对于添加纳米黏土和未添加纳米黏土的丙烯腈-丁二烯-苯乙炔相比,柔韧性高、存储模量低,这种复合材料可以在短时间内生产不同类型的直齿圆柱齿轮。

## 2.3 机加工成型

机加工生产的齿轮需要按照公差要求进行切削加工,加工过程中不仅要设计,还需要切换刀具进行切割。从经济方面考虑,注塑成型适合大批量生产齿轮,机加工适合小批量生产齿轮。Mao等<sup>[6]</sup>对机加工和注塑成型齿轮进行对比分析发现,在小批量生产中,使用机加工成型乙缩醛齿轮,生产成本要比注塑生产齿轮低得多。在失效实验的结果中,机加工齿轮与注塑成型的乙缩醛齿轮的失效是一致的,因此,磨损率与制作过程无关。虽然在后续实验中,由于工作温度达到临界值的原因,注塑齿轮磨损加快,但是也不能说明使用机切成型乙缩醛齿轮更好。因此,为了经济性和对将来大批量生产做准备,可以使用注塑成型来



代替机加工制造齿轮。

### 3 结语

随着从通用塑料到工程塑料的发展,塑料齿轮在质量轻、运行噪音小、耐磨性好、自润滑性能好、耐腐蚀等多方面的优势得到体现。纤维增强塑料齿轮在保证轻量化的同时,强度和耐磨性得到进一步提升,塑料齿轮的应用场所和使用工况得到进一步拓展。塑料齿轮材质的发展也对成型加工技术提出了更高的要求。注塑成型仍是塑料齿轮最主要的成型方式,主要在模具设计和注塑工艺参数调节方面保证成型齿轮的完整性、尺寸精度及表面质量。3D打印也逐渐发展成为塑料齿轮的成型技术,但成型周期较长,成型精度和表面质量均需改进,制品缺陷的解决主要依赖3D打印的过程控制调整。机加工塑料齿轮的方法则主要受到经济性方面的限制,适用于小批量塑料齿轮的加工成型。

#### 参考文献

- [1] McIvor S D, Darby M I, Wostenholm G H, *et al.* Thermal conductivity measurements of some glass fibre- and carbon fibre-reinforced plastics[J]. *Journal of Materials Science*, 1990, 25: 3127-3132.
- [2] Ton P, Robert K, Pieter J L. Chapter 5: a critical review of carbon fiber and related products from an industrial perspective [J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2022, 5: 90-106.
- [3] Zhang Y, Purssell C, Mao K, *et al.* A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears [J]. *Tribology International*, 2020, 141: 105953.
- [4] Gbadeyan O J, Mohan T P, Kanny K. Processing and characterization of 3D- printed nanoclay/acrylonitrile butadiene styrene (abs) nanocomposite gear[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109: 619-627.
- [5] 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.
- [6] Singh P K, Siddhartha, Singh A K. An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears[J]. *Tribology International*, 2018, 118: 264-272.
- [7] Singh A K. Noise emission from functionally graded materials based polypropylene spur gears - a tribological investigation[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5: 8199-8205.
- [8] Mao K, Greenwood D, Ramakrishnan R, *et al.* The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears[J]. *Wear*, 2019, 426-427: 1033-1039.
- [9] Chen J, Cao Y, Li H. Investigation of the friction and wear behaviors of polyoxymethylene/linear low-density polyethylene/ethylene-acrylic-acid blends[J]. *Wear*, 2006, 260: 1342-1348.
- [10] Melton GH, Peters E N, Arisman R K. Engineering thermoplastics[M]// Kutz M. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. 1st ed. Oxford: William Andrew, 2011: 7-21.
- [11] Russell D P, Beaumont P W R. Structure and properties of injection-moulded nylon-6: part 1 structure and morphology of nylon-6[J]. *Journal of Materials Science*, 1980, 15: 197-207.
- [12] Apichartpattanasiri S, Hay J N, Kukureka S N. A study of the tribological behaviour of polyamide 66 with varying injection-moulding parameters[J]. *Wear*, 2001, 251: 1557-1566.
- [13] Li W, Wood A, Weidig R, *et al.* An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements[J]. *Wear*, 2011, 271: 2176-2183.
- [14] Tavčar J, Grkman G, Duhovnik J. Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2018, 12: JAMDSM0006.
- [15] 聂明德, 周兆福, 党鸿辛. 聚四氟乙烯对齿轮润滑成膜膏润滑性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 1990(1): 7-14.
- Nie M D, Zhou Z F, Dang H X. The effect of PTFE on the performances of film-forming lubricating pastes for gears [J]. *Tribology*, 1990(1): 7-14.
- [16] Postawa P, Koszkuł J. Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162-163: 109-115.
- [17] Kamal M R, Chu J, Derdouri S, *et al.* Morphology of microinjection moulded polyoxymethylene[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2010, 39: 332-341.
- [18] Matkovič S, Pogačnik A, Kalin M. Wear-coefficient analyses for polymer-gear life-time predictions: a critical appraisal of methodologies[J]. *Wear*, 2021, 480-481: 203944.
- [19] Evans S M, Keogh P S. Wear mechanisms in polyoxymethylene spur gears[J]. *Wear*, 2019, 428-429: 356-365.
- [20] Takaffoli M, Hangalur G, Bakker R, *et al.* Thermo-visco-hyperelastic behavior of polycarbonate in forming of a complex geometry[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57: 105-113.
- [21] Redjala S, Azem S, Hocine N A. The effect of the thermal aging on polycarbonate[J]. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, 2021, 47: 3073-3076.
- [22] Mishra V, Sharma R, Khatri N, *et al.* Processing of polycarbonate by ultra-precision machining for optical applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5: 25130-25138.
- [23] Tang J, Yang B, Shi Z. Influence on center distance by measurement force in double-flank gear rolling test[J]. *Measurement*, 2021, 168: 108321.
- [24] Berer M, Tscharnuter D, Pinter G. Dynamic mechanical response of polyetheretherketone (PEEK) exposed to cyclic loads in the high stress tensile regime[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 80: 397-405.
- [25] Abbasnezhad N, Khavandi A, Fitoussi J, *et al.* Influence of loading conditions on the overall mechanical behavior of polyether-ether-ketone (PEEK) [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 109: 83-92.

- [26] Avanzini A, Petrogalli C, Battini D, *et al.* Influence of micro-notches on the fatigue strength and crack propagation of unfilled and short carbon fiber reinforced PEEK[J]. *Materials & Design*, 2018, 139: 447-456.
- [27] Hoskins T J, Dearn K D, Chen Y K, *et al.* The wear of PEEK in rolling-sliding contact - simulation of polymer gear applications[J]. *Wear*, 2014, 309: 35-42.
- [28] Trobentar B, Kulovec S, Hlebanja G, *et al.* Experimental failure analysis of S-polymer gears[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 111: 104496.
- [29] Kalin M, Kupec A. The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 1339-1346.
- [30] Mao K, Langlois P, Hu Z, *et al.* The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears [J]. *Wear*, 2015, 332-333: 822-826.
- [31] Biron M. Detailed accounts of thermoplastic resins[M]// *Thermoplastics and thermoplastic composites*. 3rd ed. Oxford: William Andrew, 2018: 203-766.
- [32] Chen Z, Li T, Yang Y, Liu X, *et al.* Mechanical and tribological properties of PA/PPS blends[J]. *Wear*, 2004, 257: 696-707.
- [33] Chen Z, Liu X, Lü R, *et al.* Friction and wear mechanisms of PA66/PPS blend reinforced with carbon fiber[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 105: 602-608.
- [34] Chen Z, Liu X, Li T, *et al.* Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend. II. Filled with PTFE[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 101: 969-977.
- [35] Kim S S, Shin M W, Jang H. The wear mechanism of a polyphenylene sulfide (PPS) composite mixed with ethylene butyl acrylate (EBA)[J]. *Tribology Letters*, 2012, 47: 165-173.
- [36] 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.
- [37] 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: 715-721.
- [38] Schroeder R, Torres F W, Binder C, *et al.* Failure mode in sliding wear of PEEK based composites[J]. *Wear*, 2013, 301: 717-726.
- [39] Kunishima T, Nagai Y, Bouvard G, *et al.* Comparison of the tribological properties of carbon/glass fiber reinforced PA66-based composites in contact with steel, with and without grease lubrication[J]. *Wear*, 2021, 477: 203899.
- [40] Kukureka S N, Hooke C J, Rao M, *et al.* The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact[J]. *Tribology International*, 1999, 32: 107-116.
- [41] Gordon D H, Kukureka S N. The wear and friction of polyamide 46 and polyamide 46/aramid-fibre composites in sliding-rolling contact[J]. *Wear*, 2009, 267: 669-678.
- [42] Zhao N, Lian J, Wang P, *et al.* Recent progress in minimizing the warpage and shrinkage deformations by the optimization of process parameters in plastic injection molding: a review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120: 85-101.
- [43] 彭亚运, 王敏杰, 张富城, 等. PEEK 微小齿轮注射成型过程的传热分析[J]. *模具工业*, 2018, 44(9): 50-57.
- Peng Y Y, Wang M J, Zhang F C, *et al.* Heat transfer analysis of PEEK Micro gear injection molding process [J]. *Die and Mould Industry*, 2018, 44(9): 50-57.
- [44] Lee J H, Park S H, Kim S H, *et al.* Replication and surface properties of micro injection molded PLA/MWCNT nanocomposites[J]. *Polymer Testing*, 2020, 83: 106321.
- [45] Praveena B A, Lokesh N, Buradi A, *et al.* A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): methods, materials, applications, challenges, trends and future potential[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 52: 1309-1313.

## Progress of Plastic Gear and Its Forming and Manufacturing Techniques

Fuhai Li, Da Wang, Jian Wang

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

**ABSTRACT:** Gears as main components for the function of motion and power transfer play very important roles in mechanical equipment. Compared with metal gear, plastic gear has many advantages, such as lightweight, low noise, good wear resistance, good self-lubrication performance, corrosion resistance, and it has the characteristics of easy molding, low manufacturing cost, and flexible design, etc. Compared with the traditional forming and manufacturing methods for metal gear, the forming and manufacturing methods for plastic gear are very different due to the significant difference in the types and properties of plastic materials. Referring to relevant literature on plastic gears, the characteristics, properties, and applications of different plastic gears were summarized, and the main manufacturing methods of plastic gears including injection molding, 3D printing, and machining were analyzed.

**Keywords:** gear; plastic; composites; injection molding; 3D printing; machining