

食品机械用复合材料齿轮的材料性能研究

张 力, 王 辉

(北京工商大学机械自动化学院, 北京 100037)

摘 要: 用复合材料替代金属材料制造齿轮, 以实现传动平稳、减轻自重、减震、降噪、耐腐蚀、耐磨、自修复和降低成本的目的。通过设计配方, 采用优化的生产工艺条件, 对食品机械用复合材料齿轮的材料性能进行了性能测试实验和研究。结果显示: 所研制的齿轮用复合材料的主要性能指标均达到国家要求, 材料性能测试实验研究表明将微胶囊自修复技术应用于复合材料齿轮是可行的。

关键词: 齿轮; 复合材料; 性能实验

Study on Material Properties of Composite Gear in Food Machinery

ZHANG Li, WANG Hui

(College of Mechanical Engineering and Automation, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China)

Abstract: For the purpose of stable transmission, lightening self-weight, shock absorption, noise reduction, corrosion resistant, wear resistance, self-repair, and cost reduction, the gear is made of composite materials in stead of metal ones. By designing formulation and using optimized production technology, performance test and research were made on the properties of composite materials. The results showed that the main properties of composite materials used in these gears meet the state requirements. This study showed that the technology is feasible.

Key words: gear; composite materials; performance test

中图分类号: TS203

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2008)08-0133-04

在食品机械中大多数的传动系统都采用齿轮进行传动, 如在各种搅拌机特别是锥形搅拌机中, 齿轮传动是最主要的动力和运动传动方式。食品机械通常要求具有无毒、卫生的特点, 并具有防腐的性能。用复合材料替代金属材料制造齿轮, 以实现传动平稳、减轻自重、减震、降噪、耐腐蚀、耐磨、自修复和降低成本的目的。德国、美国、日本等国家也在 20 世纪 50 年代起就尝试利用非金属材料制作食品机械, 近年来, 国内复合材料制成的齿轮已进入了工业化应用阶段, 广泛应用于食品机械设备等领域。

与金属齿轮相比, 复合材料齿轮在工作过程中的失效形式包括齿轮折断、磨损、点蚀和烧伤等。在疲劳弯曲和接触应力的反复作用下, 在齿轮表面出现的疲劳裂纹和损伤会对轮齿造成巨大的破坏。本实验采用全新的方法, 研制一种具有自修复功能的新型齿轮用复合材料, 把具有自修复功能的微胶囊^[1-2]应用到复合材料齿轮中, 利用微胶囊破裂后对周围材料的粘附性, 将齿轮

的疲劳点蚀裂纹等缺陷修复, 弥补一般复合材料齿轮的不足, 并提高齿轮工作能力和延长寿命, 降低食品机械中传动系统的维修成本。

1 材料与方法

1.1 基体材料

齿轮用复合材料的基体材料除了要求具有对增强纤维的粘附性、一定的强度、韧性和工艺性之外, 还应具备较高的热稳定性、耐磨性、自润滑性及减磨性, 其中摩擦磨损性能尤为重要。因此材料配方选用无机纳米改性酚醛树脂作为基体材料^[3]。无机纳米改性酚醛树脂是固体粉末, 外观为白色或淡黄色, 技术性能见表 1。

表 1 无机纳米改性酚醛树脂的技术性能
Table 1 Technical performance of inorganic nano-modified phenolic resin

流动距离(nm)	聚合速度 (150℃, s)	水分	细度	游离酚
38 ± 3	80 ± 3	< 1%	通过 95%	< 2.5%

收稿日期: 2008-05-11

基金项目: 北京市高等学校拔尖创新人才资助项目(2006); 北京市教育委员会科技发展计划项目(KM2007100110011)

作者简介: 张力(1959-), 女, 教授, 博士, 研究方向为复合材料零部件设计、制造及应用。E-mail: zhangli@th.btbu.edu.cn

1.2 增强材料

齿轮用复合材料的增强材料要求可经受冲击、剪切、拉伸等机械作用而不出现裂纹、断裂、崩缺等机械损伤, 还应有足够的强度和模量以及较好的韧性, 稳定的摩擦系数及适当的摩擦损耗, 好相容性和分散性等。因此本实验材料配方选用价格低廉的复合矿物纤维(FKF 纤维)为主体增强纤维, 同时添加少量玻璃纤维、荷兰岩棉、G.N.-1 纤维等其他纤维辅助增强的混杂增强体。FKF 纤维用量占增强体总量的 55%~82%, 每种辅助增强纤维用量占增强体总量的 6%~17%。

1.3 填料

填料的作用主要是改善齿轮的摩擦磨损性能, 改善制品外观质量、刚度、硬度及密度, 提高制品的加工性能与制造工艺性能, 控制制品热膨胀系数、收缩率, 增加产品尺寸的稳定性, 改善制品的导热性和降低生产成本。材料配方选用重晶石、铬铁矿粉、萤石、颗粒石墨、腰果壳油摩擦粉等作为填料。

1.4 微胶囊

微胶囊用于复合材料自修复作用, 目前还处在初步阶段, 其理论和实验研究还不很成熟, 用于复合材料自修复方面的微胶囊的种类也比较少, 材料配方选用聚脲甲醛包覆双环戊二烯(DCPD)微胶囊作为自修复微胶囊^[4-6]。

1.5 正交试验设计

齿轮用复合材料的性能不仅受组份材料性能的影响, 同时也受制于组份的配比, 因此配方设计一直是提高材料性能的主要途径。正交试验设计是多因素的优化试验设计方法, 用其进行配方设计及优化, 可大大缩短新材料的研制周期, 具有实验点少, 计算简便, 易于分析等特点。本研究采用经验调配与正交试验^[7]设计相结合的方法, 获得齿轮用复合材料配方 1~6 号, 其差别是组分的配比不同, 但均在上述范围内。

1.6 工艺设计

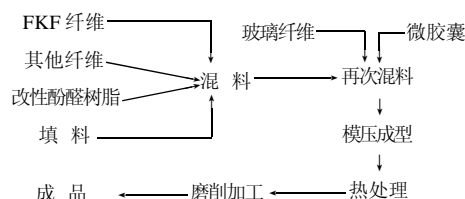


图1 工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram

齿轮用复合材料的模压成型工艺流程如图1所示^[8]。热处理的目的是保证模压制品固化完全, 减少模压制品的水分及挥发物, 消除模压制品的内应力等。热处理烘干时由于挥发性物质进一步排出, 会使制品收缩发生尺寸变化, 有时甚至出现翘曲和裂缝, 必须严格控制

热处理条件。

1.7 性能测试

本实验在所设计的齿轮用复合材料配方中选用有代表性的6种配方进行摩擦磨损性能实验、冲击强度性能实验和硬度性能实验。

1.7.1 摩擦磨损性能实验

本实验使用日本Tokyo Plant Co. Ltd.生产的HP-S型定速式摩擦实验机, 测量温度范围100~350℃, 最大面压10kgf/cm², 即0.98MPa, 最大线速度7~7.5m/s, 主轴转速500r/min。实验步骤: ①试样在100℃以下磨合5000转; ②用精度0.01mm千分尺测量试样厚度, 厚度测定应待试样冷却至室温后进行, 每个试样测5个点取其算术平均值。③在实验温度100℃时, 测定圆盘旋转5000转期间的摩擦力。摩擦后按步骤②测量试样的厚度。④在实验温度150、200、250、300℃时, 按步骤③进行同样实验。实验温度允许偏差为±10℃。

各个实验温度的摩擦系数按式(1)计算:

$$\mu = \frac{f}{F} \quad (1)$$

式中, μ 为摩擦系数; f 为摩擦力(总摩擦力的后半部稳定的摩擦力的平均值), N; F 为加在试样上的法向力(试样的压力×试样面积), N。

各个实验温度的磨损率按式(2)计算, 磨损率(V)实验结果不允许为负值。

$$V = \frac{1}{2\pi R} \times \frac{A}{n} \times \frac{d_1 - d_2}{f_m} = 1.06 \times \frac{A}{n} \times \frac{d_1 - d_2}{f_m} \quad (2)$$

式中, V 为磨损率, cm³/N·m; R 为试样中心与圆盘旋转轴中心的距离(0.15m); n 为实验时圆盘的总转数; A 为试样摩擦面的总面积, cm²; d_1 、 d_2 为实验前、后试样的平均厚度, cm; f_m 为实验时总平均摩擦力, N。

1.7.2 冲击强度性能实验

依照国标要求, 在XCJ-4型冲击实验机上测定冲击强度性能, 本实验使用简支梁式摆锤冲击方式, 对水平放置试样施加冲击弯曲负荷, 使试样断裂, 由试样单位截面积所消耗的功来衡量材料的冲击韧性, 冲击速度为2.9m/s。选用10kgf·cm(0.9807J)冲击能量级别。实验步骤: ①调节支点间距离为40±0.2mm。校正实验机的刻度盘零点, 并将摆锤放在预扬挂钩位置。②将一个试样水平放置于支架上, 使缺口背面受冲击负荷。要将冲击刀刃打在试样整个宽度线上, 并对准试样中心线。③测试时松开锁钩, 让摆锤自由下落, 使试样受到冲击负荷, 由刻度盘读取所消耗的功。④重复步骤①~③, 分别对其他试样进行测试; ⑤按式(3)

计算各个试样的冲击强度。⑥对试样的冲击强度求算术平均值,即得到制品的冲击强度。

$$\alpha_k = \frac{A_k}{b \cdot d} \quad (3)$$

式中: α_k 为试样冲击强度, $\text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2(\text{J}/\text{cm}^2)$; A 为试样所消耗的冲击能量, $\text{kgf} \cdot \text{cm}(\text{J})$; b 为试样中间部位宽度, cm ; d 为试样缺口处剩余厚度, cm 。

1.7.3 硬度性能实验

依照国标要求,在 XHR-150 型塑料洛氏硬度计上进行硬度性能测试,选用 M 标尺,按规定的要求,先用初负荷压入材料,接着施加主负荷,然后卸除主负荷(初负荷仍然保留)。因材料的塑性变形,使压痕深度变化,由初负荷保持状态下,先后两次压入深度之差,来测得洛氏硬度值。实验步骤:①将试样与工作台紧贴,转动手轮使试样上升至指示器小指针指于红点,大指针垂直向上指向 30 处,大指针偏移不得超过 ± 5 分度格(此时初负荷 $10\text{kgf}(98.07\text{N})$ 已加上)调整指示器外圈使标记 30 刻度对准大指针。②加上主负荷保持 15s,再将手柄在 2s 内均匀平稳地扳回原位,卸除主负荷。③当主负荷卸除后(初负荷继续保留)5s 时,从硬度计的刻度上直接读出洛氏硬度值。④按照步骤①~③,试样再测 5~7 个点的硬度,使各印迹中心之间的距离以及试样边缘的距离都不小于 15mm。⑤计算测得的八个点的硬度的算术平均值,即得到制品的硬度。

2 结果与分析

2.1 摩擦磨损性能实验结果与分析

1~6 号材料配方的摩擦磨损性能主要实验结果见表 2、3。从摩擦磨损实验结果可看出:经测试所设计的齿轮用复合材料的摩擦磨损性能均达到国标要求。添加少量的微胶囊对材料摩擦磨损性能的影响不大,摩擦系数略有下降,但仍满足要求;添加纳米增强填料后,材料的摩擦系数和磨损率有所增高,但增高的幅度不大。

表 2 1~6 号配方升温摩擦系数

Table 2 Coefficients of friction of formula 1~6 with temperature rise

温度(°C)	100	150	200	250	300
1 号配方	0.44	0.39	0.35	0.34	0.32
2 号配方	0.43	0.37	0.34	0.31	0.30
3 号配方	0.42	0.38	0.33	0.31	0.30
4 号配方	0.42	0.38	0.34	0.38	0.38
5 号配方	0.43	0.39	0.34	0.31	0.34
6 号配方	0.45	0.39	0.38	0.34	0.34

2.1 冲击强度性能实验结果与分析

表 3 1~6 号配方磨损率 $V(\times 10^{-7}\text{cm}^3/\text{N} \cdot \text{m})$

Table 3 Wear rates ($\times 10^{-7}\text{cm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) of formula 1~6V

温度(°C)	100	150	200	250	300
1 号配方	0.22	0.39	0.59	0.44	0.43
2 号配方	0.24	0.43	0.67	0.58	0.54
3 号配方	0.17	0.36	0.54	0.44	0.47
4 号配方	0.16	0.35	0.57	0.51	0.58
5 号配方	0.17	0.38	0.73	0.61	0.60
6 号配方	0.16	0.30	0.57	0.49	0.46

国标规定摩擦材料的冲击强度 $\alpha_k \geq 0.294\text{J}/\text{cm}^2$ 。

1~6 号配方的冲击强度性能测试结果见表 4。从冲击强度实验结果可看出:所设计配方的冲击强度性能测试结果满足要求,测试结果表明添加少量微胶囊后刹车片的冲击强度有一定的影响,但影响不大;添加纳米增强填料以后,刹车片的冲击强度有一定的提高。

表 4 1~6 号配方冲击强度性能测试结果

Table 4 Test results of impact strength of formula 1~6

配方号	1	2	3	4	5	6
$\alpha_k(\text{J}/\text{cm}^2)$	0.379	0.381	0.354	0.362	0.379	0.375

2.3 硬度性能实验结果与分析

1~6 号配方的硬度实验结果见表 5。从硬度实验结果可看出:所设计的齿轮用复合材料的硬度性能测试满足国标的要求。添加少量的微胶囊能使材料的硬度略有降低,添加纳米增强填料能使材料的硬度略有提高。

表 5 1~6 号配方硬度性能测试结果

Table 5 Test results of hardness of formula 1~6

配方号	1	2	3	4	5	6
硬度 HRM	61	59	63	57.3	64	64

总之,所研制的齿轮用复合材料的主要性能指标均达到国家要求,具体表现在:(1)摩擦系数适宜且稳定。升温摩擦系数集中在 0.3~0.45 之间,升温阶段的摩擦系数随着温度的升高逐渐减小,高温摩擦衰退不明显。(2)耐磨性能较好。最大磨损率不足 $0.61 \times 10^{-7}\text{cm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。(3)恢复性能较好。经 350°C 实验后再做 100°C 恢复实验,摩擦系数恢复到正常值。(4)耐冲击性能较好。冲击强度达到 $3.81\text{dJ}/\text{cm}^2$ 。(5)硬度适中。

3 结论

通过设计配方,采用优化的生产工艺条件,对食品机械用复合材料齿轮的材料性能进行了性能测试实验和研究。通过实验结果分析得出结论:添加少量微胶囊

对齿轮用复合材料的摩擦系数、磨损率、冲击强度、硬度的影响都不大,添加微胶囊的材料配方均仍能满足摩擦材料的使用要求。将微胶囊自修复技术应用于复合材料齿轮是可行的。通过加入纳米增强填料与未加纳米增强填料的齿轮用复合材料进行对比分析,发现添加纳米增强填料之后,材料的升温摩擦系数、磨损率、硬度和冲击强度均略有提高。

本实验设计的齿轮用复合材料利用微胶囊破裂后对周围材料的粘附性,将齿轮的疲劳点蚀裂纹等缺陷修复,弥补一般复合材料齿轮的不足,可提高齿轮工作能力和延长寿命,降低食品机械中传动系统的维修成本。

参考文献:

- [1] 李元杰. 微胶囊自修复聚合物材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2005, 33(1): 68-70.
- [2] 李超. 复合材料结构的自修补技术[J]. 纤维复合材料, 2005(4): 18-21.
- [3] 林荣会, 郝英欣, 邵艳霞, 等. 纳米铜改性酚醛树脂及其应用性能[J]. 复合材料报, 2004, 21(6): 114.
- [4] WHITE S R, KESSLER M R, SOTTOS N R. Self-healing structural composite materials[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(8): 743.
- [5] BROWN E N, WHITE S R, SOTTOS N R. Microcapsule induced toughening in a self-healing polymer composite[J]. Journal of Material Science, 2004, 39(5): 1703.
- [6] 党旭丹, 张恒, 贺跃进. 胶囊型自修复智能复合材料研究[J]. 材料导报, 2005, 19(1): 30-32.
- [7] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 64.
- [8] 古托夫斯基 T G. 先进复合材料制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.