

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.001

中空超扁平系列谐波减速器柔轮应力与疲劳寿命

赵言正*, 刘积昊, 管恩广

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:针对目前中空超扁平系列谐波减速器在运行过程中,存在柔轮易发生疲劳损坏,其疲劳寿命严重制约着谐波齿轮减速器的使用寿命等问题,课题组基于有限元仿真软件 HyperMash,研究了中空超扁平系列谐波减速器柔轮的应力特性和疲劳寿命;并分析载荷、齿长、齿厚和柔轮高度等参数对应力和疲劳寿命的影响。研究结果表明载荷是影响柔轮疲劳寿命最主要的因素。该研究可为后续机械结构优化提供参考。

关键词:谐波减速器;柔轮;HyperMash 仿真软件;有限元模型;疲劳寿命

中图分类号:TH132 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)05-0001-05

Stress and Fatigue Life of Flexible Wheel of Hollow Super Flat Series Harmonic Reducer

ZHAO Yanzheng*, LIU Jihao, GUAN Enguang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In view of the fact that the flexible wheels are most prone to fatigue damage during the operation of hollow super flat series harmonic reducers, and their fatigue life seriously restricts the service life of the harmonic gear reducers, the stress characteristics and fatigue life of those flexible wheels were studied based on the finite element simulation software HyperMash. The influences of load, gear length, gear thickness and flexible wheel height on the stress and fatigue life were analyzed. The results show that the load is the most important factor affecting the fatigue life of flexible wheels. This conclusion can provide guidance for the follow-up mechanical structure optimization.

Keywords: harmonic reducer; flexible wheel; HyperMash; finite element model; fatigue life

中空超扁平系列谐波减速器属于结构超薄型,因其具有结构紧凑简单、高转矩、高刚性、高精度(无背隙),定位精度和回转精度高等特点,常适合于对减速器有苛刻厚度要求的场合使用^[1]。

柔轮作为谐波减速器的弹性薄壁零件,在谐波减速器工作中,需要依靠它的弹性变形来传递运动和动力^[2-5]。因此,柔轮最容易发生疲劳损坏,其疲劳寿命严重制约着谐波齿轮减速器的使用寿命。因此,研究谐波减速器柔轮的疲劳寿命问题具有重要意义。

目前,有些学者已经对柔轮的应力及疲劳寿命进行了分析。如,吴上生等^[6]分别采用 SWT 疲劳分析法和有限元法对冷滚压柔轮的裂纹萌生寿命和裂纹扩展

寿命进行分析;张立勇等^[7]基于有限元法研究了在凸轮波发生器作用下柔轮的应力分布,并采用谐波传动包络啮合理论,分析谐波传动径向变形量对啮合特性的影响规律。张功学等^[8]基于 ADAMS 和 ANSYS Workbench 软件对柔轮的正应力、剪应力及疲劳强度等进行分析。Wang 等^[9]基于有限元模型对柔轮的疲劳寿命进行了分析。然而,上述研究大多数是针对杯型系列的谐波减速器,对中空超扁平系列的谐波减速器研究较少。

课题组采用有限元方法对中空超扁平系列谐波减速器的应力应变进行分析,并基于 S-N 曲线对疲劳寿命进行研究。

收稿日期:2020-04-20;修回日期:2020-07-24

基金项目:国家重点研发计划:机器人系列化谐波减速器疲劳性能分析预测与寿命提升技术研究(2017YFB1300603)。

第一作者简介:赵言正(1965),男,山东潍坊人,博士,教授,主要研究方向为负压吸附式和永磁吸附式壁面移动机器人技术。

E-mail: yzh-zhao@sjtu.edu.cn

1 有限元模型建立

1.1 模型简化

课题组以 LHD-25 型号谐波减速器为研究对象,其实物如图 1 所示。谐波减速器柔轮中主要包括端面和齿接触面等。模型中含有倒角、圆弧等工艺细节,在有限元计算过程中带来极大困难。因此,在建模时,忽略倒角、圆弧等对柔轮应力的影响,对模型进行简化。

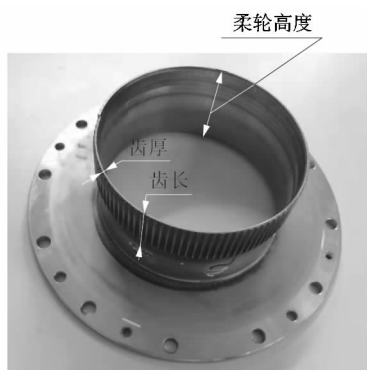


图 1 柔轮实物图

Figure 1 Flexible wheel

1.2 模型参数设置

在有限元模型中,正确的材料设置对模型的计算结构至关重要。柔轮的材料牌号为 20Cr2Ni4,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,强度应力为 600 MPa,屈服极限为 360 MPa。

1.3 模型网格划分

为利用 HyperMesh 划分的柔轮网格,按照面网格划分柔轮,设置面网格厚度为 2mm,如图 2 所示。图 3 为利用 HyperMesh 划分的柔性轴承接触面的网格。图 4 为柔性轴承和柔轮整体接触的网格划分图。

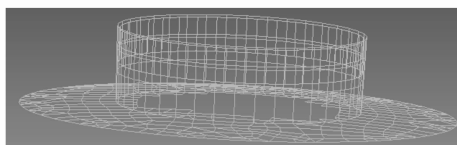


图 2 柔轮网格划分图

Figure 2 Meshing of flexible wheels

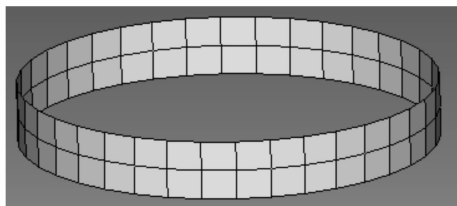


图 3 柔性轴承网格划分

Figure 3 Meshing of flexible bearing

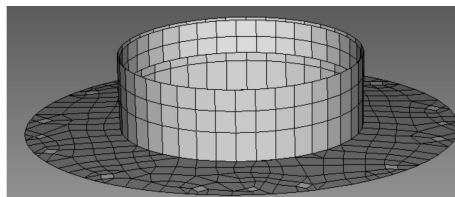


图 4 柔性轴承和柔轮整体接触网格划分

Figure 4 Meshing of contact between flexible bearing and flexible wheel

1.4 设置接触对和约束

建立接触对时,忽略了柔性轴承刚度对柔轮的影响,采用面-面接触方式分析,将波发生器的外表面定义为刚性面。接触宽度按照柔性轴承和柔轮之间的接触设置,其值为 8.95。如图 5 所示为建立的柔性轴承和柔轮之间的接触对。

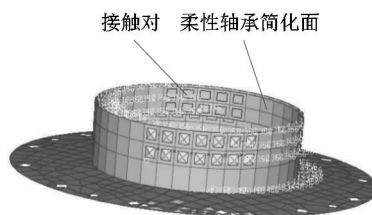


图 5 柔性轴承和柔轮接触模型设置

Figure 5 Contact model of flexible bearing and flexible wheel

进行柔轮和柔性轴承接触分析时,设置柔性轴承接触面自由度约束为 5 个,如图 6 所示为柔性轴承的约束自由度。柔性轴承绕中心轴的转动为自由状态,其余自由度全部限制。如图 7 所示为柔轮的自由度约束设置,由于柔性轴承固定在端面上,因此设定柔性轴承自由度全部约束。

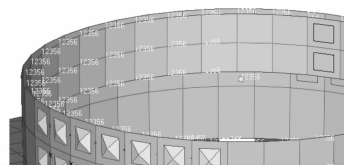


图 6 柔性轴承接触面自由度约束设置

Figure 6 Freedom constraints of flexible bearing contact surface

1.5 面-面非线性接触算法

柔轮和柔性轴承进行接触分析计算时采用的是 CONTACT 算法。在柔轮和柔性轴承接触计算时柔轮为从动面,柔性轴承为主动面。利用拉格朗日乘子进行计算时,在从动面与主动面接触位置需设置多点接触 (MPC-multi-point constraints)。

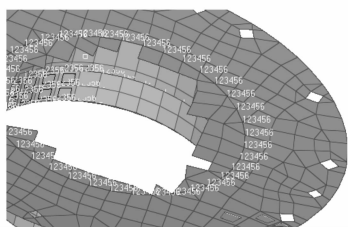


图7 柔轮自由度约束设置

Figure 7 Flexible wheel freedom constraints

图8为在柔轮上设置多点接触的示意图。进行接触分析时还需设置柔轮和柔性轴承接触面之间的动摩擦因数和静摩擦因数,并设置两者之间的间隙。如图9所示浅色单元为柔轮上的计算区域,深色单元为柔性轴承的计算区域。



图8 柔轮上的多点接触设置

Figure 8 Multi point contact on flexible wheel

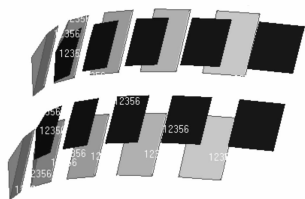


图9 柔性轴承和柔轮接触计算区域设置

Figure 9 Calculation area of contact between flexible bearing and flexible wheel

2 应力应变结果分析

2.1 空载情况下柔轮应力应变分析

经过模型简化、材料设置、网格划分、接触设置等步骤,利用 HyperMash 计算可知柔轮受力变形最大位置为齿根处(如图10所示),其最大应力为183.5 MPa,因此可知该位置易损坏,故需加强。

2.2 动载情况下柔轮应力分析

动载状态下,模拟疲劳测试时谐波减速器柔轮状况。此时,柔轮齿厚度1.3 mm,齿长7.82 mm,柔轮高度为25.6 mm。载荷和柔轮最大应力之间的关系如图11所示,在施加载荷从0~231 N时,柔轮最大应力从183.5 MPa增加到419.2 MPa。说明柔轮随着负载的增大,应力明显增加。图中的散点图为模拟仿真数据,曲线为多项式拟合曲线,图中的数学公式为拟合曲线的方程式, R^2 表示相关系数的平方。

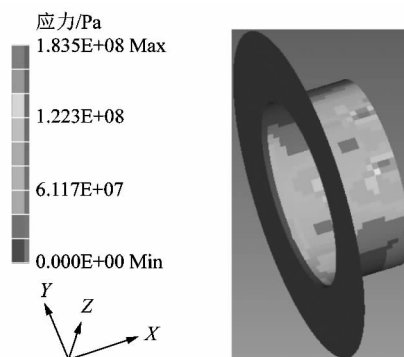


图10 柔轮应力云图

Figure 10 Cloud chart of flexible wheel stress

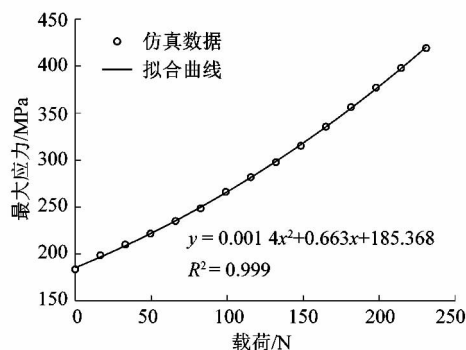


图11 载荷和柔轮最大应力之间的关系

Figure 11 Relationship between load and maximum stress of flexible wheel

2.3 不同参数变化对柔轮应力应变的影响

课题组分析齿厚、齿长和柔轮高度对柔轮应力的影响。图12~14分别表示齿厚、齿长和柔轮高度与柔轮最大应力之间的变化关系。从图中可知, R^2 均大于0.97,说明拟合效果较好,拟合方程具有很好的可信度。

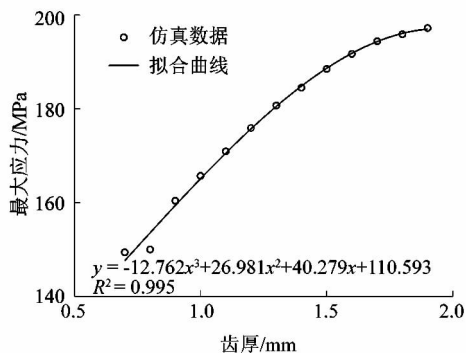


图12 齿厚和柔轮最大应力之间的关系

Figure 12 Relationship between gear thickness and maximum stress of flexible wheel

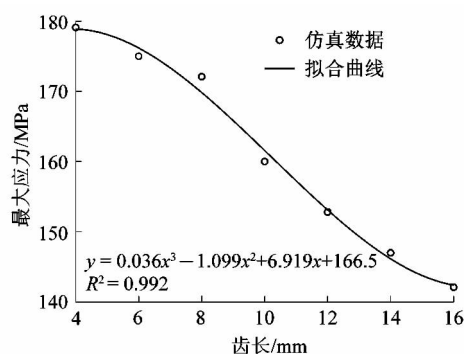


图 13 齿长和柔轮最大应力之间的关系

Figure 13 Relationship between gear length and maximum stress of flexible wheel

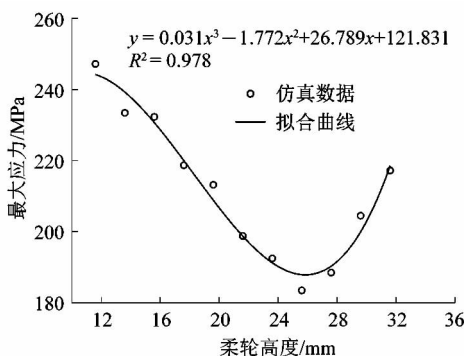


图 14 柔轮高度和柔轮最大应力之间的关系

Figure 14 Relationship between height and maximum stress of flexible wheel

从图中可知,齿厚从 0.7 mm 增加到 1.9 mm,柔轮最大应力从 149.4 MPa 变化到 197.2 MPa。随着齿长从 4 mm 增加到 16 mm,柔轮最大应力从 179.1 MPa 减小到 142.1 MPa。随着柔轮高度从 11.6 mm 增加到 25.6 mm,柔轮最大应力从 247.2 MPa 减小到 183.5 MPa;随后柔轮高度从 25.6 mm 继续增加到 31.6 mm,柔轮最大应力从 183.5 MPa 增加到 217.2 MPa。

因此,随着齿厚的增加,柔轮最大应力逐渐增大;随着齿长的增加,柔轮最大应力逐渐减小;随着柔轮高度的增加,柔轮最大应力先减小后增大,在柔轮高度为 25.6 mm 时,柔轮最大应力值最小。

3 柔轮疲劳寿命分析

在谐波减速器中,由于柔轮寿命严重影响整体寿命,因此课题组对柔轮疲劳寿命进行了分析。在预测金属材料时,一般采用 S-N 曲线进行分析。在谐波减速器运行过程中,柔轮所承受的载荷为对称交变负载,因此不需要单独建立所承受的载荷谱,在最大应力已知的情况下,只需要运用 S-N 曲线即可求取柔轮的疲劳寿命。柔轮应力与寿命之间的关系满足:

$$\sigma_{\max}^m \times N = C. \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为柔轮所受的最大应力, N 为柔轮循环次数, m 和 C 为柔轮材料参数。

基于 Xing 等^[10]的研究,材料为 20Cr2Ni4 柔轮的最大应力与疲劳寿命之间的关系满足:

$$\sigma_{\max} = 784.302 - 0.000\,039\,6N. \quad (2)$$

通过式(2),可以计算出不同载荷和不同结构参数下柔轮的疲劳寿命。

课题组分析了不同载荷、不同齿厚、齿长和柔轮高度对柔轮疲劳寿命的影响,如图 15~18 所示。通过分别对比分析图 11 和图 15、图 12 和图 16、图 13 和图 17、图 14 和图 18,说明柔轮最大应力与疲劳寿命之间具有负相关性。

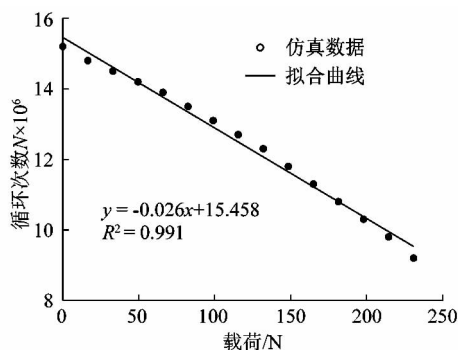


图 15 载荷和柔轮疲劳寿命之间的关系

Figure 15 Relationship between load and fatigue life of flexible wheel

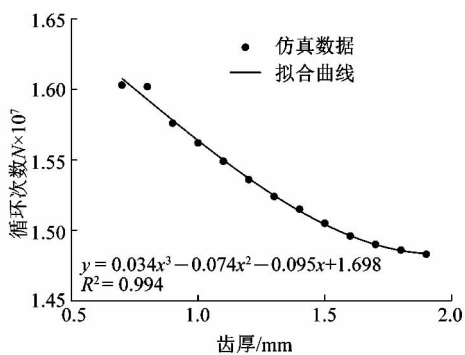


图 16 齿厚和柔轮疲劳寿命之间的关系

Figure 16 Relationship between gear thickness and fatigue life of flexible wheel

从图 15~18 可知,随着施加载荷的增加,柔轮疲劳寿命明显降低;随着齿厚的增加,柔轮疲劳寿命有所降低,但降低程度不明显;随着齿长的增加,柔轮疲劳寿命稍微增加;随着柔轮高度的变化,柔轮疲劳寿命先增加后降低。在这些参数变化过程中,载荷对疲劳寿命的影响最明显。

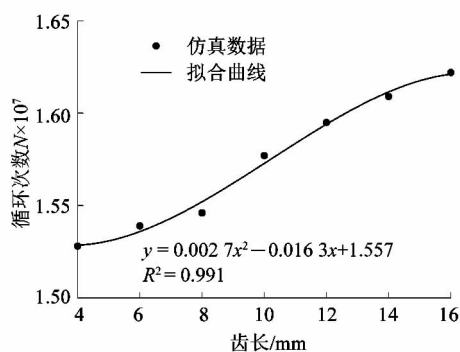


图 17 齿长和柔轮疲劳寿命之间的关系

Figure 17 Relationship between gear length and fatigue life of flexible wheel

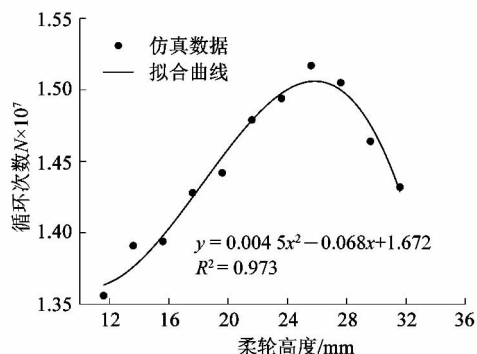


图 18 柔轮高度和柔轮疲劳寿命之间的关系

Figure 18 Relationship between height and fatigue life of flexible wheel

4 结论

课题组基于有限元方法,研究了中空超扁平系列谐波减速器柔轮的应力和疲劳寿命,并对载荷、齿长、齿厚和柔轮高度对应力和疲劳寿命的影响进行了分

析。其结果表明:

1) 柔轮应力的危险区域在柔轮齿圈部分,且最大应力出现在啮合齿的齿根部位;柔轮最大应力与疲劳寿命具有负相关性。

2) 随着载荷和齿厚的增加,疲劳寿命降低;随着齿长的增加,疲劳寿命增加;随着柔轮高度的增加,疲劳寿命先升高后降低。在这些参数中,载荷是影响疲劳寿命最主要的因素。

参考文献:

- [1] 李谦. 绿的:攻克谐波减速器品质难关[J]. 机器人技术与应用, 2013(2):17-18.
- [2] 吴伟国,于鹏飞,侯月阳,等. 短筒柔轮谐波齿轮传动新设计新工艺与实验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(1):40-46.
- [3] 邓娟,杨荣松,郑香美,等. 基于 ANSYS 的谐波减速器杯型柔轮应力分析与参数优化[J]. 机械设计与制造,2012(4):59-61.
- [4] 牟如强. 基于 ANSYS 的谐波齿轮短圆柱形柔轮的应力分析[J]. 煤矿机械,2013,34(4):112-114.
- [5] 严锋,杨为,段成财,等. 谐波减速器柔轮的疲劳寿命分析[J]. 现代制造工程,2013(10):17-19.
- [6] 吴上生,孙韩磊,杨琪. 基于冷滚压工艺的谐波减速器柔轮疲劳寿命分析[J]. 机械传动,2019,43(1):137-141.
- [7] 张立勇,刘新猛,王长路,等. 径向变形量对谐波减速器啮合特性及柔轮应力的影响分析[J]. 机械传动,2017,41(9):172-175.
- [8] 张功学,马车. 谐波减速器的柔轮应力及疲劳强度分析[J]. 煤炭技术,2018,37(3):209-212.
- [9] WANG Xin, ZHOU Xuan, LI Chengqun. Study on the structure of the flexspline of harmonic reducer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 385/386:344-347.
- [10] XING Zhiguo, WANG Zhiyuan, WANG Haidou, et al. Bending fatigue behaviors analysis and fatigue life prediction of 20Cr2Ni4 gear steel with different stress concentrations near non-metallic inclusions [J]. Materials, 2019, 12(20):3443-3464.



www.QCtester.com

因为专业, 所以权威

因为用心, 所以收获更多



扫一扫 加入我们