

考虑残余应力和硬度影响的齿轮弯曲疲劳寿命预估

赵鹏博¹ 陈勇² 尤晖² 周兴云³ 李光鑫¹ 武一民¹ 刘祥环⁴

(1. 河北工业大学 天津市新能源汽车动力传动与安全技术重点实验室, 天津 300401)

(2. 广西大学 机械工程学院, 南宁 530004)

(3. 浙江义利汽车零部件有限公司, 义乌 322000)

(4. 株洲齿轮有限责任公司, 株洲 412000)

摘要: 为研究残余应力和硬度对齿轮弯曲疲劳性能的影响,以渗碳热处理20MnCrS5钢制齿轮为研究对象,进行复合小径喷丸强化处理,进而实现同一材料的齿轮具有不同硬度和残余应力状态。以最大主应变准则为基础,分别引入残余应力影响项以及残余应力-硬度耦合影响项建立疲劳寿命预测模型。通过喷丸齿轮弯曲疲劳试验确定最优残余应力影响系数和修正系数,对比两种模型的寿命预测精度;通过未喷丸齿轮弯曲疲劳试验验证模型的准确性。结果表明,当单一考虑残余应力影响时,残余应力影响系数最优值为0.09,模型可实现较高的寿命预测精度。同时考虑残余应力和硬度影响,修正系数最优值为0.04,模型具有更高的预测精度。

关键词: 20MnCrS5 渗碳齿轮; 弯曲疲劳; 复合小径喷丸; 寿命预估; 最大主应变准则

中图分类号: TG174.44 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.02.007

0 引言

齿轮作为机械传动系统中的重要零部件,在服役环境中承受循环载荷作用,在运转过程中会发生接触疲劳失效或弯曲疲劳失效。接触疲劳失效在整个失效问题中占比达到74%^[1],弯曲疲劳失效占比较低。然而,不断的循环应力作用使裂纹在齿轮内部形成和扩展,在很短时间内就会导致轮齿的断裂,齿轮传动系统立刻失效,造成灾难性的后果。因此,在高载荷和轻量化的发展趋势下,对齿轮的弯曲疲劳强度提出更高的要求,对齿轮弯曲疲劳寿命进行精确预测也至关重要。

齿轮弯曲疲劳性能的主要影响因素为几何结构^[2]、材料^[3]以及表面完整性因素^[4]等。热处理、精加工、喷丸等处理后会在材料表面形成残余压应力层^[5],这一应力层的残余压应力对提高其抵抗裂纹萌生和扩展的能力具有积极的作用。齿轮在经过渗碳处理后,由表及里形成具有较高硬度和残余压应力的硬化层,可以显著提高齿轮等机械零部件的力学性能和疲劳强度^[6-8]。喷丸强化等工艺可以为齿轮引入较高的硬度和残余压应力,从而有效抑制裂纹的产生和扩展^[9]。高残余应力可以显著提升齿轮弯曲疲劳性能已

成为共识。针对残余应力对齿轮弯曲疲劳性能的影响已有许多学者进行了研究。杨庆祥等^[10]对渗碳及渗碳喷丸复合处理的齿轮进行了弯曲疲劳极限的定量分析,发现喷丸可以使齿轮的弯曲疲劳极限提高约38%,其主要原因为喷丸引入了较高的残余压应力。李明睿等^[11]以喷丸强化后DD6单晶合金圆棒试件为研究对象,开展低周疲劳试验,研究表明,喷丸可以引入残余应力,从而有效提高DD6低周疲劳寿命,建立的低周疲劳寿命预测模型具有较好的准确性。陈海宽等^[12]针对喷丸对18CrNiMo7-6钢硬度的影响进行了有限元分析,发现喷丸覆盖率增大,材料硬度逐渐增大,丸粒半径和速度增加,材料的硬化层深度逐渐增加。WINKLER等^[13]对不同模数渗碳齿轮和喷丸齿轮的齿根弯曲疲劳强度和疲劳断裂特性进行了深入研究,通过脉动型试验和运转型试验研究发现,喷丸可以提高齿轮的弯曲疲劳强度,且对裂纹萌生的诱发因素进行了深入分析。

齿轮弯曲疲劳性能体现为某一极限载荷下具有无限寿命。载荷在齿轮齿根处表现为弯曲应力。因此,精确计算齿根弯曲应力是进行疲劳性能分析的首要条件。目前齿根弯曲应力计算方法主要依据悬臂梁理论,即将齿轮看做悬臂梁进行求解。由此衍生出

收稿日期: 2023-07-04 修回日期: 2023-08-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0207000); 河北省全职引进高端人才项目(20181228)

作者简介: 赵鹏博,男,1996年生,河北保定人,硕士研究生; 主要研究方向为齿轮弯曲疲劳; E-mail: zpb02021@163.com。

陈勇(通信作者),男,1954年生,北京人,教授,博士研究生导师; 主要研究方向为汽车系统动力学、高强度齿轮磨损摩擦学; E-mail: chen Yong1585811@163.com。

引用格式: 赵鹏博,陈勇,尤晖,等. 考虑残余应力和硬度影响的齿轮弯曲疲劳寿命预估[J]. 机械强度,2025,47(2):53-60.

ZHAO Pengbo, CHEN Yong, YOU Hui, et al. Forecast of bending fatigue life for gears considering the influence of residual stress and hardness[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(2): 53-60.

多种计算标准并得到广泛应用^{[14][15]7-23}。进行弯曲疲劳试验来分析齿轮弯曲疲劳性能是最准确的方法,但一个完整的弯曲疲劳试验需要消耗很大的财力和物力。因此,许多学者探求有限元模拟的方法进行齿轮弯曲疲劳性能分析。张云超等^[16]基于渐开线直齿轮建立裂纹扩展有限元模型,计算了裂纹扩展不同阶段的裂纹尖端应力强度因子,运用Paris公式构建裂纹扩展速率模型,实现了含有齿根裂纹的齿轮弯曲疲劳寿命预测。熊勋等^[17]使用Franc3D和Abaqus软件进行带预制裂纹的Q235钢的CT试样裂纹扩展及寿命预估,设计相应的CT试样裂纹扩展试验,结果表明仿真值与试验值较为接近。何龙龙等^[18]对含中心穿透斜裂纹平板和带初始裂纹的加筋翼梁典型结构进行疲劳裂纹扩展路径及寿命预测,并进行试验验证,发现预测的裂纹扩展路径和试验结果具有较强的一致性。王建明等^[19]建立含有喷丸后残余应力场的四点弯曲有限元模型,并且建立考虑裂纹闭合效应的有限元模型,发现残余压应力对提高弯曲疲劳寿命起着主导作用。高云等^[20]采用有限元法对渐开线圆柱齿轮齿根疲劳裂纹扩展进行数值模拟,分析了载荷大小和初始裂纹长度对齿轮剩余寿命的影响。

目前喷丸工艺大多采用大直径丸粒(丸粒直径为0.6~0.8 mm)进行喷涂,在引入高硬度和残余压应力的同时不可避免地会增大材料表面粗糙度,进而降低了表面质量^[21-22]。复合小径喷丸作为一种特殊的喷丸工艺,采用直径为0.2~0.25 mm的弹丸进行第一次喷涂,可以在材料表面引入高硬度和高残余压应力。采用直径为0.1~0.15 mm的弹丸进行第二次喷涂,进一步引入残余压应力和硬度的同时产生较小的表面粗糙度,从而减缓了表面疲劳裂纹的产生,为齿轮等零部件表面强化提供了新方法。许任宗等^[23]发现复合小径喷丸处理可以提高齿轮表层硬度和残余压应力,降低齿面粗糙度,且弹丸冲击坑具有明显的储油、润滑功能,从而显著提高齿轮的接触疲劳性能。但有关复合小径喷丸对齿轮弯曲疲劳性能的影响研究尚有不足。目前,针对残余应力与硬度对齿轮弯曲疲劳性能的影响研究大多采用试验方法。试验装置主要为旋转式和脉动式弯曲疲劳试验机。尽管脉动式弯曲疲劳试验机可以快速形成齿轮弯曲疲劳S-N曲线,但往往也是以月为单位。同时,同种处理方式的齿轮弯曲疲劳研究结果很难与其他同材料、不同处理工艺的齿轮形成联系。

本文对齿轮与传动系统研究中心(FZG)标准齿轮进行复合小径喷丸处理,探究其对齿轮弯曲疲劳性能的提升效果。同时,利用Abaqus软件进行齿根弯曲应力和应变模拟。以最大主应变准则为基础,引入硬度

和残余应力影响项,形成考虑硬度和残余应力的寿命预测模型。结合齿轮弯曲疲劳试验数据得到最优影响系数,对不同硬度和残余应力状态的齿轮进行高精度的疲劳寿命预测,为齿轮类零件的表面强化和寿命预测提供参考。

1 试验齿轮制备与试验方法

1.1 材料及试件加工

本文选用20MnCrS5低碳合金钢作为试验齿轮的制造材料,该材料具有高强度和高韧性的特点,广泛应用于汽车、工程机械的传动部件。材料的力学性能如表1所示。

表1 20MnCrS5的力学性能
Tab. 1 Mechanical property of 20MnCrS5

项目 Project	数值 Numerical value
密度 Density/(g/cm ³)	7.838 0
弹性模量 Modulus of elasticity/GPa	209.266
泊松比 Poisson ratio	0.292 5
抗拉强度 Yield strength/MPa	1 232

试验齿轮的齿数 $z=24$,齿宽 $B=14$ mm,模数 $m_n=4.5$ mm,均由同一批次锻造的20MnCrS5毛坯加工制造。

采用的热处理工艺路线如图1所示,使用与氮气混合的甲醇和丙烷作为渗碳剂。所有试验齿轮均同炉进行热处理,处理后表面硬度为58~62 HRC,理论有效硬化层深可以达到0.7~0.9 mm。

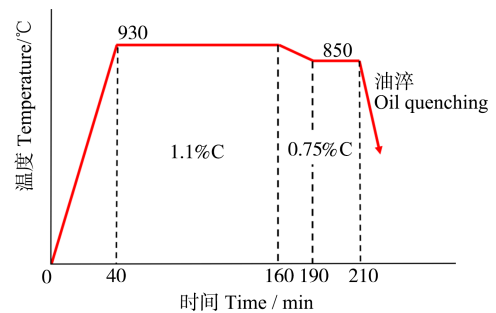


图1 齿轮的渗碳淬火工艺

Fig. 1 Carburizing and quenching process of the gear

将渗碳后的齿轮进行复合小径喷丸处理。进而实现齿轮硬度及残余应力差异。第1次喷涂时丸粒直径为0.2~0.25 mm,喷丸强度为0.16 mmA。第2次喷涂时丸粒直径为0.1~0.15 mm,喷丸强度为0.21 mmN。两次喷丸的喷射角度均为90°,表面覆盖率均为200%。两次喷涂所用钢丸材质相同,硬度为58~64 HRC。

1.2 弯曲疲劳试验方法

完整的齿轮弯曲疲劳测试包括疲劳极限确定以及基于疲劳极限的S-N曲线绘制。详细的试验过程可参见GB/T 14230—2021^{[24]11-13}。严格按照标准规定的

试验方法进行试验。

采用图 2(a)所示的 Letry M6311 型高频疲劳试验机进行齿轮弯曲疲劳试验。加载方式为单齿脉动加载。试验机稳定工作频率约为 85 Hz。装夹位置如图 2(c)所示,为保证下部夹具在上下往复冲击时不会触碰非试验齿,基于齿轮参数,采用跨 4 齿加载方法。上部夹具连接传感器。对下部夹具进行上、下往复的高频冲击。所用的夹具严格按照齿轮的参数进行设计制造,确保齿轮可以被牢固地固定在夹具上,且轮齿不影响冲头的行程,轮齿所受负载方向与基圆相切。

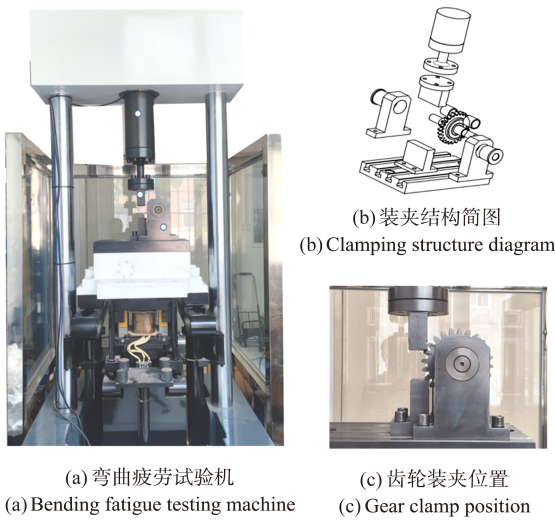


图 2 弯曲疲劳试验机和齿轮装夹
Fig. 2 Bending fatigue testing machine and gear clamp

试验过程中出现下列两种情况之一均判断为齿轮疲劳失效:

- 1) 轮齿齿根出现可见疲劳裂纹或轮齿沿齿根断齿。
- 2) 因齿根出现疲劳裂纹而引起载荷值或加载频率下降 5%~10%(失载)。

使用便携式残余应力检测仪进行残余应力的检测。检测时采用 X 射线衍射法,并用电解腐蚀的方法进行剥层,进而实现不同深度的测量。检测位置如图 3(a)所示,测试现场如图 3(b)所示。检测位置为齿根处,在同一检测点进行重复 5 次的测量,均值视为该位置残余应力。共设置 7 个检测点,检测深度为 80 μm ,前 5 个点的深度间隔为 10 μm ,后 2 个点的深度间隔为 20 μm 。残余应力检测结果如图 4 所示,取残余应力最大值作为齿轮初始残余应力。

使用 HMV-G-XY-S 型显微维氏硬度计测量试验齿的硬度。测试位置如图 3(c)所示,测试现场如图 3(d)所示。检测位置为齿根处,试验力为 9.807 N,保荷时间为 10 s,检测方向为垂直齿根过渡圆切线。在同一检测点进行重复 5 次的测量,均值视为该位置硬度。

设置 10 个检测点,总计检测深度为 1 mm,检测点间隔为 0.1 mm。硬度检测结果如图 5 所示,取硬度最大值为齿轮初始硬度值。

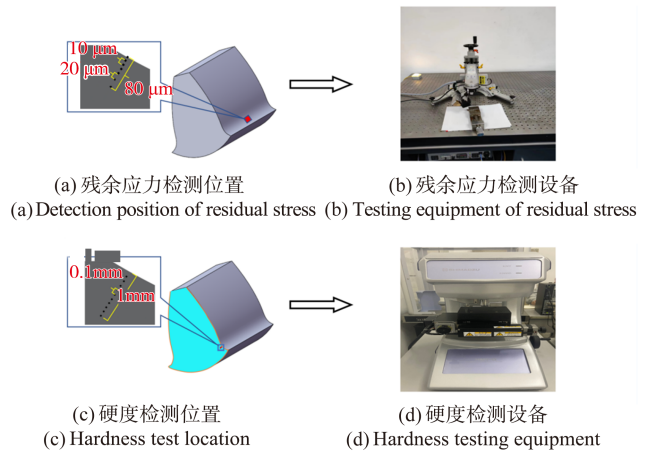


图 3 齿轮初始硬度和残余应力检测

Fig. 3 Detection of initial hardness and residual stress of gears

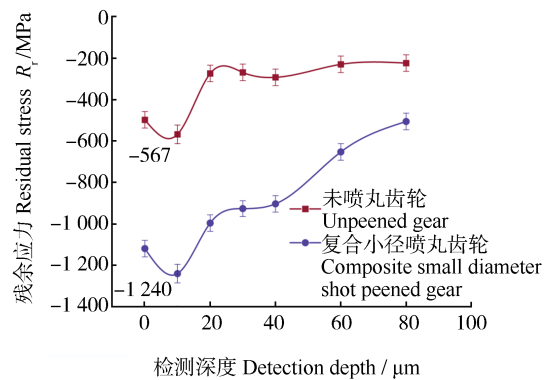


图 4 残余应力检测结果

Fig. 4 Detection result of the residual stress

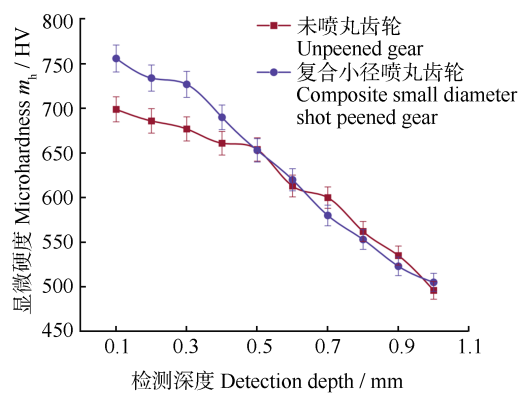


图 5 硬度检测结果

Fig. 5 Detection result of the hardness

1.3 齿根弯曲应力计算

基于 GB/T 14230—2021^{[24][11-13]} 计算不同载荷下的齿根弯曲应力,计算式为

$$R'_F = \frac{F_n \cos(\alpha F_n) Y_F Y_S Y_\beta}{B m_n Y_{ST} Y_{\delta_{reT}} Y_{ReIT} Y_X} \quad (1)$$

式中, F_n 为加载时的载荷值; α 为加载点处压力角; Y_F

为尺寸系数; Y_S 为载荷作用下的应力修正系数; Y_β 为螺旋角系数; Y_{ST} 为与试验齿轮尺寸有关的应力修正系数; $Y_{\delta_{relT}}$ 为相对齿根圆角敏感系数; Y_{RelT} 为静强度下的相对齿根圆角敏感系数; Y_X 为尺寸系数。

进行弯曲疲劳试验时, 必须预先施加一个较小的静态预紧力, 采用的应力比(循环特性系数) $r = 0.05$ 。因此, 需要将齿根弯曲应力转换为 $r = 0$ 的对应值, 转换式为

$$R_F = \frac{(1-r)R'_F}{1-rR'_F/(R_m+350)} \quad (2)$$

式中, R_m 为 20MnCrS5 材料的抗拉强度, $R_m = 1482$ MPa。

2 弯曲疲劳仿真

2.1 齿轮弯曲疲劳有限元模型

严格按照齿轮参数建立试验齿轮的有限元模型。根据夹头位置及形状建立的齿轮有限元模型如图 6(a) 所示。轮齿部分采用细化网格, 最小尺寸为 0.01 mm。同时, 为增加运算效率, 夹具、齿轮轮缘区域采用尺寸较大的渐疏网格。单元类型均为 C3D8R, 总体的网格数量为 250 348。本文采用跨 4 齿的对称式加载方法, 加载位置如图 6(b) 所示, 加载点半径 r_E 为 56.25 mm。

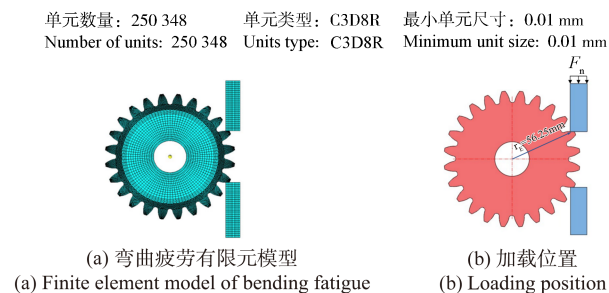


图 6 齿轮有限元模型

Fig. 6 Finite element model of gears

2.2 考虑残余应力与硬度的寿命预测准则

常见的齿轮弯曲疲劳寿命预测准则主要包括最大主应变准则、Smith-Watson-Topper 准则、等效主应变准则等。何海风等^[25]研究发现最大主应变准则在进行齿轮弯曲疲劳寿命预测时的精度较高。因此, 本文采用考虑 Morrow 平均应力修正的最大主应变准则来进行疲劳寿命预测。

最大主应变准则认为决定齿根疲劳寿命的因素为齿根处的最大主应变。最大主应变准则计算式为

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{2} = \frac{R'_f - R_{\text{mean}}}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

式中, $\Delta\varepsilon_1$ 为齿根处最大主应变; R_{mean} 为单载循环中的平均应力; R'_f 为疲劳强度系数; b 为强度指数; ε'_f 为疲劳延性系数; c 为延性指数; N_f 为疲劳寿命。根据 Seeger 理论可计算式中的各项参数, 计算式为

$$\begin{cases} R'_f = 1.5R_{\text{UTS}} \\ b = -0.087 \\ \varepsilon'_f = 0.59\psi \\ c = -0.58 \end{cases} \quad (4)$$

式中, R_{UTS} 为拉伸应力极限; ψ 为无量纲系数, 其值取决于 R_{UTS} 与 E 的关系[若 R_{UTS}/E 小于 0.003, 取值为 1, 否则 $\psi = 1.375 - 125(R_{\text{UTS}}/E)$]。各参数计算结果分别为

$$\begin{cases} R'_f = 2223 \text{ MPa} \\ b = -0.087 \\ \varepsilon'_f = 0.2906 \\ c = -0.58 \end{cases} \quad (5)$$

齿轮在经过热处理、磨削等加工后不可避免地会引入残余应力。同时, 提高残余应力也是喷丸处理最主要的目的。上述准则在预测寿命时并没有考虑残余应力这一因素。并且鲜有文献将残余应力参量引入齿轮疲劳寿命预测中。为了在寿命预测中增加材料自身残余应力要素, 对上述准则进行残余应力修正。引入残余应力影响系数 m_r , 形成的疲劳寿命预测模型如下:

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{2} = \frac{R'_f - R_{\text{mean}} - m_r R_r}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

喷丸为齿轮引入残余应力的同时也提高了齿轮的表面硬度。因此, 在式(6)的基础上, 加入硬度因素, 形成的疲劳寿命预测模型如下:

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{2} = \frac{R'_f - R_{\text{mean}} - \beta(R_r - m_h)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (7)$$

式中, β 为修正系数; m_h 为硬度值。

3 结果与讨论

3.1 残余应力及硬度修正系数确定

本文使用 Abaqus 软件进行了齿根弯曲应力与应变仿真。同时根据式(2)进行了齿根弯曲应力计算。计算值与模拟值对比结果如图 7 所示, 计算值均比仿真值要小。随着载荷逐渐增加, 两者的误差出现不同程度的增加, 但是误差值很小, 因此在进行有限元仿真时忽略不计。

载荷为 8、13 kN 时, 齿根弯曲应力云图与应变云图对比结果如表 2 所示。不同载荷下齿根区域最大弯曲应力与最大应变的位置均相同, 证明了仿真的准确性, 可以使用此有限元模型进行最大主应变的求解。

不考虑残余应力和硬度时的最大主应变准则预测结果(Sample 1)和试验结果对比如图 8 所示。当载荷为 13、14 kN 时, 两者表现出较好的一致性。当载荷小于 13 kN 时, 随着载荷逐渐降低, 两者的差异逐步增大。这是因为最大主应力准则预测模型并没有考虑材料自身的硬度和残余应力因素。但是, 硬度和残余压应力可以明显提升齿轮的高周疲劳寿命。在低周

疲劳阶段,较高的载荷使齿轮的齿根区域在高载荷作用下极易发生塑性变形,从而产生应力松弛。因此,硬度和残余应力对齿轮的低周疲劳寿命影响程度较低。进而使最大主应变准则预测模型在齿轮高周疲劳阶段的预测值与试验值相似。

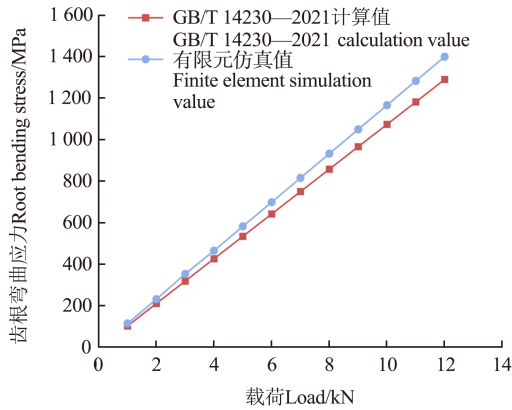


图 7 齿根弯曲应力计算值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison of calculation and simulation values of the tooth root bending stress

表 2 齿根弯曲应力和应变模拟结果

Tab. 2 Simulation result of bending stress and strain for the tooth root

载荷 Load/kN	弯曲应力云图 Bending stress nephogram	应变云图 Strain nephogram
8		
13		

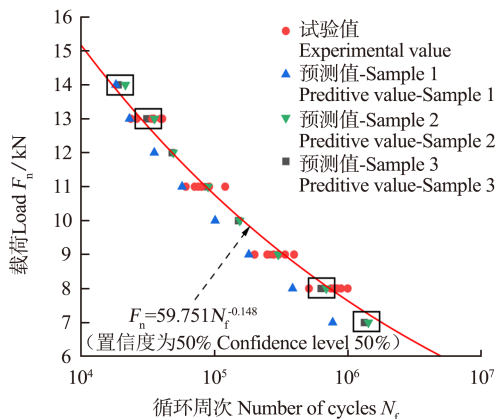


图 8 考虑硬度和残余应力影响的最大主应变准则疲劳寿命预测与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of fatigue life prediction and experimental results of the maximum principal strain criterion with considering the influence of hardness and residual stress

基于最大主应变准则,结合应变模拟结果和弯曲疲劳试验结果计算最优拟合参数。考虑残余应力因

素, $m_f=0.09$ 时表现出最高的精度。图 8 展示了 $m_f=0.09$ 时单一考虑残余应力的模型预测寿命(Sample 2)与试验寿命结果对比。单一考虑残余应力影响,当载荷为 13、14 kN 时,预测寿命偏高,误差值分别为 25.8%、26.2%。但是,当载荷小于 13 kN 时,预测模型表现出极高的预测精度。当载荷为 12 kN 时,拟合曲线对应的寿命为 48 382 次,模型预测值为 49 125 次,相对误差仅为 1.54%,可以忽略不计。

添加硬度影响因素后, $\beta=0.04$ 时显示出最高的精度。图 8 展示了 $\beta=0.04$ 时同时考虑残余应力和硬度的模型预测结果与试验寿命结果对比(Sample 3)。同时考虑残余应力和硬度影响,模型在载荷为 13、14 kN 的预测值明显减小,更加接近于试验曲线值。同时高周疲劳区的预测寿命有较小程度的降低。但降低幅度很小,可以忽略不计。由此可见,同时考虑残余应力和硬度的预测模型精度更高。

图 9、图 10 分别为单一考虑残余应力的仿真寿命与试验寿命分散带图和同时考虑残余应力和硬度的仿真寿命与试验寿命分散带图。由图 9、图 10 可知,预测结果和试验结果均在三倍分散带以内,证明了残余应力影响系数和修正系数取值的合理性和准确性。

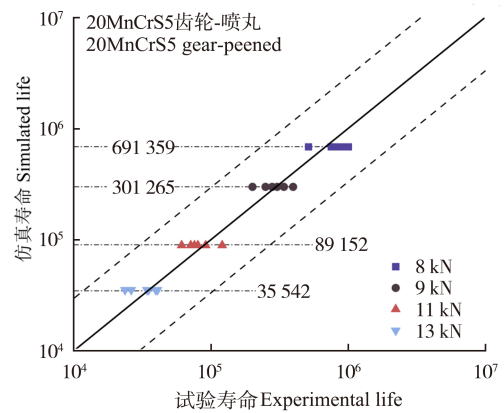


图 9 考虑残余应力的寿命预测和试验结果对比(喷丸)

Fig. 9 Comparison of life prediction and experimental results with considering residual stress (peened)

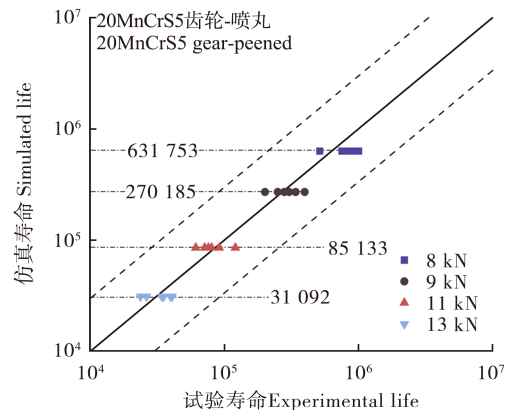


图 10 同时考虑硬度、残余应力的寿命预测和试验结果对比(喷丸)
Fig. 10 Comparison of life prediction and experimental results with considering both hardness and residual stress (peened)

3.2 修正系数验证

前文已经确定, $m_i=0.09, \beta=0.04$ 两种情况的最大主应变疲劳寿命预测准则具有较好的精度。

但是, 前文的结果只是基于喷丸材料的试验数据。相同材料但是不同残余应力、硬度的齿轮应同时适用于这一准则, 进而需要对修正系数进行准确性验证。为此, 使用未喷丸的齿轮进行弯曲疲劳试验, 实现相同材料的齿轮具有不同的硬度和残余应力状态。试验载荷选取 6、7、9、13 kN。表 3 所示为未喷丸齿轮的弯曲疲劳寿命试验结果。

表 3 未喷丸齿轮弯曲疲劳寿命试验结果

Tab. 3 Experimental result of bending fatigue life for not shot peened gears

载荷 Load F_n /kN	寿命 Life N_f	载荷 Load F_n /kN	寿命 Life N_f
6	162 618	9	51 754
	241 357		52 135
	265 163		60 021
	307 315		63 561
	328 413		64 900
	360 192		102 356
	92 746		8 963
7	95 654	13	10 259
	120 205		13 435
	162 747		17 350
	193 417		18 788
	252 674		19 063

单一考虑残余应力的模型预测结果和试验结果对比如图 11 所示, 同时考虑残余应力和硬度的模型预测结果和试验结果对比如图 12 所示。由图 11、图 12 可知, 预测寿命和试验寿命的结果均在三倍分散带以内, 进一步证明了残余应力影响系数和修正系数取值的准确性。值得注意的是, 在最大主应变准则中直接进行影响项的加减并不具有物理意义。因此, 本文展现的添加修正系数所得的预测模型仅为经验公式。

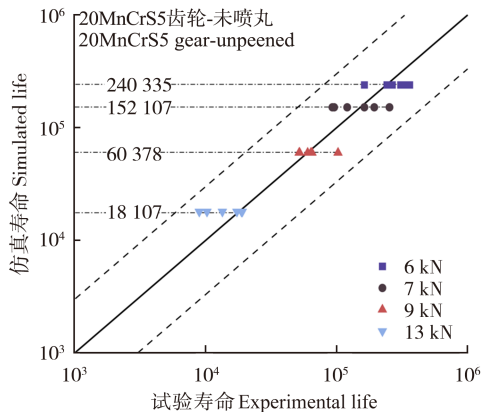


图 11 考虑残余应力的寿命预测和试验结果对比 (未喷丸)

Fig. 11 Comparison of life prediction and experimental results with considering residual stress (unpeened)

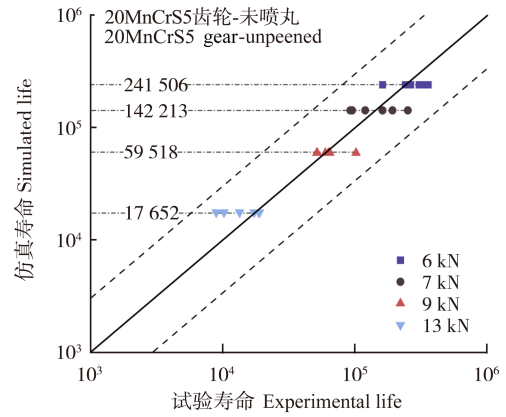


图 12 同时考虑硬度、残余应力的寿命预测和试验结果对比 (未喷丸)

Fig. 12 Comparison of life prediction and experimental results with considering both hardness and residual stress (unpeened)

根据式(6)、式(7), 齿根弯曲应力最大的位置即为疲劳裂纹的萌生位置。有限元模拟与实际轮齿断裂位置对比如图 13 所示。图 13(a)所示为典型的裂纹扩展路径, 图 13(b)所示为不同载荷下裂纹初始萌生位置。不同载荷下的轮齿断裂路径基本相同, 初始裂纹萌生位置略有不同, 但均分布在齿根切线方向 $29.5^\circ \sim 30.2^\circ$ 范围内。如图 13(c)所示, 依据 GB/T 3480.3—2021 标准^{[15]7-23}, 齿根最大弯曲应力为齿根切线方向 30° 处, 此区域即为裂纹萌生位置。图 13(d)为有限元模拟裂纹扩展云图。模拟结果的初始裂纹出现位置为齿根切线方向 30.1° 。国家标准经验结果、有限元模拟结果和实际断裂结果高度吻合, 这进一步验证了有限元模拟的准确性。

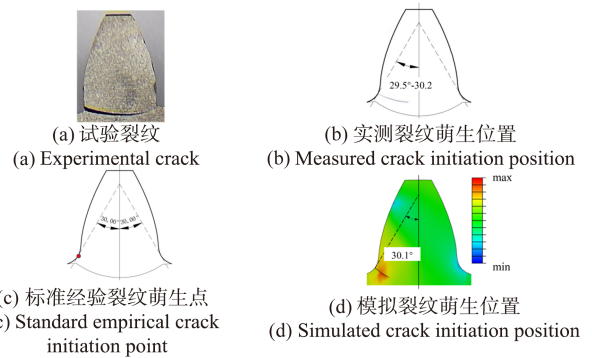


图 13 齿根疲劳裂纹萌生实测、标准经验及模拟位置对比

Fig. 13 Comparison of measured tooth root fatigue crack initiation, standard experience and simulated position

4 结论

通过试验与有限元模拟相结合的方式研究了残余应力和硬度对 20MnCrS5 渗碳齿轮弯曲疲劳性能的影响。以最大主应变准则为基础, 分别引入残余应力影响项和残余应力-硬度耦合影响项, 基于复合小径喷丸齿轮的弯曲疲劳试验数据, 确定了残余应力影响系数以及耦合修正系数。并使用未喷丸齿轮验证参数

选取的准确性。主要结论如下:

1)单一考虑残余应力影响时,残余应力影响系数的最优取值为 0.09。针对不同残余应力状态的齿轮均可实现较高精度的弯曲疲劳寿命预测,当载荷为 12 kN 时,拟合曲线对应的寿命为 48 382 次,模型预测值为 49 125 次,相对误差仅为 1.54%,可以忽略不计,且预测寿命均在三倍分散带内。

2)在单一考虑残余应力的模型基础上耦合添加硬度影响项进行修正,耦合修正系数的最优取值为 0.04。相比单一考虑残余应力的模型展现出更高的预测精度,预测结果更加接近寿命拟合曲线,且预测寿命均在三倍分散带内。

3)使用未喷丸齿轮进行修正系数验证,预测寿命结果均在三倍分散带内,验证了系数取值的准确性。

本文所提出的预测模型仅需要仿真齿轮的最大主应变,以及测量齿轮的硬度和残余应力,即可实现较高精度的齿轮弯曲疲劳寿命预测。但尚有不足之处,所得的修正系数仅适用于 20MnCrS5 材料的 FZG 标准齿轮,是否适用于其他材料、不同处理工艺的齿轮需要进一步验证。

参考文献(References)

- [1] 陈勇,周慧东,臧立彬,等. 汽车变速器表面涂层齿轮疲劳性能试验与接触强度研究[J]. 机械传动,2020,44(6):18-24.
CHEN Yong, ZHOU Huidong, ZANG Libin, et al. Study on the fatigue performance test and contact strength of automatic transmission gear with coating [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(6): 18-24. (In Chinese)
- [2] ZOU T, SHAKER M, ANGELES J, et al. An innovative tooth root profile for spur gears and its effect on service life [J]. Meccanica, 2017, 52(8): 1825-1841.
- [3] LU Z H, LIU H J, WEI P T, 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.
- [4] CHEN D F, ZHU J Z, LIU H J, et al. Experimental investigation of the relation between the surface integrity and bending fatigue strength of carburized gears [J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(1): 33-46.
- [5] GU C, LOU B, JING X, et al. Mechanical properties of carburized Cr-Ni-Mo steels with added case nitrogen [J]. Journal of Heat Treating, 1989, 7(2): 87-94.
- [6] MIAO S, WANG J G, JU D Y, et al. Improvement and analysis of fatigue strength for mild steel 20MnCrS5 during carburizing and quenching [J]. Materials Science, 2019, 26(2): 192-198.
- [7] NOJIMA K, OGATA K, TANAKA M, et al. Bending fatigue strength of case-carburized helical gears (in the case of large helix angles) [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(12): 5657-5663.
- [8] JO B, SHARIFIMEHR S, SHIM Y, et al. Cyclic deformation and fatigue behavior of carburized automotive gear steel and predictions including multiaxial stress states [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 100: 454-465.
- [9] 陈勇,臧立彬,巨东英,等. 高强度汽车齿轮表面强化技术的研究现状和发展趋势[J]. 中国表面工程,2017,30(1):1-15.
CHEN Yong, ZANG Libin, JU Dongying, et al. Research status and development trend on strengthening technology of high strength automobile gear surface [J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 1-15. (In Chinese)
- [10] 杨庆祥,赵言辉,许志强,等. 渗碳及渗碳喷丸齿轮轮齿弯曲疲劳极限的定量分析[J]. 机械工程学报,2004,40(7):34-40.
YANG Qingxiang, ZHAO Yanhui, XU Zhiqiang, et al. Quantitative analyses on bending fatigue limits of teeth of carburized and shot-peened gear specimens [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 34-40. (In Chinese)
- [11] 李明睿,王荣桥,田腾跃,等. 喷丸强化 DD6 单晶合金低周疲劳寿命预测[J]. 表面技术,2022,51(10):1-9.
LI Mingrui, WANG Rongqiao, TIAN Tengyue, et al. Low cycle fatigue life prediction of DD6 single crystal superalloy by shot peening [J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 1-9. (In Chinese)
- [12] 陈海宽,徐广涛,孙博,等. 喷丸对 18CrNiMo7-6 钢硬度影响的有限元分析[J]. 机械强度,2022,44(3):726-730.
CHEN Haikuan, XU Guangtao, SUN Bo, et al. Effects of shot peening on hardness of 18CrNiMo7-6 steel based on finite element analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(3): 726-730. (In Chinese)
- [13] WINKLER K J, SCHURER S, TOBIE T, et al. Investigations on the tooth root bending strength and the fatigue fracture characteristics of case-carburized and shot-peened gears of different sizes [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(21/22): 7338-7349.
- [14] International Organization for Standardization. Calculation of load capacity of spur and helical gears—part 3: calculation of tooth bending strength: ISO 6336-3: 2006 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006: 2-4.
- [15] 全国齿轮标准化技术委员会. 直齿轮和斜齿轮承载能力计算第 3 部分: 轮齿弯曲强度计算: GB/T 3480.3—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 7-23.
National Technical Committee of Gear Standardization. Calculation of load capacity of spur and helical gears—Part 3: calculation of tooth bending strength: GB/T 3480.3—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 7-23. (In Chinese)
- [16] 张云超,王友仁,李加兴. 基于 ABAQUS 的圆柱直齿轮齿根裂纹扩展与寿命估计[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):54-56.
ZHANG Yunchao, WANG Youren, LI Jiaying. Root crack propagation and life estimation of spur gear based on ABAQUS [J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(1): 54-56. (In Chinese)
- [17] 熊勋,杨莹,汪舟,等. 基于 FRANC 3D 和 ABAQUS 联合仿真三维疲劳裂纹扩展分析及寿命预测[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(3):506-512.
XIONG Xun, YANG Ying, WANG Zhou, et al. Three-dimensional fatigue crack propagation analysis and life prediction based on co-simulation of FRANC 3D and ABAQUS [J]. Journal of Wuhan

- University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(3):506-512. (In Chinese)
- [18] 何龙龙, 刘志芳, 顾俊杰, 等. 基于 XFEM 的疲劳裂纹扩展路径和寿命预测[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4):737-743.
HE Longlong, LIU Zhifang, GU Junjie, et al. Fatigue crack propagation path and life prediction based on XFEM[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4):737-743. (In Chinese)
- [19] 王建国, 赵莉莉, 吕鹤婷. 喷丸残余应力对裂纹扩展疲劳寿命的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(4):608-613.
WANG Jianming, ZHAO Lili, LÜ Heting, et al. Effect of shot peening residual stress on crack growth fatigue life [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(4):608-613. (In Chinese)
- [20] 高云, 杨柳青, 刘帅, 等. 齿轮齿根疲劳裂纹扩展特性和剩余寿命研究[J]. 机械强度, 2019, 41(3):718-723.
GAO Yun, YANG Liuqing, LIU Shuai, et al. Research on fatigue crack propagation characteristics and remaining life at the tooth root of a gear[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(3):718-723. (In Chinese)
- [21] ZHANG Y L, WANG J K, WU L J, et al. Surface integrity and bending fatigue behavior of aeronautic gear steel under combined carburized treatment and shot peening[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 169:107488.
- [22] MACEK W, SZALA M, KOWALSKI M, et al. Shot peening intensity effect on bending fatigue strength of S235, S355 and P460 structural steels [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 710(1):012035.
- [23] 许任宗, 陈勇, 李光鑫, 等. 复合小径喷丸强化对齿轮接触疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(5):191-200.
XU Renzong, CHEN Yong, LI Guangxin, et al. Effect of composite small diameter shot peening on contact fatigue performance of gear[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(5):191-200. (In Chinese)
- [24] 全国齿轮标准化技术委员会. 齿轮弯曲疲劳强度试验方法: GB/T 14230—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021:11-13.
National Technical Committee of Gear Standardization. Test method of tooth bending strength for gear load capacity: GB/T 14230—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021:11-13. (In Chinese)
- [25] 何海风, 刘怀举, 朱才朝, 等. 残余应力对齿轮弯曲疲劳的量化影响研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(4):53-61.
HE Haifeng, LIU Huaiju, ZHU Caichao, et al. Quantitative effect of residual stress on gear bending fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(4):53-61. (In Chinese)

Forecast of bending fatigue life for gears considering the influence of residual stress and hardness

ZHAO Pengbo¹ CHEN Yong² YOU Hui² ZHOU Xingyun³ LI Guangxin¹ WU Yimin¹ LIU Xianghuan⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of Power Transmission and Safety Technology for New Energy Vehicles, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(3. Zhejiang Yili Auto Parts Co., Ltd., Yiwu 322000, China)

(4. Zhuzhou Gear Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: In order to study the influence of residual stress and hardness on bending fatigue performance of gear, the 20MnCrS5 steel gear with carburizing heat treatment was taken as the research object, and composite small diameter shot peening strengthening treatment was carried out to realize the gear with different hardness and residual stress states of the same material. Based on the maximum principal strain criterion, incorporating separate factors for residual stress influence and residual stress-hardness coupling influence were introduced respectively to establish the fatigue life prediction model. Through shot-peened gear bending fatigue tests, optimal values for both the residual stress influence coefficient and correction coefficient were determined. The two models' accuracy for life prediction was contrasted, and the accuracy of these models was further verified through unshot peened gear bending fatigue test. The results show that considering only residual stress influence yielded an optimal value of 0.09 for the residual stress influence coefficient, the model achieving high life predictive accuracy. Whereas considering the effects of residual stresses and hardness, it requires a correction coefficient with an optimal value of 0.04, the model achieve even higher predictive accuracy.

Key words: 20MnCrS5 carburized gear; Bending fatigue; Composite small diameter shot peening; Life forecast; Maximum principal strain criterion

Corresponding author: CHEN Yong, E-mail: chenrong1585811@163.com

Fund: National Key R&D Program of China (2018YFE0207000); Hebei Province Full-Time Introduction of High-End Talent Project (20181228)

Received: 2023-07-04 Revised: 2023-08-07