

# 残余应力对 SAE9310 钢航空齿轮弯曲疲劳寿命的影响

关荣鑫<sup>1</sup>, 职彦锋<sup>1</sup>, 王东飞<sup>1</sup>, 王晓鹏<sup>1,2</sup>

(1. 郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450052; 2. 郑州航空工业管理学院 机械工程学院, 河南 郑州 450015)

**摘要:** 为提升航空齿轮弯曲疲劳性能, 通过渗碳热处理等强化措施引入残余压应力是关键工艺技术。为揭示齿轮渗碳热处理性能梯度对弯曲疲劳的影响, 运用测试技术和寿命统计方法, 针对 SAE9310 钢航空齿轮在单齿脉冲弯曲疲劳试验中的疲劳寿命进行分析, 研究渗碳热处理后齿轮的硬度梯度、表面残余应力对其弯曲疲劳寿命的影响。结果表明, 残余应力增益量较大的齿轮的弯曲疲劳寿命明显增加, 且近表层硬度梯度增长速率较大, 易导致硬度峰值前端硬点分布, 造成裂纹路径非平滑扩展。齿面残余应力的预测疲劳寿命与试验结果一致, 验证了齿面残余压应力是影响弯曲疲劳寿命的主要因素, 为航空齿轮的设计和制造提供了重要的理论依据和实践指导。

**关键词:** 航空齿轮; 弯曲疲劳寿命; 硬度梯度; 残余应力; 疲劳裂纹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.034

中图分类号: TG162

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0255-08

## Influence of residual stress on bending fatigue life for SAE9310 steel aviation gears

Guan Rongxin<sup>1</sup>, Zhi Yanfeng<sup>1</sup>, Wang Dongfei<sup>1</sup>, Wang Xiaopeng<sup>1,2</sup>

(1. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** To enhance the bending fatigue performance of aviation gear, introducing the residual compressive stress through strengthening measures such as carburizing heat treatment is the key process technology. Therefore, in order to reveal the influence of the gradient of gear carburizing heat treatment performance on bending fatigue, the fatigue life of SAE9310 steel aviation gears in single-tooth impulse bending fatigue test was analyzed by using the test techniques and the method of life statistics, and the influences of hardness gradient and surface residual stress on the bending fatigue life of gears after carburizing heat treatment were investigated. The results show that the bending fatigue life of gears with larger residual stress increment is significantly increased, and the near-surface hardness gradient growth rate is higher, which can easily lead to the distribution of hard points at the front end of hardness peak, resulting in non-smooth propagation of crack point. The predicted fatigue life considering the residual stress on the tooth surface is consistent with the test results, verifying that the residual compressive stress on the tooth surface is the main factor affecting the bending fatigue life, and providing important theoretical basis and practical guidance for the design and manufacture of aviation gears.

**Key words:** aviation gear; bending fatigue life; hardness gradient; residual stress; fatigue crack

齿根弯曲疲劳是齿轮失效模式中最危险的一种失效形式。当齿轮在传递动力和承受载荷时, 齿根部位承受着复杂的应力状态, 在周期性弯曲应力作用下, 齿根处应力集中最为严重的地方容易出现裂纹<sup>[1]</sup>。随着循环次数的增加, 该裂纹不断生长、扩

展, 最终导致轮齿沿齿根断裂。如图 1 所示, 在齿轮弯曲疲劳试验中, 单齿脉动加载, 裂纹在齿根圆弧处产生, 并由表面向齿根深处扩展。

齿轮弯曲疲劳寿命反映了弯曲疲劳强度, 是评价齿轮抗弯曲疲劳能力的重要参数, 而影响齿轮弯曲疲劳寿命的因素有很多。朱孝录<sup>[2]</sup>指出渗碳淬火齿轮表层脱碳、内部氧化、粗大马氏体、碳化物组织、非马氏体组织、黑色组织、残余奥氏体、晶粒度等对齿轮强度和寿命有影响, 并通过试验数据论证了齿轮表面脱碳对齿轮弯曲疲劳寿命影响极大。齿根过渡圆角影响齿轮弯曲应力分布, 进而影响疲

收稿日期: 2024-03-04; 修订日期: 2024-06-15

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102220110)

作者简介: 关荣鑫 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: guanrongxin@163.com

通信作者: 职彦锋 (1985-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: zhisir@qq.com

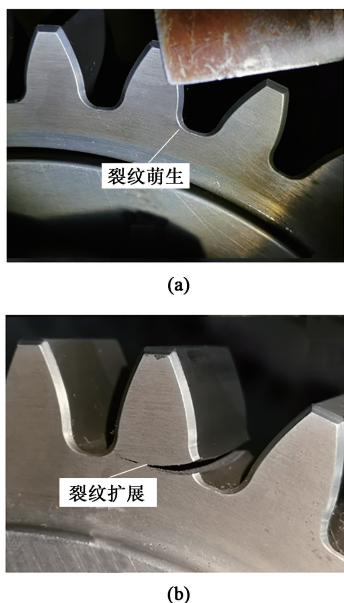


图 1 齿根疲劳裂纹

(a) 裂纹萌生 (b) 裂纹扩展

Fig. 1 Fatigue crack at tooth root

(a) Crack initiation (b) Crack propagation

寿命。过渡圆角半径越大, 裂纹扩展速率越小, 齿轮的疲劳寿命越长<sup>[3-4]</sup>。李飞等<sup>[5]</sup>研究了 MnCr 钢在室温循环载荷作用下的力学形变行为和微观组织演变过程, 分析了其疲劳强度特性。万荣春等<sup>[6]</sup>研究了千兆级应力下的超强钢的断裂行为, 表明钢的强度提高, 钢中氢陷阱浓度越高, 钢的氢表观扩散系数下降, 一旦氢浓度达到延迟开裂临界氢浓度, 试验钢即会出现氢致延迟开裂现象。

有效的残余压应力可以对齿轮的弯曲疲劳强度产生有利的影响, 齿轮的有效强化层形成压缩残余应力, 降低了齿轮的载荷应力, 从而使齿根的抗弯曲疲劳性能得以显著提高<sup>[7-9]</sup>。残余压应力与齿轮的弯曲疲劳强度成正比关系, Shaw B<sup>[10]</sup>研究了残余应力变化对 20MnCr5 渗碳钢齿轮弯曲疲劳性能的影响, 结果表明, 通过喷丸强化控制残余应力, 从而引入高的压残余应力, 使齿轮的弯曲疲劳强度提高了 75%。Shiozawa K 等<sup>[11]</sup>关于 SCr420 渗碳齿轮钢的研究揭示了残余压应力与齿轮疲劳强度之间的密切关系。试验和分析结果表明, 喷丸处理引入的残余压应力对齿轮的疲劳性能具有显著影响。残余压应力峰值的大小与齿轮的疲劳强度成正比。这意味着在渗碳齿轮钢中引入更大的残余压应力峰值可以有效地提高齿轮的疲劳强度; 残余压应力峰值的位置对于提高疲劳强度也至关重要。当残余压应力峰值位于短裂纹扩展区域附近时, 其抵抗裂纹扩展的

能力得到增强, 从而进一步提升了齿轮的疲劳强度。Sakurada T 等<sup>[12]</sup>的研究进一步细化了残余应力场的特征参量与齿轮弯曲疲劳强度之间的关系。研究发现, 残余压应力峰值或 0~0.1 mm 层深的平均残余压应力值与弯曲疲劳强度的相关性最好。这意味着在这个深度范围内, 残余压应力的分布对齿轮的弯曲疲劳强度具有显著影响。Ogawa K 等<sup>[13]</sup>特别指出了齿根深度方向 0.05 mm 处 (通常为残余压应力峰值位置) 残余压应力分布的重要性, 这一位置的残余压应力分布对齿轮弯曲疲劳强度的影响非常关键。董明振等<sup>[14]</sup>研究了两种齿轮钢材料热变形行为, 在低应变速率下, 两种材料均出现明显的动态再结晶, 且其应力特征值和热变形激活能之间由于元素含量不同导致再结晶的程度呈现差异性。

因此, 在优化齿轮的喷丸处理工艺时, 应特别关注这一位置的残余压应力分布。

本文对渗碳淬火工艺下 SAE9310 钢航空齿轮进行弯曲疲劳寿命研究, 分析渗碳淬火后齿轮的硬度梯度、表面残余应力对其弯曲疲劳寿命的影响, 建立含残余应力因素的寿命预测模型并进行寿命预测, 与弯曲疲劳试验进行对比验证。

## 1 热处理与弯曲疲劳试验

### 1.1 渗碳淬火处理

齿轮装炉后, 将渗碳炉温度升至 900 ℃, 同时将炉内碳势升至 1.08%, 在此条件下渗碳 180 min, 渗碳位置为轮齿表面, 渗碳完成后将齿轮置于氮气气氛中保护冷却至室温, 以防止齿轮表面氧化; 之后将齿轮转入回火炉中进行高温回火, 回火温度为 650 ℃, 时间为 240 min, 冷却方式为空冷; 回火完成后, 将齿轮重新加热至 815 ℃并保温 100 min, 保证齿轮整体奥氏体化且各位置的温度均匀一致, 然后进行油淬, 淬火油采用快速油, 油温为 60 ℃, 冷却至油温之后, 再空冷至室温; 由于渗碳后齿轮表层的碳含量较高, 使得马氏体相变温度大幅降低, 导致淬火后表层含有大量残余奥氏体, 因此, 在淬火后齿轮需要进行冷处理, 冷处理温度为 -80 ℃, 时间为 100 min; 最后, 为稳定组织和尺寸并降低齿轮淬火后的脆性, 将齿轮置于炉温为 150 ℃的低温回火炉中保温 180 min。渗碳淬火工艺流程如图 2 所示。

### 1.2 试验齿轮

试验齿轮的材料为 SAE9310 钢, 合金元素成分

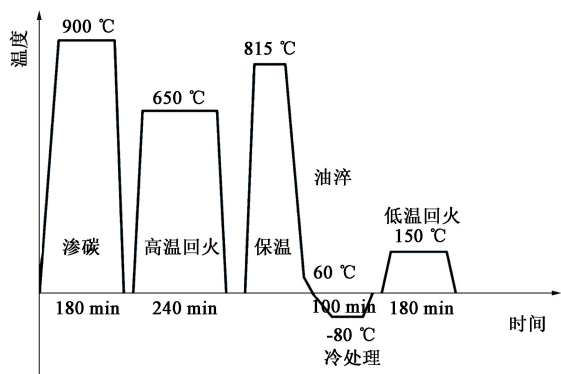


图 2 渗碳淬火工艺流程  
Fig. 2 Flow of carburizing and quenching process

标准值和实测值如表 1 所示，该材料具有强度高、韧性好、淬透性高等优点，还具有一定的淬透性及可焊性，主要应用于中重载荷、中大截面尺寸航空动力传动系统中的齿轮、齿轮轴、旋翼轴等构件<sup>[15]</sup>。试验齿轮采用渗碳淬火热处理工艺，为同一批产品，即材料、加工设备、制造及热处理工艺等均相同，齿轮精度满足 5 级精度要求。齿轮技术参数见表 2，试验齿轮如图 3 所示。

表 1 SAE9310 钢主要合金成分（%，质量分数）  
Table 1 Main alloy compositions of SAE9310 steel  
(%, mass fraction)

元素	C	Ni	Cr	Mo	Mn	Si
标准值	0.07~	3.00~	1.00~	0.08~	0.40~	0.15~
	0.13	3.50	1.40	0.15	0.70	0.35
实测值	0.12	3.28	1.32	0.11	0.55	0.20

表 2 齿轮参数  
Table 2 Gear parameters

参数	数值
齿数	30
模数/mm	5
压力角/(°)	20
齿宽/mm	20
齿顶圆直径/mm	Φ170
精度/级	5
抗拉强度/MPa	1240

1.3 弯曲疲劳试验

本次试验采用 GPS-200 高频疲劳试验机，单齿加载，支撑齿与下支撑头接触，试验齿与上压头接触，试验机所加载荷通过上压头施加至试验轮齿，

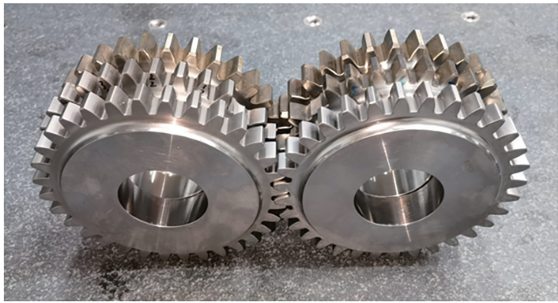


图 3 试验齿轮  
Fig. 3 Test gears

且支撑齿与试验轮齿中间相隔 3 个齿，齿轮装夹如图 4 所示。按照 GB/T 14230—2021<sup>[16]</sup>，使用专用的夹具将试验齿轮固定于试验机，然后施加脉动载荷，直至出现疲劳失效或者疲劳寿命达到越出点（循环次数达到  $3 \times 10^6$ ），本次试验终止，将试验机脉动循环次数作为该试验应力下的寿命数据。试验前将试验齿轮的轮齿编号，按照预定的顺序选取试验齿，保证每个齿轮均包含所有应力级的试验点。

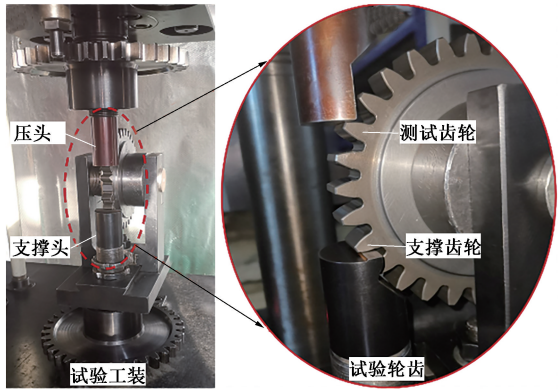


图 4 齿轮弯曲疲劳试验装置  
Fig. 4 Bending fatigue test device for gear

2 SAE9310 钢齿轮弯曲疲劳分析

2.1 硬度梯度与残余应力

渗碳齿轮在表面形成一层较硬的硬化层，而心部具有一定的高韧性，其硬度呈现梯度性分布。如图 5a 所示，根据 GB/T 3480.3—2021<sup>[17]</sup> 方法 B 给定的外齿轮危险截面位置，沿着过齿廓根部过渡曲线与 30°切线相切点的法向，采用显微器对 6 个试验齿轮进行硬度性能测量。由于测量的硬度梯度有微量差距，为方便分析讨论，定义硬度梯度较高的齿轮为 A 组，硬度梯度较低的齿轮为 B 组，硬度测试数据如图 5b 所示。数据显示，A、B 两组齿轮的



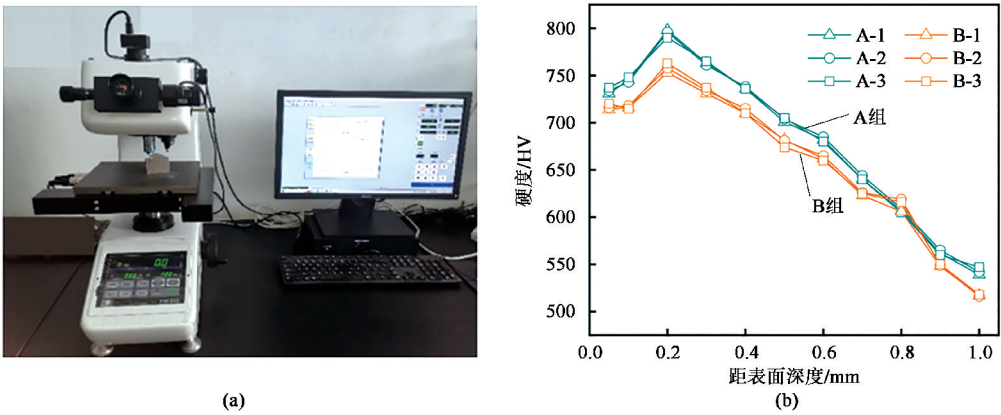


图 5 硬度测试设备 (a) 与硬度梯度分布 (b)  
Fig.5 Hardness testing device (a) and hardness gradient distribution (b)

硬度梯度随深度呈现先增大后减小的分布规律，同位置处 A 组齿轮的硬度梯度略高于 B 组，最大差量值在硬度最大位置处，约为 45 HV，差比约为 6%，而表面差值为 15 HV，差比约为 2%。

采用大功率 X 射线应力分析仪对试验齿轮齿根

的表面残余应力进行测量。沿齿宽方向选取 5 个测量点 (1~5) 进行测试，如图 6 所示。数据显示，A、B 组齿轮齿根处存在残余压应力，且中间部位的残余压应力要高于端部；A 组齿轮的残余压应力要远大于 B 组齿轮，最小差值为 86 MPa，差比为 61%。

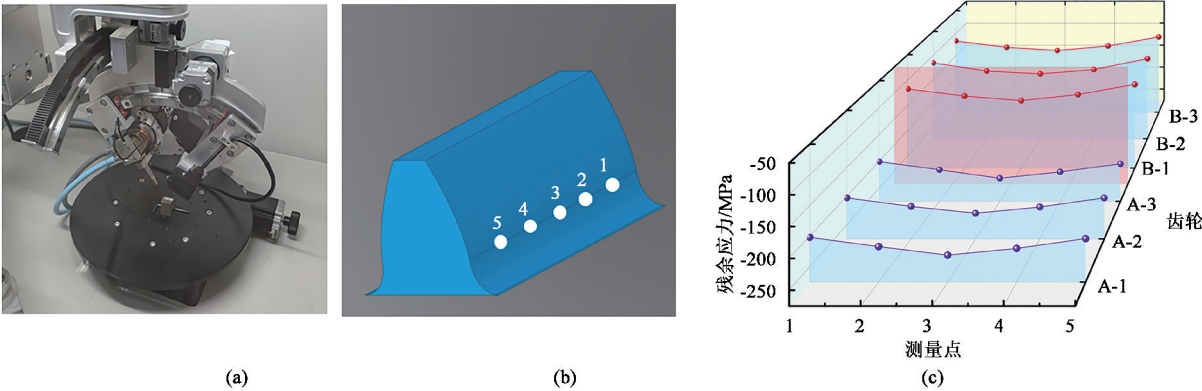


图 6 残余应力测试  
(a) 测试设备 (b) 取样位置 (c) 残余应力分布  
Fig.6 Residual stress testing  
(a) Testing device (b) Sampling position (c) Residual stress distribution

2.2 弯曲疲劳寿命

根据 GB/T 14230—2021<sup>[16]</sup>，载荷作用点 E 的齿根应力  $\sigma'_F$  的计算公式如式 (1) 所示。

$$\sigma'_F = \frac{F_t \cdot Y_{FE} \cdot Y_{SE} \cdot Y_{\beta} \cdot Y_B}{b \cdot m_n \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_X} \quad (1)$$

式中： $F_t$  为名义切向力； $Y_{FE}$  为 E 点的齿形系数； $Y_{SE}$  为 E 点的应力修正系数； $Y_{\beta}$  为螺旋角系数； $Y_B$  为轮缘系数； $b$  为齿宽； $m_n$  为模数； $Y_{ST}$  为与标准试验齿轮尺寸相关的应力修正系数； $Y_{\delta relT}$  为相对齿根圆角敏感系数； $Y_{RrelT}$  为相对齿根表面状况系数； $Y_X$  为弯曲强度尺寸系数。

根据试验，齿根应力  $\sigma'_F$  的系数取值如表 3 所示。

表 3  $\sigma'_F$  系数取值

Table 3 Coefficient values of  $\sigma'_F$

参数	$Y_{FE}$	$Y_{SE}$	$Y_{\beta}$	$Y_B$	$Y_{ST}$	$Y_{\delta relT}$	$Y_{RrelT}$	$Y_X$
数值	2.36	1.77	1.0	1.0	2.0	1.0	0.99	1

由于弯曲疲劳试验机的自身限制，设定应力的循环特性系数  $r=0.05$ 。实际循环特性系数  $r'=0.05$  对应的实际齿根应力  $\sigma'_F$  与理论循环特性系数  $r=0$  对应的理论循环齿根应力  $\sigma_F$  之间的换算公式如式 (2) 所示。

$$\sigma_F = \frac{(1 - r) \cdot \sigma'_F}{1 - r \cdot \sigma'_F / (R_m + 350)} \quad (2)$$



式中： $R_m$  为齿轮材料的抗拉强度。

针对 SAE9310 钢齿轮，开展弯曲疲劳试验试验，并选取 5 个应力级（740、760、779、818 和 857 MPa），且每个弯曲应力级至少包含 5 个有效数据点。去除试验数据中的越出点和异常点，试验齿轮不同应力级下的疲劳寿命如表 4 所示，其中， $F_{bt}$  为试验机压头作用在齿面的载荷。

表 4 不同应力级下轮齿弯曲疲劳寿命

Table 4 Bending fatigue life of gear under different stress levels

$F_{bt}/kN$	应力/MPa	弯曲疲劳寿命/次									
		A 组					B 组				
40	740	93700	97685	109472	113872	124420	27635	28584	31872	34297	35274
41	760	71349	74964	75648	76542	78137	25159	26764	27636	28373	31158
42	779	50836	52867	53426	55784	57436	20876	22763	24643	25116	26629
44	818	38768	41917	42658	43176	45609	14516	15002	15532	15743	16007
46	857	26553	28179	30198	32767	33917	13116	13363	13512	13614	13637

各应力级下的疲劳寿命点分布如图 7 所示。由图 7 可以清晰看出，定应力下，A 组齿轮的弯曲疲劳寿命均比 B 组齿轮的弯曲疲劳寿命高，并且各应力级下 2 组弯曲疲劳寿命的差异量比较接近。

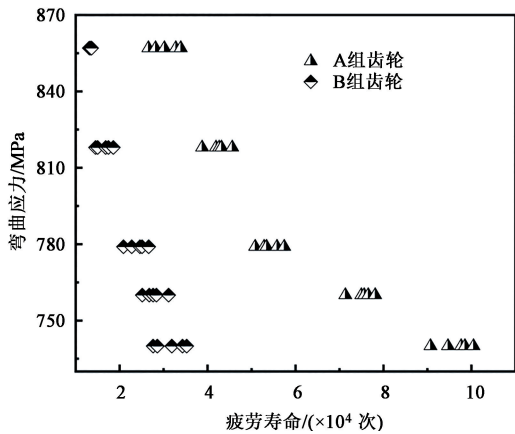


图 7 齿轮疲劳寿命分布

Fig. 7 Fatigue life distribution of gear

由于在定应力级下，齿轮的弯曲疲劳寿命的分布符合对数正态分布（图 7），分布函数如式（3）和式（4）所示。根据数理统计中假设检验的原理，对当前应力级别下的齿轮弯曲疲劳寿命进行拟合检验，计算出回归系数  $a$ 、 $b$ ，计算式如式（5）所示。再按照最小二乘法原则对拟合结果进行回归分析，比较其相关系数  $R$ ，相关系数公式如式（6）所示。 $R$  绝对值越大，则代表其拟合精度越高，实际寿命分布越接近理论分布。

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^4}\right] \quad (x > 0) \quad (3)$$

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^4}\right]dx \quad (x > 0) \quad (4)$$

式中： $f(x)$  为对数正态分布的概率密度函数； $F(x)$  为对数正态分布函数； $x$  为自变量，即疲劳寿命值； $y$  为对数函数值，即寿命值的对数； $\mu_y$ 、 $\sigma_y$  分别为  $y=\ln x$  的期望平均值和标准差。

$$\begin{cases} a = \bar{y} - b\bar{x} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - n\bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \end{cases} \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中： $x_i$  为第  $i$  个自变量； $y_i$  为第  $i$  个对数函数值； $\bar{x}$  为自变量的平均值； $\bar{y}$  为对数函数值的平均值； $n$  为疲劳寿命； $a$  为拟合曲线的斜率； $b$  为拟合曲线的截距。

由统计分析可知，定应力下的齿轮弯曲疲劳寿命具有一定的分布规律，疲劳寿命不是一个常值，而是按照一定概率分布的随机值。可靠度-弯曲应力-疲劳寿命（ $R$ - $S$ - $N$ ）曲线描述了应力水平与疲劳寿命之间的概率关系。本试验的  $R$ - $S$ - $N$  曲线如图 8 所示。

如图 8 所示，在可靠度为 50% 条件下，当弯曲

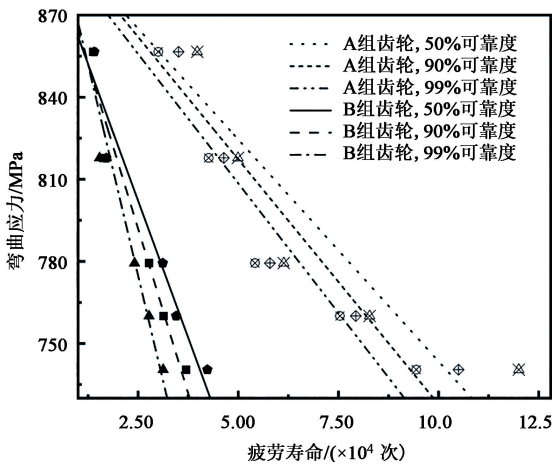


图 8 不同可靠度下的 R-S-N 曲线

Fig. 8 R-S-N curves under different reliability levels

应力为 740 MPa 时, A 组齿轮寿命比 B 组齿轮寿命提高 202%; 当弯曲应力为 760 MPa 时, A 组齿轮寿命比 B 组齿轮寿命提高 172%; 当弯曲应力为 779 MPa 时, A 组齿轮寿命比 B 组齿轮寿命提高 125%; 当弯曲应力为 818 MPa 时, A 组齿轮寿命比

B 组齿轮寿命提高 177%; 当弯曲应力为 857 MPa 时, A 组齿轮寿命比 B 组齿轮寿命提高 122%; 在可靠度 90% 条件下, A 组齿轮寿命比 B 组齿轮寿命提高 109%; 在可靠度 99% 条件下, A 组齿轮寿命比 B 组齿轮寿命提高 97%。对比数据表明, A 组齿轮寿命均比 B 组齿轮寿命长。

2.3 疲劳裂纹

齿根处承受的拉应力是轮齿发生裂纹、产生弯曲疲劳断裂的主要原因<sup>[18]</sup>, 而齿面残余应力、齿根处硬度梯度变化则会影响裂纹的扩展轨迹。如图 9 所示, 齿轮 A-1 和齿轮 B-1 的渗碳层深度比较接近, 分别为 0.837 和 0.903 mm。选取距离表面等长裂纹进行对比分析, 齿轮 B-1 (图 9c) 的裂纹路径平滑, 而齿轮 A-1 (图 9d) 的裂纹路径在距离表面 100 μm 附近有轻微曲折现象, 此现象可能与硬度梯度分布有关, 齿轮 A-1 在距离表面 0~0.2 mm 范围内的硬度增长速率较齿轮 B-1 快, 易导致硬度峰值前端硬度硬质点分布, 造成裂纹路径波动。

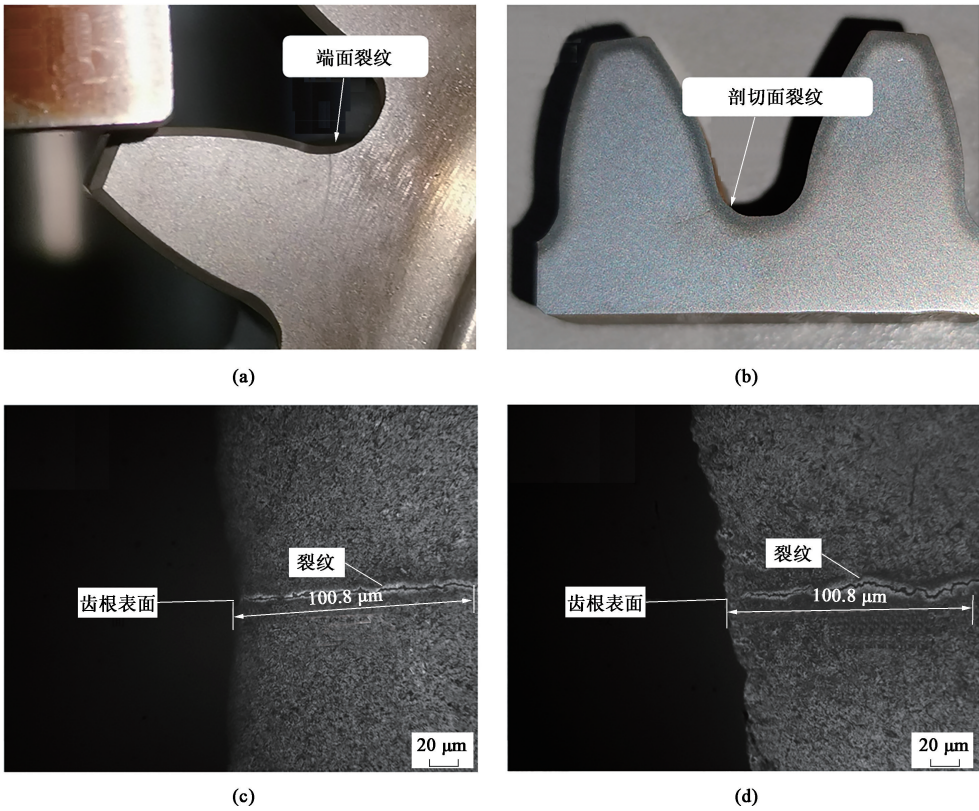


图 9 弯曲疲劳裂纹示意图

(a) 端面裂纹 (b) 剖切面裂纹 (c) 齿轮 B-1 裂纹路径 (d) 齿轮 A-1 裂纹路径

Fig. 9 Schematic diagrams of bending fatigue crack

(a) Crack at end face (b) Cracks at cross section (c) Crack path of B-1 gear (d) Crack path of A-1 gear

### 3 考虑残余应力的寿命预测

在预测齿轮弯曲疲劳寿命时,存在多种标准和方法,每种方法均有其特定的适用条件和优缺点。考虑到残余应力对齿轮疲劳性能的影响以及平均应力在疲劳寿命预测中的关键作用,选择适当的预测准则显得尤为重要。

最大主应变准则是一种基于材料在疲劳过程中的最大主应变变化来预测疲劳寿命的方法。然而,该准则通常忽略了平均应力的影响,在许多实际应用中可能导致预测结果的不准确。因此,本文采用考虑莫尔平均应力修正的最大主应变准则,该准则通过引入莫尔平均应力的修正项,可更准确地反映齿轮在实际工作过程中的应力状态,提高疲劳寿命预测的准确性。

考虑到 BASQUIN 高周疲劳<sup>[19]</sup>和 Coffin-Manson 低周疲劳<sup>[20]</sup>阶段,最大主应变准则的公式<sup>[21]</sup>表示为:

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E'} (2N_f)^z + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (7)$$

式中:  $\Delta \varepsilon_1$  为单次荷载循环中的最大主应变;  $\sigma_m$  为平均应力;  $\sigma'_f$  为疲劳强度系数;  $E'$  为弹性模量;  $z$  为强度指数;  $\varepsilon'_f$  为疲劳延性系数;  $c$  为延性指数;  $N_f$  为疲劳寿命。

残余应力作为齿轮加工、热处理和强化过程中引入的一个力学参数,其对齿轮弯曲疲劳性能的影响是不容忽视的<sup>[22-25]</sup>。而关于残余应力在齿轮弯曲疲劳寿命预测中的研究相对较少,这可能是由于残余应力的测量和表征难度较大,以及缺乏合适的预测模型和方法。为了克服这些困难,采用先进的残余应力测量技术,如X射线衍射法以准确获取齿轮内部的残余应力分布。同时,结合有限元分析、多尺度模拟等方法,建立考虑残余应力的齿轮弯曲疲劳寿命预测模型,以更准确地预测齿轮的疲劳寿命。为此,将残余应力修正项引入上述准则(式(7)),形成考虑残余应力影响的寿命预测方法,计算公式如式(8)所示。

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m - m_r \sigma_r}{E'} (2N_f)^z + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (8)$$

式中:  $\sigma_r$  为残余应力;  $m_r$  为残余应力的影响系数。

根据寿命预测式(8),分别对A组齿轮和B组齿轮在各应力级下的疲劳寿命进行预测。各载荷级下预测寿命与试验寿命分布如图10所示。而预测寿

命与不同可靠度下的拟合寿命分布如图11所示。数据表明,采用考虑残余应力的疲劳寿命预测方法得到的数据与试验寿命和拟合寿命比较接近,进而说明残余应力是引起试验齿轮疲劳寿命离散化的主要因素。

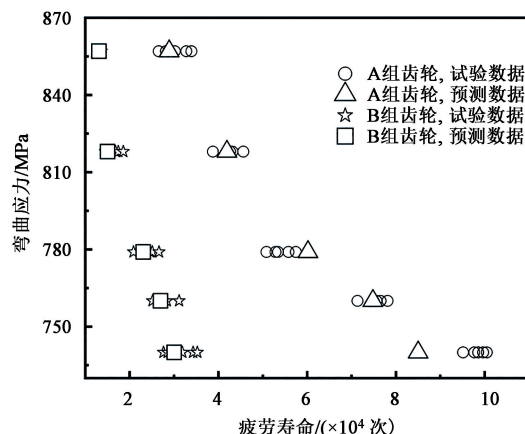


图10 预测寿命与试验寿命对比

Fig. 10 Comparison between predicted life and test life

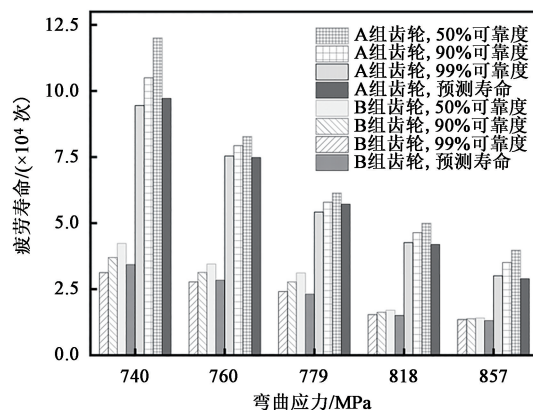


图11 预测寿命与拟合寿命对比

Fig. 11 Comparison between predicted life and fitted life

## 4 结论

(1) SAE9310 钢航空齿轮弯曲疲劳试验结果表明渗碳热处理后硬度梯度峰值较大的A组齿轮的寿命比B组齿轮更长。

(2) 观察距表面0.1 mm深度的扩展裂纹可知,A组齿轮的裂纹扩展呈现波动性,而B组齿轮的裂纹扩展相对平滑;齿轮硬度梯度测量结果表明,在距表面0.2 mm深度范围内,A组齿轮的硬度比B组齿轮的至少增大6%;表面残余应力测量结果表明,A组齿轮的残余压应力比B组齿轮的至少增大61%。



(3) 考虑齿面残余应力的疲劳寿命预测模型的预测结果与试验寿命一致, 从而验证了齿面残余应力是影响弯曲疲劳寿命的主要因素。

#### 参考文献:

- [1] 樊毅嵩. 齿轮弯曲疲劳强度影响因素分析及试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
Fan Y Q. The Analysis and Experimental Research of Gear Bending Fatigue Strength Influence Factors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [2] 朱孝录. 齿轮内在品质对齿轮强度和寿命的影响 [J]. 机械传动, 2021, 45 (9): 112-118.  
Zhu X L. Influence of internal quality of gear on strength and life of gear [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45 (9): 112-118.
- [3] 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.
- [4] Savaria V, Bridier F, Bocher P. Predicting the effects of material properties gradient and residual stresses on the bending fatigue strength of induction hardened aeronautical gears [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 85: 70-84.
- [5] 李飞, 张华煜, 陈慧琴. Mn18Cr18N 钢室温拉压循环加载力学行为和微观组织演变机理 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 231-237.  
Li F, Zhang H Y, Chen H Q. Mechanical behavior and microstructure evolution mechanism on Mn18Cr18N steel under tension-compression cycle loading at room temperature [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 231-237.
- [6] 万荣春, 付立铭, 王学双, 等. 1000 MPa 级别超高强钢延迟开裂机理的研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 238-242.  
Wang R C, Fu L M, Wang X S, et al. Study on delayed cracking mechanism for ultra-high strength steel of 1000 MPa grade [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 238-242.
- [7] Wang W, Liu H J, Zhu C C, et al. Effect of the residual stress on contact fatigue of a wind turbine carburized gear with multiaxial fatigue criteria [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 151: 263-273.
- [8] He H F, Liu H J, Zhu C C, et al. Study on the gear fatigue behavior considering the effect of residual stress based on the continuous damage approach [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 531-544.
- [9] Li Z C, Freborg A M, Hansen B D, et al. Modeling the effect of carburization and quenching on the development of residual stresses and bending fatigue resistance of steel gears [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2013, 22 (3): 664-672.
- [10] Shaw B. The role of residual stress on the fatigue strength of high performance gearing [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25 (9-11): 1279-1283.
- [11] Shiozawa K, Murai M, Shimatani Y, et al. Transition of fatigue failure mode of Ni-Cr-Mo low-alloy steel in very high cycle regime [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 32: 541-550.
- [12] Sakurada T, Kobayashi M. Effects of shot peening and grinding on gear strength [A]. SAE Conference [C]. Detroit: 1994.
- [13] Ogawa K, Yamada H, Saruki K, et al. Influence of residual stress on fatigue of carburized and shot peened notched specimens [A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Shot Peening [C]. Tokyo: 1990.
- [14] 董明振, 闫永明, 欧阳雪枚, 等. 17Cr2Ni2MoVNb 和 20Cr2Ni4A 齿轮钢的热变形行为 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 230-237.  
Dong M Z, Yan Y M, Ouyang X M, et al. Thermal deformation behavior of 17Cr2Ni2MoVNb and 20Cr2Ni4A gear steels [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 230-237.
- [15] 郑医, 何培刚, 李宁, 等. 航空渗碳齿轮钢的迭代发展 [J]. 航空材料学报, 2023, 43 (1): 60-69.  
Zheng Y, He P G, Li N, et al. Material iterative development of aero carburizing gear steels [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43 (1): 60-69.
- [16] GB/T 14230—2021, 齿轮弯曲疲劳强度试验方法 [S].  
GB/T 14230—2021, Test method of tooth bending strength for gear load capacity [S].
- [17] GB/T 3480.3—2021, 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 [S].  
GB/T 3480.3—2021, Calculation of load capacity of spur and helical gears—Part 3: Calculation of tooth bending strength [S].
- [18] 熊显文, 涂家海, 明兴祖. 齿轮齿根过渡圆角的计算方法及控制的研究 [J]. 机械传动, 2008, 32 (3): 9-14.  
Xiong X W, Tu J H, Ming X Z. Research on calculation method and control of tooth root fillet [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2008, 32 (3): 9-14.
- [19] Tseng S C, Chao C K, Li D X, et al. Experimental and simulation analysis of the evolution of residual stress due to expansion via CMAS infiltration in thermal barrier coatings [J]. Journal of Coatings, 2021, 11 (10): 1148-1161.
- [20] Chen G M. Review on physical metallurgical factors of surface hardening heat treatment for gears [J]. Journal of Heat Treatment of Metals, 2015, 40 (8): 1-12.
- [21] 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): 53-60.  
He H F, Liu H J, Zhu C C, et al. Quantitative effect of residual stress on gear bending fatigue [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (4): 53-60.
- [22] Chen J W, Salvati E, Uzun F, et al. An experimental and numerical analysis of residual stresses in a TIG weldment of a single crystal nickel-base superalloy [J]. Journal of Manufacturing, 2020, 53 (2): 190-200.
- [23] Tobe T, Kato M, Inoue K, et al. Bending strength of carburized SCM420H spur gear teeth [J]. Bulletin of JSME, 1986, 29 (247): 273-280.
- [24] Basquin O. The exponential law of endurance test [J]. American Society for Testing and Material, 1910 (10): 625-630.
- [25] Coffin L. Study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metal [J]. Transactions of the ASME, 1954, 76: 931-950.