

## 离子注入氮工艺对渗碳淬火齿轮弯曲疲劳强度的影响研究

张伟<sup>1</sup> 贾华坡<sup>1</sup> 关荣鑫<sup>2</sup> 王晓鹏<sup>2,3</sup> 马骋天<sup>2</sup> 徐要伟<sup>1</sup>

(1. 郑州科技学院 机械工程学院, 郑州 450064)

(2. 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司 国家齿轮产品质量检验检测中心, 郑州 450001)

(3. 郑州航空工业管理学院 机械工程学院, 郑州 450015)

**摘要:** 为了优化齿轮表面改性工艺,研究了离子注入氮工艺对渗碳淬火齿轮弯曲疲劳强度的影响。以低碳合金钢 18CrNiMo7-6 渗碳淬火齿轮为基体,通过射频等离子体辅助离子注入系统进行氮离子注入处理,系统对比了离子注入齿轮与未注入齿轮的齿根金相组织、硬度梯度、残余应力分布及弯曲疲劳性能。结果表明,离子注入氮工艺使得齿根硬度由 695 HV0.1 提升至 780 HV0.1,增幅 12.2%;硬化层深度由 1.50 mm 减少到 1.41 mm,降低了 6.0%;表面残余应力由 -400 MPa 减小到 -286 MPa,降低了 28.5%。基于弯曲疲劳试验拟合的  $R-S-N$  方程,在 99% 可靠度下,离子注入齿轮的疲劳寿命仅为对照齿轮的 12.3%~19.3%,且失效模式以脆性断裂为主,裂纹扩展速率加快。研究表明,离子注入氮虽可通过表面强化延缓裂纹萌生,但过浅的硬化层与残余应力降低导致裂纹扩展抗力不足,最终削弱齿轮弯曲疲劳寿命。

**关键词:** 离子注入氮; 齿轮弯曲疲劳; 疲劳寿命; 残余应力

**中图分类号:** C55; TH114 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.08.011

## 0 引言

齿轮作为动力传递系统的核心部件,其弯曲疲劳失效直接威胁装备服役可靠性。研究表明,不断的循环应力作用会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,使传动系统立刻失效,此类失效具有突发性和灾难性特征<sup>[1]</sup>,可导致传动系统崩溃甚至产生重大安全事故。为提升齿轮抗弯性能,表面改性技术被广泛采用。渗碳处理虽能形成深层强化层,具有相对较高的硬度,一定程度上抑制微裂纹萌生<sup>[2]</sup>,但高温工艺易引发零件畸变,需后续磨削修正,导致加工成本攀升;气体氮化在 520~580 °C 下虽能减少变形,但处理周期长达 20~50 h,且渗层厚度通常不足 0.5 mm,难以满足高承载需求<sup>[3]</sup>;喷丸强化通过引入表面压应力可延缓裂纹萌生,但其强化效果受弹丸流场均匀性制约,且会劣化表面粗糙度( $R_a$  值增加约 30%)<sup>[4]</sup>,这些技术瓶颈促使研究者不断探索新型表面工程方法。离子注入氮工艺因独特优势受到关注:其采用低能离子束 (<100 keV) 在真空室温下将氮原子注入基体,避免了传统热扩散引起的相变和尺寸变化(变形量 <1  $\mu\text{m}$ )<sup>[5]</sup>,且能精确调控注入深度(0.1~1  $\mu\text{m}$ )和浓度梯度;同时,非平衡注入过程可在表层形成过饱和固溶体,使显微硬度提升 2~3 倍<sup>[6]</sup>。

离子注入是一种环保的表面改性技术<sup>[7-8]</sup>。与其他改性技术相比,离子注入不仅可以弥补微缺陷,而且只需注入少量元素即可获得亚稳相和高过饱和固溶体,而不改变衬底性质和尺寸,已被用于扩展金属材料的表面性质<sup>[9]</sup>。例如,LEVINTANT-ZAYONTS 等<sup>[10]</sup>研究了氮离子注入处理弹簧钢的摩擦学特性。结果表明,氮离子注入提高了硬度,特别是对于在中等接触压力的磨损条件下使用的零件。XIE 等<sup>[11]</sup>探讨了钛离子注入对 M50 钢摩擦学性能的影响。试验结果表明,钛离子注入产生的化合物增加了纳米硬度,降低了注入层的磨损率<sup>[12]</sup>。然而,单离子注入过程的注入层相对较浅,导致强化效果降低<sup>[13]</sup>。氮等非金属元素注入后在位错附近或固溶体形成了固溶强化,促使晶格发生畸变以妨碍位错的运动,同时,离子轰击材料易产生一定的压应力,出现冷作硬化效应<sup>[14]</sup>,使得材料表面的硬度显著提高。COLLINS 等<sup>[15]</sup>对 AISI1443 钢进行了等离子体基高温离子注入的研究;结果表明,氮含量随温度和剂量的提高稳步增加,其扩散深度远超过了理论注入层。然而,现有研究多聚焦于该工艺对接触疲劳和耐磨性的改善<sup>[16]</sup>,对其弯曲疲劳行为的影响机制仍存在认知盲区,特别是近期试验发现其可能引发反常的疲劳强度衰减现象,这凸显了揭示工艺-性能内在关联的紧迫性。

收稿日期: 2025-05-09

基金项目: 河南省重点研发与推广专项项目(252102220076); 河南省高校重点研究项目(23A460024, 23A460004)

作者简介: 张伟,男,1984年生,河南浚县人,硕士,讲师; 主要研究方向为机械传动技术; E-mail: zhangwei5763@163.com。

关荣鑫(通信作者),男,1984年生,河南郑州人,硕士,高级工程师; 主要研究方向为齿轮抗疲劳技术; E-mail: guanrongxin@163.com。

引用格式: 张伟,贾华坡,关荣鑫,等. 离子注入氮工艺对渗碳淬火齿轮弯曲疲劳强度的影响研究[J]. 机械强度, 2025, 47(8): 91-100.

ZHANG Wei, JIA Huapo, GUAN Rongxin, et al. Study on the effect of nitrogen ion implantation process on the bending fatigue strength of carburized and quenched gear[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(8): 91-100.

本研究以18CrNiMo7-6渗碳淬火齿轮为对象,通过对比分析离子注入氮前、后齿根微观组织、硬度梯度、残余应力分布及其对弯曲疲劳寿命的影响,旨在揭示工艺参数与弯曲疲劳性能衰退的内在关联。研究结果可为高可靠性齿轮表面改性工艺的优化设计提供参考,对突破现有技术瓶颈、提升齿轮在风电、航空等领域的抗弯疲劳性能具有重要工程意义。

## 1 试验方案

### 1.1 齿轮材料

试验齿轮基体材料为低碳合金钢18CrNiMo7-6,化学成分见表1,其化学成分设计兼顾高强度与韧性需求。材料中关键合金元素Ni(1.58%)、Cr(1.57%)和Mo(0.30%)通过固溶强化与二次硬化效应显著提升淬透性,实测抗拉强度为1250 MPa。该钢中碳含量控制在0.16%(质量分数),既保证渗碳后的表面硬化潜力,又避免高碳钢的脆性风险。

表1 18CrNiMo7-6钢主要合金成分

Tab. 1 Major alloy composition of 18CrNiMo7-6 steel %

化学元素 Chemical element	C	Ni	Cr	Mo	Mn	Si
标准值 Standard value	0.15~ 0.21	1.40~ 1.70	1.50~ 1.80	0.25~ 0.35	0.50~ 0.90	≤0.40
实测值 Measured value	0.16	1.58	1.57	0.30	0.76	0.31

### 1.2 齿轮热处理工艺

未经离子注入氮工艺的齿轮(对照齿轮)采用渗碳-淬火-回火热处理工艺。渗碳工艺在可控气氛炉中进行气体渗碳,工艺参数为:温度930℃,时间8h,碳势1.2%C,渗层深度1.0~1.3mm<sup>[17]</sup>;淬火工艺:渗碳后直接油淬(淬火介质:ISO VG 32快速淬火油),冷却速率100℃/s,表面硬度达666~746HV0.1;回火工艺:温度180℃,时间2h,消除残余应力,心部硬度保持在373~412HV0.1。

经离子注入氮工艺处理的齿轮(离子注入齿轮)在对照组渗碳淬火的热处理工艺基础上,增加离子注入氮处理。采用射频等离子体辅助离子注入系统,真空度 $<10^{-3}$  Pa;注入能量50 keV,氮离子剂量 $2 \times 10^{17}$  cm<sup>-2</sup>,束流密度15 μA/cm<sup>2</sup>,注入时间2h,靶材温度 $<150$ ℃。形成梯度氮化层(深度≈0.05 mm),表面氮原子占比峰值10%,显微硬度提升至780HV0.1,且无热变形(齿廓误差 $<1$  μm,无需后加工)。

### 1.3 齿轮几何参数

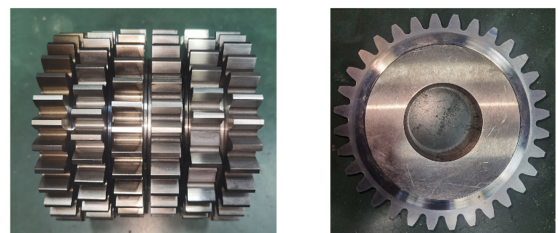
试样为标准直齿渐开线圆柱齿轮,模数为5 mm,

齿数为32,齿宽为20 mm,参数如表2所示,实物如图1所示。

表2 齿轮参数

Tab. 2 Gear parameters

参数Parameter	值Value
齿数Number of teeth $z$	32
模数Module $m$ /mm	5
压力角Pressure angle $\alpha$ (°)	20
螺旋角Helix angle $\beta$ (°)	0
齿宽Tooth width $b$ /mm	20
变位系数Modification coefficient $x$	0
齿顶圆直径Tip diameter $d_a$ /mm	170
精度等级Accuracy class	6级(GB/T 10095.1—2022)



(a) 试验齿轮

(a) Test gears

(b) 单件齿轮

(b) Single gear

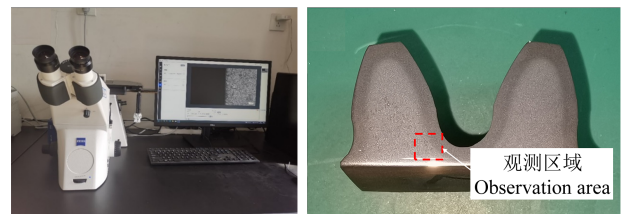
图1 试样

Fig. 1 Test specimen

## 2 齿轮完整性表征

### 2.1 金相组织

金相组织分析主要检测齿根处马氏体等级、残余奥氏体含量、碳化物形貌等级和非金属夹杂等。沿齿轮齿根危险截面线切割取样;首先,依次使用400#~2000#砂纸湿磨;然后,以0.05 μm金刚石悬浮液机械抛光至镜面;最后,采用4%硝酸酒精溶液(体积分数)腐蚀10~15 s,立即用无水乙醇清洗并吹干。采用金相显微镜对磨制轮齿的齿根区域进行观察<sup>[18]</sup>,如图2所示。



(a) 金相显微镜

(a) Metallographic microscope

(b) 磨制轮齿

(b) Ground gear

图2 金相组织分析

Fig. 2 Metallographic structure analysis

由图3、图4所示的齿轮金相组织可知,对照齿轮的显微组织显示粗大板条马氏体,晶界清晰,局部存在少量残余奥氏体;离子注入齿轮的马氏体显著细

化,呈现细小针状或隐晶马氏体结构,晶界模糊,残余奥氏体含量显著减少。这是由于在离子注入过程中,高能氮离子轰击表面,引发晶格畸变和位错增殖,促进马氏体相变的细化;同时,氮原子固溶强化抑制奥氏体稳定性,加速其向马氏体转变。对照齿轮的残余奥氏体等级为 4 级(WQH13)和 2 级(WQH14)。这是由于渗碳淬火后,表层因碳含量高而保留较多残余奥氏体(图 3 中白色区域占比约 15%~20%),如表 3 所示。离子注入齿轮的残余奥氏体等级提升到 1 级(QH03)和 2 级(QH06),如表 4 所示。这是因为离子注入引入的氮原子通过固溶和钉扎作用,抑制奥氏体稳定化,残余奥氏体含量显著降低(图 4 中白色区域占比不足 5%)。两者碳化物形态等级均为 4 级,表明碳化物分布均匀,未因离子注入产生明显粗化或团聚。

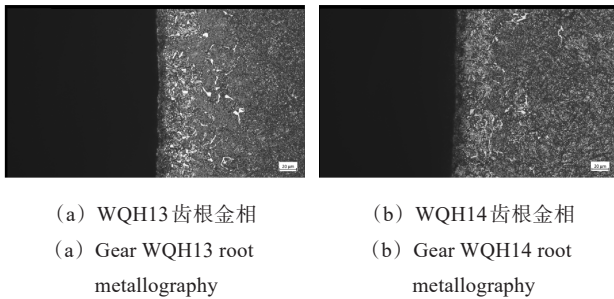


图 3 对照齿轮金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of comparison gear

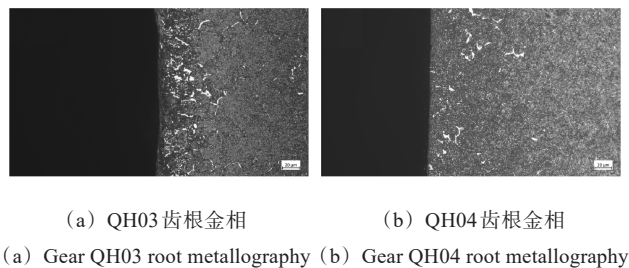


图 4 离子注入齿轮金相组织

Fig. 4 Metallographic structure of ion-implanted gear

表 3 对照齿轮金相组织等级

Tab. 3 Metallographic structure grades of comparison gear

检测项目 Test items	技术要求(级别) Technical requirements (grades)	对照齿轮 Comparison gear	
		WQH13	WQH14
马氏体 Martensite	1~4	3	2
残留奥氏体 Retained austenite	1~4	4	2
碳化物 Carbide	1~4	4	4

## 2.2 硬度梯度

选定齿根危险截面处(齿廓根部过渡曲线与 30°切线的切点)为测量起点。沿法线方向(垂直于齿面)从表面向心部测量,测量间距 0.1 mm。总测量深度

2.0 mm,覆盖渗层与基体过渡区<sup>[19]</sup>。使用 FM-700 型显微硬度计,载荷为 0.5 N,保载时间为 15 s,如图 5 所示。

表 4 离子注入齿轮金相组织等级

Tab. 4 Metallographic structure grades of ion-implanted gear

检测项目 Test items	技术要求(级别) Technical requirements (grades)	对照齿轮 Comparison gear	
		QH03	QH06
马氏体 Martensite	1~4	2	1
残留奥氏体 Retained austenite	1~4	1	2
碳化物 Carbide	1~4	4	4

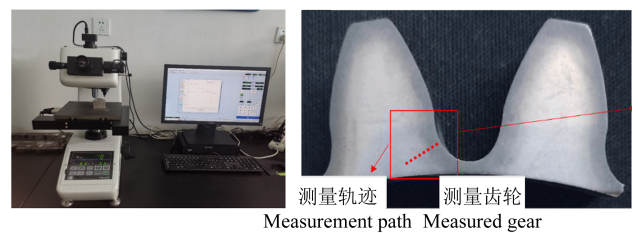


图 5 硬度梯度测量

Fig. 5 Hardness gradient measurement

图 6 所示为对照齿轮 WQH13 和 WQH14 与离子注入齿轮 QH03 和 QH04 齿根硬度梯度分布曲线。对照齿轮表面硬度为 695 HV0.1,硬化层深度为 1.50 mm,硬度分布特征表现为从表面至心部呈现平缓下降趋势,渗碳层与基体过渡区硬度梯度较小。

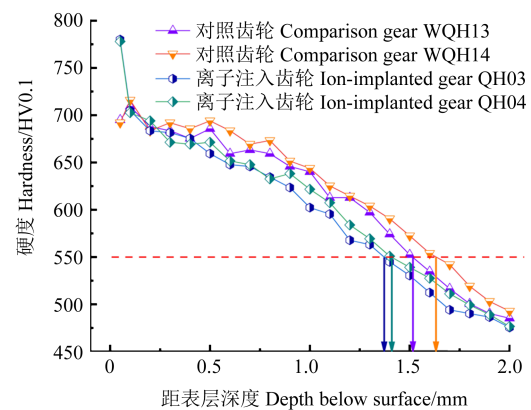


图 6 硬度梯度曲线

Fig. 6 Hardness gradient curves

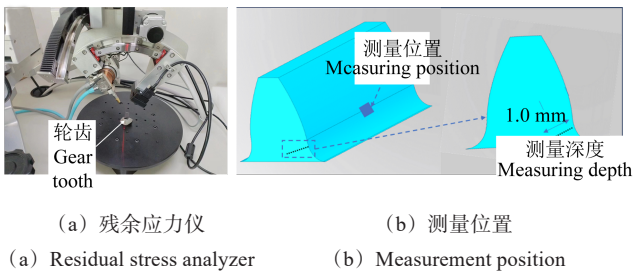
离子注入齿轮的表面硬度为 780 HV0.1,较对照齿轮提升了 12.2%,这是由于在离子注入过程中,高能氮离子轰击齿轮表面,引发晶格畸变与位错增殖,形成高密度缺陷结构;同时,氮原子固溶于马氏体晶格中,产生强烈的固溶强化效应。这两种机制共同导致表面显微硬度显著提高。

离子注入齿轮的硬化层深度为1.41 mm,较对照齿轮减少6.0%,离子注入的氮原子扩散深度受限于工艺参数,仅能形成约0.05 mm的梯度氮化层。尽管渗碳层总深度仍保留1.41 mm,但表层高硬度区域的实际有效深度较浅,导致整体硬化层深度略有减少。

离子注入齿轮表面0~0.05 mm内硬度急剧升高,随后快速下降至与对照齿轮相近的基体硬度水平。硬度曲线在0.05 mm处出现拐点,表层氮化区与下层渗碳层之间因氮浓度梯度的急剧变化,硬度分布呈现“陡升-缓降”特征。

### 2.3 残余应力

残余应力对齿轮的弯曲疲劳强度有着非常重要的影响<sup>[20]</sup>。现采用Proto LXR D X射线应力仪(Cr-K $\alpha$ 辐射,波长 $\lambda=0.229$  nm),基于 $\sin^2\psi$ 法计算残余应力。在齿根圆弧处,与硬度测量同点位,沿齿厚方向对称选取左、右齿面各3个测点。通过电化学腐蚀逐层剥离,单层腐蚀深度0.1 mm,共测量10层,总深度1.0 mm,如图7所示。



(a) 残余应力仪 (b) 测量位置  
(a) Residual stress analyzer (b) Measurement position

图7 离子注入氮齿轮齿根处残余应力测量

Fig. 7 Residual stress measurement at tooth root of nitrogen ion-implanted gear

图8所示为对照齿轮WQH13和WQH14与离子注入齿轮QH03和QH04齿根残余应力梯度分布趋势。对照齿轮的表面残余压应力为-400 MPa,其应力分布特征为从表面至深度0.3 mm处维持较高压应力,随后逐渐衰减至心部接近-50 MPa。

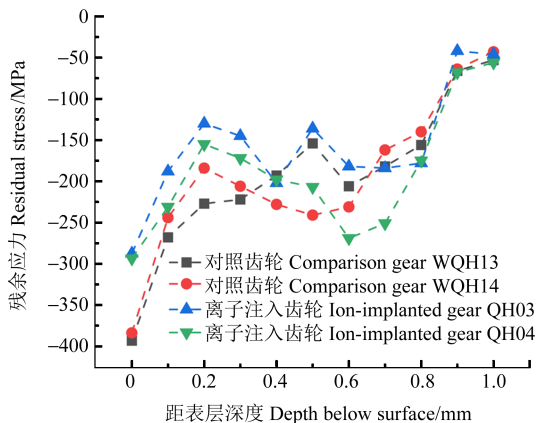


图8 残余应力梯度曲线

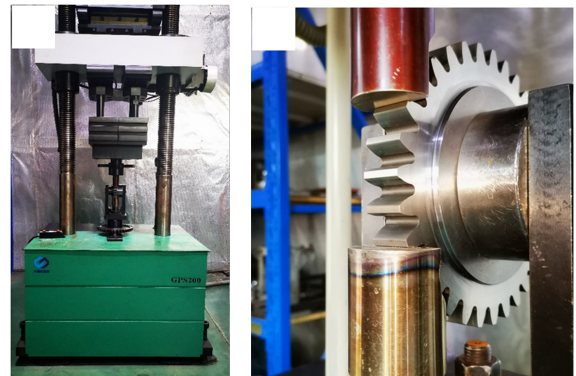
Fig. 8 Residual stress gradient curves

离子注入齿轮表面残余压应力为-286 MPa,较对照齿轮降低28.5%,这是氮原子固溶导致表层晶格膨胀,部分抵消了渗碳淬火形成的压应力。此外,离子注入过程中的高能轰击引发位错运动与重组,也局部释放了原有渗碳层内的残余应力;其应力分布特征表现为表面压应力显著降低,且在0~0.1 mm深度内压应力衰减速率加快,0.1 mm后与对照齿轮趋于一致。

## 3 疲劳试验

### 3.1 试验台

试验采用GPS-200型高频疲劳试验机,依据国家标准GB/T 14230—2021<sup>[21]</sup>开展单齿加载试验。采用设计夹具固定试验齿轮,上压头与待测轮齿(加载齿)接触,下压头与支撑轮齿接触,两压头间距固定,加载齿与支撑齿间隔3个齿位,确保载荷集中于单齿齿根危险截面,加载结构如图9所示。施加脉动载荷,应力比 $R=0.05$ ,试验频率为113 Hz,精度 $\pm 1\%$ 。



(a) 高频疲劳试验机 (b) 设计夹具  
(a) High-frequency fatigue testing machine (b) Designed fixture

图9 试验机与设计夹具

Fig. 9 Testing machine and designed fixture

### 3.2 试验方法

采用常规成组法,分别对离子注入齿轮和对照齿轮开展弯曲疲劳试验,获取两种齿轮的弯曲 $R-S-N$ 曲线。通过升降法预试验确定5个应力级(715.3、734.6、763.5、811.9、909.1 MPa),覆盖疲劳极限至过载区间。每个应力级至少测试5组有效样本,总样本数不少于28个。当循环次数达 $3 \times 10^6$ 时,轮齿未失效计为越出点,试验停止;齿根出现可见裂纹或完全断裂,判定为失效,试验停止。

### 3.3 应力计算

根据国家标准GB/T 3480.3—2021<sup>[22]</sup>,载荷作用点 $E$ 的齿根应力 $\sigma'_F$ 的计算式为

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

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;  $Y_{RelT}$  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, 齿根弯曲应力  $\sigma'_f$  的系数取值如表 5 所示。

表 5 齿轮弯曲应力系数取值  
Tab. 5 Bending stress coefficient values of gear

参数 Parameter	$Y_{FE}$	$Y_{SE}$	$Y_{\beta}$	$Y_B$	$Y_{ST}$	$Y_{\delta_{relT}}$	$Y_{RelT}$	$Y_X$
值 Value	3.109	1.570	1.0	1.0	2.0	0.998	0.988	1

基于对应转换机制, 理论循环特性系数  $r = 0$  对应的循环齿根应力  $\sigma_f$  可用实际循环特性系数  $r = 0.05$  对应的实际齿根应力  $\sigma'_f$  进行换算得出, 见式(2)。

$$\sigma_f = \frac{(1 - r)\sigma'_f}{1 - r\sigma'_f/(\sigma_b + 350)} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_b$  为齿轮材料的抗拉强度。施加载荷与齿根弯

曲疲劳应力的对应关系如表 6 所示。

表 6 齿根弯曲疲劳应力  
Tab. 6 Root bending fatigue stress

施加载荷 Applied load/kN	$\sigma'_f$ /MPa	$\sigma_f$ /MPa
38.0	735.9	715.3
39.0	755.3	734.6
40.5	784.3	763.5
43.0	832.7	811.9
48.0	929.6	909.1

## 4 结果与讨论

### 4.1 试验结果

针对对照齿轮(WQH)和离子注入齿轮(QH), 开展弯曲疲劳试验, 试验齿轮在不同应力级下的疲劳寿命和损伤情况如表 7 所示。

表 7 试验齿轮弯曲疲劳数据  
Tab. 7 Test gear bending fatigue datas

序号 No.	齿轮编号 Gear number	弯曲应力 Bending stress/MPa	疲劳寿命 Fatigue life	损伤情况 Damage condition
1	WQH-15	715.3	1 109 894	裂纹 Crack
2	WQH-15	715.3	106 435	裂纹 Crack
3	WQH-15	734.6	68 121	裂纹 Crack
4	WQH-15	763.5	53 090	裂纹 Crack
5	WQH-15	811.9	45 757	裂纹 Crack
6	WQH-15	909.1	16 621	断齿 Fracture
7	WQH-15	909.1	17 301	断齿 Fracture
8	WQH-12	715.3	347 531	裂纹 Crack
9	WQH-12	734.6	77 221	裂纹 Crack
10	WQH-12	734.6	85 462	裂纹 Crack
11	WQH-12	763.5	44 678	裂纹 Crack
12	WQH-12	763.5	75 364	裂纹 Crack
13	WQH-12	811.9	21 101	裂纹 Crack
14	WQH-12	811.9	30 113	断齿 Fracture
15	WQH-12	909.1	17 276	断齿 Fracture
16	WQH-13	909.1	12 239	断齿 Fracture
17	WQH-13	811.9	29 152	断齿 Fracture
18	WQH-13	763.5	103 881	裂纹 Crack
19	WQH-13	734.6	133 954	裂纹 Crack
20	WQH-13	909.1	4 4307	裂纹 Crack
21	WQH-13	811.9	35 085	断齿 Fracture
22	WQH-13	763.5	38 281	断齿 Fracture
23	WQH-13	734.6	76 199	断齿 Fracture
24	WQH-14	909.1	18 215	断齿 Fracture
25	WQH-14	715.3	107 883	断齿 Fracture
26	WQH-14	715.3	73 303	断齿 Fracture
27	WQH-11	715.3	3 000 000	越出 Exceed
28	WQH-14	715.3	3 000 000	越出 Exceed

续表 Continued table

序号 No.	齿轮编号 Gear number	弯曲应力 Bending stress/MPa	疲劳寿命 Fatigue life	损伤情况 Damage condition
29	WQH-14	715.3	3 000 000	越出 Exceed
30	QH-03	909.1	29 435	断齿 Fracture
31	QH-03	811.9	11 078	裂纹 Crack
32	QH-03	763.5	32 791	裂纹 Crack
33	QH-03	734.6	69 233	裂纹 Crack
34	QH-03	909.1	19 840	裂纹 Crack
35	QH-03	811.9	29 196	断齿 Fracture
36	QH-03	763.5	85 271	断齿 Fracture
37	QH-03	734.6	87 689	断齿 Fracture
38	QH-09	715.3	124 138	断齿 Fracture
39	QH-09	909.1	5 334	断齿 Fracture
40	QH-09	811.9	19 612	断齿 Fracture
41	QH-09	763.5	16 994	断齿 Fracture
42	QH-09	734.6	49 544	断齿 Fracture
43	QH-09	909.1	13 732	断齿 Fracture
44	QH-09	811.9	18 321	断齿 Fracture
45	QH-09	763.5	34 022	断齿 Fracture
46	QH-07	909.1	6 881	断齿 Fracture
47	QH-07	811.9	8 629	断齿 Fracture
48	QH-07	763.5	9 726	断齿 Fracture
49	QH-07	734.6	32 859	断齿 Fracture
50	QH-07	734.6	45 353	断齿 Fracture
51	QH-07	715.3	59 702	断齿 Fracture
52	QH-07	763.5	19 949	断齿 Fracture
53	QH-07	909.1	5 538	断齿 Fracture
54	QH-10	909.1	11 774	断齿 Fracture
55	QH-10	811.9	13 252	断齿 Fracture
56	QH-10	763.5	22 377	断齿 Fracture
57	QH-10	734.6	42 257	断齿 Fracture
58	QH-10	715.3	54 807	断齿 Fracture
59	QH-10	715.3	108 977	断齿 Fracture
60	QH-10	715.3	194 415	断齿 Fracture

对照齿轮开展 29 组试验,其中 14 组轮齿因裂纹而失效,12 组轮齿因断裂而失效,占比 41.4%;离子注入齿轮开展 31 组试验,其中 4 组轮齿因裂纹而失效,27 组轮齿因断裂而失效,占比 87.1%,齿轮损伤如图 10 所示。结果表明,离子注入齿轮的韧性要低于对照齿轮的。

#### 4.2 疲劳寿命分析

参照国家标准 GB/T 14230—2021,根据式(3),计算失效概率序列  $F_i$ 。采用正态分布、对数正态分布和两参数威布尔分布对齿轮弯曲疲劳试验数据进行分布检验,按照式(4)~式(6)对应计算分布概率值的纵

坐标序列。

$$P(N_{L,i}) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3)$$

$$\Phi^{-1}[P(N_L)] = \frac{1}{\sigma_N} (N_L - \mu_N) \quad (4)$$

$$\Phi^{-1}[P(N_L)] = \frac{1}{\sigma_{\ln N}} (\ln N_L - \mu_{\ln N}) \quad (5)$$

$$\ln \ln \frac{1}{1 - P(N_L)} = \beta (\ln N_L - \ln \eta) \quad (6)$$

采用最小二乘法对相关试验点按线性模型  $Y=A+BX$  进行常数项  $A$ 、 $B$  和线性相关系数  $r_c$  值的计算,结果如表 8、表 9 所示。

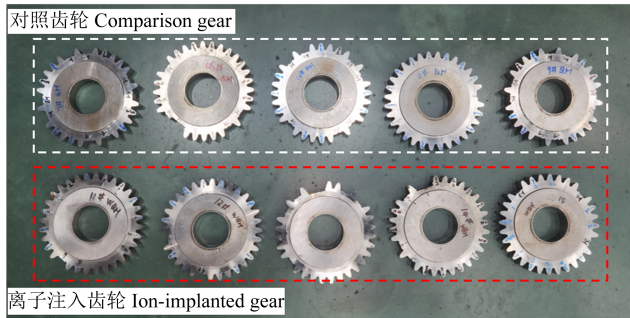


图 10 试验齿轮损伤

Fig. 10 Damage of test gears

由表 8、表 9 可知,正态分布、对数正态分布和两参数威布尔分布的线性相关系数最小值大于线性相关系数临界值 0.878(置信度 95%),并且对数正态分布函数的相关系数绝对值总体优于其他 2 种分布函数的相关系数绝对值。因此,对数正态分布函数是试验数据的最优寿命分布函数,并采用该函数进行 R-S-N 拟合。

在求得定应力水平下寿命分布的基础上,计算对应可靠度下的疲劳寿命。可靠度序列选取为 0.50,

0.90, 0.95, 0.99。将各应力级相同可靠度的疲劳寿命,用最小二乘法进行曲线拟合,得到 R-S-N 曲线簇。根据国家标准 GB/T 14230—2021 所给不同可靠度 R 下的可靠寿命  $N_{L,R}$  计算式,对数正态分布的计算式为

$$N_{L,R} = \exp [\mu_{\ln N} + \sigma_{\ln N} \Phi^{-1}(1 - R)] \quad (7)$$

根据式(7)计算得到不同可靠度下的弯曲疲劳循环次数,如表 10、表 11 所示。

对不同可靠度下的疲劳寿命进行分布类型检验研究发现,定应力级下的疲劳寿命亦可较好地被对数正态分布描述。齿轮弯曲疲劳曲线倾斜段方程为

$$m \lg \sigma_F + \lg N_{L,R} = \lg C \quad (8)$$

令  $Y = \lg \sigma_F$ ,  $X = \lg N_{L,R}$ ,  $b = -\frac{1}{m}$ ,  $a = -\frac{\lg C}{m}$ , 则

式(8)在双对数坐标系下视为线性模数  $Y=a+bX$ 。采用最小二乘法将可靠度相同的各应力级上的试验点进行直线拟合,得出在不同可靠度下的 R-S-N 曲线方程,并验证相关系数。对照齿轮数据拟合如表 12 所示,离子注入齿轮数据拟合如表 13 所示。

表 8 拟合公式的常数项和线性相关系数表(对照齿轮)

Tab. 8 Constant term and linear correlation table of the fitting formula (comparison gear)

系数 Coefficient	应力级 Stress level					
	I	II	III	IV	V	
正态分布 Normal distribution	B	$7.9813 \times 10^{-6}$	$3.7705 \times 10^{-5}$	$6.7305 \times 10^{-5}$	$9.4807 \times 10^{-5}$	$4.1263 \times 10^{-4}$
	A	-4.0117	-4.2302	-4.2845	-4.0807	-7.2774
	$r_c$	0.9857	0.9826	0.9938	0.9906	0.9811
对数正态分布 Lognormal distribution	B	4.1153	4.3313	4.2293	3.9942	7.4587
	A	-53.9514	-50.2949	-46.7124	-42.5454	-72.8898
	$r_c$	0.9948	0.9904	0.9939	0.9890	0.9886
两参数威布尔分布 Two-parameter Weibull distribution	B	4.8271	5.0716	5.0370	4.7859	8.7360
	A	-63.7737	-59.3822	-56.1235	-51.4689	-85.8621
	$r_c$	0.9757	0.9697	0.9898	0.9909	0.9682

表 9 拟合公式的常数项和线性相关系数表(离子注入齿轮)

Tab. 9 Constant term and linear correlation table of the fitting formula (ion-implanted gear)

系数 Coefficient	应力级 Stress level					
	I	II	III	IV	V	
正态分布 Normal distribution	B	$2.1423 \times 10^{-5}$	$4.1637 \times 10^{-5}$	$9.1779 \times 10^{-5}$	$1.1467 \times 10^{-4}$	$9.4776 \times 10^{-5}$
	A	-2.2495	-2.2688	-2.0782	-1.9129	-1.2529
	$r_c$	0.9493	0.9551	0.9749	0.9661	0.9402
对数正态分布 Lognormal distribution	B	1.9040	2.4365	1.8364	1.9915	1.3249
	A	-21.8808	-26.4407	-18.2638	-19.2008	-12.3260
	$r_c$	0.9259	0.9805	0.9658	0.9920	0.9743
两参数威布尔分布 Two-parameter Weibull distribution	B	2.3344	2.8548	2.2491	2.3590	1.5489
	A	-27.3275	-31.4805	-22.8685	-23.2445	-14.9183
	$r_c$	0.9442	0.9556	0.9838	0.9773	0.9433

表 10 对数正态分布下对照齿轮不同概率下的疲劳寿命(对照齿轮)  
Tab. 10 Fatigue life under different probabilities under lognormal distribution (comparison gear)

可靠度 Reliability	应力级 Stress level				
	I	II	III	IV	V
0.50	493 786	110 421	62 619	42 267	17 543
0.90	388 279	87 963	49 569	33 042	15 376
0.95	362 702	82 472	46 392	30 814	14 812
0.99	319 179	73 079	40 970	27 033	13 810

表 11 对数正态分布下离子注入齿轮不同概率下的疲劳寿命  
(离子注入齿轮)

Tab. 11 Fatigue life under different probabilities under lognormal distribution (ion-implanted gear)

可靠度 Reliability	应力级 Stress level/MPa				
	I	II	III	IV	V
0.50	97 916	51 630	20 857	15 390	10 976
0.90	59 295	34 090	12 124	9 207	5 037
0.95	51 436	30 306	10 396	7 959	4 039
0.99	39 394	24 303	7 791	6 056	2 670

基于拟合  $R-S-N$  方程,在 50% 可靠度、低应力级 I 下,对照齿轮疲劳寿命为 493 786,而离子注入齿轮疲劳寿命为 97 916,降低了 80.2%;在中应力级 III 下,对照齿轮疲劳寿命为 110 421,离子注入齿轮疲劳寿命为 51 630,降低了 53.2%;在高应力级 V 下,对照齿轮疲劳寿命为 17 543,离子注入齿轮疲劳寿命为 10 976,降低了 37.4%,如图 11 所示。

在 99% 可靠度下、低应力级 I 下,对照齿轮疲劳寿命为 319 179,离子注入齿轮疲劳寿命为 39 394,减少了 87.7%;在中应力级 III 下,对照齿轮疲劳寿命为

40 970,离子注入齿轮疲劳寿命为 7 791,仅占比 81.0%;在高应力级 V 下,对照齿轮疲劳寿命为 13 810,离子注入齿轮疲劳寿命为 2 670,仅占比 80.7%,如图 12 所示。

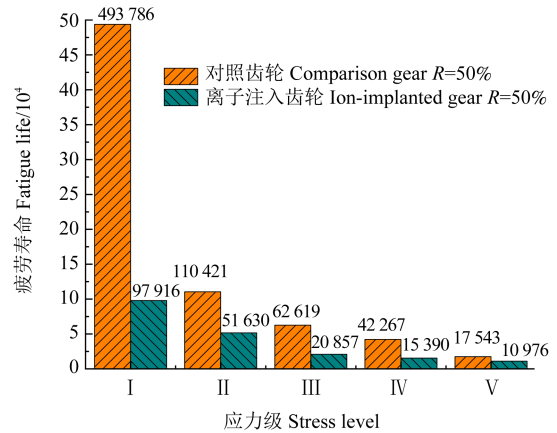


图 11 50% 可靠度下齿轮疲劳极限比较

Fig. 11 Comparison of gear fatigue limits under 50% reliability

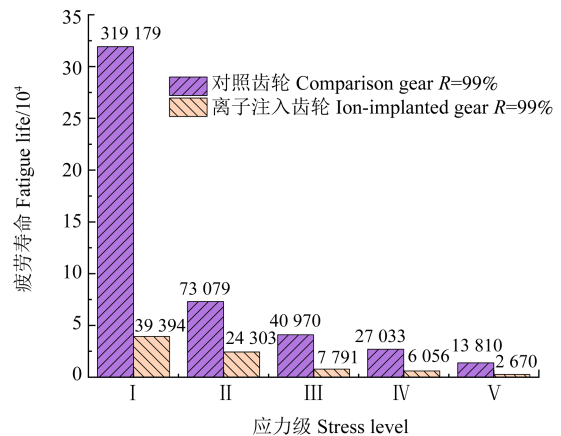


图 12 99% 可靠度下齿轮疲劳极限比较

Fig. 12 Comparison of gear fatigue limits under 99% reliability

表 12 对照齿轮数据拟合

Tab. 12 Fitting of comparison gear data

可靠度 Reliability R	$m \lg \sigma_{Flim} + \lg N = \lg C$		相关系数 Correlation coefficient $r_c$	$\sigma_F^m N = C$	
	系数 Coefficient b	系数 Coefficient a		m	C
0.50	-0.069 4	3.233 1	0.903 8	14.409 2	$3.858 8 \times 10^{46}$
0.90	-0.070 4	3.231 2	0.894 1	14.204 5	$7.901 8 \times 10^{45}$
0.95	-0.070 6	3.230 5	0.891 2	14.164 3	$5.725 2 \times 10^{45}$
0.99	-0.071 0	3.229 1	0.885 3	14.084 5	$3.021 9 \times 10^{45}$

表 13 离子注入齿轮数据拟合

Tab. 13 Fitting ion-implanted gearing data

可靠度 Reliability R	$m \lg \sigma_{Flim} + \lg N = \lg C$		相关系数 Correlation coefficient $r_c$	$\sigma_F^m N = C$	
	系数 Coefficient b	系数 Coefficient a		m	C
0.50	-0.093 9	3.312 1	0.888 9	10.649 6	$1.873 4 \times 10^{35}$
0.90	-0.088 0	3.264 8	0.922 8	11.363 6	$1.258 9 \times 10^{37}$
0.95	-0.086 1	3.251 2	0.929 8	11.614 4	$5.764 3 \times 10^{37}$
0.99	-0.082 6	3.226 1	0.940 5	12.106 5	$1.140 0 \times 10^{39}$

疲劳寿命结果表明,离子注入齿轮在有限寿命区间内,其疲劳寿命远低于对照齿轮的疲劳寿命。

#### 4.3 疲劳寿命讨论

离子注入氮工艺形成的“陡升-缓降”硬度梯度(图 6),导致了应力集中,促进了裂纹扩展。表面至 0.05 mm 处硬度从 780 HV0.1 骤降至 695 HV0.1,形成“硬-软”界面。根据断裂力学理论,该梯度导致应力集中系数( $K_t$ )增加,裂纹尖端驱动力( $\Delta K$ )上升,加速裂纹扩展<sup>[23]</sup>。离子注入氮工艺产生的“低温回火”效应,使得有效渗碳层深度从 1.50 mm 降至 1.41 mm,这种浅层硬化导致裂纹易穿透表面强化区进入基体,从而降低疲劳寿命。

残余压应力可通过闭合裂纹尖端,从而抑制裂纹扩展<sup>[1]53-60[18]153-168</sup>。而离子注入氮工艺使得表面残余压应力从-400 MPa 降至-286 MPa(降幅 28.5%),其减少削弱了裂纹扩展阻力,进一步降低了齿轮疲劳寿命。

## 5 结论

为探究离子注入氮工艺对齿轮弯曲疲劳强度的影响,针对离子注入氮齿轮和常规渗碳淬火齿轮,进行了完整性表征,获得齿根处金相组织、硬度梯度和残余应力分布情况;开展了齿轮弯曲疲劳试验,采用常规成组法,获得不同可靠度下的弯曲疲劳寿命。得到如下主要结论:

1)离子注入氮工艺通过表面强化延缓裂纹萌生,但残余压应力降低与硬化层过浅导致裂纹扩展抗力不足,最终使疲劳寿命降至对照组的 12.3%~19.3%(99%可靠度)。离子注入氮工艺使得齿轮齿根表面硬度提升了 12.2%,由 695 HV0.1 提升至 780 HV0.1;但导致硬化层深度缩减 6.0%,由 1.50 减小至 1.41 mm;表面残余压应力降低 28.5%,由-400~-286 MPa。

2)针对该工艺导致的裂纹扩展抗力不足的问题,可进行离子注入工艺参数优化。采用更高能量(>80 keV)和剂量(>3×10<sup>17</sup> cm<sup>-2</sup>)以增加氮扩散深度;结合深冷处理(-196 °C×2 h)减少残余奥氏体并提升基体韧性。在提升表面硬度的同时,兼顾硬化层深度和残余应力,从而实现裂纹扩展抗力的提升。

3)本研究为高精度齿轮(航空、风电)的复合表面改性工艺设计提供了参考,建议进一步探索“离子注入+喷丸”协同强化方案,以平衡表面硬度与深层抗裂性能。

#### 参考文献(References)

[1] 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.

(In Chinese)

[2] 陈为浩,许自宽,谷雪忠,等. 渗碳处理高强度齿轮钢 BG801 的高温疲劳行为[J]. 金属热处理,2025,50(3):255-263.  
CHEN Weihao, XU Zikuan, GU Xuezhong, et al. High temperature fatigue behavior of carburized high-strength gear steel BG801[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(3): 255-263. (In Chinese)

[3] CONRADO E, GORLA C, DAVOLI P, et al. A comparison of bending fatigue strength of carburized and nitrided gears for industrial applications[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 78: 41-54.

[4] XU C L, WANG X, ZHANG B, et al. Effect of the pre-shot peening and nitrogen ion implantation combined surface treatments on the surface structure and properties of gear steel 16Cr<sub>3</sub>NiWMoVNbE[J]. Metals, 2022, 12(9): 1509.

[5] CAO Z Y, HE W F, LUO S H, et al. Effect of combined laser shock peening and nitrogen implantation on the microstructure and tribology of M50 bearing steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 5080-5095.

[6] RYABCHIKOV A, SIVIN D, ANANIN P, et al. High intensity, low ion energy implantation of nitrogen in AISI 5140 alloy steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 355: 129-135.

[7] LIU W M, MAN Q Y, LI J, et al. Microstructural evolution and vibration fatigue properties of 7075-T651 aluminum alloy treated by nitrogen ion implantation[J]. Vacuum, 2022, 199: 110931.

[8] PANDEY R K, MISHRA P, PANDEY A, et al. Effects of Si ion implantation on the surface and electrical characteristics of epitaxial GaSb[J]. Vacuum, 2022, 198: 110883.

[9] LI X M, CHEN L, HOU J, et al. Improving the sensitivity of LaMnO<sub>3</sub> NTC films by Al ion implantation[J]. Vacuum, 2023, 208: 111704.

[10] LEVINTANT-ZAYONTS N, STARZYŃSKI G, KUCHARSKI S. Effect of N ion implantation on tribological properties of spring steels[J]. Applied Surface Science, 2022, 591: 153117.

[11] XIE X Y, CHEN C, LUO J, et al. The microstructure and tribological properties of M50 steel surface after titanium ion implantation[J]. Applied Surface Science, 2021, 564: 150349.

[12] 黄岳山,蒙继龙,刘正义. 金属钛的离子注入表面改性[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版),1997,18(S1):66-68.  
HUANG Yueshan, MENG Jilong, LIU Zhengyi. Study on surface modification of titanium alloy by ion implantation[J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 1997, 18(S1): 66-68. (In Chinese)

[13] ZHANG J F, PENG S X, ZHANG A L, et al. Nitrogen ion implantation on the mechanical properties of AISI 420 martensitic stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 305: 132-138.

[14] VOORWALD H J C, BONORA R G, OLIVEIRA V M C A, et al. Increasing fatigue resistance of AISI 4340 steel by nitrogen plasma ion-implantation[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 490-499.

[15] COLLINS G A, HUTCHINGS R, TENDYS J. Plasma immersion ion implantation of steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 1991, 139: 171-178.

[16] 贾晨帆,卢泽华,吴吉展,等. 高性能齿轮基础数据研究[J]. 中国

- 科学:技术科学,2024,54(6):1149-1170.
- JIA Chenfan, LU Zehua, WU Jizhan, et al. Study of the fundamental data of high-performance gears [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(6):1149-1170. (In Chinese)
- [17] 陈强,陈林芳,杨明华. 18CrNiMo7-6钢的可控气氛高温渗碳工艺[J]. 金属热处理,2022,47(4):231-239.
- CHEN Qiang, CHEN Linfang, YANG Minghua. High temperature carburizing process of 18CrNiMo7-6 steel in controlled atmosphere [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(4):231-239. (In Chinese)
- [18] 吴吉展,朱才朝,魏沛堂,等. 航空齿轮钢强化工艺与表面完整性关联规律研究[J]. 表面技术,2024,53(1):153-168.
- WU Jizhan, ZHU Caichao, WEI Peitang, et al. Correlation between strengthening process and surface integrity of aviation gear steel [J]. Surface Technology, 2024, 53(1):153-168. (In Chinese)
- [19] 王庆志,陈易明,吴吉展,等. 高性能渗碳齿轮表面完整性特征的试验研究[J]. 表面技术,2025,54(5):233-244.
- WANG Qingzhi, CHEN Yiming, WU Jizhan, et al. Experimental study on surface integrity characteristics of high-performance carburized gears [J]. Surface Technology, 2025, 54(5):233-244. (In Chinese)
- [20] 林锐怡,殷超超,师陆冰,等. 齿轮制造中的残余应力及其对疲劳性能的影响[J]. 机械强度,2024,46(5):1216-1227.
- LIN Ruiyi, YIN Chaochao, SHI Lubing, et al. Residual stress in gear manufacturing and its influence on fatigue properties [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(5):1216-1227. (In Chinese)
- [21] 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,2021:7-13.
- 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, 2021:7-13. (In Chinese)
- [22] 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,2021:11-35.
- 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, 2021:11-35. (In Chinese)
- [23] 吴鲁纪,杨世豪,杨林杰,等. 硬齿面齿轮齿根裂纹扩展特性与剩余寿命研究[J]. 机械传动,2023,47(11):1-8.
- WU Lujì, YANG Shihao, YANG Linjie, et al. Study on the root crack propagation characteristics and residual life of case-hardened gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(11):1-8. (In Chinese)

## Study on the effect of nitrogen ion implantation process on the bending fatigue strength of carburized and quenched gear

ZHANG Wei<sup>1</sup> JIA Huapo<sup>1</sup> GUAN Rongxin<sup>2</sup> WANG Xiaopeng<sup>2,3</sup> MA Chengtian<sup>2</sup> XU Yaowei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

(2. National Gear Product Quality Inspection and Testing Center, China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

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

**Abstract:** Aiming at optimizing the gear surface modification process, the influence of ion nitrogen implantation on the bending fatigue strength of carburized and quenched gears was studied. Using low-carbon alloy steel 18CrNiMo7-6 carburized and quenched gears as the matrix, nitrogen ion implantation treatment was carried out through a radio-frequency plasma-assisted ion implantation system. The root metallography, hardness gradient, residual stress distribution, and bending fatigue properties of ion-implanted gears and unimplanted gears were systematically compared. The results show that the ion nitrogen implantation process increases the root hardness from 695 HV0.1 to 780 HV0.1, an increase of 12.2%; the hardened layer depth decreases from 1.50 mm to 1.41 mm, a reduction of 6.0%; and the surface residual stress decreases from -400 MPa to -286 MPa, a reduction of 28.5%. Based on the R-S-N equation fitted by bending fatigue tests, under 99% reliability, the fatigue life of ion-implanted gears is only 12.3%-19.3% of that of the control gears, with the failure mode dominated by brittle fracture and accelerated crack propagation rate. The study indicates that although ion nitrogen implantation can delay crack initiation through surface strengthening, the excessively shallow hardened layer and reduced residual stress lead to insufficient crack propagation resistance, ultimately weakening the bending fatigue life of gears.

**Key words:** Nitrogen ion implantation; Gear bending fatigue; Fatigue life; Residual stress

Corresponding author: GUAN Rongxin, E-mail: guanrongxin@163.com

Fund: Key R&D and Promotion Projects of Henan Province (252102220076); Key Research Projects of Henan Higher Education Institutions (23A460024, 23A460004)

Received: 2025-05-09