文章编号:1674-2974(2025)04-0195-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025302

不同表面改性对超强耐热航空齿轮钢弯曲疲劳性能影响

朱文林[1,2],唐鑫[1,2],朱如鹏[2],贺自强[3],李发家[4†],陆凤霞[2],杨长树[3]
(1. 中国航发湖南动力机械研究所 直升机动力学全国重点实验室,湖南 株洲 412002;
2. 南京航空航天大学 直升机动力学全国重点实验室,江苏 南京 210016;
3. 中国航发北京材料研究院,北京 100081;
4. 济南大学 机械工程学院,山东 济南,250022)

摘 要:以超强耐热航空齿轮钢12Co14Ni6Cr5Mo4VNb圆柱齿轮为研究对象,采用高频脉冲法开展了不同表面改性齿轮弯曲疲劳性能试验研究,通过试验数据处理及轮齿失效机理分析,揭示了不同表面改性对超强耐热航空齿轮钢齿轮承载性能影响规律.研究结果表明:普通喷丸对超强耐热航空齿轮钢齿轮表面无明显强化效果,超强喷丸能够显著提高超强耐热航空齿轮钢齿轮表面残余压应力,相对于普通喷丸齿轮,超强喷丸齿轮弯曲疲劳极限提高了36.04%;超强耐热航空齿轮钢齿轮对齿面粗糙度敏感性较强,粗糙度R_a≤0.2的齿轮较粗糙度0.3≤R_a≤0.4的齿轮弯曲疲劳极限提高了16.58%;弯曲疲劳试验齿轮渗碳层近表面组织为高碳马氏体和细小弥散的颗粒状碳化物,并随渗层深度增加逐渐向超低碳板条马氏体过渡;试验齿轮失效模式均为轮齿疲劳断裂,断口上可见清晰疲劳条带,超强喷丸齿轮疲劳裂纹全部萌生于齿根圆角亚表面,普通喷丸齿轮疲劳裂纹大部分在齿根圆角表面萌生.

关键词:超强耐热钢;表面改性;残余压应力;弯曲疲劳;失效机理
中图分类号:V252.1 **文献标志码**:A

Influence of Different Surface Modifications on Bending Fatigue Performance of Super Heat-resistant Aviation Gear Steel

ZHU Wenlin[1,2], TANG Xin[1,2], ZHU Rupeng[2], HE Ziqiang[3], LI Fajia[4†], LU Fengxia[2], YANG Changshu[3]
(1. National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics, Aero Engine Corporation of China Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;
2. National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. Aero Engine Corporation of China Beijing Institute of Aeronautical material, Beijing 100081, China;
4. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: Taking the super heat-resistant aviation gear steel 12Co14Ni6Cr5Mo4VNb cylindrical gear as the research object, the high-frequency pulse method was used to conduct bending fatigue performance tests on gears

* **收稿日期**:2024-10-14
基金项目:国家科技重大专项资助项目(J2019-Ⅲ-0023-0067,30104040201),National Science and Technology Major Project(J2019-Ⅲ-0023-0067,30104040201);国家自然科学基金资助项目(52075241),National Natural Science Foundation of China(52075241)
作者简介:朱文林(1986—),男,江西吉安人,中国航发湖南动力机械研究所高级工程师,博士研究生
† 通信联系人,E-mail:me_lifj@ujn.edu.cn

with different surface modifications. Through experimental data analysis and gear tooth failure mechanism analysis, the influence of different surface modification layers on the load-bearing performance of super heat-resistant aviation gear steel gears was revealed. The research results show that ordinary shot peening has no significant strengthening effect on the surface of super heat-resistant aviation gear steel gears. Super shot peening can significantly increase the residual compressive stress on the surface of super heat-resistant aviation gear steel gears. Compared with ordinary shot peening gears, the bending fatigue limit of super shot peening gears is increased by 36.04%; Super heat-resistant aviation gear steel gears are highly sensitive to the tooth surface roughness, gears with roughness $R_a \leqslant 0.2$ showing a 16.58% increase in bending fatigue limit compared with gears with a roughness of $0.3 \leqslant R_a \leqslant 0.4$. In the bending fatigue test, the microstructure of carburized layer near the surface of the gear is high-carbon martensite and finely dispersed granular carbides, and it gradually transits to ultra-low carbon flat noodles martensite with the increase of carburized layer depth. The failure mode of the test gears is fatigue fracture of the gear teeth, with clear fatigue bands visible on the fracture surface. The fatigue cracks of the super shot peening gears all originate from the sub surface of the tooth root fillet, while the fatigue cracks of ordinary shot peening gears mostly originate from the surface of the tooth root fillet.

Key words: super heat-resistant steel; surface modification; residual compressive stress; bending fatigue; failure mechanism

齿轮是减速器的关键部件,决定了减速器的性能和寿命[1].新一代直升机传动系统朝着高功率密度、高承载能力以及长寿命方向发展,这要求齿轮材料具有优越的表层超硬化性能、高韧性和耐热性.目前国内常用航空齿轮材料为低合金Cr-Ni型渗碳钢9310钢和X-53钢[2],但9310齿轮钢和X-53齿轮钢的疲劳强度和耐温性能较低,不能满足新一代直升机传动系统的要求,超强耐热航空齿轮钢12Co14Ni6Cr5Mo4VNb具有表面高硬度、芯部高韧性、承载性能和抗胶合能力强等特点,成为下一代航空齿轮钢的发展热点,目前国内尚未掌握不同表面改性对该材料齿轮弯曲疲劳性能的影响规律,制约了该材料在传动系统齿轮中的应用.

弯曲疲劳失效是齿轮最常见的失效形式之一[3],目前国内外学者开展了不同表面改性对钢弯曲疲劳性能影响的研究.Kenta等[4]开展了渗碳和渗碳+喷丸两种不同表面改性工艺对AISI4120钢弯曲疲劳极限的影响,得出渗碳+喷丸工艺较渗碳工艺表面残余压应力和弯曲疲劳极限明显提高的结论.Ali Terres等[5]研究了渗氮和渗氮+喷丸两种不同使钢表面改性工艺对42CrMo4钢弯曲疲劳性能的影响,得出渗氮+喷丸表面改性工艺较单一的渗氮工艺使钢弯曲疲劳极限提高了近27%.Benedetti等[6]针对表面硬化的16MnCr5钢齿轮开展了弯曲疲劳试验,得出了该工艺下齿轮的弯曲疲劳极限,同时开展了失效分析,揭示了该材料齿轮发生断裂的机理.Ho等[7]研究不同喷丸参数(喷丸直径、覆盖率、喷丸强度等)对18CrNiMo7-6钢表面、亚表层性能及弯曲疲劳性能的影响,得出喷丸工艺改善了钢表面性能,显著提高了18CrNiMo7-6钢的弯曲疲劳寿命.Luo等[8]研究了激光冲击强化、喷丸强化及其复合强化3种不同表面改性方式对Ti-6Al-4V合金弯曲疲劳性能的影响,得出复合强化可以显著提高合金表面残余压应力及疲劳寿命.肖娜[9]对20Cr2Ni4A合金齿轮钢进行了真空渗碳工艺和不同渗碳层深度的疲劳试验,发现真空渗碳后钢疲劳性能提高了38%,且渗碳层深度为0.86 mm时钢疲劳性能最佳.赖大春等[10]研究了渗碳和碳氮共渗2种不同表面改性工艺对CrNiMoV轴承钢弯曲疲劳性能的影响,得出碳氮共渗后CrNiMoV轴承钢弯曲疲劳寿命明显高于单一渗碳工艺.孙杰[11]针对20CrNiMo齿轮钢研究了渗碳、激光冲击和渗碳+激光冲击3种工艺对表层弯曲性能的影响,发现复合表层改性相比单一渗碳使钢弯曲疲劳寿命提高了5.25倍.吴晓斌[12]以表层硬度、残余压应力和冲击凹槽形貌为评价指标研究了不同超声冲击表层改性工艺参数对20CrNiMo齿轮钢的影响,得

出了最佳的工艺参数.王振等[13]采用数值分析与试验相结合的方法研究二次喷丸、喷丸+超声滚压2种表面改性工艺对18CrNiMo7-6渗碳齿轮钢表面完整性及弯曲疲劳性能的影响,得出喷丸+超声滚压工艺能够有效提高钢表面硬度、残余压应力、表面粗糙度以及弯曲疲劳寿命.Zhao等[14-15]研究了超声冲击对渗氮处理300M钢疲劳性能和耐腐蚀性能的影响,得出超声冲击后300M钢疲劳性能及耐腐蚀性能大幅提高.

综上所述,国内外许多学者开展了不同表面改性对钢弯曲疲劳性能影响的试样级试验研究,但齿轮级试验研究还很少,针对超强耐热航空齿轮钢12Co14Ni6Cr5Mo4VNb的齿轮级试验研究尚未见报道.本文针对超强耐热航空齿轮钢12Co14Ni6Cr5Mo4VNb开展不同渗层深度、喷丸方式、表面粗糙度3种表面改性对圆柱齿轮弯曲疲劳性能的影响规律研究,并对其失效原因进行分析,揭示超强耐热航空齿轮钢齿轮的失效机理,为其在航空发动机及直升机传动系统中的应用提供支撑.

1　齿轮弯曲疲劳试验设计

1.1　试验齿轮及试验夹具

根据《齿轮弯曲疲劳强度试验方法》(GB/T 14230—2021),试验齿轮设计参数如表1所示,采用双齿加载的脉动试验方式开展超强耐热航空齿轮钢圆柱齿轮弯曲疲劳试验.

表1　弯曲疲劳试验齿轮参数

Tab.1　Bending fatigue test gear parameters

齿轮参数	数值
齿数	40
齿宽/mm	17
模数/mm	4
齿顶高系数	1.0
顶隙系数	0.25
压力角/(°)	20
精度等级	5

为了评定渗层深度、喷丸方式、表面粗糙度3种不同表面改性对齿轮弯曲疲劳强度的影响,设计了不同表面改性层状态的圆柱齿轮,试验件状态见表2.

采用双齿脉冲试验时,需要设计合适的试验夹具,试验夹具应具有足够的刚度,并能可靠地支承试

表2　弯曲疲劳试验齿轮状态

Tab.2　Bending fatigue test gear state

状态	表面改性方式
1	浅渗层(0.70~0.80 mm)+普通喷丸+粗糙度(R_a≤0.2)
2	深渗层(1.05~1.25 mm)+普通喷丸+粗糙度(R_a≤0.2)
3	深渗层(1.05~1.25 mm)+超强喷丸+粗糙度(R_a≤0.2)
4	深渗层(1.05~1.25 mm)+超强喷丸+粗糙度(0.3≤R_a≤0.4)

验齿轮,施加在轮齿上的载荷作用线与试验齿轮基圆相切,加载头的宽度应大于试验齿轮齿宽,硬度应高于试验齿轮齿面硬度[16].

根据文献[17]给出的跨齿数n和载荷作用点E压力角α_E的计算公式进行夹具设计,跨齿数n和载荷作用点E压力角α_E计算公式如下.

跨齿数n:

$$n \approx \frac{Z}{2\pi}\left[\pi - 2\tan\alpha_a - \frac{1}{Z}(\pi - 4x\tan\alpha) - 2Z\mathrm{inv}\alpha\right] \tag{1}$$

载荷作用点E压力角α_E:

$$\tan\alpha_E = \frac{1}{2}\left[\pi - \frac{1}{Z}(2n\pi - \pi - 4x\tan\alpha - 2Z\mathrm{inv}\alpha)\right] \tag{2}$$

式中:Z为齿数;α_a为齿顶压力角;x为变位系数;α为分度圆压力角;inv(·)为渐开线函数.

根据试验齿轮参数和公式(1)(2)计算得出试验夹具参数如表3.

表3　试验夹具参数表

Tab.3　Fixture parameters for bending fatigue test

参数	数值
跨齿数n	15
E点压力角α_E/(°)	24.079
E点所在圆直径/mm	164.68

1.2　试验方法

采用升降法开展渗层深度、喷丸方式、表面粗糙度3种不同表面改性对超强耐热航空齿轮钢齿轮弯曲疲劳影响试验研究,对比各个状态下齿轮弯曲疲劳极限,并对断口进行分析,揭示不同表面改性对齿轮承载性能影响机制.升降法试验过程中,若齿轮在第i级最大应力S_i下未达到指定循环数时发生破坏(即$N<N_0$),而在第i+1级最大应力S_{i+1}作用下越出(即$N>N_0$),则对应循环基数N_0的疲劳极限必发生在S_i和S_{i+1}之间.为了避免零载荷造成加载压头对齿轮轮齿形成冲击,防止夹具与试件的不稳定,在试验过程中必须保持一定的最小载荷,应力循环特性R=

0.05.采用升降法进行试验时,应力水平升降区间(即增量或减量)为20~25 MPa.

试验前确保齿轮齿根过渡圆弧无加工刀痕或其他形式的损伤,对齿轮的轮齿逐个进行编号,试验所选取的轮齿与承受过载荷的轮齿(包括支撑齿)至少应间隔一个轮齿[18].

1.3 试验应力计算

根据标准[19]规定,弯曲疲劳试验循环基数N_0=1×10^7,试验应力计算如式(3)所示:

$$\sigma'_{\mathrm{F}} = F_{\mathrm{t}}K_{\mathrm{s}}\frac{1}{bm}\frac{K_{\mathrm{H}}K_{\mathrm{B}}}{Y_{\mathrm{J}}Y_{\mathrm{ST}}} \tag{3}$$

式中:F_{t}为单个轮齿试验载荷;Y_{J}为弯曲几何系数;Y_{ST}为齿轮试验的应力修正系数;b为齿宽;m为模数;K_{B}为轮缘厚度系数;K_{H}为齿面载荷分配系数;K_{s}为尺寸系数.

脉动疲劳试验机加载试验采用的应力比为R=0.05,齿轮实际运行过程中的应力比R=0,因此脉动循环齿根应力转化如式(4)所示:

$$\sigma_{\mathrm{F}} = \frac{(1-R)\sigma'_{\mathrm{F}}}{1-\dfrac{R\sigma'_{\mathrm{F}}}{\sigma_{\mathrm{b}}+350}} \tag{4}$$

式中:σ_{b}为材料的抗拉强度.

1.4 试验数据处理

根据试验得出不同应力级下“越出”和“失效”试验点分布后,将应力级按升序排列:

$$\sigma_0 \leqslant \sigma_1 \leqslant \cdots \leqslant \sigma_l \tag{5}$$

计算应力平均值μ_σ和标准偏差s_σ:

$$\mu_\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma\left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2}\right) \tag{6}$$

$$s_\sigma = \begin{cases} 1.62\Delta\sigma\left(\dfrac{NB-A^2}{N^2}+0.029\right), & \dfrac{NB-A^2}{N^2} \geqslant 0.3; \\ 0.53\Delta\sigma, & \dfrac{NB-A^2}{N^2} < 0.3 \end{cases} \tag{7}$$

考虑可靠度R和置信度C的疲劳极限应力$\sigma_{R,C}$:

$$\sigma_{R,C} = \mu_\sigma + k_{R,C}s_\sigma \tag{8}$$

式中:μ_σ为应力平均值;s_σ为应力标准偏差;l为应力级数;$\Delta\sigma$为应力增量;N、A、B为与分析事件中出现的次数有关的系数;$k_{R,C}$为可靠度R和置信度C的系数.

1.5 弯曲疲劳失效判据

试验中若出现下列情况之一则判为失效:

1)轮齿齿根出现可见疲劳裂纹;

2)试验载荷或频率下降5%~10%;

3)轮齿齿根出现沿齿根断齿.

2 弯曲疲劳试验及分析

2.1 弯曲疲劳试验

根据上述试验方法对4种不同表面改性状态齿轮的弯曲疲劳极限进行测试,试验过程见图1,试验完成后轮齿断齿情况如图2所示.



图1 弯曲疲劳试验过程

Fig.1 Bending fatigue test process



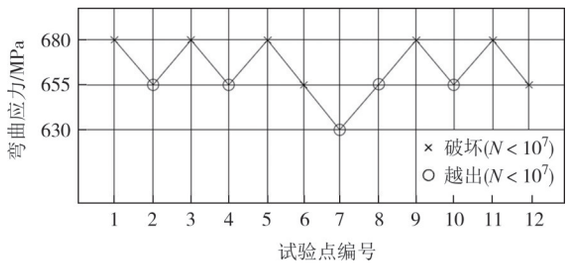
图2 弯曲疲劳试验后齿轮

Fig.2 The gear after bending fatigue test

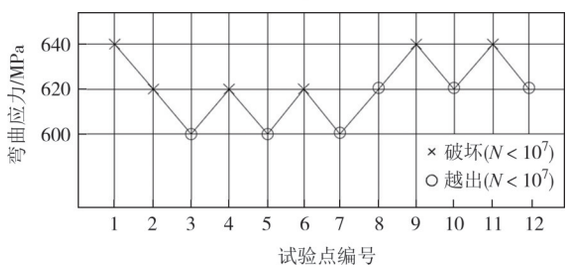
2.2 试验结果分析

采用升降法进行弯曲疲劳极限测试,4种不同表面改性状态齿轮弯曲疲劳试验结果见图3,采用式(5)~式(8)得出置信度95%,可靠度50%时的疲劳极限如表4.

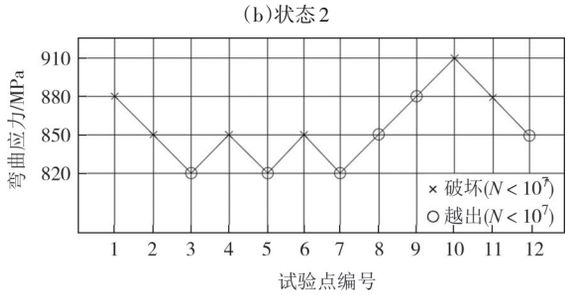
由表4可知:1)浅渗层齿轮弯曲疲劳极限为649.9 MPa,深渗层齿轮弯曲疲劳极限为611.3 MPa,超强耐热航空齿轮钢齿轮在浅渗层时齿面硬度为HRC(61~63),深渗层时齿面硬度为HRC(65~68),采用普通丸粒(HRC65)喷丸对浅渗层齿轮具有强化作用,可以覆盖磨削加工纹路,对深渗层齿轮的超硬齿面无明显强化效果.2)相较于普通丸粒喷丸,超强丸粒硬度(≥HRC73)大于齿轮表面硬度(HRC65~



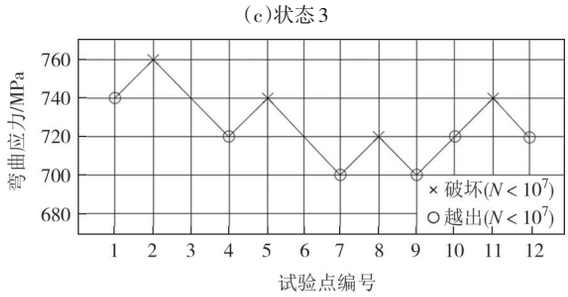
(a)状态 1



(b)状态 2



(c)状态 3



(d)状态 4

图 3　齿轮弯曲疲劳试验结果

Fig.3　Gear bending fatigue test result

表 4　齿轮弯曲疲劳极限

Tab.4　Gear bending fatigue limit

状态	弯曲疲劳极限/MPa
浅渗层(0.70~0.80 mm)+普通喷丸+粗糙度(R_a≤0.2)	649.9
深渗层(1.05~1.25 mm)+普通喷丸+粗糙度(R_a≤0.2)	611.3
深渗层(1.05~1.25 mm)+超强喷丸+粗糙度(R_a≤0.2)	831.6
深渗层(1.05~1.25 mm)+超强喷丸+粗糙度(0.3≤R_a≤0.4)	713.3

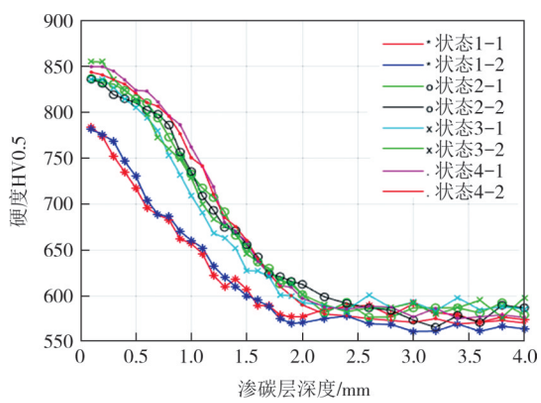
68),采用超强丸粒喷丸大大提高了齿轮表面的残余压应力,弯曲疲劳极限提高了 36.04%.3)相较于粗糙度 0.3≤R_a≤0.4 齿轮,粗糙度 R_a≤0.2 齿轮的弯曲疲劳极限提高了 16.58%,表明超强耐热航空齿轮钢齿轮的弯曲疲劳极限对粗糙度的敏感性较强.

3　失效分析

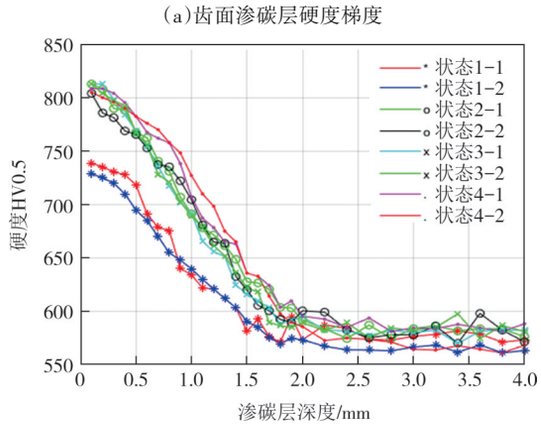
对 4 种不同表面改性状态弯曲疲劳失效的轮齿进行 SME 和硬度分析,研究了不同表面改性对齿轮弯曲疲劳性能的影响以及齿轮的抗疲劳机理.

3.1　渗碳层硬度梯度

从不同表面改性层状态的齿轮弯曲试验件上取未加载试验的轮齿试样进行渗层显微硬度检测,每个状态检测 2 个轮齿,各试样渗碳层的硬度梯度曲线见图 4.图 4(a)为分度圆齿面渗层梯度,图 4(b)为齿根圆角渗碳层硬度梯度.



(a)齿面渗碳层硬度梯度



(b)齿根圆角渗碳层硬度梯度

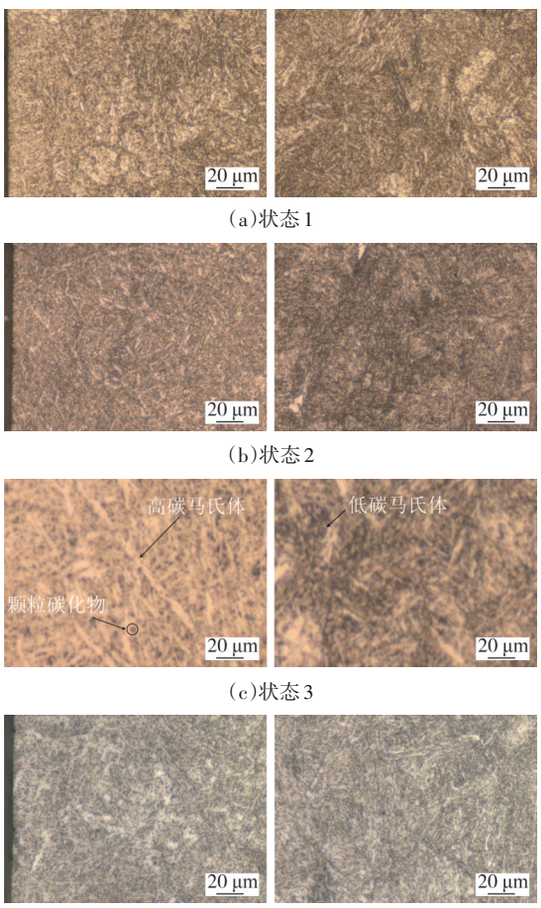
图 4　齿轮渗碳层硬度梯度图

Fig.4　Hardness gradient of gear carburized layer

由图 4 可得:深渗层试验件轮齿的渗碳层硬度梯度基本一致,分度圆齿面表面硬度约为 HRC67,有效渗层深度约为 1.2~1.3 mm,齿根圆角表面硬度约为 HRC65,有效硬化层深度约为 1.0~1.1 mm;浅渗层试验件轮齿的分度圆齿面表面硬度仅为 HRC63,有效硬化层深度约为 0.8 mm,齿根圆角表面硬度为 HRC61.5,有效硬化层深度约为 0.7 mm.浅渗层齿轮的齿面和齿根硬度较深渗层低,该结论与试验结果一致.

3.2 渗碳层金相组织

不同表面改性状态的齿轮弯曲疲劳试验件失效轮齿的渗碳层金相组织如图5所示(左列为0~0.6 mm渗碳区,右列为0.6~1.2 mm渗碳区).



(a)状态1

(b)状态2

(c)状态3

(d)状态4

图5 渗碳层金相组织图

Fig.5 Metallographic structure of carburized gear

由图5可得:渗碳层近表面组织为高碳马氏体和细小弥散的颗粒状碳化物,随渗层深度增加逐渐向心部超低碳板条马氏体过渡,除浅渗层齿轮外,深渗层齿轮金相组织无明显差异,喷丸对渗层组织无明显影响;浅渗层齿轮组织在渗层深度大于0.6 mm时已转变为超低碳板条马氏体,与渗碳层硬度梯度测试结果相符.

3.3 表面改性层残余应力

从不同表面改性状态的齿轮弯曲疲劳试验件上取未加载的轮齿试样,按图6位置测定试样的残余应力,结果见表5.

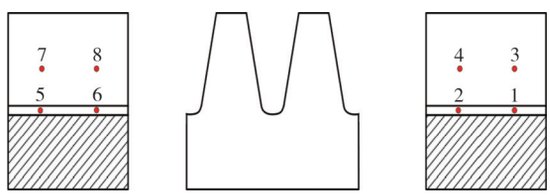


图6 表面残余应力测试位置图

Fig.6 Surface residual stress testing location

由表5可知:1)超强耐热航空齿轮钢轮齿渗碳磨削表面具有较高的残余压应力,普通喷丸对深渗层齿轮强化效果几乎无影响,齿面残余压应力为880~980 MPa、齿根圆角残余压应力为770~840 MPa,对浅渗层可产生一定强化效果,喷丸后齿面残余压应力约为1 100 MPa,齿根圆角残余压应力为870~950 MPa,浅渗层的齿面和齿根的残余压应力较深渗层高;2)超强喷丸轮齿齿面残余压应力达到了1 520~1 650 MPa,齿根圆角表面残余压应力为1 100~1 300 MPa,超强喷丸可显著提高轮齿表面和齿根的残余压应力,进而提高齿轮的疲劳极限;3)由试验和分析结果可以得出残余应力测试结果与弯曲疲劳试验结果相符,残余压应力越大的齿轮试验件其弯曲疲劳性能越好.

3.4 表面形貌

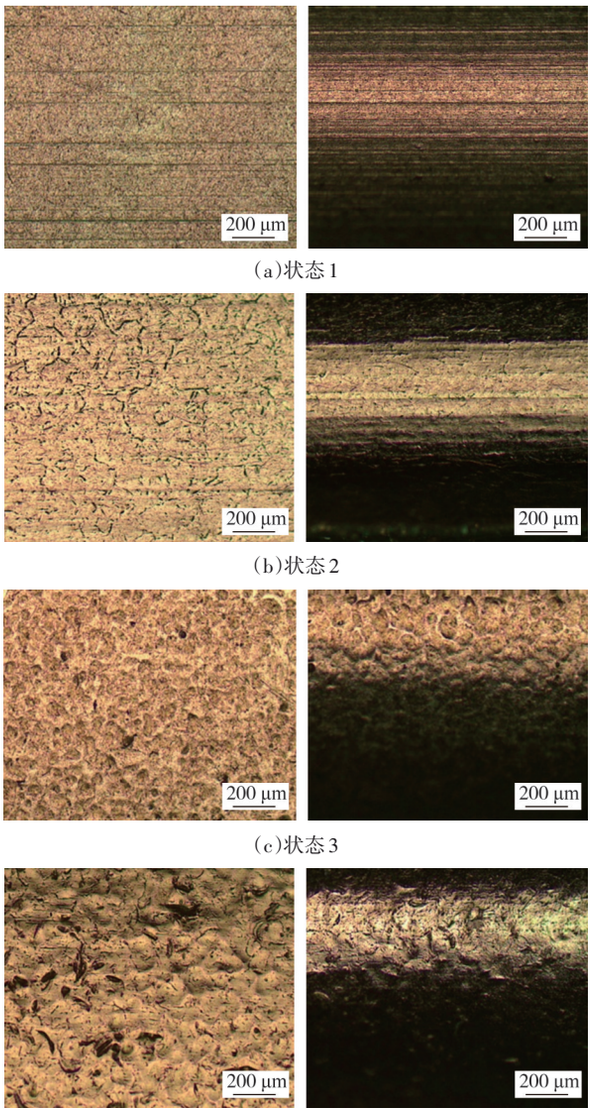
不同表面改性状态齿轮弯曲疲劳试验失效轮齿表面形貌如图7所示(左列为分度圆齿面形貌,右列为齿根圆角形貌).

由图7可得:1)超强喷丸齿轮齿面及齿根圆角布满经超硬丸粒轰击后产生的弹痕凹坑,同时磨削加工纹路被弹痕完全覆盖,振动抛光无法有效消除喷丸弹痕;2)粗糙度0.3≤R_a≤0.4要求的超强喷丸试验齿轮齿面弹坑凹凸起伏更大,略微可见磨削刀痕;3)与残余应力相似,普通喷丸无法使超硬渗碳的轮

表5 齿轮表面残余压应力测试结果

Tab.5 Surface residual compressive stress testing result MPa

状态	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6	位置7	位置8
1	947.3	870.8	1 116.9	1 120.3	914.5	901.2	1 088.1	1 113.8
2	843.6	782.9	985.4	982.0	776.3	836.0	983.6	881.6
3	1 026.6	1 198.7	1 628.4	1 565.3	1 291.6	1 377.1	1 615.0	1 642.2
4	1 232.4	1 076.9	1 545.3	1 563.8	1 228.7	1 111.1	1 553.0	1 523.1



(a)状态 1

(b)状态 2

(c)状态 3

(d)状态 4

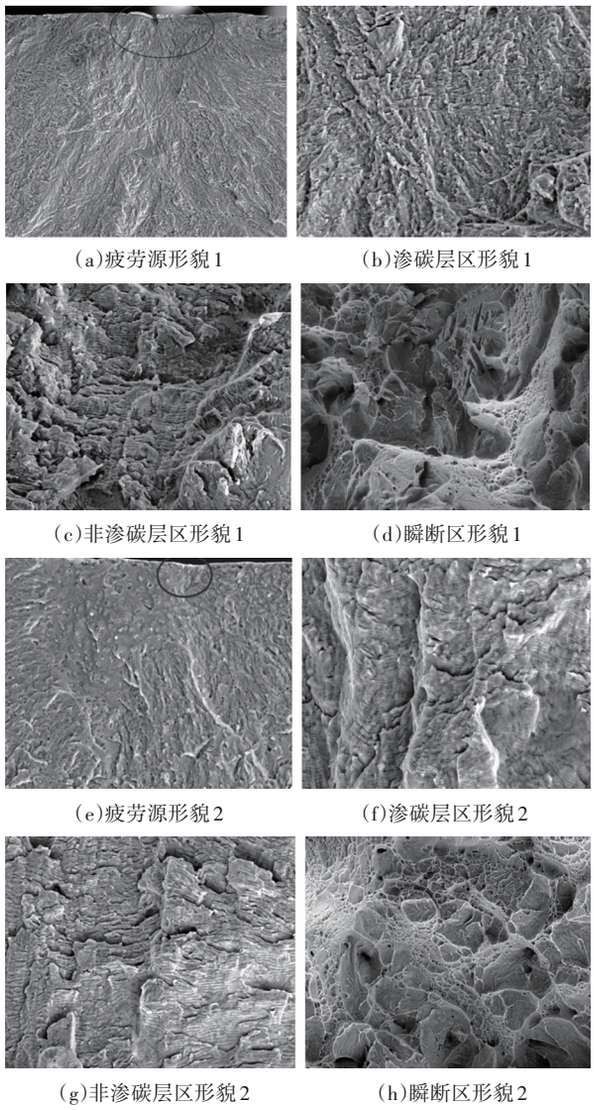
图 7　齿轮表面形貌

Fig.7　Surface morphology of gears

齿表面产生较大的塑性变形,无法产生较大的残余应力,仅在齿轮表面留下轻微凹陷,且无法覆盖磨削加工纹路.

普通喷丸轮齿疲劳断口形貌如图 8 所示,(a)~(d)为状态 1 断口形貌,(e)~(h)为状态 2 断口形貌.

由图 8 可得:失效轮齿均为疲劳断裂,断口上可见清晰疲劳条带.普通喷丸齿轮疲劳裂纹在齿根圆角表面萌生,普通喷丸无法在轮齿表面产生有效的塑性变形和应变强化,齿根圆角残余压应力低,轮齿表面强化效果十分有限;普通喷丸无法消除轮齿表面的磨削加工纹路,齿根圆角位置加工刀痕明显,受载时易在磨削纹路处产生应力集中,从而导致疲劳裂纹在轮齿表面过早萌生,造成轮齿疲劳断裂.



(a)疲劳源形貌 1　(b)渗碳层区形貌 1

(c)非渗碳层区形貌 1　(d)瞬断区形貌 1

(e)疲劳源形貌 2　(f)渗碳层区形貌 2

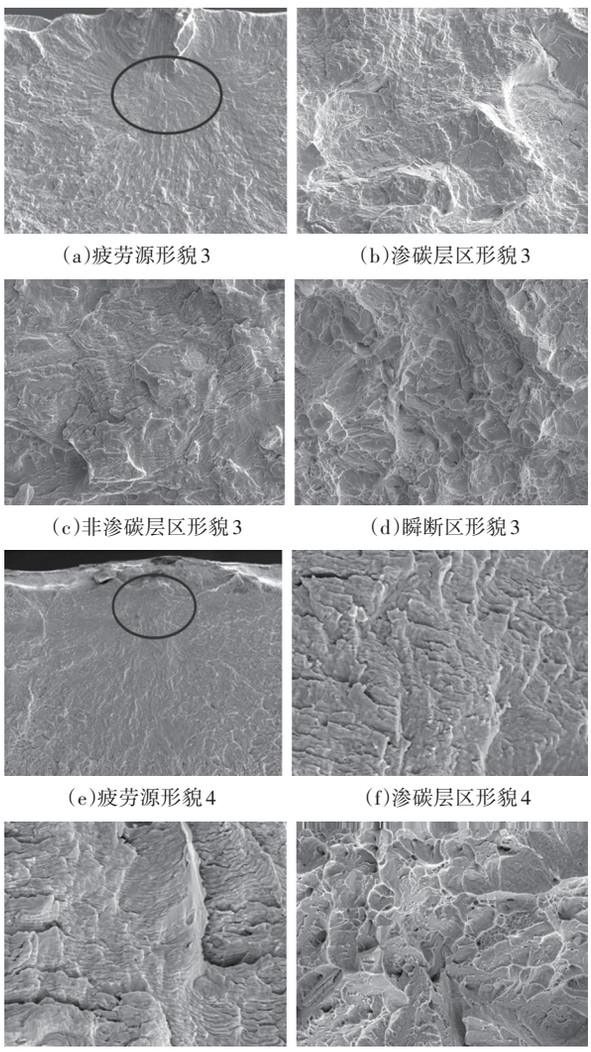
(g)非渗碳层区形貌 2　(h)瞬断区形貌 2

图 8　普通喷丸轮齿疲劳断口形貌

Fig.8　Fracture morphology of ordinary shot peened gear tooth

超强喷丸轮齿疲劳断口形貌如图 9 所示,(a)~(d)为状态 3 断口形貌,(e)~(h)为状态 4 断口形貌.

由图 9 可得:超强喷丸失效轮齿均为疲劳断裂,断口上可见清晰疲劳条带.超强喷丸齿轮疲劳裂纹均在齿根亚表面萌生.超强喷丸使超硬渗碳表面产生了有效的塑性变形和应变强化,一方面大幅增加了轮齿近表层的残余压应力,消除了受交变载荷时在轮齿表面、次表面的微观塑性变形产生的应力集中;另一方面喷丸弹痕可覆盖磨削加工纹路(粗糙度 $0.3 \leqslant R_a \leqslant 0.4$ 的轮齿表面无法完全覆盖),可以有效降低磨削刀痕处产生的表面应力集中,抑制裂纹从表面产生,从而使疲劳裂纹萌生于亚表面,有效提高齿轮的弯曲疲劳性能.



(a)疲劳源形貌3 (b)渗碳层区形貌3

(c)非渗碳层区形貌3 (d)瞬断区形貌3

(e)疲劳源形貌4 (f)渗碳层区形貌4

(g)非渗碳层区形貌4 (h)瞬断区形貌4

图9 超强喷丸轮齿疲劳断口形貌

Fig.9 Fracture morphology of ultra strong shot peened gear tooth

4 结论

本文以超强耐热航空齿轮钢12Co14Ni6Cr5Mo4VNb为研究对象,采用升降法开展了不同表面改性对圆柱齿轮弯曲疲劳性能的影响研究,并对轮齿失效机理进行了分析.主要结论如下.

1)普通喷丸对超强耐热航空齿轮钢浅渗层齿轮有一定的强化效果,对深渗层齿轮无明显强化效果;采用超强喷丸大大提高了齿轮表面残余压应力,弯曲疲劳极限提高了36.04%;超强耐热航空齿轮钢齿轮弯曲疲劳极限对粗糙度敏感性较强,粗糙度R_a≤0.2齿轮较粗糙度0.3≤R_a≤0.4齿轮的弯曲疲劳极限提高了16.58%.

2)不同表面改性状态的超强耐热航空齿轮钢弯曲齿轮齿部渗碳层近表面组织均为高碳马氏体和细小弥散的颗粒状碳化物,并随渗层深度增加逐渐向超低碳板条马氏体过渡.

3)超强喷丸会在超强耐热航空齿轮钢轮齿表面留下明显弹痕凹坑,可完全消除粗糙度R_a≤0.2齿轮表面的磨削加工纹路,但无法完全覆盖粗糙度0.3≤R_a≤0.4齿轮表面加工纹路;普通喷丸仅在齿轮表面留下轻微凹陷,无法消除磨削加工纹路.

4)超强喷丸弯曲齿轮的疲劳裂纹全部在齿根圆角亚表面萌生,普通喷丸齿轮的疲劳裂纹大部分在齿根圆角表面萌生,裂纹萌生于齿轮亚表面可以显著地提高齿轮的弯曲强度.

参考文献

[1] 樊俊星, 邓召义. 航空齿轮传动的可靠性优化设计[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2001, 7(3): 205-208.
FAN J X, DENG Z Y. Reliability optimization design of aviation gears transmission [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2001, 7(3): 205-208.(in Chinese)

[2] 康丽霞, 高洁. 航空传动新材料手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2020.
KANG L X, GAO J. Handbook of new materials for aviation transmission [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2020.(in Chinese)

[3] 刘子强, 陈亮, 万文铭. 关于齿轮单齿脉动弯曲疲劳试验中的几个问题[J]. 机械传动, 2017, 41(3): 151-154.
LIU Z Q, CHEN L, WAN W M. Several questions about gear single tooth pulsating bending fatigue test [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(3): 151-154.(in Chinese)

[4] KENTA M, JINTA A, HIROYUKI A, et al. Fatigue limit estimation for carburized steels with surface compressive residual stress considering residual stress relaxation [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 160: 106846.

[5] ALI TERRES M, LAALAI N, SIDHOM H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: experimental analysis and predictive approach [J]. Materials & Design, 2012, 35: 741-748.

[6] BENEDETTI M, FONTANARI V, HÖHN B R, et al. Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(11): 1127-1136.

[7] HO H S, LI D L, ZHANG E L, et al. Shot peening effects on subsurface layer properties and fatigue performance of case-hardened 18CrNiMo7-6 steel [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018(1): 3795798.

[8] LUO X K, DANG N, WANG X. The effect of laser shock peening, shot peening and their combination on the microstructure

and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 153: 106465.

[9] 肖娜. 高性能重载齿轮钢疲劳破坏行为及夹杂物评估技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
XIAO N. Study on fatigue failure behavior and inclusion evaluation technology of high performance and heavy load gear steel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)

[10] 赖大春, 杨卯生, 冷崇燕, 等. 基于化学热处理低碳CrNiMoV轴承钢疲劳性能的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(7): 784-789.
LAI D C, YANG M S, LENG C Y, et al. Fatigue properties of low-carbon CrNiMoV bearing steel modified by carburizing and nitriding[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(7): 784-789. (in Chinese)

[11] 孙杰. 20CrNiMo齿轮钢复合表层改性及其弯曲疲劳性能研究[D]. 厦门: 集美大学, 2023.
SUN J. Study on modification of composite surface layer of 20CrNiMo gear steel and its bending fatigue properties [D]. Xiamen: Jimei University, 2023. (in Chinese)

[12] 吴晓斌. 20CrNiMo渗碳齿轮钢超声冲击表层改性及腐蚀疲劳性能研究[D]. 厦门: 集美大学, 2023.
WU X B. Study on surface modification and corrosion fatigue properties of 20CrNiMo carburized gear steel by ultrasonic impact[D]. Xiamen: Jimei University, 2023. (in Chinese)

[13] 王振, 孙浩, 崔义龙, 等. 表面复合强化对18CrNiMo7-6渗碳齿轮钢表面完整性的影响研究[J/OL]. 机械强度, 2024: 1-12. (2024-06-03). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=JXQD20240530001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
WANG Z, SUN H, CUI Y L, et al. Effect of surface composite strengthening on surface integrity of 18CrNiMo7-6 carburized gear steel [J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-12. (2024-06-03). http://kns. cnki. net/KCMS/detail/detail. aspx? filename=JXQD20240530001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ. (in Chinese)

[14] ZHAO W D, LIU D X, ZHANG X H, et al. Improving the fretting and corrosion fatigue performance of 300M ultra-high strength steel using the ultrasonic surface rolling process[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 30-38.

[15] ZHAO W D, LIU D X, QIN H F, et al. The effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on low temperature nitriding of ultra-high strength steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 375: 205-214.

[16] 唐鑫, 朱如鹏, 廖梅军, 等. 第三代航空齿轮钢圆柱齿轮弯曲疲劳强度性能测试分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1756-1764.
TANG X, ZHU R P, LIAO M J, et al. Analyse bending fatigue strength test of cylindrical gear of third-generation aviation gear steel[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1756-1764. (in Chinese)

[17] 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: 1-40.
Test method of tooth bending strength for gear load capacity: GB/T 14230—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1-40. (in Chinese)

[18] 朱孝录. 齿轮的试验技术与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
ZHU X L. Test technology and equipment of gears[M]. Beijing: China Machine Press, 1988. (in Chinese)

[19] Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth (Metric Edition): ANSI/AGMA 2101-D04 [S]. Alexandria, Virginia: American Gear Manufacturers Association, 2024.