

新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的 弯曲疲劳失效机理

唐 鑫^{1,2}, 朱如鹏¹, 杨卯生³, 唐 朋^{1,2}, 李发家^{1,2,4}, 熊兴波²

(1. 南京航空航天大学 直升机传动技术重点实验室, 南京 210016;

2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所

直升机传动技术重点实验室, 湖南 株洲 412002;

3. 钢铁研究总院 特殊钢研究所, 北京 100081;

4. 济南大学 机械工程学院, 济南 250022)

摘 要: 以新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢圆柱齿轮为研究对象, 采用国标 GB/T 14230-1993 规定的“B 试验法”开展了齿轮弯曲疲劳试验, 并对轮齿的断裂的失效机理进行了研究。分析结果发现存在三种造成轮齿断裂失效的诱因: 表面碳化物、表面缺陷和内部碳化物。其中, 表面碳化物对轮齿弯曲疲劳寿命的影响比内部碳化物和表面加工缺陷都要严重。当齿面没有碳化物和加工缺陷时, 在长时间循环应力作用下会产生内部碳化物, 进而造成裂纹萌生和扩展, 较小尺寸碳化物会形成粗糙的“鱼眼”区形貌。采用航空新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢的齿轮要得到较高的寿命, 应当在加工过程中控制轮齿表面及近表面碳化物尺寸、数量及形状系数和表面加工缺陷, 以避免在轮齿表面形成裂纹源。

关 键 词: 航空齿轮钢; 弯曲疲劳; 失效机理; 裂纹源; 碳化物; 表面加工缺陷

中图分类号: V233.1; TH113.1

文献标志码: A

Bending fatigue failure mechanism of the new high temperature carburizing stainless aviation steel gear

TANG Xin^{1,2}, ZHU Rupeng¹, YANG Maosheng³,

TANG Peng^{1,2}, LI Fajia^{1,2,4}, XIONG Xingbo²

(1. Science and Technology on Helicopter Transmission Laboratory,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Science and Technology on Helicopter Transmission Laboratory,

Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;

3. Institute of Special Steel,

Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

4. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: The fracture failure mechanism for new high temperature carburizing stainless aviation steel cylindrical gears was studied. The bending fatigue test for gear was carried out using

收稿日期: 2021-04-07

基金项目: 国家基金面上项目(51975274); 南京航空航天大学“直升机传动技术重点实验室”开放课题(HTL-O-20K02)

作者简介: 唐鑫(1983—), 男, 研究员, 博士生, 主要从事直升机传动、传动强度和振动等方面研究。

引用格式: 唐鑫, 朱如鹏, 杨卯生, 等. 新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的弯曲疲劳失效机理[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 589-599. TANG Xin, ZHU Rupeng, YANG Maosheng, et al. Bending fatigue failure mechanism of the new high temperature carburizing stainless aviation steel gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 589-599.

“B test method” based on the stipulated GB/T 14230-1993. The results showed that the carbides in surface carburizing layer, the surface machining defects and interior carbides were main inducement factors in the tooth fracture failure. The carbides in surface carburizing layer were the most serious reason. When the carbides and surface machining defects did not exist in the surface, the interior carbides could be generated under alternating stresses, resulting in initiation and propagation for crack. The smaller size carbides generated the rough “fish-eye” zone morphology. In order to obtain the higher service life of new high temperature carburizing stainless aviation steel cylindrical gears, the size, amount, shape factor of the carbides and surface machining defects on the tooth surface should be controlled during the whole surface machining. The crack initiation in surface should be avoided.

Key words: aviation gear steel; bending fatigue; failure mechanism; crack initiation; carbide; surface machining defects

齿轮是航空传动系统最重要的结构件之一,工作环境十分复杂。材料性能决定了齿轮的核心性能,整个航空减速器的质量、承载能力、干运转能力、寿命等核心指标均与之息息相关。随着航空减速器的不断发展,对齿轮承载能力和使用温度提出了更高的要求,要求具有更高的抗疲劳性能。

目前国际上航空齿轮材料以 9310 钢、EX-53 (AMS 6308) 钢为代表的第一、二代航空齿轮钢为主,第三代航空齿轮钢以 CSS-42L 钢为代表。新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢(与 CSS-42L 相当),其成分如表 1 所示,是一种具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损性能的第三代航空齿轮钢,其材料性能指标相对于 9310 钢和 EX-53 钢有较大的优势,尤其弯曲强度较第一、二代齿轮钢有较大提升,但由于对这种材料缺乏失效机理研究,目前还未掌握其失效的机理,一定程度上制约了该材料在航空齿轮上的应用。

轮齿的疲劳失效在齿轮传动系统中是最为常见的突出问题^[1],疲劳失效是机械零件的最主要的破坏形式^[2],亟需解决这一问题,针对齿轮疲劳

强度试验开展了较多的研究工作^[3-6],但是对齿轮的疲劳失效的原因缺乏研究。航空齿轮的弯曲疲劳强度是衡量航空传动性能的重要指标之一^[7],针对其疲劳失效的原因进行规避和检测,提高齿轮机构的可靠性和安全性,具有重要的意义。

朱鹏飞等^[8]研究了普通的渗碳钢齿轮喷丸后的疲劳断裂机理,包括裂纹萌生与扩展机制,提出了改善齿轮疲劳强度的措施。李宁^[9]对 18CrNiMo7-6 钢表面粗糙度等微观形貌造成的弯曲断裂进行研究,分析了微观形貌对材料的疲劳影响。秦超^[10]对 35CrNiMo 钢齿轮弯曲断口进行了分析,发现该材料发生断裂齿轮的内部缺陷主要为伴有气孔的夹渣。肖娜^[11]以 20Cr2Ni4A 齿轮钢为研究对象,研究了真空渗碳处理及钢材冶金的金属夹杂质量对其高周疲劳断裂行为的影响规律。冷小刚等^[12]对 40CrNiMo 和 42CrMo 渗碳齿轮进行了试验研究,研究了弯曲疲劳强度极限值,并进行了弯曲疲劳断口分析和断裂机理研究。涂小龙^[13]研究结果表明齿轮氧化物夹杂物含量低的齿轮强度会增加。

Xi^[14]发现 MnCr 钢齿轮的疲劳裂纹源会在喷丸后发生向次表明迁移,提高了其性能。Winkler 等^[15]研究了 20MnCr5 与 18CrNiMo7-6 渗碳齿轮的疲劳断裂特性,发现夹杂物尺寸、断裂面层深与齿轮模数成正比,夹杂物均位于渗碳层内。Winkler、Shiozawa 等^[15-16]通过对轮齿断面进行扫描电镜分析表征发现,齿根高周疲劳断口呈现鱼眼状形貌,是内部裂纹源产生的破坏。Fuchs 等^[17-18]研究表明,喷丸后的齿轮的非金属夹杂物处会产生裂纹源,夹杂物越小齿轮抗疲劳性能越好。

表 1 新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢成分
Table 1 Composition of new high temperature carburizing stainless aviation gear steel

元素	质量分数/%
C	0.1~0.2
Cr	11~15
Co	10~14
Mo	4~6
Ni	1.6~3.0

许多学者对齿轮、齿轮材料的弯曲疲劳断裂的机理开展了研究,但是对新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢的研究尚无公开资料可查。本文针对新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢的齿轮弯曲疲劳特性进行测试,针对不同寿命下的断口进行分析,得到该新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的断裂原因和失效机理,指导设计和生产,保证整个该材料齿轮机构的安全。

1 弯曲疲劳强度试验数据

1.1 弯曲疲劳强度试验

根据 GB/T 14230-93《齿轮弯曲疲劳强度试验方法》采用脉动加载试验方式,进行新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的弯曲疲劳试验,并对其断口进行扫描电镜分析,研究其弯曲疲劳失效机理,根据 GB/T 14230-93 标准规定,试验齿轮参数和精度如表 2 所示。

表 2 试验齿轮参数
Table 2 Test gear parameters

齿轮参数	数值及说明
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
刀具半径/mm	1.52
渗碳后渗层深度/mm	1.30~1.50
是否喷丸	是
精度等级	5

根据设计的试验齿轮参数和文献[19]给出的夹具设计公式计算夹具参数如表 3 所示,夹具设计尺寸如图 1 所示。

表 3 弯曲疲劳试验夹具参数
Table 3 Fixture parameters for bending fatigue test

参数	数值
跨齿数 n	15
E 点的压力角 $\alpha_E/(^{\circ})$	24.079
E 点所在圆直径 d_E/mm	164.68

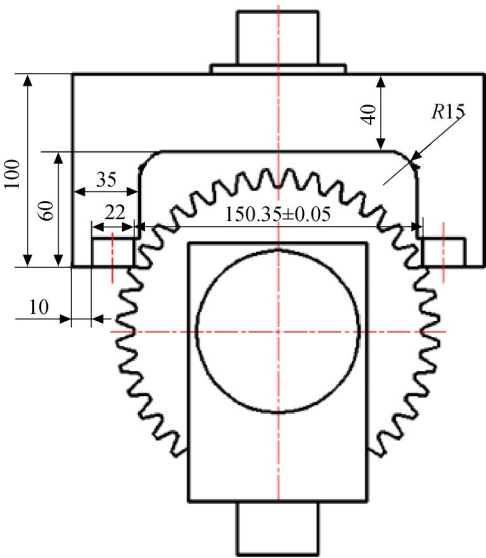


图 1 脉动加载示意(单位:mm)
Fig.1 Pulsation loading diagram (unit:mm)

使用脉动疲劳试验机对试验齿轮的双齿同时进行脉动加载,试验过程见参考文献[19]。图 2 为试验过程图,图 3 为试验后齿轮及断齿实物图。



图 2 试验过程
Fig.2 Test process



图 3 试验后齿轮
Fig.3 Gear after test

1.2 弯曲疲劳强度试验结果

采用升降试验法进行齿轮弯曲疲劳极限(长寿命区寿命次数 $N>3\times10^6$ 次测试,结果如图 4 所示。有限寿命高载荷区(寿命次数 $N<3\times10^6$ 次采用恒定应力水平成组法获得失效寿命见表 4 所示。

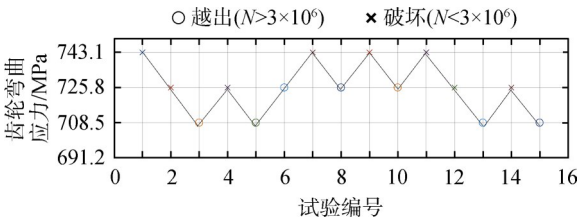


图 4 试验齿轮弯曲疲劳极限
Fig.4 Bending fatigue limit of test gear

经过分析,采用对数正态分布拟合在 99% 可靠度下,新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的弯曲疲劳极限应力已经达到 687.6 MPa^[19]。95% 置信度下,对有限寿命区载荷下的齿轮弯曲疲劳数据进行(应力-寿命)S-N 曲线方程拟合,不同可靠度 R 下的应力寿命曲线 (R -S-N 曲线)见图 5 所示。

表 4 试验齿轮失效寿命
Table 4 Failure life of test gear

应力/MPa		疲劳寿命/次			
778.0	1 603 101	1 357 836	1 243 683	734 086	714 413
812.9	763 076	630 692	351 061	332 928	324 670
830.4	264 261	148 879	135 136	98 990	83 916

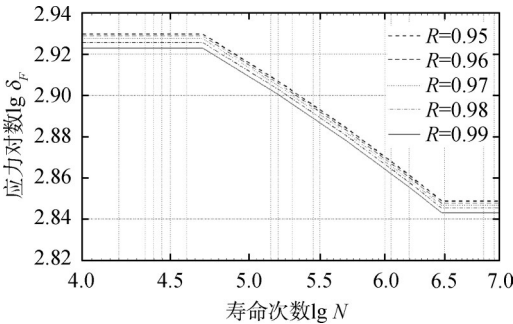


图 5 齿轮 R-S-N 曲线
Fig.5 Gear R-S-N curves

表 5 弯曲疲劳失效轮齿编号
Table 5 Number table of bending fatigue failure tooth

编号	应力水平/MPa	寿命/次
1	830.4	264 261
2	830.4	148 879
3	830.4	135 136
4	830.4	83 916
5	812.9	630 692
6	812.9	763 076
7	812.9	351 061
8	812.9	104 054
9	778.0	1 603 101
10	778.0	1 243 683
11	778.0	714 413
12	778.0	215 170
13	743.2	1 560 371
14	743.2	1 401 202
15	743.2	1 386 882
16	743.2	618 934
17	743.2	276 482
18	725.8	2 364 687
19	725.8	2 333 080
20	725.8	1 193 067
21	725.8	270 611

2 轮齿弯曲疲劳失效断口分析

利用试验后的断齿,对试验件进行弯曲疲劳失效分析,试验件如图 6 所示,典型的弯曲疲劳失效轮齿一共 21 个,按照寿命的长短分别编号命名 1~21,并分析其断裂原因。表 5 为弯曲疲劳失效轮齿编号。



图 6 弯曲失效齿轮
Fig.6 Bending failure gear

2.1 齿轮弯曲疲劳失效分析

通过对弯曲疲劳失效齿轮轮齿断面微观结构和成分进行研究,分析造成轮齿断裂的失效机理。

2.1.1 表面碳化物裂纹源

编号 3、4、8、11、16、20 轮齿的裂纹形貌如图 7~图 12 所示,其断裂原因在交变应力作用下由轮齿表面的碳化物处作为裂纹源,造成的轮齿断裂。

在表面加工过程中,近表面的碳化物被磨削一部分而暴露在表面,碳化物与基体结合较薄弱,

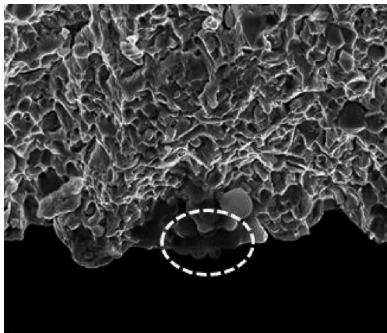


图 7 表面碳化物裂纹源(编号 3 轮齿)
Fig.7 Crack initiation of surface carbide (No.3 tooth)

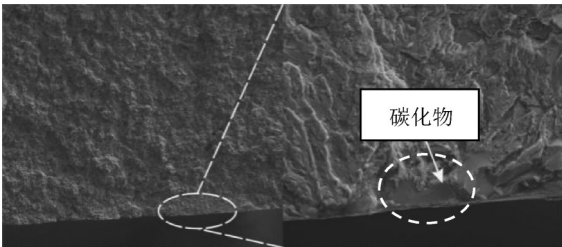


图 8 表面碳化物裂纹源(编号 4 轮齿)
Fig.8 Crack initiation of surface carbide (No.4 tooth)

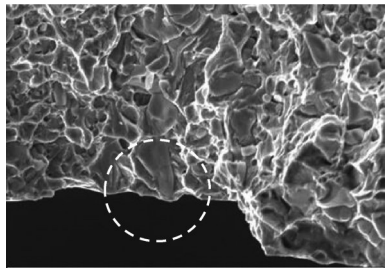


图 9 表面碳化物裂纹源(编号 8 轮齿)
Fig.9 Crack initiation of surface carbide (No.8 tooth)

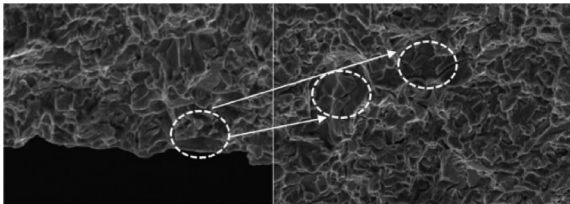


图 10 表面碳化物裂纹源(编号 11 轮齿)
Fig.10 Crack initiation of surface carbide (No.11 tooth)

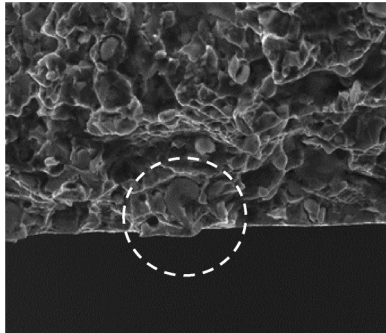


图 11 表面碳化物裂纹源(编号 16 轮齿)
Fig.11 Crack initiation of surface carbide (No.16 tooth)

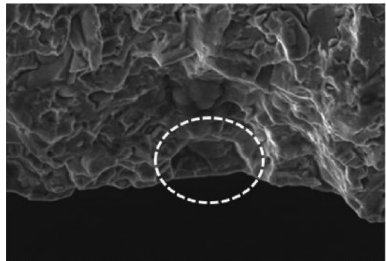


图 12 表面碳化物裂纹源(编号 20 轮齿)
Fig.12 Crack initiation of surface carbide (No.20 tooth)

在反复的拉应力作用下,碳化物与基体之间和碳化物内部会产生微裂纹。在交变载荷的作用下,微裂纹很容易沿着渗层中碳化物边缘或内部快速扩展,最后造成断裂失效破坏。因此,在高载荷作用下,由于表面碳化物的存在,更容易引起的断裂失效寿命较低。

2.1.2 加工缺陷起裂

编号 12 的轮齿的裂纹形貌如图 13 所示,轮齿是由于在加工过程中产生的加工缺陷,在经过长时间的循环拉应力后成为裂纹源,然后裂纹沿着渗碳层的碳化物边缘迅速扩展,造成失效。

表面加工缺陷起裂失效的齿轮轮齿,承载能力和寿命往往会高于表面碳化物起裂失效的齿轮轮齿。因为表面加工缺陷当量尺寸会小于表面碳化物,同时表面碳化物本身就与基体之间存在微

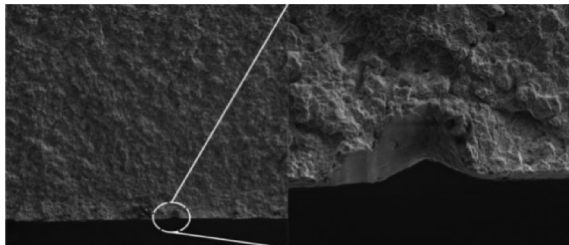


图 13 表面缺陷裂纹源(编号 12 轮齿)
Fig.13 Crack initiation of gear surface defect
(No.12 tooth)

裂纹,当受到拉应力作用后,会快速形成裂纹萌生,裂纹会直接沿渗碳层的碳化物边缘快速扩展。

表面加工缺陷产生裂纹萌生和造成应力集中,在相同载荷下裂纹会优先在尺寸大的加工缺陷的位置萌生。萌生的微裂纹达到临界值会在基体中逐步扩展,当裂纹扩展到碳化物处时,会击碎碳化物后继续扩展或者沿着碳化物边缘扩展,在遇到碳化物以后的扩展过程与表面碳化物萌生裂纹扩展具有相同的机理。

2.1.3 内部碳化物起裂

当轮齿的表面没有碳化物和明显的加工缺陷时,在长时间循环应力作用下,会在轮齿的内部发生裂纹的萌生和扩展现象,编号1、7、15、18、19的轮齿的裂纹形貌如图14~图18所示,其断裂原因在交变应力作用下由轮齿次表面的内部碳化物处作为裂纹源,造成的轮齿断裂。

如图15(编号7轮齿)、图16(编号15轮齿)和图17所示(编号18轮齿),在轮齿次表面的裂纹起裂区域可以观察到“鱼眼”形貌的裂纹源,由内部

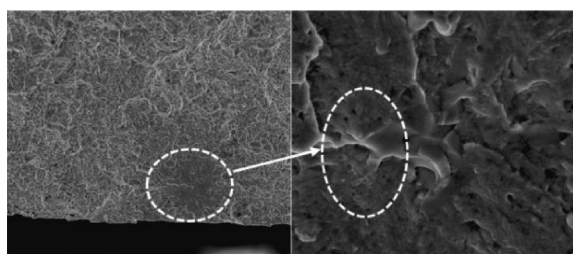


图14 内部碳化物起裂(编号1轮齿)

Fig.14 Crack initiation of interior carbide (No.1 tooth)

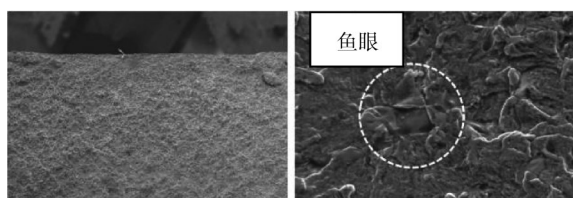


图15 内部碳化物起裂(编号7轮齿)

Fig.15 Crack initiation of interior carbide (No.7 tooth)

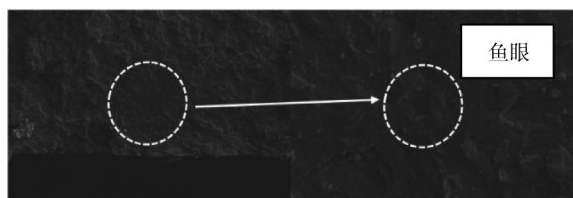


图16 内部碳化物起裂(编号15轮齿)

Fig.16 Crack initiation of interior carbide (No.15 tooth)

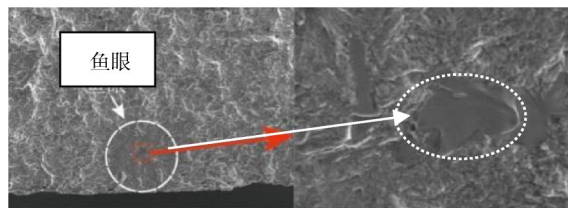


图17 内部碳化物起裂(编号18轮齿)

Fig.17 Crack initiation of interior carbide (No.18 tooth)

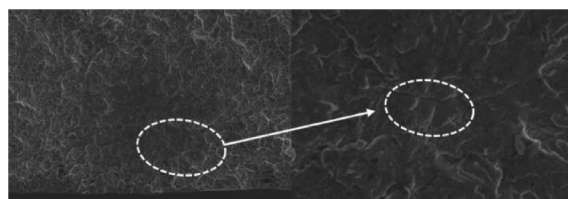


图18 内部碳化物起裂(编号19轮齿)

Fig.18 Crack initiation of interior carbide (No.19 tooth)

的次表层产生裂纹逐渐扩展到齿轮表面。“鱼眼”中心区域为碳化物,碳化物周围为粗糙区,由于是在轮齿的次表面,此时齿轮有较高的寿命。

如图14(编号1轮齿)、图18(编号19轮齿)为内部碳化物边缘处作为裂纹源,造成的轮齿断裂。

2.2 碳化物尺寸对齿轮弯曲疲劳影响分析

齿轮的断裂与碳化物具有较为直接关系,而碳化物的直径和存在的位置对轮齿的承载能力同样具有直接关系,表6为碳化物作为裂纹源轮齿的碳化物相关参数。

碳化物等效直径 d 定义如下:

$$d = 2\sqrt{A/\pi} \quad (1)$$

式中 A 表示碳化物面积。

碳化物的形状系数 K 定义如下:

$$K = 4\pi A/L^2 \quad (2)$$

式中 L 表示碳化物周长;形状系数 $K=1$ 时,碳化物呈圆球状,形状系数 K 的值越接近“0”,碳化物形态越不规则。

齿根断裂断口分析结果发现,齿根断裂分为表面起裂和次表面起裂,除了两处为加工缺陷为裂纹源以外其余裂纹源均为M23C6型碳化物。

在齿轮加载运行过程中,微裂纹容易在大颗粒碳化物边缘产生,并迅速扩展。碳化物尺寸较小时,在大应力作用下,局部发生塑性变形造成位错的塞积,当碳化物无法抵抗这种局部应力时,微裂纹从碳化物内部萌生,然后再沿着碳化物边缘扩展。由表6可知,齿轮寿命并不只受碳化物尺寸一个因素的影响,而是由碳化物等效直径、碳化物距表面的距离以及碳化物形状等因素共同决

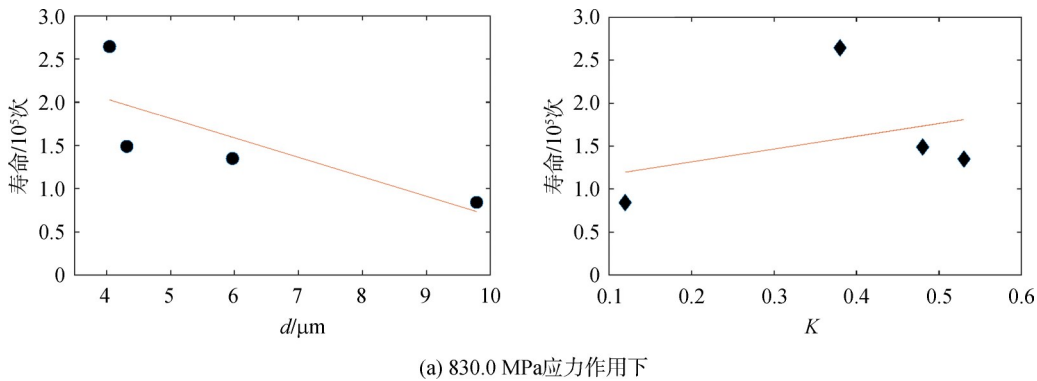
表 6 轮齿碳化物相关参数
Table 6 Carbide related parameters of teeth

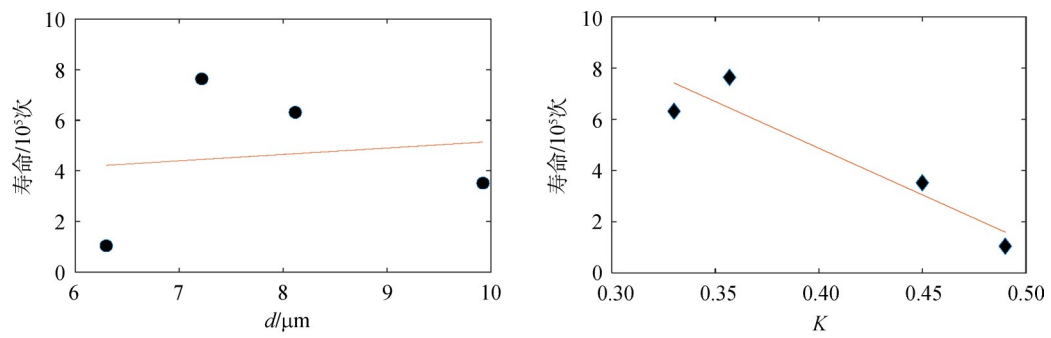
编号	应力/MPa	寿命/次	$d/\mu\text{m}$	K	碳化物距离 表面距离/ μm	裂纹起裂位置
1	830.4	264 261	4.05	0.380	32.0	碳化物内部
2	830.4	148 879	4.32	0.480	表面	碳化物表面
3	830.4	135 136	5.97	0.530	表面	碳化物表面
4	830.4	83 916	9.78	0.120	表面	碳化物表面
5	812.9	763 076	7.22	0.357	40.9	碳化物内部
6	812.9	630 692	8.12	0.330	表面	碳化物表面
7	812.9	351 061	9.92	0.450	104.6	碳化物内部
8	812.9	104 054	6.30	0.490	表面	碳化物表面
9	778.0	1 603 101	3.12	0.780	表面	碳化物表面
10	778.0	1 243 683	4.18	0.915	2.78	碳化物内部
11	778.0	714 413	5.26	0.300	表面	碳化物表面
12	778.0	215 170	12.30	0.859	70.8	加工缺陷
13	743.2	1 560 371	7.69	0.500	37.3	碳化物内部
14	743.2	1 401 202	4.31	0.680	65.4	加工缺陷
15	743.2	1 386 882	8.45	0.610	62.1	碳化物内部
16	743.2	618 934	5.81	0.540	表面	碳化物表面
17	743.2	276 482	7.38	0.600	表面	碳化物表面
18	725.8	2 364 687	10.3	0.360	41.3	碳化物内部
19	725.8	2 333 080	6.83	0.550	78.5	碳化物内部
20	725.8	1 193 067	5.59	0.470	表面	碳化物表面
21	725.8	270 611	7.82	0.600	表面	碳化物表面

定。齿轮寿命与碳化物参数间的关联性见图 19, 图 19(a)和图 19(c)表明碳化物尺寸越大,受到应力越大,寿命越大,齿轮弯曲疲劳寿命越低。表 6 中参数表明,相同应力作用下,碳化物尺寸越大,碳化物距表面距离越小,齿轮弯曲疲劳寿命越低。由图 19(b)、图 19(c)和图 19(e)表明碳化物距表

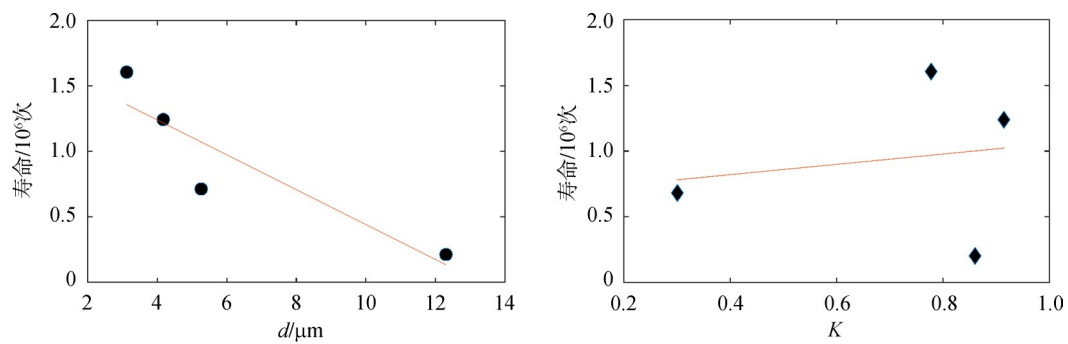
面距离对寿命的影响比较大,在一定程度上可以影响碳化物尺寸和碳化物形状的影响规律。

碳化物等效直径 d 和碳化物距表面距离与齿轮寿命具有一定的关联性。碳化物距表面距离越近,承受的载荷和应力越大,齿轮寿命越短。碳化物形状与齿轮寿命也有一定关联性,相同载荷和

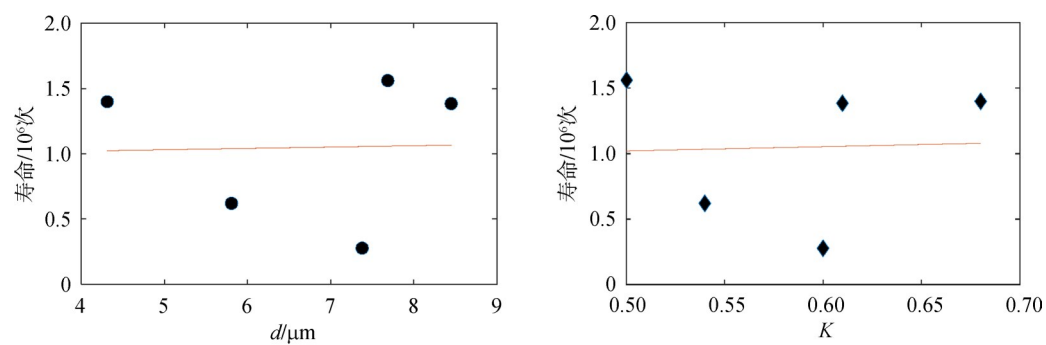




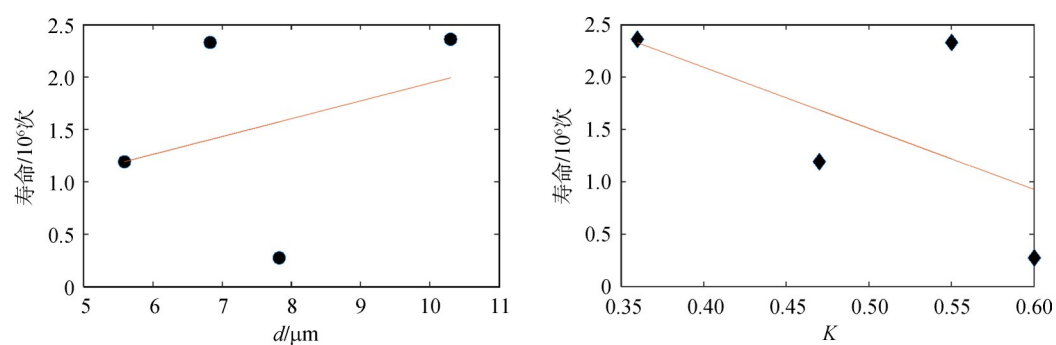
(b) 812.9 MPa应力作用下



(c) 778.0 MPa应力作用下



(d) 743.2 MPa应力作用下



(e) 725.8 MPa应力作用下

图 19 齿轮寿命与碳化物参数间的关联性

Fig.19 Correlation between gear life and carbide parameters

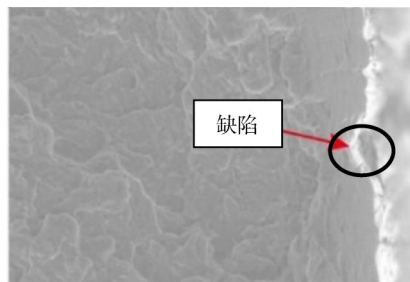
相近碳化物尺寸条件下,碳化物形状系数越靠近1,碳化物造成的应力集中程度小,齿轮寿命会增加;表6中7、18号试样,虽然碳化物位于距离表面较远的位置,形状系数也最大,由于其尺寸较大,造成齿轮寿命同样较短。

分析结果表明,在相同的加工条件下,碳化物尺寸和应力大小对齿轮寿命具有决定性的影响。碳化物距表面距离决定碳化物承受应力大小,碳化物形状决定应力集中程度。在载荷相同的情况下,碳化物等效直径、碳化物距表面的距离和碳化物的形状共同决定了齿轮的寿命。当引起微裂纹的碳化物的等效直径越小、碳化物距离表面距离越远、碳化物形状系数越大时,齿轮寿命越高。

2.3 齿轮材料弯曲疲劳失效分析

为了更好地验证新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的弯曲失效机理,对该材料的弯曲疲劳失效机理进行分析。齿轮轮齿受力方式相当于悬臂梁结构,受载后齿根受弯曲应力,因此对新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢材料进行旋转弯曲疲劳试验,图20为新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢材料渗碳后理论应力集中系数 $K_t=1$ 时的室温旋转弯曲疲劳 $S-N$ 曲线和断口图。

由图20可知,新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢材料试样旋转弯曲疲劳断裂原因为 Al_2O_3 夹杂起裂、碳化物起裂和表面缺口起裂。在裂纹源的原因上,试样旋转弯曲疲劳和齿轮疲劳破坏同样都



(c)

图20 材料旋转弯曲疲劳断裂原因

Fig.20 Fracture reason of materials under rotating bending fatigue

是以碳化物起裂为主,并且由碳化物造成的起裂断口上都有“鱼眼”特征。轮齿起裂原因中没有夹杂引起的裂纹源,试样旋转弯曲疲劳中引起裂纹的碳化物均为内部碳化物,没有发现表面碳化物。

2.4 齿轮弯曲疲劳失效汇总

根据以上分析,对试验轮齿的破坏因素进行统计,结果如图21所示。

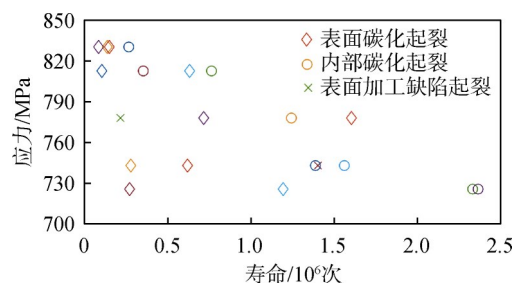
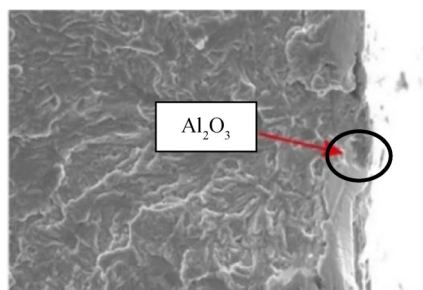
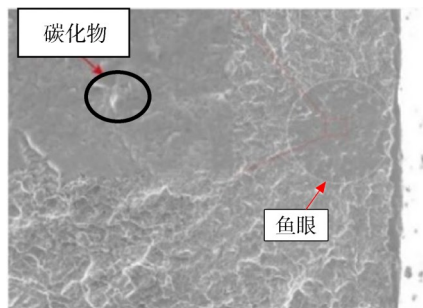


图21 齿轮失效原因汇总

Fig.21 Summary of gear failure causes



(a)



(b)

齿轮失效原因有三个:表面碳化物(占总失效数量的52.4%)、表面缺陷(占总失效数量的9.5%)和内部碳化物(占总失效数量的38.1%)。高载荷下轮齿表面碳化物起裂是导致齿轮早期断裂的主要原因;由内部碳化物起裂引起疲劳破坏的齿轮寿命相对较高。表面碳化物的存在和表面加工缺陷是产生在较短寿命下,弯曲疲劳破坏的主要原因,其中齿轮表面碳化物的存在对降低齿轮弯曲寿命尤为突出。

3 结论

本文以新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢为研究对象,采用国标GB/T 14230-1993规定的“B试验法”开展了该材料标准圆柱齿轮轮齿的弯曲疲劳试验,获得了弯曲疲劳性能数据,并对轮齿断裂的失效机理进行了研究。

1) 该材料齿轮在可靠度为 99% 时, 齿根弯曲疲劳极限应力为 687.6 MPa。

2) 由轮齿表面碳化物引起的断裂失效, 寿命较低, 容易发生断裂; 表面加工缺陷起裂失效的齿轮轮齿, 承载能力和寿命高于表面碳化物起裂失效的齿轮轮齿; 当表面没有碳化物和加工缺陷时, 在长时间循环应力作用下, 在轮齿内部发现裂纹的萌生和扩展现象, 在裂纹区域可以观察到“鱼眼”形貌的裂纹源, “鱼眼”中心区域为碳化物, 碳化物周围为粗糙区。

3) 该材料齿轮轮齿弯曲失效方式有三种, 在该齿轮样品中: 表面碳化物造成的弯曲失效约占 52.4%; 表面缺陷造成的弯曲失效约占 9.5%; 内部碳化物造成的弯曲失效约占 38.1%。表面起裂导致的齿轮寿命明显降低, 由内部碳化物为裂纹源引起疲劳破坏的齿轮寿命相对较高。

4) 碳化物的存在和表面加工缺陷是产生弯曲疲劳破坏的主要原因, 其中碳化物的存在, 是发生破坏的主要原因。要得到较高的轮齿寿命, 应当注意齿轮碳化物的尺寸, 距离轮齿表面的距离和碳化物的形状系数。

参考文献:

- [1] 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 Ziqiang, CHEN Liang, WAN Wenming. Several questions about gear single tooth pulsating bending fatigue test[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(3):151-154. (in Chinese)
- [2] 李文正. 圆弧齿轮的几种损伤形式及其防止措施[J]. 装备制造技术, 2015(6):263-264, 279.
LI Wenzheng. Several damage types of circular arc gear and its prevention measures[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(6):263-264, 279. (in Chinese)
- [3] 朱孝录. 齿轮的试验技术与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [4] 胡晓煜. T700 发动机发展综述[R]. 北京: 中国航空工业发展研究中心, 国防科技情报研究报告 HY2003-020, 2003.
- [5] 于海旭. 齿轮疲劳失效分析与工艺参数优化[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(3):189-195.
YU Haixu. Fatigue failure analysis and process parameters optimization of gear[J]. Failure Analysis and Prevention, 2018, 13(3):189-195. (in Chinese)
- [6] 张洛明, 张向威. 工业结构钢疲劳极限的断裂力学研究[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4):162-166.
ZHANG Luoming, ZHANG Xiangwei. The study on fatigue limit of industrial structural steel with fracture mechanics[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4):162-166. (in Chinese)
- [7] 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, 3(7):205-208.
FAN Junxing, DENG Zhaoyi. Reliability optimization design of aviation gears transmission[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2001, 3(7):205-208. (in Chinese)
- [8] 朱鹏飞, 严宏志, 陈志, 等. 渗碳齿轮齿根喷丸强化研究现状与展望[J]. 表面技术, 2021, 50(1):10-27, 46.
ZHU Pengfei, YAN Hongzhi, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of shot peening for carburized gear roots[J]. Surface Technology, 2021, 50(1):10-27, 46. (in Chinese)
- [9] 李宁. 粗糙度对渗碳淬火 18CrNiMo7-6 钢旋转弯曲疲劳寿命的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
LI Ning. Research on the effect of roughness on the fatigue life of carburized and quenched 18CrNiMo7-6 steel[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)
- [10] 秦超. 齿轮弯曲疲劳强度及疲劳裂纹扩展研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
QIN Chao. Research of gear bending fatigue strength and gear fatigue crack propagation[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 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 Na. Study on fatigue fracture behavior and non-metallic inclusion evaluation technology of high performance heavy-duty gear steels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [12] 冷小刚, 陈秀玉, 卢金生, 等. 离子渗氮齿轮的弯曲疲劳强度[J]. 齿轮, 1988, 4(12):40-42, 49.
LENG Xiaogang, CHEN Xiuyu, LU Jinsheng, et al. Bending fatigue strength of ion nitriding gear[J]. Gear, 1988, 4(12):40-42, 49. (in Chinese)
- [13] 涂小龙. 重型汽车齿轮热处理变形控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
TU Xiaolong. Controlling heat treatment distortion of the gears in heavy-duty truck gear-box[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [14] XI L. Investigation of the region of fatigue crack initiation in a transmission gear[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(6):1377-1382.
- [15] 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.
- [16] 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, 2010, 32(3):541-550.
- [17] FUCHS D, SCHURER S, TOBIE T, et al. New consideration of non-metallic inclusions calculating local tooth root

- load carrying capacity of high-strength, high-quality steel gears[R].Lyon,France:International Gear Conference,2018.
- [18] FUCHS D, SCHURER S, TOBIE T, et al. A model approach for considering nonmetallic inclusions in the calculation of the local tooth root load-carrying capacity of high-strength gears made of high-quality steels[J].Proceedings of the institution of mechanical engineers:Part C Journal of Mechanical Engineering Science,2019,233(21/22):7309-7317.
- [19] 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 Xin, ZHU Rupeng, LIAO Meijun, 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)

(编辑:陈 越)