

第三代航空齿轮钢圆柱齿轮弯曲疲劳强度性能测试分析

唐鑫^{1,2}, 朱如鹏¹, 廖梅军², 熊兴波², 唐朋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)

摘 要: 以第三代航空齿轮钢圆柱齿轮的弯曲疲劳性能作为研究对象,修正了国标(GB)给出的齿轮弯曲夹具计算公式,设计了弯曲疲劳试验用圆柱齿轮参数,并对该材料的齿轮进行了弯曲疲劳试验。通过对试验结果数据采用对数正态分布、二参数威布尔分布数据处理方法对试验数据进行了处理,得到了该材料的试验齿轮弯曲疲劳极限及可靠-应力-寿命(R-S-N)曲线,同时与9310钢(第一代)齿轮的性能进行了对比分析。结果表明:在置信度为95%、可靠度为99%的情况下,9310钢圆柱齿轮的弯曲应力极限为602 MPa,第三代航空齿轮钢圆柱齿轮的弯曲应力极限为687.6 MPa,第三代齿轮钢的齿轮弯曲疲劳性能相对于9310钢疲劳性能提高了14.2%,该材料在航空齿轮传动齿轮的弯曲疲劳特性方面体现出较大的优势。

关 键 词: 第三代航空齿轮钢; 弯曲疲劳强度; R-S-N曲线; 疲劳极限; 弯曲夹具

中图分类号: V233.1; TH113.1

文献标志码: A

Analyse bending fatigue strength test of cylindrical gear of third-generation aviation gear steel

TANG Xin^{1,2}, ZHU Rupeng¹, LIAO Meijun², XIONG Xingbo², TANG Peng²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, 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)

Abstract: Taking the third-generation aviation gear steel gear as the research object, the bending fatigue test of the cylindrical gear made of this material was carried out. The cylindrical gear for bending fatigue test was designed, and the calculation formula of the GB standard gear bending fixture was revised. The bending fatigue test was carried out for the gear of the material. The experimental data were analyzed, and the log-normal distribution and two-parameter Weibull distribution data processing methods were used to fit the data. The bending fatigue limit and R-S-N curve of the test gear were obtained. The performance of test gears and 9310 steel gear was compared and analyzed. The results showed that under the condition of 95% confidence degree

收稿日期: 2020-12-27

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,高级工程师,博士生,主要从事直升机传动、传动强度和振动的研究。

引用格式: 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.

and 99% reliability, the bending stress limit of 9310 steel gear was 602 MPa and the bending stress limit of the third-generation aviation gear steel gear was 687.6 MPa. The bending fatigue performance of the third-generation aviation gear steel gear was 14.2% higher than that of the 9310 steel, presenting great advantage in aviation gear transmission.

Key words: third-generation aviation gear steel; bending fatigue strength; R-S-N curve; fatigue limit; bending fixture

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。齿轮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、运转能力、寿命等核心指标均与之密切相关。随着航空发动机的不断更新发展,对齿轮承载能力和使用温度提出了更高的要求,要求齿轮钢具有优良的强度和疲劳特性。

目前国际上航空齿轮主要以 9310 钢、EX-53 (AMS 6308) 钢、15Cr14Co12Mo5Ni2WA 钢为代表的第 一、二、三代航空齿轮钢。其中,第二代齿轮钢 EX-53 (AMS 6308) 相对于 9310 钢,具有更高温度下的组织稳定性和抗高温应力松弛能力,可以承受比 9310 钢更高的服役环境。第三代齿轮钢,是一种具有强韧性、耐高温、耐腐蚀、耐磨损性能和疲劳强度的新一代航空齿轮钢,其材料性能指标相对 9310 钢和 EX-53 钢有较大的优势。但是由于对这种材料缺乏应用研究,目前还未掌握其应用在齿轮上的弯曲疲劳极限和 R-S-N (可靠-应力-寿命) 等重要材料性能,成为制约该材料在齿轮传动系统的应用的瓶颈,轮齿的疲劳失效是十分常见的突出问题^[1],急需得到该材料齿轮的弯曲疲劳极限和 R-S-N,保证设计的安全性。

疲劳失效通常指材料、构件或零件在循环应力或循环应变作用下,经过一段时间后突然断裂的现象。据统计,机械零件的破坏 50%~90% 为疲劳失效^[2]。为解决上述问题,国内外学者针对齿轮疲劳强度分析及其影响因素开展了大量的理论研究工作^[3-4]。对于航空齿轮而言,弯曲疲劳强度是衡量其传动性能的重要指标,是保障整个机构安全的关键^[5-7]。

何晓华^[8]针对 20CrMoH 齿轮的弯曲疲劳强度进行了分析和研究,得到了该材料的不同存活率下的疲劳寿命 (P-S-N) 曲线曲线,陈毅和马骋天等^[9-10]对 20CrMnMo 材料的齿轮的弯曲性能、齿根弯曲应力进行了测试;李铭等^[11]在恒定应力水平下进行齿轮弯曲疲劳试验,获得了 20CrMn-

Ti 渗碳齿轮的弯曲疲劳寿命数据。

Benedetti 等^[12]针对表面硬化的 16MnCr5 钢齿轮进行了弯曲疲劳试验,分析了该材料齿轮的发生断了的原因。Peng 等^[13]针对 9310 钢采用单齿弯曲法进行了疲劳试验,对比了激光强化对齿轮的影响。赵文杰等^[14]针对用于高铁使用的齿轮钢进行了循环变形下的性能研究。Won 等^[15]对第三代齿轮的重载条件下的静态拉伸性能进行了研究。Emami 等^[16]研究了第三代齿轮的静态强度和热处理工艺等。Savic 等^[17]研究了 3GAHSS 这种汽车车用第三代钢的使用情况。Chang 等^[18]研究了汽车车用第三代车用钢的热处理硬度层的剪切间隙对材料断裂的影响。综上所述,针对第三代航空用齿轮钢的弯曲疲劳性能的研究还比较少,目前还未见第三代齿轮钢弯曲疲劳极限及 R-S-N 曲线结果。

本文针对 15Cr14Co12Mo5Ni2WA 钢 (第三代航空齿轮钢) 材料的齿轮的弯曲疲劳性能进行研究,通过对比第三代航空齿轮钢和第一代航空齿轮钢的性能差距,给出其在航空齿轮设计中的指导数值。本文确定了该材料的试验方案、夹具参数及数据处理方法,对该材料圆柱齿轮轮齿进行了弯曲疲劳试验,依据试验结果得到寿命经验分布函数,按对数正态分布、二参数威布尔分布对数据进行了拟合,得到了齿轮材料弯曲疲劳极限及 R-S-N 曲线,并比较分析了第一代齿轮钢和第三代齿轮钢轮齿的疲劳性能差异。

1 弯曲疲劳强度试验方法

1.1 试验齿轮设计

常温下第一、二、三代航空齿轮钢的静力学性能如表 1 所示,由表可知,第三代齿轮钢在抗拉强度、屈服强度、渗碳后硬度和使用温度方面都得到了较大的提升,但其疲劳特性未知需要进一步研究。

GB/T 14230-93《齿轮弯曲疲劳强度试验方法》对齿轮的弯曲疲劳方法进行了详细的规定,本

文采用标准规定的齿轮脉动加载试验法(B 试验法)进行第三代齿轮钢齿轮的弯曲疲劳强研究,根据标准规定的试验齿轮参数和精度,设计试验齿轮参数如表 2 所示。

表 1 三代航空齿轮钢性能对比

Table 1 Performances comparison of three generations aviation gear steel

齿轮钢代数	典型材料	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	渗碳后硬度	使用温度/℃
第一代	9310	1 240	1 040	58~62	150
第二代	AMS6308(10CrNi2-Mo3Cu2V)	1 170	965	60~63	300
第三代	15Cr14Co-12Mo5Ni2WA	1 760	1 336	60~68	500

表 2 弯曲疲劳 S-N 曲线试验齿轮参数

Table 2 Test gear parameters of bending fatigue

S-N curve	
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 级

1.2 试验方法

采用“B 试验法”进行试验时,需要参考标准 GB/T 14230-1993 设计脉动疲劳试验机上专用齿轮试验夹具,国标中夹具设计计算的跨齿数 n 和载荷作用点压力角 α_E 的计算存在问题,本文对其计算公式进行修正,具体计算公式如下:

国标给出的计算跨齿数 $n^{[19]}$ 为

$$n \approx \frac{Z}{2\pi} \left[\pi - 2 \tan \alpha_a - \frac{1}{Z} (\pi - 4x \tan \alpha) + \operatorname{inv} \alpha \right] + 0.5 \quad (1)$$

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, $\operatorname{inv}(\cdot)$ 为渐开线函数。

国标给出的载荷作用点 E 点的压力角 $\alpha_E^{[19]}$

$$\tan \alpha_E = \frac{n}{2Z} (Z - 2n - 1) + \frac{2x \tan \alpha}{Z} + \operatorname{inv} \alpha \quad (2)$$

本文采用文献[20]给出的计算跨齿数 n 为

$$n \approx \frac{Z}{2\pi} \cdot$$

$$\left[\pi - 2 \tan \alpha_a - \frac{1}{Z} (\pi - 4x \tan \alpha) - 2Z \operatorname{inv} \alpha \right] \quad (3)$$

修正文献[21]给出作用点 E 点压力角 α_E

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

根据试验齿轮的参数计算夹具参数如表 3 所示,夹具的具体设计尺寸如图 1 所示。

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,直至轮齿出现弯曲疲劳失效或越出。试验终止并获得轮齿在试验应力下的一个

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

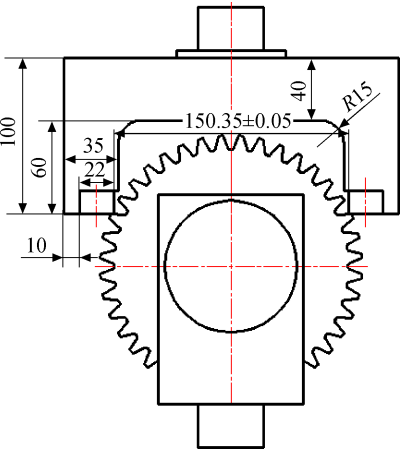


图 1 双齿脉动加载示意图(单位:mm)

Fig.1 Double tooth pulsation loading diagram (unit: mm)

寿命数据。试验中,脉动载荷仅施加在试验轮齿对称的单个轮齿上,试验齿轮不做啮合运转,为了减小试验轮齿对相邻轮齿的寿命影响,试验过程中所选取的试验轮齿,与加过载荷的轮齿(包括支承齿)至少应间隔一个轮齿。

使用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为 $R=0$,因此脉动循环齿根应力需要转化,具体转化方法见GB/T 14230-1993规定所示。

1) 疲劳极限应力测试

齿轮弯曲寿命的无限寿命区,采用升降法测试疲劳极限应力。试验时指定“循环基数 N_0 ”(根据GB3480规定,本文采用 $N_0=3\times 10^6$ 次作为循环基数^[12])下测定“疲劳极限”,若轮齿发生破坏并逐渐降低应力水平。试件在第 i 级最大应力 S_i 作用下未达到循环基数 N_0 发生破坏,而在较低的第 $i+1$ 级最大应力 S_{i+1} 作用下“越出”(达到循环基数未破坏),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。本试验固定应力水平升降区间(即增量或减量)为20~25 MPa。

2) R-S-N曲线测定

齿轮有限寿命区采用常规成组法测定试验齿轮的R-S-N曲线。试验时取若干个应力水平进行试验。最高应力级中的各试验点的弯曲应力循环次数应不低于 0.5×10^5 次,最高应力级与次高应力级的应力间隔为总试验应力范围的40%~50%,随着应力降低,应力间隔逐渐减小,最低应力级中至少有一个试验点越出。

3) 试验终止条件

试验中若出现下列情况之一,均应判为失效:

- (1) 齿轮齿根出现可见疲劳裂纹。
- (2) 载荷或频率下降5%~10%。
- (3) 沿齿根断齿。

1.3 试验数据处理方法^[10]

由于齿轮的疲劳寿命和疲劳强度具有随机现象,而随机现象的数量规律一般只能根据数量有限的样本观测值来估计。

1) 寿命经验分布函数计算

齿轮弯曲疲劳试验,采用双齿加载形式试验的数据处理方法进行处理,其失效顺序用平均顺序法计算,当对 P 对轮齿加载时,有 r 个齿失效($r\leq P$)。取 $n=2P$,寿命经验分布函数值应按下式计算:

$$F(N_i) = \frac{A_i}{n_b + 1} \quad (5)$$

式中 n_b 为试验轮齿总数, A_i 为试验点寿命数值由小到大排列的平均顺序。

$$A_i = A_i + \frac{n_b + 1 - A_{i-1}}{n_b + 1 - 2i} \quad (6)$$

式中 i 为失效试验点单独排列的顺序。

在未知试验齿轮的寿命分布函数时,一般采用对数正态分布或二参数威布尔分布进行分布检验,确定分布类型,两种分布函数分别为

$$F(N_i) = \phi\left(\frac{N_i - \mu_n}{\sigma_n}\right) \quad (7)$$

$$F(N_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N_i}{b}\right)^k\right] \quad (8)$$

式中 N_i 齿根应力循环次数; μ_n 为对数分布函数母体对数平均值; σ_n 为对数分布函数母体对数标准差; b 为威布尔分布函数的尺度参数; k 为威布尔分布函数的形状参数。

2) 寿命分布函数的拟合与检验

采用最小二乘法进行寿命分布的拟合优度检验,其具体步骤如下:

(1) 通过寿命经验分布函数计算得到 $F(N_i)$ 。

(2) 分布函数的拟合。

按对数正态分布拟合时,拟合公式为

$$\phi^{-1}(F(N_i)) = \frac{1}{\sigma_{\ln N}} (\ln N_i - \mu_{\ln N}) \quad (9)$$

按二参数威布尔分布拟合时,拟合公式为

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(N_i)} = k(\ln N_i - \ln b) \quad (10)$$

3) R-S-N曲线参数的确定

(1) 按确定的寿命分布函数计算不同可靠度 R 的寿命值。对于对数正态分布,其计算公式为

$$N_i = \exp[\mu_{\ln N} + \sigma_{\ln N} \phi^{-1}(1 - R)] \quad (11)$$

对于二参数威布尔分布,其计算公式为

$$N_i = b \left[\ln \frac{1}{R} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (12)$$

(2) 拟合R-S-N曲线

齿轮弯曲疲劳曲线倾斜段方程(对数坐标中为直线方程)的形式为

$$m \lg \sigma_f + \lg N_i = \lg C \quad (13)$$

式中 σ_f 为对应的 N_i 寿命下疲劳极限; m 为方程指数; C 为方程常数。

以各应力级相同可靠度的应力-寿命作为子样,按上述公式用最小二乘法拟合,可以得到一系列不同可靠度的S-N曲线,即R-S-N曲线。

值得注意的是在低应力级下有寿命越出点, 则高可靠度 S-N 曲线通常会失真, 此时应根据相关系数剔除异常数据, 依靠其余可靠度的 S-N 曲线来确定特定寿命级下的极限弯曲应力。

2 弯曲疲劳试验及分析

根据上述疲劳强度的测试方案, 对加工的 5 组试验齿轮的弯曲疲劳强度进行测试, 试验加载过程见图 2, 试验完成后的齿轮和断齿如图 3 所示。



图2 试验过程
Fig.2 Test process



(a)



(b)

图3 试验后齿轮及断齿
Fig.3 Gear and broken teeth after test

为了得到真实的数据, 每个应力等级的试验样本来自 5 个试验齿轮, 即在每个试验齿轮上进行各个应力等级的试验, 保证每个应力等级的试验样本数据的来自不同的齿轮。

2.1 弯曲疲劳试验数据

齿轮的无限寿命区采用升降试验法进行测试, 试验齿轮升降试验结果如图 4 所示。有限寿命区用恒定应力水平试验法获得 3 个应力水平失效寿命见表 4 所示, 每个应力水平测量 5 个点。

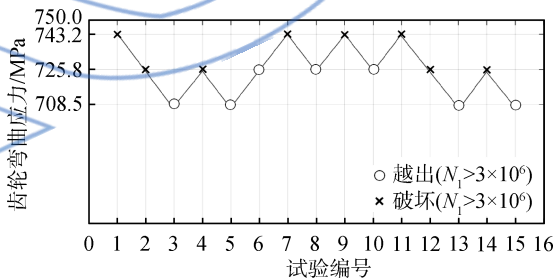


图4 试验齿轮长寿命区升降法试验图
Fig.4 Test drawing of long-life zone lifting and lowering method of test gear

表 4 试验齿轮寿命(按寿命长短排序)
Table 4 Life of test gear (sort by life span)

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

2.2 弯曲疲劳极限分析

无限寿命区的试验数据采用对数正态分布、二参数威布尔分布方法进行拟合得到齿轮的在不同可靠度下的弯曲疲劳极限。95% 置信度下, 采

用对数正态分布拟合时疲劳极限如表 5 所示, 其相关系数 $r=0.837\ 7$; 95% 置信度下, 采用二参数威布尔分布时其疲劳极限如表 6 所示, 其相关系数 $r=0.803\ 1$ 。经过分析可以得到在 99% 的可靠

表 5 齿轮弯曲疲劳极限(对数正态分布)
Table 5 Gear bending fatigue limit
(lognormal distribution)

可靠度/%	弯曲疲劳极限/MPa	寿命/ 10^6 次
95	695.8	≥ 3
96	694.5	≥ 3
97	692.9	≥ 3
98	690.9	≥ 3
99	687.6	≥ 3

表 6 齿轮弯曲疲劳极限(二参数威布尔分布)
Table 6 Gear bending fatigue limit
(two parameter Weibull distribution)

可靠度/%	弯曲疲劳极限/MPa	寿命/ 10^6 次
95	690.0	≥ 3
96	687.7	≥ 3
97	684.7	≥ 3
98	680.5	≥ 3
99	673.4	≥ 3

度下第三代齿轮钢的无限寿命区的应力采用对数正态分布拟合时已经达到了 687.6 MPa,采用二参数威布尔分布拟合时达到 673.4 MPa,基于二参数威布尔分布得到的齿轮疲劳极限更保守。

根据本单位前期第一代齿轮钢(9310)钢试验结果,第一代齿轮钢采用对数正态分布拟合时的齿轮弯曲疲劳极限 602 MPa,第三代航空齿轮钢齿轮的应力水平提高了 14.2%,提高了航空齿轮传动系统的可靠性。

2.3 弯曲疲劳寿命 R-S-N 曲线拟合

对有限寿命区的试验结果表 4 进行数据分析,95% 置信度下,采用对数正态分布和二参数威布尔分布进行拟合,分析在置信度为 95% 下的不同可靠度的 R-S-N 曲线,最终得到第三代齿轮钢齿轮的 R-S-N 曲线。

2.3.1 基于对数正态分布拟合分析

1) 寿命分布函数拟合

试验齿轮的寿命(循环次数)与可靠度的之间的数据如表 7 所示,相关系数为 $r_{92\%}=0.914\ 4$; $r_{96\%}=0.953\ 1$; $r_{98\%}=0.933\ 4$ 。

2) 弯曲疲劳寿命 R-S-N 曲线拟合

95% 置信度下,对有限寿命区载荷下的齿轮

表 7 有限寿命区齿轮弯曲疲劳寿命(对数正态分布)
Table 7 Gear bending fatigue life in finite life region
(lognormal distribution)

可靠度/ %	齿轮疲劳寿命/次		
	$\sigma_t =$ 778.0 MPa	$\sigma_t =$ 812.9 MPa	$\sigma_t =$ 830.4 MPa
95	508 773	193 325	56 737
96	484 934	183 121	53 669
97	457 152	171 311	50 125
98	422 670	156 783	45 773
99	373 524	136 345	39 667

弯曲疲劳数据进行 S-N 曲线方程拟合,拟合参数结果如表 8 所示,R-S-N 曲线见图 5 所示,根据拟合的曲线可得到,在可靠度为 99% 时该材料的弯曲疲劳极限为 696.7 MPa,与采用升降法得到的疲劳极限 687.6 MPa 误差较小,S-N 曲线可信度较高。第一代齿轮钢的 S-N 曲线如图 6 所示(本单位前期试验结果)。由图 5 和图 6 可知,第三代齿轮钢在有限寿命区的许用应力要高于,在相同的载荷下,第三代齿轮钢齿轮具有更高的寿命,更轻的质量,具有突出的优势。

表 8 最小二乘法拟合参数(对数正态分布)
Table 8 Least square fitting parameter
(lognormal distribution)

可靠度/%	方程指数 m	方程常数 $\lg C$
95	-0.045 6	3.144 0
96	-0.045 6	3.143 1
97	-0.045 5	3.141 4
98	-0.045 2	3.138 2
99	-0.045 0	3.134 4

2.3.2 基于二参数威布尔分布的拟合分析

1) 寿命分布函数拟合

95% 置信度下,基于二参数威布尔分布拟合,试验齿轮的寿命(循环次数)与可靠度的之间的数据如表 9 所示,相关系数为 $r_{92\%}=0.936\ 4$; $r_{96\%}=0.865\ 4$; $r_{98\%}=0.940\ 5$ 。

2) 弯曲疲劳寿命 R-S-N 曲线拟合

95% 置信度下,基于二参数威布尔分布拟合试验齿轮弯曲疲劳曲线方程参数和拟合曲线的疲劳极限结果如表 10 所示,R-S-N 曲线见图 7 所示,

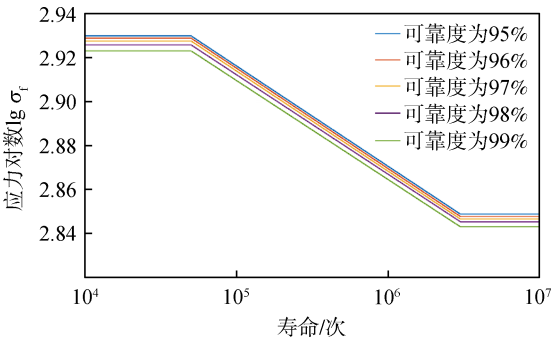


图5 第三代齿轮钢齿轮 R-S-N 曲线(对数正态分布)
Fig.5 Third-generation gear steel gear R-S-N curve (lognormal distribution)

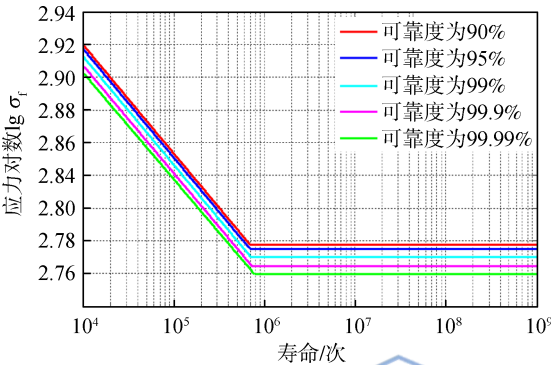


图6 第一代齿轮钢齿轮 R-S-N 曲线(对数正态分布)
Fig.6 First-generation gear steel Gear R-S-N curve (lognormal distribution)

表9 有限寿命区齿轮弯曲疲劳寿命(二参数威布尔分布)
Table 9 Gear bending fatigue life in finite life region (two parameter Weibull distribution)

可靠度 / %	齿轮疲劳寿命 / 次		
	$\sigma_f = 778.0 \text{ MPa}$	$\sigma_f = 812.9 \text{ MPa}$	$\sigma_f = 830.4 \text{ MPa}$
95	417 091	147 291	43 730
96	382 341	132 919	39 429
97	341 980	116 521	34 526
98	292 462	96 880	28 661
99	224 154	70 777	20 883

根据拟合的曲线可得到,在可靠度为 $R=99\%$ 时该材料的弯曲疲劳极限为 681.5 MPa,与采用升降法得到的疲劳极限 673.4 MPa 误差较小,S-N 曲线可信度较高。第一代齿轮钢的 S-N 曲线如图 8 所示(本单位前期试验结果)。

由图 7 和图 8 的比较结果与由图 5 和图 6 的结果相同,再次表明第三代齿轮钢在弯曲强度方面具有较大的优势。

表 10 最小二乘法拟合参数(二参数威布尔分布)
Table 10 Least square fitting parameter (two parameter Weibull distribution)

可靠度 / %	方程指数 m	方程常数 $\lg C$
95	-0.044 9	3.136 0
96	-0.044 8	3.133 4
97	-0.044 7	3.130 4
98	-0.044 1	3.124 0
99	-0.043 7	3.116 6

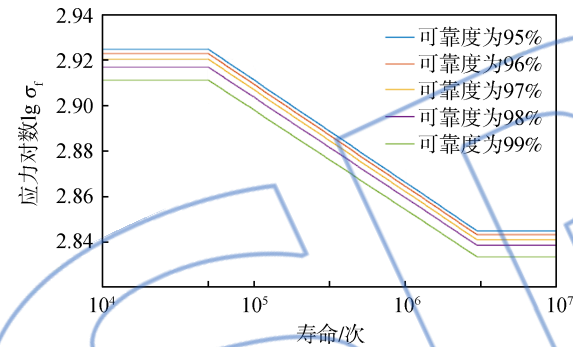


图7 第三代齿轮钢齿轮 R-S-N 曲线(二参数威布尔分布)
Fig.7 Third-generation gear steel gear R-S-N curve (two parameter Weibull distribution)

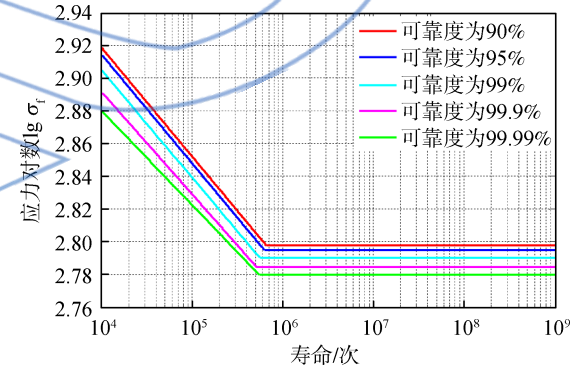


图8 第一代齿轮钢齿轮 R-S-N 曲线(二参数威布尔分布)
Fig.8 First-generation gear steel gear R-S-N curve (two parameter Weibull distribution)

采用对数正态分布拟合和二参数威布尔分布的拟合的 R-S-N 曲线得到的弯曲疲劳极限与升降法的到极限数值差距较小,同时验证了拟合曲线的准确性和可靠性。

3 结 论

本文以第三代航空齿轮钢圆柱齿轮弯曲疲劳性能作为研究对象,根据国标 GB/T 14230-1993 制定了试验方案,对国标的夹具计算存在的缺陷进行了修正,设计了试验齿轮和专用夹具,采用

“B 试验法”开展了第三代齿轮钢齿轮弯曲疲劳试验,进行了试验数据处理,得到了第三代齿轮钢齿轮弯曲应力疲劳极限和不同可靠度下的结果。

1) 完善了国标 GB/T 14230-1993 的“B 试验法”专用夹具的跨齿数和载荷作用点的压力角的计算公式,设计了脉动疲劳试验机齿轮试验专用的齿轮和夹具。

2) 采用对数正态分布、二参数威布尔分布数据处理方法,对长寿命区的试验数据进行了分析,试验齿轮在可靠度为 99% 时,基于对数正态分布拟合齿轮齿根弯曲疲劳极限应力是 687.6 MPa,基于二参数威布尔分布齿轮齿根弯曲疲劳极限应力是 673.4 MPa;基于二参数威布尔分布得到的齿轮疲劳极限更保守。

3) 在短寿命区内,第三代齿轮钢试验齿轮在可靠度为 99% 时,基于对数正态分布 S 曲线方程指数 $m = -0.0450$,方程常数 $\lg C = 3.1344$;基于两参数威布尔分布方程指数 $m = -0.0437$,方程常数 $\lg C = 3.1166$,对数正态分布、二参数威布尔分布两个方法拟合公式两者差异较小。同时拟合曲线的上的弯曲疲劳极限数值与采用升降法的数值误差较小,同时验证了拟合曲线的准确性和可靠性。

4) 第三代齿轮钢齿轮在长寿命区齿轮齿根弯曲疲劳极限应力较第一代齿轮钢齿轮提高了 14.2%;在短寿命区内相同在循环次数下其许用应力有较大提高;与第一代齿轮钢相比第三代齿轮钢在航空齿轮传动方面具有较大的优势。

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,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),2001,7(3):205-208.
FAN Junxing, DENG Zhaoyi. Reliability optimization design of aviation gears transmission[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2001, 7(3): 205-208. (in Chinese)
- [8] 何晓华.20CrMoH 齿轮弯曲疲劳强度研究[D].重庆:重庆大学,2011.
HE Xiaohua. The study of bending fatigue strength of 20CrMoH gear[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [9] 陈毅.20CrMnMo 齿轮齿根残余应力理论及试验研究[D].重庆:重庆大学,2013.
CHEN Yi. Theoretical and experimental researches of 20CrMnMo gear root residual stresses[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [10] 马骋天,李纪强,陈宏,等.20CrMnMo 齿轮弯曲疲劳性能试验研究[J].内燃机与配件,2018(14):5-6.
MA Pintian, LI Jiqiang, CHEN Hong, et al. Experimental study on bending fatigue performance of 20CrMnMo Gear [J]. Internal Combustion Engine and Parts, 2018(14): 5-6. (in Chinese)
- [11] 李铭,谢里阳,张宇,等.齿轮的概率寿命预测与弯曲疲劳试验[J].机械工程学报,2017,53(18):169-175.
LI Ming, XIE Liyang, ZHANG Yu, et al. Probabilistic life prediction and bending fatigue test for gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 169-175. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] PENG Chong, XIAO Yuzhe, WANG Yanzhong, et al. Effect of laser shock peening on bending fatigue performance of AISI 9310 steel spur gear[J]. Optics and Laser Technology, 2017, 94: 15-24.
- [14] 赵文杰,杨绍普,任学红,等.高铁齿轮钢 18CrNiMo7-6 循环变形行为实验和本构模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(6):52-58.
ZHAO Wenjie, YANG Shaopu, REN Xuehong, et al. Cyclic deformation experiment and constitutive model of high-speed railway gear steel 18CrNiMo7-6[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(6): 52-58. (in Chinese)
- [15] WON C, LEE W, LEE H Y, et al. Evaluation of in-plane

- edge stretchability under severe contact condition for third-generation advanced high-strength steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(9):1-14.
- [16] EMAMI M, ASKARI-PAYKANI M, FARABI E, et al. Development of new third-generation medium manganese advanced high-strength steels elaborating hot-rolling and inter-cortical annealing[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2019, 50(9):1-14.
- [17] SAVIC V, HECTOR L, SINGH H, et al. Development of a lightweight third-generation advanced high-strength steel (3GAHSS) vehicle body structure[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2018, 11(4):303-313.
- [18] CHANG Ying, HAN Shuo, LI Xiaodong, et al. Effect of shearing clearance on formability of sheared edge of the third-generation automotive medium-Mn steel with metastable austenite[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 2018, 259:216-227.
- [19] 张照智, 关焯, 谈嘉祯, 等. 齿轮弯曲疲劳强度试验方法: GB/T 14230-1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993:1-12.
- [20] 朱孝录, 鄂中凯. 齿轮承载能力分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [21] 唐定国, 鄂中凯, 朱孝禄, 等. 渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法: GB/T 3480-1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 1-80.

(编辑: 张 雪)

深切缅怀王震华教授

《航空动力学报》原副主编、首任编辑部主任王震华教授因病医治无效, 于2021年8月3日在北京逝世, 享年90岁。我们对王震华教授的逝世表示沉重的悼念和深切的缅怀。

王震华教授1931年2月21日出生, 中国共产党党员, 是《航空动力学报》的创办人之一。自1986年《航空动力学报》创刊以来, 担任第一届编委会委员, 第二届、第三届、第四届副主编, 并担任第一届至第四届编辑部主任。王震华教授为人正直、襟怀坦荡、严于律己, 在担任编辑部主任和副主编期间, 十几年如一日勤奋工作, 为学报的创建和发展作出了重要的贡献。

王震华教授严谨治学、锲而不舍的工作作风和为人师表、平易近人、勤勤恳恳、鞠躬尽瘁的精神是我们学习的表率 and 楷模。

《航空动力学报》编辑部