

# 某型发动机传动装置齿轮齿面剥落问题研究

卫仁杰

中国航发成都发动机有限公司 四川 成都 610500

**[摘要]** 齿轮作为航空发动机传动装置的重要组成部分之一，其性能的优劣在一定程度上决定着航空发动机的质量水平。长期以来，国内外航空发动机传动装置技术人员都非常注重研究齿轮损伤，损伤不是材料的本性，而是系统特性。齿面剥落属于齿面损伤中较为严重的一种损伤形式，本文通过某型发动机传动装置齿轮齿面剥落问题，系统的研究其形成机理，提出改善建议。

**[关键词]** 传动装置；齿轮；剥落

**[DOI]** 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.11.601

## 1 引言

齿轮及传动装置是航空发动机的重要部件之一。它传递扭矩，驱动保证发动机正常工作的各种附件。从发动机的启动到正常工作，它都起着协调和维持作用。齿轮及传动装置正常工作与否直接关系到发动机能否正常工作。随着航空发动机的发展，附件传动装置转速越来越高，对传递功率的要求也越来越大，预防齿轮损伤导致的安全事故已成为航空发动机设计、生产、制造的重点工作。

齿面剥落是齿轮常见的一种故障形式，多是由于高负荷引起表面下材料疲劳，大的金属片从齿面脱落或剥离而形成齿面损伤，多见于表面硬化齿轮，其原因大多是硬化层厚度和心部硬度不适当、残余应力过大导致。

## 2 典型问题原因与对策

针对齿轮齿面剥落的现象，根据剥落形成的故障机理，总结了导致齿面剥落的常见原因及解决措施，具体信息见表1。

表1 常见剥落原因和解决措施

常见原因	对策
对齿轮承受的载荷估计不足，齿面强度及硬度不足。	改变齿轮参数，尤其改变与齿面强度相关的参数。
齿面深度方向硬度分布不良。	改善材料：热处理方法，材质的改进。 改变齿轮形式，例如直齿改成斜齿。 研究齿轮腹板、系统的振动因素。
使用条件的变化。	重新检查运转条件和载荷。
动负荷增加，负荷过大。	改良激振源，提高齿轮精度。
驱动轴系的振动（负荷、扭矩的变动）	改变齿轮参数、热处理和材质。 充分掌握作为主体装置的振动特性。 轴系中设置缓冲装置。
齿接触不良。	提高精度。
装配精度不良。	重新检查齿的接触状况。
齿面光洁度不良。	充分磨合运转。 重新研究磨削工序，仔细进行磨削加工。 齿形、齿向修形。 改变齿轮参数、材料。
齿顶干涉。	提高轴平行度和装配精度。
轴、齿轮箱的误差、变形。	提高齿轮、轴、箱体等的刚性。 变更轴承或改变轴承种类。 重新研究热特性。
润滑油不当	分析供油量是否适当。 考虑添加剂（EP极压剂、氧化稳定剂等） 改变滑油种类 调整供油压力。 改变滑油黏度和黏度指数。 改善供油方式。

下面通过对某型发动机后传动机匣齿轮副齿面剥落问题研究，从选材、加工、热处理、润滑、装配等多方面进行分析，借助有限元分析手段，研究影响齿轮可靠性的因素，提出改进措施。

## 3 问题分析

### 3.1 结构与参数

某型发动机后传动机匣齿轮副随发动机完成持久试车后，发现相啮合双联齿轮A、齿轮B共4处轮齿工作面分度圆附近齿面剥落，宽度约2mm。

A、B均为双联齿轮，其中B为组件，其单件分别为大齿轮B1、小齿轮B2。齿轮A窄齿与后传动机匣输入齿轮啮合，宽齿与B中的B1啮合，B中的B2与行星齿轮架啮合，带动的附件包括交流发电机、恒速传动调节器、转速传感器，工作参数见表2。

### 3.2 设计选材

B1和B2早期图样规定材料为12Cr2Ni4A，后期更改为16Cr3NiWMoVnNbE，两种材料性能对比见表3。经复查，发生齿面剥落的齿轮按早期图纸生产，材料为12Cr2Ni4A，齿轮A材料一直为16Cr3NiWMoVnNbE。

### 3.3 理化分析

#### 3.3.1 外观观察

损伤分布于整个圆周方向上的所有工作齿面，而起动面未见损伤痕迹。

#### 3.3.2 齿面损伤痕迹分析

对B1、B2、A齿轮按照损伤程度切取三个有代表性的轮齿在显微镜下观察，形貌相似，图1为A齿面形貌。

由图可见，损伤区域大致可分为三部分。区域1存在沿齿高方向的磨损，在与区域2交界处可见分层现象，该区域基体表面附着一层外来材料；区域2可见较明显的剥落损伤痕迹；区域3同样存在沿齿高方向的磨损痕迹，并在区域下方可观察到明显与相配合齿顶的刮擦痕迹。

#### 3.3.3 化学成分分析

对齿轮副进行化学成分分析，B1、B2符合12Cr2Ni4A技术要求，A符合16Cr3NiWMoVnNbE技术要求，均符合当时图纸要求。

#### 3.3.4 高倍分析

对近齿顶、分度圆、近齿根、齿根圆角未啮合部位表面及心部金相组织进行了观察。

近齿顶部位基体表面存在一层厚度约4 μm的附着层，附着层与基体之间还可见一层不完全连续的白亮层。该附着层应为近齿顶部位表面与配合齿轮近齿根部位表面在啮合过程中产生胶合，材料转移形成；白亮层应为啮合过程中齿面摩擦表面大量生热所形成的极薄淬火烧伤层。近齿根部位与近齿顶部位形貌相似；

分度圆部位表面可见厚度约32 μm的接触疲劳剥落坑。

齿根圆角的未啮合部位表面未见烧伤、脱碳、增碳等缺陷，心部组织符合相应技术要求。

以上各部位表面除存在材料转移层、淬火烧伤层、剥落等缺陷外，其余渗层金相组织及非工作面渗层金相组织未见

表 2 齿轮副工作参数表

序号	件号	材料	热处理	齿面硬度	工作转速 (r/min)	分度圆处线速度 (m/s)	传递功率 (kW)
1	A	16Cr3NiWMoVNbE	氰化 (0.6~1.2) mm	HRC≥60	10100.4684	39.64	69.2
2	B1	12Cr2Ni4A	氰化 (0.6~1.2) mm	HRC≥61	6733.6456	39.64	69.2
3	B2	12Cr2Ni4A	氰化 (0.6~1.2) mm	HRC≥61	6733.6456	27.75	69.2

表 3 材料性能对比

序号	材料	回火温度/℃	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ %	$\psi$ %	$A_{k0.2}$ J
1	12Cr2Ni4A	140~160	980	785	12	45	71
2	16Cr3NiWMoVNbE	190~210	1270	1130	10	50	51

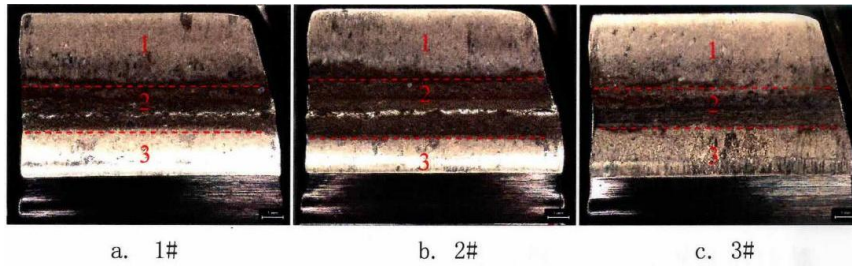


图 1 齿面损伤形貌

异常。

3.3.5 硬度检测

在损伤齿面金相试片上进行硬度检测，均符合图纸要求。

3.3.6 渗层深度检测

在损伤齿面金相试片上进行渗层深度和硬度检测，均符合图纸要求，深层硬度随深层深度增加平缓降低，未发现硬度突降现象。

3.4 设计强度分析

将齿轮B分别按12Cr2Ni4A和16Cr3NiWMoVNbE两种材料进行强度计算，计算结果见表6，可见12Cr2Ni4A接触疲劳安全系数略低于16Cr3NiWMoVNbE。

表4 两种材料齿轮啮合安全系数

件号	A	B1	A	B1
材料	12Cr2Ni4A		16Cr3NiWMoVNbE	
接触强度	1.306	1.371	1.393	1.462
弯曲强度	3.96		4.13	
胶合强度	1.4		1.4	

3.5 齿廓修形分析

齿轮B1与A图样未规定齿廓修形，通过ANSYS软件分析，齿轮B1与A啮合时，齿面分度圆附近变形量约0.0005mm，变形量较小，不需要修形。

3.6 润滑分析

小齿轮B2为喷嘴强制润滑，相啮合的B1与A为飞溅润滑，根据《航空发动机手册》第18册，当齿轮的圆周速度低于10m/s时，通常采用飞溅润滑；当高于10m/s时，推荐采用喷射或油雾润滑；当齿轮圆周速度超过35m/s时，应保证供给齿轮足够数量的润滑油来带走齿轮啮合时产生的摩擦热。

通过表1可以看出，齿轮B1、A分度圆处圆周速度超过35m/s，现有润滑方式存在润滑不足的情况。

3.7 选材分析

齿轮B1、B2材料均为12Cr2Ni4A，要求若在100h以上长期保持HRC≥58的硬度，齿轮的工作温度不能超过150℃。该型号后传动机匣规定滑油回油温度不超过120℃，实际工

作齿面温度高于150℃，因此齿轮B1、B2材料不适宜选用12Cr2Ni4A。

3.8 总结

(a) 剥落齿轮化学成分、齿面硬度、心部硬度、渗层及心部组织均符合技术要求，齿面参数基本符合要求，排除加工及冶金质量导致剥落的可能性。

(b) 齿轮与轴承配合的轴径表面痕迹均匀一致，未见明显损伤及偏载痕迹，剥落齿面也无明显偏载痕迹，可以排除壳体尺寸不合格导致偏载的可能性。

(c) 12Cr2Ni4A高温性能不能满足后传动机匣的工作要求，同时该对齿轮副为飞溅润滑，效果不佳，长时间工作后齿面出现胶合、剥落，然后导致小齿轮B2啮合异常，齿面逐渐出现胶合、剥落。

4 结论和建议

齿轮B1、B2材料12Cr2Ni4A高温性能不能满足使用要求为导致剥落的主要因素。

该对齿轮副分度圆处圆周速度高于10m/s时，润滑结构设计不合理为次要原因，应增加喷射强制润滑结构。

12Cr2Ni4A要求若在100h以上长期保持HRC≥58的硬度，齿轮的工作温度不能超过150℃。因此较高温度下工作的齿轮，应采用热强钢制造。对接触区温度达到350℃~400℃的高应力齿轮和摩擦零件，推荐采用16Cr3NiWMoVNbE热强渗碳钢。该对齿轮工作温度超过150℃，应选用16Cr3NiWMoVNbE材料。

参考文献

[1] 孙大涌, 侯增寿, 樊东黎等. 热处理手册. 第1卷 工艺基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 8  
 [2] 徐灏主编. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995  
 [3] 高振声主编. 航空发动机设计手册18册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004  
 [4] 王知行, 刘廷荣. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 2  
 [5] 宋宝玉, 王黎钦. 机械设计. 北京: 高等教育出版社, 2010