

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.07.016

齿面锈蚀对齿轮磷化质量的影响

赵清碧¹, 马勇^{2,3*}, 田晓丽³, 孙峰³, 郭秋彦¹

(1. 吉利汽车研究院(宁波)有限公司, 浙江 宁波 315336; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司, 浙江 宁波 315336)

摘要: 齿轮磷化是齿轮常用的一种表面处理方式。某型变速器磷化后齿轮在极限性能试验及耐久试验过程中发生了齿轮轮齿折断及齿面剥落的失效现象。通过宏观及微观形貌测试, 发现齿面有直径50 μm 以上, 深度50 μm 左右的凹坑; 通过工厂现场调查及后续试验分析, 确定是齿轮流转过程中发生锈蚀导致齿面凹坑, 继而在磷化过程中保留凹坑, 最终导致齿轮试验中失效。

关键词: 磷化; 齿轮失效; 凹坑; 锈蚀

中图分类号: TG441.8 **文献标识码:** A

Effect of tooth surface rust on the quality of gear phosphating

Zhao Qingbi¹, Ma Yong^{2,3*}, Tian Xiaoli³, Sun Feng³, Guo Qiuyan¹

(1. Geely Automobile Research Institute (Ningbo), Ningbo 315336, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Ningbo Geely Royal Engine Components Co., Ltd., Ningbo 315336, China)

Abstract: Gear phosphating is a commonly used surface treatment for gears. The failure phenomenon of gear tooth breaking and tooth surface peeling occurred during the ultimate performance test and durability test of a certain type of transmission after phosphating. Through macro and micro morphology test, it was found that the tooth surface has pits with a diameter of above 50 μm and depth of 50 μm . Through on-site investigation and subsequent experimental analysis in the factory, it was determined that corrosion occurred during the gear transferring process, and pitting on the tooth surface, which were then retained during the phosphating process, and ultimately led to failure in the gear test.

Keywords: phosphating; gear failure; pit; rusting

齿轮传动是新能源变速器常用的一种动力传动方式。为了适应新能源变速器转速高、扭矩大及响应快的特点, 经常在成品齿轮表面进行多种的表面处理工艺, 以达到特定的使用要求。当前表面强化常用的表面处理工艺有机械强化技术、高能束表面强化技术、热喷涂表面强化技术、CVD/PVD技术及

离子注入技术等。齿轮表面磷化是一种常用的工艺, 虽然有着较大的环保压力, 但是其工艺成熟, 处理过程成本低廉, 工艺过程简单, 是目前国内工业发展阶段较优的一种表面处理工艺^[1-4]。

本公司在进行某型号变速器研发阶段的试验时, 在不同的试验中均发生了磷化后齿轮轮齿折断

收稿日期: 2023-11-16

修回日期: 2023-12-13

作者简介: 赵清碧(1980—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为齿轮热处理工艺和金属材料性能, email: qingbi.zhao@geely.com

*通信作者: 马勇, 男, 高级工程师, 研究方向为变速器设计及试验开发、金属材料表面处理, email: dcmayong@126.com

的失效模式。故障齿轮属于工厂特制同批次零件,该批次零件专为新品研发使用。该产品工艺成熟,在同系列的变速器已经实现了量产。因此,需要快速找到失效原因,保证新品研发的时效及质量。

1 齿轮参数、使用工况及工艺介绍

失效齿轮为1挡主动齿轮,其材料为20MnCr5,属于渐开线斜齿轮。具体参数如下:模数2 mm、齿数63、变位系数0.4325、齿宽20 mm,润滑方式为飞溅润滑。发生失效的试验为稳态耐久试验,试验工况见表1。

表1 稳态耐久试验工况

Tab.1 Test conditions of steady state durability

挡位	输入转速/ ($r \cdot min^{-1}$)	输入扭矩/ ($N \cdot m$)	循环时 间/s	循环次数/ cycles	总时 间/h
1 st	3000	275	39.45	800	8.77

齿轮基本工艺流程为:毛坯→粗加工→滚齿→渗碳热处理→精加工→磷化→包装。采用车削、滚齿等多道工序将正火态的20MnCr5钢制毛坯加工成热处理前的齿轮样件,其化学成分如表2所示。

表2 20MnCr5元素含量

Tab.2 Element content of 20MnCr5

元素	Fe	C	Si	Mn	Cr
含量/at. %	97.02	0.18	0.30	1.30	1.20

热处理工艺为渗碳淬火,成品齿轮热处理技术要求为:渗层深度0.5~0.8 mm,表面硬度为650~700 HV₁,芯部硬度为400~500 HV₁。齿轮渗碳淬火热处理后,全齿面喷丸处理后进行珩齿,然后发送至磷化工序供应商处,对齿轮进行表面磷化处理,目的是减摩擦及车辆启停时抗轻微刮擦^[5-7]。

2 失效分析

2.1 失效现象及观察

1挡齿轮在表1所示工况进行测试,进行至30%试验进度时,发现试验失效。失效模式为轮齿折断,实物形貌见图1。轮齿折断定义为严重的齿轮失效故障,影响车辆安全。

从失效齿轮轮齿折断部位取样,用80~1000# SiC纸打磨材料表面,用酒精超声清洗齿轮样件,去除齿轮样件表面杂质。镶嵌试样后,依次用60~3000#的砂纸对要观察的截面进行打磨,用抛光机进



图1 轮齿折断失效模式

Fig. 1 Fracture failure mode of teeth

行抛光,并完成表面丙酮超声清洗。将4%硝酸酒精侵蚀后的试样吹干后,使用OLYMPUS-311U型金相显微镜观察截面的组织形貌。为了进一步分析失效机理,使用扫描电子显微镜(日立热场发射扫描电镜SU5000)对试样进行观察。

2.2 失效齿轮断口分析

对失效齿轮进行宏观观察,发现其中一个轮齿折断的起始位置为齿根未啮合区域(图2)。本批次齿轮已经在渗碳淬火后对齿轮根部进行了喷丸处理,可以在一定程度上增强齿根弯曲强度,原始设计计算结果说明齿根弯曲强度安全系数已经足够,可以保证表1中工况安全进行。同时调查其它批次产品使用情况,均未发现异常情况。

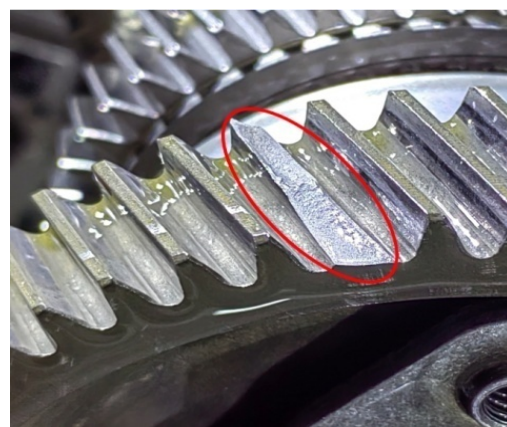


图2 轮齿折断失效宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of fracture failure of gear teeth

使用SU5000型扫描电镜对另外一个轮齿折断部分较少的轮齿进行观察。如图3所示,发现红圈内为断裂起始位置,向上及向左、向右均形成疲劳扩展区域,最后发生一定程度的瞬断,宏观表现为疲劳

断裂。



图3 轮齿折断起始位置

Fig.3 Starting position of gear tooth fracture

将图3红圈内断裂起始位置继续放大,可以观察到两个凹坑(图4),凹坑呈现半圆形状,凹坑的直径分别为57.53 μm 及53.78 μm 。

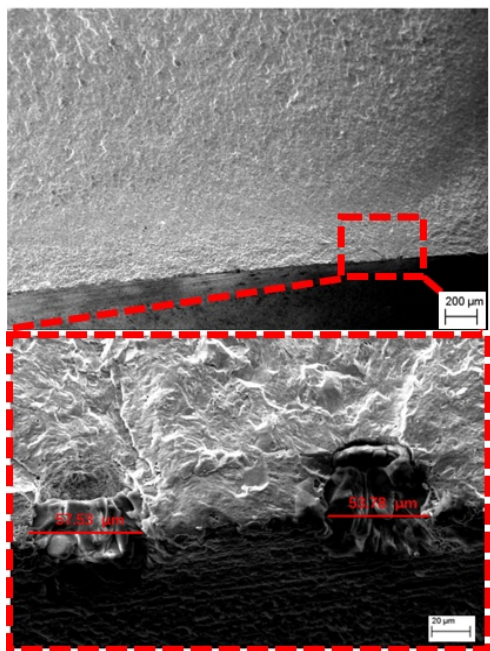


图4 轮齿折断起始位置微观凹坑

Fig.4 Micro indentation at the starting position of gear teeth fracture

进一步观察凹坑,可见凹坑内壁光滑,可见晶粒间的腐蚀痕迹,推测为酸性溶液腐蚀或者氧化腐蚀造成(图5)。对坑口晶粒物质进行EDS能谱分析,结果如表3所示。从表3可知,Mn元素及P元素的含量较高,明显高于表2中本体材料中合金相应合金元素含量,因此判断该晶粒物质为外来物质;结合磷化工序使用的Mn系磷化工工艺,推断凹坑坑口晶粒为磷化膜晶粒。由于宏观形貌初步判断为疲劳断

裂,因此需要在微观进行确认。观察裂纹扩展区,由图6可见明显的微观疲劳辉纹特征(红色箭头所指位置)。至此,可以判断轮齿折断为齿根处凹坑导致轮齿运行时产生应力集中,进而发生局部破坏,演化为疲劳断裂。下一步需要确认凹坑产生的原因。

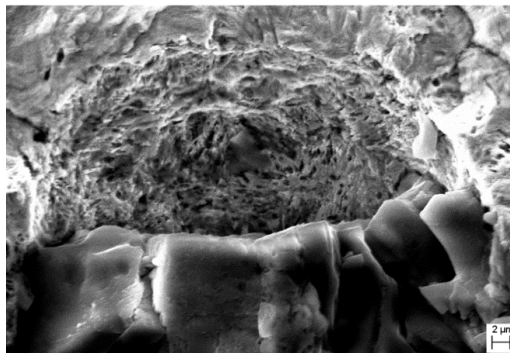


图5 微观凹坑细节

Fig.5 Details of microscopic pit

表3 凹坑坑口晶粒元素含量

Tab.3 Element content of grain at pit

元素	质量百分数/wt. %	原子百分数/at. %
O	45.37	70.45
P	14.27	11.44
Mn	20.73	9.38
Fe	19.63	8.73

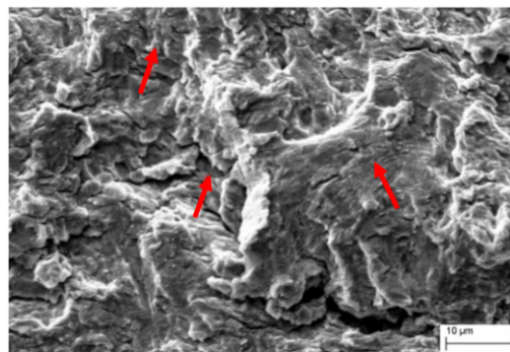


图6 裂纹扩展区疲劳辉纹

Fig.6 Fatigue striation in crack propagation zone

3 试验验证

3.1 试验介绍及准备

初步分析磷化工艺,认为凹坑有可能在磷化工艺过程产生及磷化前零件锈蚀缺陷引起^[8-9]。为此磷化前在齿轮零件上人为制造锈蚀缺陷,使用5 wt.%盐水腐蚀两件齿轮,同时使用两件完好齿轮作为对比组(见图7),同时进行磷化工艺试验。



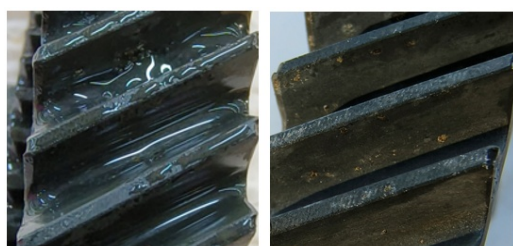
图7 锈蚀缺陷齿轮及完好齿轮

Fig.7 Rusted gears and intact gears

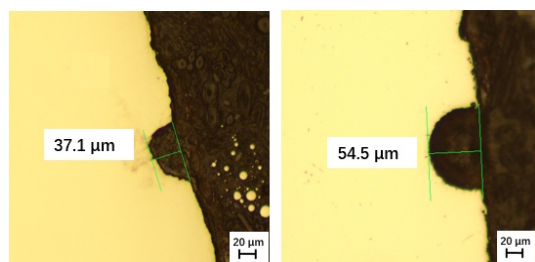
3.2 试验结果

完好齿轮及锈蚀齿轮磷化后轮齿局部见图8。从图8可以看出,完好齿轮磷化后表面质量良好,同时磷化过程中产生的凹坑不规则,符合公司内部相关技术文件规定的凹坑深度小于 $50\text{ }\mu\text{m}$;锈蚀齿轮磷化后,磷化膜无法完全覆盖锈蚀痕迹^[10],同时锈蚀凹坑形状较规则,一般呈半圆形、水滴形及椭圆形,且深度大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ ^[11]。

根据试验结果,及结合前文中对失效齿轮分析



(a) 完好齿轮磷化后表面 (b) 锈蚀齿轮磷化后表面



(c) 完好齿轮磷化后表面凹坑 (d) 锈蚀齿轮磷化后表面凹坑

图8 锈蚀缺陷齿轮及完好齿轮磷化后对比

Fig.8 Comparison of corroded and defective gears and intact gears after phosphating

结果,可以推断失效齿轮的凹坑形貌及大小同锈蚀后齿轮磷化后的凹坑形貌及大小相似。结合近期流转过程中遭遇几次台风气象干扰,可以判断本次失效的主要原因为齿轮转运过程中发生锈蚀导致。

4 结论

(1) 齿轮轮齿折断由齿根非啮合区域起源,起源位置有凹坑,该凹坑造成了齿轮运转时应力集中,发生破坏。

(2) 轮齿折断失效为有源疲劳失效,在裂纹扩展区发现了疲劳辉纹。

(3) 引起失效的凹坑为齿轮热后加工发送至磷化供应商处时,在流转过程中齿轮锈蚀导致。该锈蚀凹坑同正常磷化凹坑形貌及尺寸均不同。

参考文献

- [1] 贾森,陈勇,臧立彬,等.基于磷化涂层表面改性齿轮的温度场特性研究[J].机械传动,2018,42(4):23-26,32.
- [2] 赵利民,王树凤.齿轮用45钢锰系磷化膜和锰系复合磷化膜的性能比较[J].电镀与精饰,2020,42(8):13-17.
- [3] 王绪虎,王东飞,吕泮功,等.基于齿面磷化的齿轮抗胶合性能试验[J].机械传动,2020,44(11):134-138.
- [4] Chen X. Effect of manganese phosphating on properties of 45 steel used for gear production[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(3): 220326-220336.
- [5] 陈果.三种汽车零部件的磷化工艺[J].电镀与精饰,2009,31(11):24-27.
- [6] 李文平,赵冉磷.磷化处理对齿轮材料摩擦磨损特性的影响[J].汽车工艺与材料,2016(9):57-59.
- [7] Li G X, Chen Yg, Zang L, et al. Comparative study on transmission performance of manganese phosphate coated gears[J]. Coatings, 2021, 11(9): 1026-1026.
- [8] 廖福平,余登位,张钢,等.汽车齿轮锰系磷化质量优化浅析[J].热处理技术与装备,2020,41(1):11-16.
- [9] 颜晨曦,郝玉林,蔡宁,等.酸洗汽车用钢磷化机理探讨及其质量评价[J].电镀与精饰,2022,44(11):29-34.
- [10] 郑亚旭,王福明,王延露,等.20CrMnTi齿轮钢表面渗氮后的氧化处理工艺[J].材料热处理学报,2016,37(9):190-195.
- [11] 黄泽培.差速器锥齿轮减摩磷化应用及检验分析[J].金属加工(热加工),2017(3):26-31.