

# 40GrNiMo 中硬齿轮 材料点蚀破坏的金相研究<sup>\*</sup>

瞿学良<sup>1</sup>, 杨宏伟<sup>2</sup>

(1. 江苏广播电视大学, 南京, 210013; 2. 郑州机械研究所, 郑州, 450052)

[摘要] 采用金相试验方法, 对 40CrNiMo 中等硬度齿轮材料在接触疲劳过程中的表面破坏形态、裂纹的萌生与扩展等问题进行了研究, 并从金属学的角度对材料失效破坏过程进行了分析。

[关键词] 接触疲劳; 齿轮; 点蚀破坏

[中图分类号] TG113.12; [文献标识码] A; [文章编号] 1008-1925(2001)04-0074-05

## 0 前言

接触疲劳是轴承、齿轮等机械零件的一种常见失效破坏形式, 它是在周期应力的作用下零件的接触表面产生点蚀或剥落的表面破坏。接触疲劳是一个十分复杂的过程, 其影响因素很多。由于观察问题的角度不同, 关于接触疲劳生成机理的看法也很多, 但归纳起来, 大体上可分为应力解释和金属学解释两类。本文针对 40CrNiMo 中等硬度齿轮材料, 在不同的配对条件下, 就接触疲劳试件的表面破坏形态、裂纹的萌生及裂纹扩展方式等问题, 用金相试验的方法进行了研究, 并从金属学的角度对材料失效破坏过程进行了分析。

## 1 试验条件和方法

### 1.1 试件和试验条件

采用滚轮配对进行接触滚动试验, 配对的滚轮由试验滚和陪试滚组成。试验滚为中硬材料, 陪试滚分别为低硬、中硬和高硬三种材料, 它们均为 40CrNiMo 经不同的热处理之后得到:

低硬材料: 850 油淬+ 610 回火 HB= 270;

中硬材料: 850 油淬+ 550 回火 HB= 350;

高硬材料: 为中硬材料经调质处理后再进行 20h530 离子氮化处理, 氮化层深 0.39 mm。

试验滚的转速为 1 800 r/min, 陪试滚的转速为 2000 r/min, 两滚的滑差为 10%, 采用 20# 机油作为润滑剂, 滚道试验赫兹应力为 1 215 MPa。

### 1.2 失效破坏的判据

采用印泥法测定试验滚表面的破坏程度, 当点蚀坑的面积达到试验滚表面积 3% 时, 即判定试件已失效破坏, 此时达到的循环次数即为疲劳寿命。

## 2 金相试验与结果

作为试验滚的中硬 40CrNiMo 的金相组织为回火索氏体。

\* 收稿日期: 2001-08-30

作者简介: 瞿学良, 1961-, 江苏广播电视大学讲师, 主要从事金属材料的教学与研究。

当上述三种不同配对条件下的试验滚和陪试滚达到疲劳寿命时,对其表面产生点蚀破坏的地方切开展取样,进行金相观察。

### 2.1 试件接触疲劳破坏的类型和特征

经观察发现:试验滚道表面有许多大小和深浅不同的破坏坑,这表明破坏坑不是在同一时间发生的,每个破坏坑都可能经历形成及长大的过程。破坏坑最初的形态为“V”形,其宽度约0.2 mm左右,深度为0.1 mm左右,随着循环次数的增加,这种破坏坑不断产生,数量不断增多,破坏坑的尺寸逐渐由小变大,最后,小的破坏坑彼此相互连接重叠,使滚道表面产生严重的破坏,以致初始状态的“V”形坑不易被观察到。图1为“V”形坑的形貌及发展趋向。

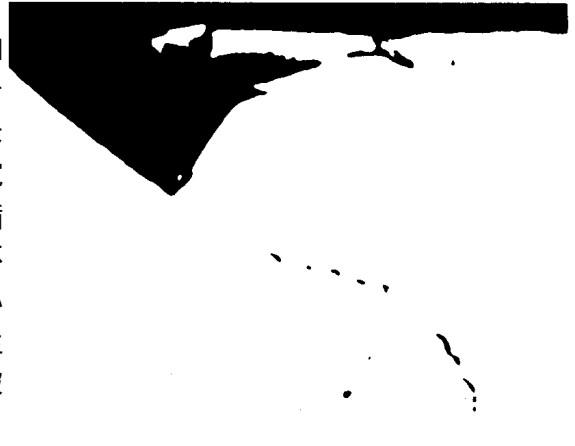


图1 表面点蚀坑的形状及坑底生成的裂纹(200×)

按照有关文献<sup>[1]</sup>的分类,接触疲劳可分为点状剥落和片状剥落两种形式,前者称为点蚀,后者称为剥落,它们的外貌及形成过程都不相同。点蚀坑的尺寸较小,其初始深度往往只有0.1~0.2 mm,但随着试验时间的增长,点蚀坑的数量增多,尺寸变大,最后发展到坑与坑连接成片,以致发生金属脱落。而“剥落”坑的尺寸则较大,深度达0.3~0.5 mm,坑底与试件表面平行,其侧壁与表面垂直,“剥落”损伤的面积较大。

根据破坏坑的形貌特征分析,可以认为:本试验所产生的接触疲劳破坏属于“点蚀”破坏。

### 2.2 疲劳源

疲劳源是疲劳研究中的一个重要问题,目前对于软材料“点蚀”破坏规律研究得比较透彻,疲劳裂纹萌生于接触表面的观点已被大多数实验所证实<sup>[2]</sup>。但对于硬材料的研究尚未取得充分的结果,疲劳源可能产生于表面,但在某些条件下也可能产生于次表面。



图2 裂纹萌生形态(300×)

本文所进行的金相研究表明:中硬材料接触疲劳裂纹萌生于滚道的表面,如图2所示。这是一条尚未发展成点蚀坑的裂纹的形貌,它萌生于表面,表面的裂口处还有金属塑性变形的隆起。

进一步分析认为:在接触滚动过程中,表层局部区域的金属受到应力作用后产生了塑性变形,随后形成金属隆起,隆起的趾都可能成为裂纹源,裂纹由此处以一定的角度向内部扩展,裂纹开口处尺寸较宽,但向内延伸逐渐变细,这种形态便表明了裂纹萌生于表面并向内部扩展的特征。

### 2.3 裂纹的扩展

一旦形成“点蚀”坑后,坑内的金属就已脱落,但众多的“点蚀”坑是渐次产生的,在试件上

可以找到代表破坏过程各个阶段的形貌,将这些形貌组合起来进行观察研究,在一定程度上可以推断出“点蚀”发展的全过程。

如图1照片所示:左侧是初生的主裂纹(一次裂纹),它萌生于滚道表面并沿 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 向内扩展。当扩展到一定深度时,会出现拐点,在拐点处裂纹发生折向,形成右侧的次生裂纹(二次裂纹),并以一定的角度向表面扩展。在应力的作用下,当二次裂纹到达表面后,两条裂纹上部的金属便发生脱落,形成“V”形点蚀坑;在应力反复作用下,坑底某些应力集中处又会产生新的裂纹,此新生的裂纹继续向内部深处扩展并重复上述发展过程,从而使“点蚀”坑进一步扩大,造成表面严重损伤,此时,“点蚀”坑形貌特征已难以辨认,试件终于失效破坏。试验表明:所有的裂纹都是以穿晶形式扩展的。

## 2.4 不同硬度配对条件下的试验结果

疲劳寿命试验结果指出:陪试滚为低硬材料时,试验滚具有最高的疲劳寿命( $8.5\times 10^6$ 次);陪试滚为高硬材料时,试验滚的疲劳寿命最低( $1.1\times 10^6$ 次);陪试滚为中硬材料时,试验滚的疲劳寿命居中( $2\times 10^6$ 次)。

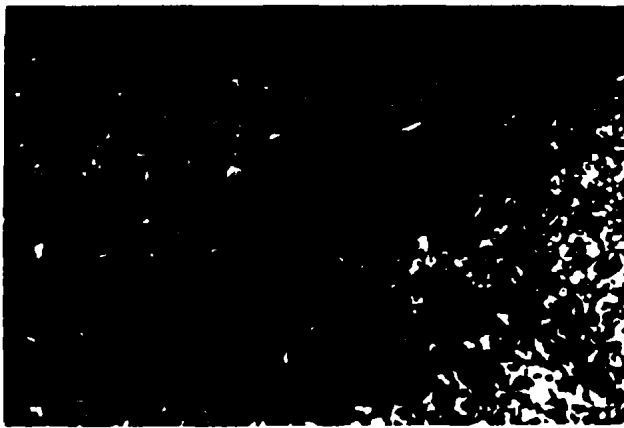


图3 表面塑性变形层及微裂纹(400×)

金相观察发现:陪试滚为高硬材料时,试验滚表面将产生一层塑性变形层,其厚度约为 $0.025\sim 0.037\text{ mm}$ ,而且层中存在很多微裂纹(图3)。当陪试滚为低硬材料时,试验滚表面未发现塑性变形及微裂纹。陪试滚为中硬材料,试验滚表面只有局部地区产生塑性变形及微裂纹。

通常认为:接触疲劳与塑性变形有重要的关系。本试验观察到的现象与这一认识是相吻合的,即表面塑性变形严重时,疲劳寿命就较低,若无明显塑性变形时,疲劳寿命则较高。

## 2.5 显微硬度试验

在接触疲劳过程中,材料会产生循环硬化或循环软化现象。如当陪试滚为硬材料时,试验滚表面的显微硬度由原始值 $HV_{0.2352}$ 降至产生疲劳破坏时的 $HV_{0.2310}$ ,此时,材料发生了循环软化。若陪试滚为中硬材料,经接触疲劳循环后,试验滚表面有塑性变形的地方其显微硬度下降,无塑性变形处则硬度不变。当陪试滚为低硬材料时,试验滚表面显微硬度不变。

上述结果表明:试验滚在与不同硬度的材料配对试验时,表面将发生不同的塑性变形状况,相应也会出现不同的显微硬度变化,而且与疲劳寿命有着一定的关系。

# 3 点蚀破坏过程分析

## 3.1 点蚀形成阶段的划分

点蚀破坏的发展过程大体上可分裂纹萌生、裂纹扩展及金属剥落等三个阶段。但接触疲劳过程十分复杂,影响因素很多,破坏过程中的表现也会有所差异。

当陪试滚为高硬材料时,试验滚表面产生了明显的塑性变形,在达到失效破坏之前,表面产生裂纹的几率较高,在此情况下,应该重视研究裂纹的萌生阶段,设法提高材料的强度,以提

高材料抵抗塑性变形的能力。

当陪试滚为低硬材料时, 试验滚表面不产生明显的塑性变形, 出现裂纹的几率也小, 在此情况下疲劳裂纹的萌生比较难以进行。所以, 裂纹的扩展阶段应作为重点研究对象, 应着重考虑如何提高材料的塑性和韧性, 以提高其对裂纹扩展的抗力。

当陪试滚为中硬材料时, 试验滚的破坏过程及特征比较接近上述第一种情况。

### 3.2 裂纹的萌生

切应力是引发接触疲劳破坏的重要原因, 但在滚动加滑动的条件下, 还存在有摩擦力的作用, 它将在接触区造成附加的切应力和正应力, 从而构成复杂的应力场。

在本试验中, 对产生明显塑性变形的试件表面进行了金相观察, 发现表层金属都有一定的流动方向, 而且与摩擦力的方向是一致的。由此而认为: 金属产生塑性变形与流动是由内摩擦力引起的, 另外, 表层内萌生的裂纹都具有相同的走向, 此方向也与摩擦力方向一致(如图4所示)。

可以认为: 接触区摩擦力形成的附加切应力导致了金属塑性变形和流动, 虽然金相组织上看不到明显的变化, 但其内部亚结构却产生了一定的变化; 在表层金属流变层中, 一些非金属夹杂物发生了定向排列而形成流线。另一方面, 表层金属将形成位错运动, 位错很容易在夹杂物流线处堆积, 在交变应力作用下, 位错作前后方向反复运动, 彼此切割后产生空穴, 空穴聚集, 最终演变成裂纹。



图4 表层金属的流动与裂纹的走向(500×)

### 3.3 不同硬度材料配对时的疲劳寿命

齿轮材料, 习惯上采用不同硬度材料配对方式使用, 小齿轮硬度偏高, 大齿轮硬度偏低。

曾有人对不同硬度材料配对进行接触疲劳试验, 结果表明: 当达到3%点蚀破坏面积时, 配对的双方表面都发生了点蚀, 但主要产生于软材料上<sup>[3]</sup>。本文所进行的试验的结果也基本上反映了这种规律: 表面金属塑性变形和“点蚀”大多发生在配对中的低硬度材料的表面。另外, 本文还进行了低硬——低硬(HV269)材料滚子配对的接触疲劳试验, 试验滚是四种配对条件下疲劳寿命最低的一种。

## 4 结论

(1) 将40CrNiMo材料处理成中等硬度HV350之后, 进行接触疲劳试验, 最终其表面产生的接触疲劳破坏是“点蚀”破坏。

(2) 用三种不同硬度的材料与被试验材料配对进行接触疲劳试验, 被试验材料表面产生的塑性变形和金属流变层, 是引起表面“点蚀”破坏的重要原因。

(3) 材料硬度对接触疲劳寿命有较大的影响, 但此硬度主要是指经过一定周次循环后的材料表面实际硬度。

(4) 试验滚为中硬材料, 陪试滚为低硬材料, 试验滚具有最高的疲劳寿命。

[ 参考文献]

- [ 1] 哈尔滨工业大学. 关于接触疲劳破坏分类的讨论[ J]. 金属科学与工程, 1983, ( 6) : 25 ~ 32  
 [ 2] 邵尔玉. 接触疲劳的试验方法、断口和破坏机理的研究[ J]. 理化检验( 物理分册), 1980, ( 1)  
 [ 3] 葛中民. 耐磨损设计[ M]. 北京: 机械工业出版社, 1991

## Study on Pitting Failure of Gear Material 40CrNiMo With Medium Hardness by Means of Metalloscopy

Qu Xueliang<sup>1</sup>, Yang Hongwei<sup>2</sup>

( 1. Jiangsu Radio and TV University, Nanjing, 210013, PRC;

2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou, 450052, PRC)

**Abstract:** By means of metalloscopy, the paper deals with the crack initiation and propagation as well as the fracture morphology of the surface in a gear material 40CrNiMo with medium hardness, meanwhile it analyzes the failure mechanism of the material on metallograpy.

**Key words:** contact fatigue, gear, pitting

[ 责任编辑: 刘健]

( 上接第 37 页)

[ 参考文献]

- [ 1] SYSMAC C Series I/O Link Unit[Z]. OMRON USER'S MANUAL  
 [ 2] OMRON P-type Programmable Controllers Installation Guide[Z]. 1994  
 [ 3] 钟肇新, 彭侃. 可编程控制器原理及应用[ M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991

## Application of PLC in Manipulator Step Motion Control

Shi Guosheng

( College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, PRC)

**Abstract:** On the basis of Japan OMRON C Series P-type PLC, this paper introduces the application of PLC in manipulator step motion control, programming and process are given in detail. This program has been applied in the field of industrial manipulator. It has stable and reliable performance.

**Key words:** PLC, Manipulator, Step Motion Control

[ 责任编辑: 刘健]