

# 表面电沉积合金层提高碳钢齿轮的接触疲劳强度研究

李小周, 黄华梁

(广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 接触疲劳破坏是齿轮的主要失效形式之一。在 45 # 钢齿轮齿面电沉积 Ni-P-Co 合金层, 可以显著提高其接触疲劳强度。同时, 对合金层的表面形貌, 表面粗糙度、显微硬度和疲劳点蚀坑形貌特征等进行了分析。

**关键词:** Ni-P-Co 合金涂层; 接触疲劳强度; 抗点蚀能力; 45 # 钢; 齿轮传动

**中图分类号:** TG111.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-754X(2002)04-0211-04

## Research on contact-fatigue strength of 45 # steel gear drives with Ni-P-Co alloy coating

LI Xiao-zhou, HUANG Hua-liang

(College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Contact fatigue failure is one of the failure type for steel gear. This paper researched the contact fatigue strength of Ni-P-Co alloy coating on surface of gears made from 45 # steel. Several studies on the alloying coating, such as surface shape, surface roughness, micro-hardness and shape characteristic of fatigue pitting hole were carried out. The experimental results were analyzed and conclusion was as follows; contact fatigue life and strength of steel gears with Ni-P-Co alloy coating and air-cooling after heat-treatment with temperature of 450 C are increased remarkably.

**Key words:** Ni-P-Co alloy coating; contact-fatigue strength; pitting resistance; 45 # steel; gear drives

碳钢比合金钢价廉, 对应力集中的敏感性较低, 在汽车、拖拉机等农业机械和机床中应用广泛。碳钢齿轮的主要失效形式之一是接触疲劳破坏(疲劳点蚀)。本文研究在 45 # 钢齿轮表面电沉积 Ni-P-Co 合金层, 以提高其接触疲劳强度; 同时研究了电沉积合金层的组织结构和性能。对提高齿轮的使用寿命具有较高的参考价值。

### 1 试件、试验设备及试验条件

采用常见的用两个圆柱辊子对滚代替齿轮啮合的模拟试验方法。辊子试件的主要参数为: 外径 50 mm, 内径 32 mm, 接触宽度 6 mm。试验辊子的材料为 45 # 钢, 其成分见表 1。

表 1 45 # 钢试件材料成分

Table 1 Material element of test sample

元素	C	Si	Mn	P	S
成分/%	0.48	0.26	0.66	0.045	0.015

所有试验辊子表面均电沉积 Ni-P-Co 合金层, 厚度为 8  $\mu\text{m}$ 。

接触疲劳试验在 JP-BD1500 型接触疲劳试验机上进行。标准齿轮的疲劳点蚀位置大都在节圆以下 0.3 mm 处<sup>[1]</sup>。因此, 选取辊子滑差率为 10%; 上试件(陪试件)转速为 2 000 r/min, 下试件(试验件)转速为 1 800 r/min。辊子试件采用 N100 号机械油润滑, 试验机内配置的齿轮挂轮采用 N68 号机械油

收稿日期: 2002-01-17。

作者简介: 李小周(1966-), 女, 广西田东人, 讲师, 硕士, 从事机械设计研究, E-mail: sun\_JD@gxep.com.cn;

黄华梁(1937-), 男, 湖南岳阳人, 教授, 从事机械设计理论研究。

润滑,油温控制在 40℃左右。

选取低应力水平  $\sigma_1$  和高应力水平  $\sigma_2$  两个应力进行试验。低应力水平的选择原则为略高于 GB3480 中给出的相应材料的接触疲劳强度极限,而高应力水平比低应力水平增加 250~400 N/mm<sup>2</sup>。取  $\sigma_1=800$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_2=1\ 130$  N/mm<sup>2</sup>, 每一个应力水平下的试验试件数均为 5 对。

试验终止条件为疲劳试验机的自动停机,即以辮子产生点蚀后所引起的振动程度为失效判据。这样能综合反映点蚀坑的大小(面积)、深度和个数,与实际齿轮失效状态较接近。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 接触疲劳寿命

累积分布二参数威布尔分布函数为

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N-N_0}{N_u-N_0}\right)^\beta}, N_0 < N < \infty, \quad (1)$$

式(1)中,  $F(N)$  表示破坏概率;  $N_0$  表示最小寿命;  $\beta$  表示威布尔形状参数;  $N_u$  表示特征寿命;  $N$  表示循环寿命次数;  $e$  表示自然对数的底,  $e=2.718$ 。

采用此函数处理试验数据,结果见表 2。

表 2 45#钢辮子试件的接触疲劳寿命

Table 2 The trial results of contact fatigue life

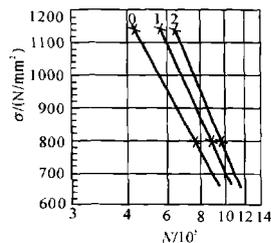
代号 $n_1-n_2$	应力状况/ N/mm <sup>2</sup>	寿命/ $10^5$			斜率 $\alpha$	寿命比 $N_1/N_0$		
		$F(N)=0.1$	$F(N)=0.5$	$\bar{N}$		$F(N)=0.1$	$F(N)=0.5$	$\bar{N}$
1-0		4.04	7.273	7.139	4.621	1.00	1.00	1.00
1-1	$\sigma_1=800$	7.017	8.826	8.768	8.217	1.736	1.462	1.452
1-2		6.975	9.473	9.407	6.157	1.728	1.560	1.558
2-0		3.007	4.475	4.331	4.739	1.00	1.00	1.00
2-1	$\sigma_2=1\ 130$	3.441	5.338	5.871	4.289	1.144	1.193	1.348
2-2		4.610	6.733	6.696	4.974	1.533	1.505	1.511

注:①代号  $n_1$  为试件组号;  $n_2$  为种类, 0 为未沉积, 1 为 Ni-P-Co 沉积层, 2 为 Ni-P-Co 沉积层且在 450℃ 热处理。

取失效概率 10% 的接触疲劳寿命评定电沉积 Ni-P-Co 合金层。由表 2 可知, 45#钢辮子试件经电沉积 Ni-P-Co 合金层后, 其接触疲劳寿命明显提高。在接触应力  $\sigma_1=800$  N/mm<sup>2</sup> 下, 电沉积 Ni-P-Co 合金层的试件可提高接触疲劳寿命 1.736 倍; 电沉积 Ni-P-Co 合金层且在加热到 450℃ 保温 1 h 后空气冷却的试件可提高 1.728 倍。在接触应力  $\sigma_2=1\ 130$  N/mm<sup>2</sup> 下, 电沉积 Ni-P-Co 合金层的试件可提高接触疲劳寿命 1.144 倍; 电沉积 Ni-P-Co 合金层且在加热到 450℃ 保温 1 h 后空气冷却, 可提高接触疲劳寿命 1.533 倍。

### 2.2 $\sigma-\bar{N}$ 曲线

为了直观地对比 45#钢辮子试件电沉积 Ni-P-Co 合金层后的抗疲劳性能, 图 1 给出其应力平均寿命 ( $\sigma-\bar{N}$ ) 曲线。若取循环次数为  $8 \times 10^5$ , 则 Ni-P-Co 合金沉积层试件与无合金层试件的极限应力之比为 1.18, 即接触疲劳许用应力提高了 18%。而有 Ni-P-Co 合金层且在 450℃ 保温 1 h 后空气冷却的试件为 1.333, 即接触疲劳许用应力提高了 33.3%。



0. 未电沉积层试件; 1. Ni-P-Co 合金沉积层试件;  
2. Ni-P-Co 合金层且 450℃ 保温 1 h 后空气冷却的试件

图 1 有无合金沉积层试件的  $\sigma-\bar{N}$  曲线

Fig. 1  $\sigma-\bar{N}$  curve

## 3 合金沉积层的组织结构和性能

### 3.1 合金层成分分析

采用日本 DXS-1 电子显微镜对基体材料为 45#钢的 Ni-P-Co 合金沉积层进行能谱分析(图 2)。合金层中各元素含量为: Ni, 86.74%; Co, 9.83%; P, 3.43%。

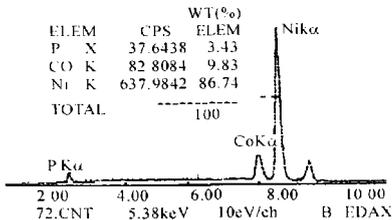


图2 电沉积合金层的能谱图

Fig. 2 Energy dispersion analysis under alloy coating

### 3.2 表面形貌分析

图3是在电子显微镜下观察到的45#钢基体表面电沉积Ni-P-Co合金沉积层的表面形貌。其表面形貌为堆砌均匀致密的胞状物，胞状结构沿三维方向生长，胞状颗粒大小较均匀，平面厚度有起伏。说明沉积初期，合金元素在基体表面有选择地形核，首先选择微观局部能量较高的地方形核，然后逐步长大。电沉积合金层的形成过程是形核和长大同时进行的过程，在基体表面形成一层均匀、致密的保护层。



图3 Ni-P-Co合金沉积层的表面形貌(二次电子像)

Fig. 3 The surface shape of Ni-P-Co alloy coating

### 3.3 表面粗糙度

在2Z-01型表面光洁度测量仪上测出以45#钢为基体的Ni-P-Co合金沉积层的表面粗糙度曲线(图4)，电沉积合金层之前表面粗糙度 $R_a = 6.4 \mu\text{m}$ ，沉积合金层后表面粗糙度 $R_a = 2.65 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度降低约59%，表明在零件表面粗糙度较大时电沉积合金层可降低试件的表面粗糙度。

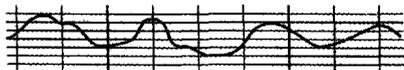


图4 Ni-P-Co合金层的表面粗糙度曲线

Fig. 4 The curve of surface roughness of Ni-P-Co alloy coating

### 3.4 合金沉积层的显微硬度

用国产71型显微硬度计在Ni-P-Co合金沉积层纵剖面打硬度，测试结果见温度—显微硬度曲线(图5)。由图5可见，400~500℃温度热处理使合金层结构产生变化，即在此温度范围内合金层中的P产生偏聚富集，与Ni生成 $\text{Ni}_3\text{P}$ ，合金沉积层为Ni和 $\text{Ni}_3\text{P}$ 的混合物，合金层硬度提高，450℃时显微硬度达到最大值1109 $\text{HV}_{0.05}$ 。进一步提高加热温度(如大于600℃)，由于 $\text{Ni}_3\text{P}$ 晶粒长大、粗化，晶界强化的总效应降低，合金沉积层软化，显微硬度迅速下降。

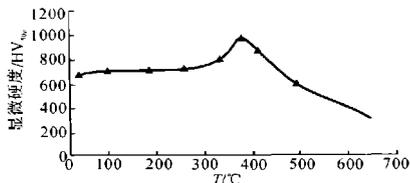


图5 Ni-P-Co合金涂层温度—显微硬度关系

Fig. 5 The relation curve between micro-hardness and temperature

### 3.5 电沉积Ni-P-Co合金层的X射线衍射分析

图6为试件表面Ni-P-Co合金层X射线衍射图。由图6中可见在衍射角 $2\theta \approx 43^\circ$ 处有一衍射峰，其上部较尖锐，慢慢向两边宽化，为晶体衍射特征，故涂层为晶体结构。由于Ni、P、Co的原子半径 $r > 0.1 \text{ nm}$ ，Co和P只能以置换的方式进入Ni晶格中，即置换晶格中的Ni原子成为置换固溶体，故Ni-P-Co三元合金是以Ni为溶剂，Co和P为溶质的固溶体，仍保持金属Ni的面心立方晶型。由于Co和P的参与，引起Ni的晶格产生畸变，衍射宽度变大。根据scherrer公式<sup>[2]</sup>：

$$B = \frac{K\lambda}{t \cos \theta}$$

当衍射常数 $K$ 、入射波长 $\lambda$ 一定，衍射角 $\theta$ 小，

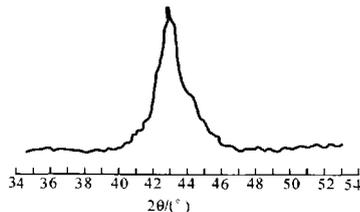


图6 Ni-P-Co合金涂层的X射线衍射图

Fig. 6 The X-ray diffraction diagram of Ni-P-Co alloy coating

衍射宽度  $B$  变大时,晶胞尺寸  $t$  变小,说明由于 Co 和 P 原子的固溶,晶胞尺寸变小,起到细化晶粒的作用。

## 4 电沉积合金层与基体的结合强度试验

### 4.1 淬火试验

将试件加热到 250 °C 后,投入 2~8 °C 冷水中急冷,捞起来观察,合金层没有剥落。

### 4.2 偏磨试验

将 0.15 mm 厚度的合金层试件在砂轮上偏磨,试件外圆留下部分合金层,但仍分辨不出合金沉积层与基体的界线。

### 4.3 划痕试验

用锋利的淬火钢凿划破合金层,直至金属基体,在上面平行刻划 3 条划痕,间距为 2 mm,然后在垂直方向同样刻划 3 道刻痕与前 3 条交叉,用 5 倍放大镜观察交叉点,发现合金层没有剥落、起皮。

通过上述试验证明,合金沉积层与基体结合良好。

## 5 接触疲劳点蚀坑形貌特征

表面未经电沉积 Ni-P-Co 合金层的 45 # 钢试件,在试验应力为  $1\ 130\ \text{N}/\text{mm}^2$ ,连续运转  $4.39 \times 10^5$  次时,出现接触疲劳表面损伤,XXT 体视显微镜照片(图 7)显示其点蚀坑形貌为三角形状压碎形凹坑剥落,且三角形箭头端部指向滚子试件转动的方向,点蚀坑底面为一系列逐渐破坏的曲面台阶。表面电沉积 Ni-P-Co 合金层的 45 # 钢试件,在试验应力  $1\ 130\ \text{N}/\text{mm}^2$  下连续运转  $6.37 \times 10^5$  次时出现三



图 7 点蚀坑形貌(体视显微镜照片 5×)

Fig. 7 The surface shape of non alloy coating

角形状压碎形剥落凹坑,三角形箭头更细长,凹坑面积比无电沉积 Ni-P-Co 合金层的试件大而深,且数量更少(图 8)。



图 8 电沉积合金层的点蚀坑形貌  
(体视显微镜照片 5×)

Fig. 8 The surface shape of alloy coating

## 6 结 语

在 45 # 钢制齿轮表面电沉积 Ni-P-Co 合金层及沉积合金层在 450 °C 热处理,然后在几种应力水平下与未电沉积合金试件一起进行接触疲劳强度对比试验,每组 5 对,共试验 20 对。结果表明:45 # 钢制齿轮表面电沉积 Ni-P-Co 合金层可提高其表面接触疲劳强度。如:取失效概率 10%,试验应力  $\sigma_2 = 1\ 130\ \text{N}/\text{mm}^2$ ,45 # 钢试件表面电沉积 Ni-P-Co 合金层可提高接触疲劳寿命 1.144 倍,电沉积 Ni-P-Co 合金层且加热到 450 °C 保温 1 h 后空气冷却的试件可提高接触疲劳寿命 1.533 倍。当循环次数为  $8 \times 10^5$ ,接触疲劳寿命则分别提高了 18% 和 33.3%。

电沉积 Ni-P-Co 合金层是金属离子在 45 # 钢试件表面上快速还原沉积的过程,使合金层获得超细晶粒组织。当 Ni-P-Co 合金层在 400~500 °C 温度下热处理,合金沉积层结构产生变化,合金层中 P 原子产生偏聚富集,与 Ni 生成  $\text{Ni}_3\text{P}$ ,合金沉积层为 Ni 和  $\text{Ni}_3\text{P}$  的混合物,合金层显微硬度提高。

### 参考文献:

- [1] HUANG Hua-liang, ZHANG Xiu-lin(黄华梁,张秀林). The study for raising contact fatigue strength of gears with brush copper plating[J]. *GEAR*(齿轮), 1989, 13(3): 52-56. (in Chinese)
- [2] DU Bian-che(渡边澈). *Metal Surface Technology*(金属表面技术)[M]. Beijing, China Machine Press, 1989. (in Chinese)