

文章编号:1000-582X(2005)02-0001-04

## 表面处理和涂层技术在齿轮上的应用初探\*

钱文富<sup>1</sup>,曹兴进<sup>1</sup>,卢龙<sup>1</sup>,黄楠<sup>2</sup>,孙鸿<sup>2</sup>,冷永祥<sup>2</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030;2. 西南交通大学教育部先进材料技术重点实验室,成都 610000)

**摘要:**利用气相物理沉积(PVD)技术和磁过滤弧源沉积的方法(DFAD),在由20CrMo制造的直齿圆柱齿轮表面分别制备了TiN以及C:N薄膜,并在齿轮传动实验台上进行了性能测试。结果表明:齿轮表面上覆C:N薄膜后,在1800 rpm,12 Nm的工况下,连续运行50 h,对齿轮表面在体式显微镜下进行观察,薄膜无明显破损,而未覆膜的淬火齿轮表面已经失效。因此,齿轮表面覆膜对改善齿轮的减摩抗磨性的效果是十分明显的,也是切实可行的。同时,还探讨了PVD技术在齿轮传动中应用时出现的问题,如用常用的多弧磁控溅射技术在齿轮表面涂覆TiN膜,因温度太高导致渗碳淬火齿轮表面硬度因回火而降低,无法正常使用,采用磁过滤弧源沉积的方法对齿轮表面进行覆膜,能获得满意效果。

**关键词:**磁过滤弧源沉积;物理气相沉积;齿轮表面;减摩抗磨性

**中图分类号:**TG174.46

**文献标识码:**A

齿轮是机械传动系统中的重要部件,它工作时的受力和运动情况是十分复杂的,由此产生的损伤形式多样,较常见的、后果较严重的损伤有3种:破坏性点蚀、断齿和破坏性胶合<sup>[1-2]</sup>。因此需要齿轮具有高的抗弯曲疲劳强度,齿轮芯部要有高的强度和耐冲击韧性,齿面要有高硬度、高耐磨性和一定的抗腐蚀性能<sup>[3-4]</sup>。德国国家标准(DIN3979, Zzahn Schaden an Zahnradgetri-eben)将齿轮的损伤简单的分为两大类:表面损伤和折断<sup>[5]</sup>。日本机械学会曾对涉及各行各业的齿轮传动失效实例进行过调查研究,发现因齿轮表面失效而引起的齿轮传动副失效的数量约占所调查对象总数的74%<sup>[6]</sup>。所以,提高齿轮的表面强度已成为提高齿轮传动副的可靠性和延长其使用寿命的有效途径。为了达到这一要求,必须对齿轮进行强化处理,除采用常规热处理手段外,日益成熟的各种表面强化新技术也获得了广泛的应用。目前,在齿轮上的应用主要有渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗金属、激光表面强化、热喷涂等。但是在一些具有特殊高性能要求的齿轮中,单纯依靠某一种处理已不能满足其高疲劳强度、高弯曲强度、高红硬性、低摩擦磨损以及承受高速重载的要求,而且,单是传统的齿轮表面热处理工艺已难以满足发展的需要,人们又将一些新的表面强化理论及技

术应用于齿轮研究领域,以适应发展的要求,如物理气相沉积(PVD)技术、离子注入技术等<sup>[7-8]</sup>,在国外已有研究报导,但其关键技术尚未公开。国内有研究人员在疲劳实验机上模拟得出相应的结论<sup>[9]</sup>,尚未见在齿轮上覆膜的实验研究报导。

另外,与真空蒸发和溅射镀膜等技术相比,离子镀膜具有附着性能好、绕射性能好,便于使膜材粒子散射在整个工件表面上、可镀材质广、沉积速率快等优点;离子注入成膜还具有黏结强度高、可多元成膜、可精确控制温度和膜厚等优点,而且,近年来,离子注入改善表面韧性进展明显,使精细陶瓷性能进一步提高<sup>[1]</sup>。有研究表明:金属在离子注入之后,其承受黏着和磨粒磨损的表面使用寿命可以提高2-100倍。基于以上考虑,可采用以下方法对齿轮表面进行改性。

将渗碳淬火的齿轮齿面在多弧磁控溅射真空离子镀膜机中镀氮化钛,厚度为1-5 μm,以及利用磁过滤弧源沉积的方法在同样齿轮表面上沉积C:N膜,厚度为0.35-1.5 μm,利用扫描电镜对齿轮表面的金相组织进行检测,将覆膜后的齿轮装入齿轮箱中,安装在实验台上,进行加载运行实验,并与未覆膜的渗碳淬火齿轮副进行了对比实验,同时,对实验后的齿轮表面在体式显微镜下进行了观察研究。

\* 收稿日期:2004-10-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59905024)

作者简介:钱文富(1974-),男,湖北省浠水县人,重庆大学硕士研究生,主要从事齿轮表面处理技术的研究。

## 1 试件、试验设备及试验条件

### 1.1 齿轮试件

摩托车减速器中二挡齿轮(圆柱直齿轮);

模数:  $m = 1.75$ ;

主动齿轮: 齿数 = 17, 外径 = 34 mm, 齿宽 = 11 mm;

被动齿轮: 齿数 = 32, 外径 = 61 mm, 齿宽 = 9 mm;

压力角  $\alpha = 20^\circ$ ;

材料均为 20CrMo, 其成分见表 1。

表 1 20CrMo 的化学成分

成分	C	Si	Mn	P
Wt%	0.17 - 0.24	0.20 - 0.40	0.40 - 0.70	$\leq 0.040$
成分	S	Cr	Ni	Mo
Wt%	$\leq 0.040$	0.8 - 1.10	$\leq 0.35$	0.15 - 0.25

齿轮表面渗碳淬火处理, 渗碳深度为 0.3 ~ 0.5 mm, HRA78 - 83, 芯部 HRC25 - 45, 精度等级为 8 级(GB10095 - 88)。

### 1.2 实验设备

TX - 4B 多弧磁控溅射多功能离子镀膜机, 磁过滤弧源沉积系统, JSM - 5600LV 扫描电镜, HV - 1000 型显微硬度计等。

### 1.3 小齿轮涂层

利用 TX - 4B 多弧磁控溅射多功能离子镀膜机在齿轮表面镀 TiN 膜。

另采用磁过滤弧源沉积系统在齿轮表面镀厚度不同的 C:N 薄膜若干。为比较齿面的表面粗糙度对涂层结合强度的影响, 对部分齿轮试件进行了不同粒度砂纸磨光。

### 1.4 实验台架

按实验要求和实验室的实际情况, 设计、搭建了功率流开放式实验台, 其实物图如图 1、2 所示。

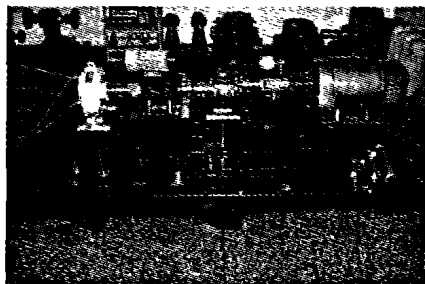


图 1 实验台全貌

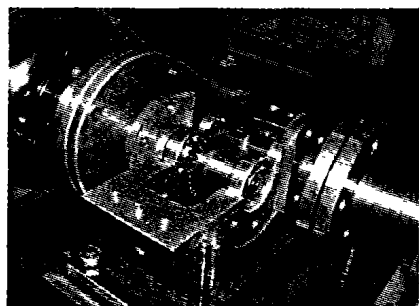


图 2 实验台局部(齿轮箱)

### 1.5 实验设计

实验选用 ISOVG68 机械油为润滑油。装配调试后开机, 利用插入到润滑油池中的温度传感器对齿轮箱中的润滑油温度进行监测, 当润滑油温度稳定后停机, 通过齿轮箱顶部的开口检查齿轮磨损情况, 待润滑油的温度冷却到常温, 再将输入扭矩依次提高。实验过程中每 10 min 记录一次油温, 一次传动效率(每次连续记录 5 个, 取平均值), 实验转速设置为 1 800 r/min, 输入扭矩从 4 N·m 开始, 并分别对 8 N·m、11 N·m、13 N·m 做同样的实验及实验记录, 这一部分视为磨合过程。实验完毕后, 加载 12 N·m 连续开机 50 h, 做破坏性实验。

对有涂层的齿轮, 每次停机检查时, 若涂层有大面积磨损, 视为失效, 并停止实验。为防止磨屑二次磨损齿轮, 每次停机时换油。分别取各样齿轮进行实验(为叙述方便, 分别记抛光后镀 C:N 膜(厚 0.5  $\mu\text{m}$ )以及未抛光直接镀 C:N 膜(厚 0.5  $\mu\text{m}$ )、未抛光直接镀 C:N 膜(厚 1.5  $\mu\text{m}$ )、未抛光直接镀 C:N 膜(厚 0.8  $\mu\text{m}$ )、未抛光直接镀 C:N 膜(厚 0.35  $\mu\text{m}$ )、TiN 膜、无膜齿轮为 1# ~ 7# 齿轮)。

## 2 实验结果和分析

### 2.1 齿轮镀膜前后的金相分析

#### 2.1.1 渗碳淬火齿轮

如图 3 所示, 为渗碳淬火齿轮表面的扫描电镜金相照片, 可明显看出为回火马氏体, 用 HV - 1000 型显微硬度计检测齿轮表面的硬度为 HV628 ~ 649 (HRC55)。

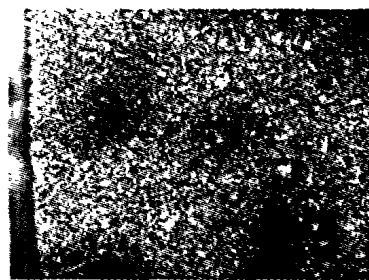


图 3 未经表面镀涂的金相照片(500 倍)

#### 2.1.2 TiN 膜

渗碳淬火后的齿轮表面在多弧磁控溅射真空离子镀膜机中镀氮化钛后, 其在扫描电镜下的金相组织及镀膜层的情况如图 4 所示。从图中可明显看出, 基体的金相组织为回火屈氏体。用显微硬度计测得基体硬度为 HV435 ~ 444 (HRC45)。所以, 利用多弧磁控溅射真空离子镀膜机对渗碳淬火后的齿轮表面镀 TiN 膜后, 齿轮表面的硬度因回火下降了将近 10 HRC。

#### 2.1.3 镀 C:N 膜

利用磁过滤弧源沉积的方法在渗碳淬火齿轮表面沉积 C:N 膜, 其齿轮表面的金相组织如图 5 和齿轮芯



图 4 镀 TiN 的金相组织(500 倍)

部的金相组织如图 6。从图中可以看出齿轮表面的金相组织为回火马氏体和回火屈氏体,用硬度仪对齿轮表面的测试结果为 HRC55,与镀膜前相比基本无变化,芯部组织为板条马氏体。可见,经 120 °C 镀膜,表面渗碳淬火层组织没有受到影响,镀前镀后金相组织基本没有变化。

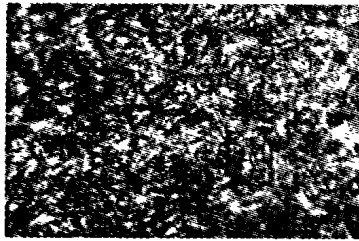


图 5 镀 C:N 膜的金相照片(800 倍)  
(靠近齿面处)

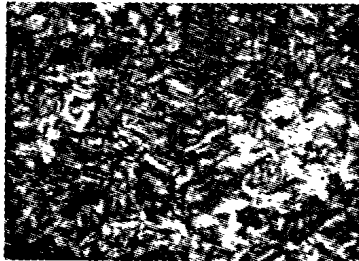


图 6 镀 C:N 膜的金相照片(800 倍)  
(芯部组织)

### 2.2 齿轮表面的磨损状况

利用体式显微镜对实验后的齿轮表面进行观察。

#### 2.2.1 1#齿轮

除齿根与配对齿轮有干涉现象外,齿面镀膜基本完好,大齿轮的磨损也较小,见图 7。

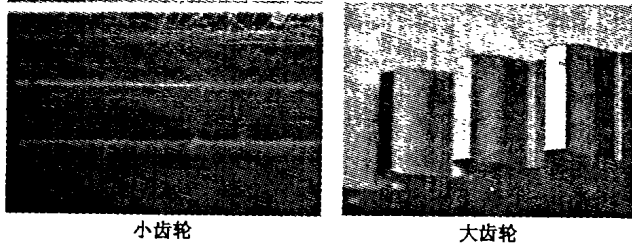


图 7 1#齿轮齿面显微照片

#### 2.2.2 2#齿轮

基本上和 1#齿轮情况相似,但磨损程度稍大(色彩稍淡),见图 8。

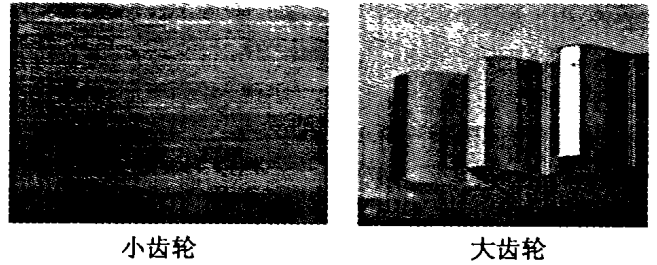


图 8 2#齿轮齿面显微照片

#### 2.2.3 3#、4#、5#小齿轮

3#小齿轮膜已接近完全磨损,4#小齿轮膜大面积脱落,5#小齿轮上的膜也已经快被磨完,只是程度比 3#齿轮稍轻。其磨损程度都比较大,达不到预期的目的,见图 9。

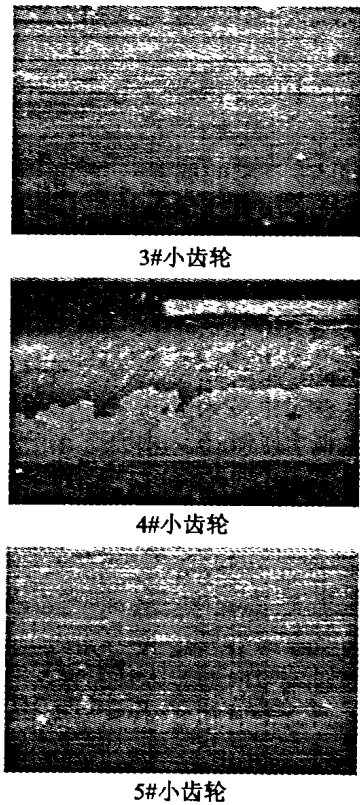


图 9 3#、4#、5#小齿轮齿面显微照片

#### 2.2.4 6#小齿轮

如图 10 所视,无须借用显微镜就能明显看出,齿轮磨损严重,有干涉现象,表现为在齿面上有明显的一道宽约 1 mm 的沟槽,伤及表面和基体。

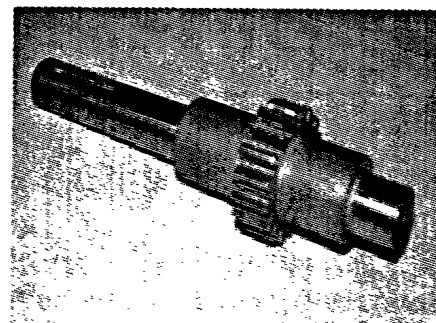


图 10 6#镀膜的小齿轮照片

### 2.2.5 7#齿轮

如图 11,大小齿轮齿面都有很明显的较深的磨痕,可以认为齿轮已经失效。

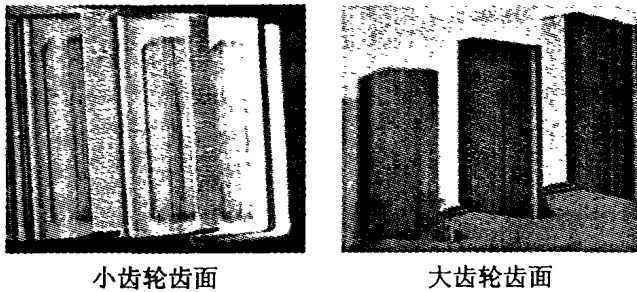


图 11 7#齿轮齿面显微照片

### 2.3 实验结果分析

重复以上实验,结果相同。

#### 1) 适当选择涂镀方法能显著提高齿轮性能。

通过齿轮的摩擦磨损实验表明,在相同的工况条件下,镀 TiN 膜时由于高温回火使齿面变软,效果不是很理想,而镀了 C:N 膜的齿轮齿面则能显著提高减摩抗磨性,其原因在于,采用磁过滤弧源沉积的方法在齿轮表面沉积的 C:N 涂层,工作温度低,不会产生回火现象,而 C:N 涂层作为一种超优性能的薄膜材料,它不仅硬度高,而且摩擦因数小,黏着倾向低,尽管离子注入到金属表层的初始深度很浅,膜比较薄,但它能使金属表层所产生的持续耐磨损能力显著改善<sup>[7]</sup>,正是这些优良的摩擦学性能使之成为理想的抗磨材料。

#### 2) 涂层厚度对涂层摩擦性能的影响。

通过实验发现,镀 C:N 膜时,膜厚为  $0.5 \mu\text{m}$  比膜厚  $1.5 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 、 $0.35 \mu\text{m}$  的要好,说明膜厚对涂层的结合强度有很大影响。通常情况,为了使涂层在一定的磨损速度之下能够有更长的使用寿命,当然希望涂层厚度越大越好,但涂层厚度过大也有不少不利因素。涂层厚度与涂层内应力紧密联系,当涂层厚度值比较大时,涂层与基体的界面在外载作用之下会产生较大的界面应力,从而导致涂层裂纹萌生或涂层的剥落。本实验条件下,C:N 抗磨涂层厚度最佳值在  $0.5 \mu\text{m}$  左右。

#### 3) 基体表面粗糙度对涂层质量的影响。

通过实验还发现,镀 C:N 膜,镀前打磨了的齿轮表面要比未打磨的好,说明表面粗糙度对涂层的结合强度也有很大影响。可以认为,由于试件表面具有极细小的凹坑和微观不平,涂层沉积在微观的凹坑里和不平的表面上,在接触摩擦过程中的摩擦力较大,涂层更容易从基体上剥落下来。实验发现当基体在沉积涂层之前进行适当的表面细化处理时,使表面粗糙度减小,可使耐磨损性能提高。

4) 同时在大小齿轮齿面上进行镀膜处理,不利于齿轮的跑合,达不到镀膜的预期效果。因为两个齿面均镀有涂层,经跑合后,两个硬质齿面直接接触,磨损较快。而且,润滑油中的硬质磨屑产生的磨料磨损也

会对齿轮涂层产生极大的破坏。故我们只在小齿轮上进行了表面涂层,在跑合过程中,让未镀膜的大齿轮表面去适应镀了膜的小齿轮。

5) 齿轮顶部、根部都有不同程度的干涉(镀膜的齿轮有膜脱落的现象),产生这种干涉现象的原因可能是覆膜使齿轮厚度的增加以及受力后产生的变形对齿轮形貌的改变,从而对齿轮的啮合产生影响,可以通过预先修型处理再进行热处理和覆膜处理的办法加以消除。

另外,基体的硬度同样会影响效果,先给齿轮渗碳淬火再覆膜,正是希望减小硬度梯度,增强膜的整体性能。

## 3 结 论

1) 由于在多弧磁控溅射真空离子镀膜机中为渗碳淬火齿轮表面镀氮化钛时温度过高,导致齿轮回火,基体硬度降低,其抗磨性能急剧降低。

2) 磁过滤弧源沉积的方法在齿轮表面沉积的 C:N 涂层,齿轮的表面金相组织和表面硬度基本未改变,加上 C:N 涂层优良的减摩抗磨性能的协同作用,使得齿轮表面的减摩抗磨性能得以有效的提高。另外,齿轮表面抛光处理后镀膜层的减摩抗磨性能可以得到进一步提高,且厚度为  $0.5 \mu\text{m}$  的镀膜减摩抗磨性能最强。

3) 在齿轮表面覆膜以改善齿轮的减摩抗磨性,效果是十分明显的,也是切实可行的。

致谢:该项研究受到四川省科技厅 2003 基础科研项目(编号 03JY029-062-1)支持。

### 参考文献:

- [1] 曲敬信,汪泓宏. 表面工程手册[M]. 北京:化学工业出版社,1998.
- [2] 文峰,黄楠,孙鸿,等. 磁过滤弧源沉积合成不同 N 分压下的 N 掺杂金刚石薄膜性能研究[A]. 第五届全国表面工程学术会议论文集[C]. 西安,2004.
- [3] 中国机械工程学会材料分会. 齿轮的失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [4] 何奖爱,王玉伟. 材料磨损与耐磨材料[M]. 长春:东北大学出版社,2001.
- [5] DIN3979, Zahnschaden an Zahnradgetrieben[Z]. 何德芳译. 东北工学院出版社,1979.
- [6] 日本机械学会技术资料《齿轮强度设计资料》出版分委会编. 李茹贞,赵清慧,译. 姜勇校订[M]. 北京:机械工业出版社,1984.
- [7] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [8] 张津,程晓萍. 齿轮材料及齿轮表面工程技术发展现状[J]. 机械工艺师,1999,(2):36-39.
- [9] 黄华樑,蒙必胜. 钢齿轮表面合金涂层的显微结构和接触疲劳强度研究[J]. 机械传动,2000,24(4):23-27.

(下转第 15 页)

- [4] Six-Input Channel Analog Front End—AD73360[EB/OL]. Analog Device, Inc., 2000, www.analog.com, 2003 - 12 - 14.
- [5] ADSP2100 Family User's Manual[EB/OL]. Analog Devices, Inc., 1993, www.analog.com, 2003 - 12 - 14
- [6] DSP Microcomputer——ADSP—2181[EB/OL]. Analog Device, Inc., 1996, www.analog.com, 2003 - 12 - 14.
- [7] 吴敏渊, 金伟正, 胡志雄. ADSP 系列数字信号处理器原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

## ECG Signal Acquisition Instrument Based on USB 2.0

JIAO Zhi-feng, JI Zhong, ZHAO Ling, QIN Shu-ren

(Test Center, College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** An electrocardiogram (ECG) is an essential way for diagnosing the heart disease, and the test theories and systems work well with the practice application, whereas, as new technologies and devices come forth one after another, it allow us to acquire the ECG data more conveniently, more accurately, more comprehensively. The authors discuss the design of ECG data acquisition system based on the USB 2.0 protocol, and expatiates the system principle in detail. The system employs two AD73360 to sample the standard 12-lead signal simultaneously, which has a resolution of 16-bit. They utilize EZ-USB FX-2 as the USB interface device, which can transfer the data conveniently and quickly, and also permit the configuration of multi-system controlled by just one host. Considering the DSP as a powerful tool in the field of digital signal processing, ADSP-2181 has been chosen.

**Key words:** USB 2.0; ECG; data acquisition

(编辑 张小强)

(上接第4页)

## Surface Treatment and Coating Technologies on Gears

QIAN Wen-fu<sup>1</sup>, CAO Xing-jin<sup>1</sup>, LU Long<sup>1</sup>, HUANG Nan<sup>2</sup>, SUN Hong<sup>2</sup>, LENG Yong-xiang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Key Lab for Advanced Materials Technology of Chinese Education Ministry, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** TiN and C:N coatings are made on 20CrMo gears by PVD (Physical Vapour Deposition) technology and DFAD (Direct current Filtered Arc Deposition) technology. Then the authors puts forward the test rig, working under the conditions of 1 800 rpm, 12 N·m for 50 h, and the observations by body-microscope show that reducing wear and anti-wearing performance greatly enhanced when C:N film is used, TiN coatings can however, because the hardness of gears is evidently decreased when coating was processing. Direct current Filtered Arc Deposition (DFAD) technology are used on gears to improve the performance of reducing wear and anti-wearing.

**Key words:** PVD; DFAD; surface of gears; reduce wear and anti-wear

(编辑 成孝义)