

激光淬火对钛合金高温干摩擦特性影响的实验研究*

戴振东 王 珉

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

杨生荣 薛群基

(中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放实验室, 兰州, 730000)

摘要: 报道了钛合金 TC11 对轴承钢 GCr15 在室温到 450°C 大气环境下, 激光淬火前后球盘对比研究。结果表明, 经激光处理后, 钛合金在 150°C 和 300°C 抗磨能力明显提高, 但在室温和 450°C 改善不明显。

关键词: 钛合金 玻璃化 滑动摩擦 激光淬火

Experimental study on dry friction characteristics of titanium alloy TC11 before and after laser beam quenching

Dai Zhendong, Wang Min

(Department of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics And Astronautics, Nanjing, 210016)

Yang Shenrong, Xue Qunji

(Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

Abstract: Titanium alloy is a wide used as the blade material in aeroturbine. This paper reported the experimental results of wear capacity of bearing steel GC15 ball on Ti alloy disk processed by laser beam quenching (LBQ) or not, at the friction temperature of room temperature, 150°C, 300°C, 450°C. With the increasing of the friction temperature from room temperature up to 300°C, the wear rate of surface of Ti alloy increased. The scanning electron micrography proved that the large amount of Fe was found in worn zone of Ti alloy. But it was low greatly at 450°C, and the X ray photography indicated that an oxide film called glazing layer, which consisted of TiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃, formed to resist being worn. By using LBQ, the wear resistance of Ti alloy to dry friction at 150°C and 300°C was greatly improved, but there was no obvious improvement at room temperature and 450°C.

Key words: titanium alloy glazing sliding wear laser beam quenching

引 言

钛合金由于其较高的比强度和高温机械强度, 优异的耐腐蚀性, 得到了日益广泛的应用。在核电站、核电站、石油、化工工业和航海领域, 钛合金用于制造在腐蚀性介质中工作的冷凝固器^[1]。飞机结构上用于制造机翼、支架、横梁和蒙皮等。在动力工程中, 钛合金用于制造航空燃气轮机和蒸气轮机高温段轮盘和叶片^[2]。作为结构材料, 人们对钛合金的微动损伤的性能研究较多, 而对其滑动摩擦特性, 特别是高温环境下的干摩擦性能研究得较少。

* 本工作部分内容为中国科学院固体润滑开放实验基金和航空科学基金资助。

采用激光技术对金属表面输入高密度能量,使之在短时间内产生熔化或发生相变硬化,可使材料的耐磨性、抗腐蚀性有大幅度的提高,对此,国内外已经有研究^[3,4],但钛合金的激光相变硬化对其高温干摩擦特性的影响尚未见报道。我们通过金相分析、试件表面的扫描电子显微分析和光电子能谱分析,研究了钛合金 TC11 从室温至 450℃范围内的滑动干摩擦特性。

1 实验

1.1 实验机和试件

实验是在中国科学院兰州化学物理研究

所固体润滑开放试验室的 MG-100 高温滑动摩擦实验台上完成的。实验采用球-面接触形式。

球材料为 GCr15, 直接从市场购得。

试块(平面)材料为 TC11, 最终为线切割加工。其成分和强度列于表 1 和表

Table 1 Chemical compositions of TC11

Al	Mo	Zr	Si	Ti
5.8~7.0	2.8~3.8	0.8~2.0	0.2~0.35	remained

Table 2 Strength of TC11 and hardness of GCr15 to temperature

temperature(°C)	20	150	200	300	400	450	500
GCr15(HRC)	> 64	64	61	55	49	45	41
TC11(σ_b , MPa)	1114	968.5	943.	843	809	804	780
σ_b /HRC	17.4	15.4	15.5	15.3	16.5	17.8	19.0

2. 试样从环形基材上用线切割方法取得,其中一面经激光相变硬化处理(laser beam quenching, LBQ)。为提高吸收率,采用了发黑预处理,激光处理的参数为功率 600W,扫描速度 1000 mm/min,光斑直径 4mm。

1.2 实验参数和内容

实验在室温, 150℃, 300℃和 450℃大气环境、干摩擦条件下进行。实验载荷按点-面赫兹接触应力取为 TC11 材料室温屈服应力的一半(500 MPa), 实验机转速 300r/min, 对应相对滑动速度 0.2355m/min。实验考察温度对摩擦副的磨损率的影响,及激光相变硬化前后的变化。

实验前试件用丙酮在超声清洗器(KQ-50型)中清洗 10min。每次实验后,用光学显微镜对磨痕形貌及磨屑形态进行观察,测量球的磨斑大小和平面磨痕宽度,保留磨屑,然后清洗、烘干。最后在万分之一克感量的天平上称量磨损失重量。同时用粗糙度仪(BCJ-2型)测量磨痕宽度、深度和形貌。最后用扫描电子显微镜观察磨损区形貌,用光电子能谱仪测定化学成分及元素价态,并用应力仪及 X 光衍射仪试图测定表层应力状态。激光处理对材料的影响通过金相观察和微观硬度测定来加以考察。

2 实验结果及讨论

2.1 磨损形貌及磨屑形态

实验前试件最终为线切割加工,表面为放电所形成的海绵状形貌,如图 1a 右边部分所示。室温下,形成同心圆形的犁沟状磨痕,犁沟较密,深度较大,而且较长。局部可见明显的粘着撕裂形貌,如图 1a。犁沟深度也可从粗糙度测试结果看出,如图 2a。磨屑为白色片状。150℃和 300℃仍可见犁沟形磨痕,但所占面积减少;无犁沟部分形貌光滑,且有浅红色粉末覆盖,可见涂抹表观,如图 1b 和图 2b。450℃磨损区几乎全为红色细粉末所覆盖,可见原线切割加工的残留形貌,如图 1c 及图 2c。在随后进行的激光相变硬化表面磨损的实验中,磨痕区的形貌及磨屑特征未发现有明显差别。图 1a~d 为实验完成后磨损区形貌的电子显微照片。

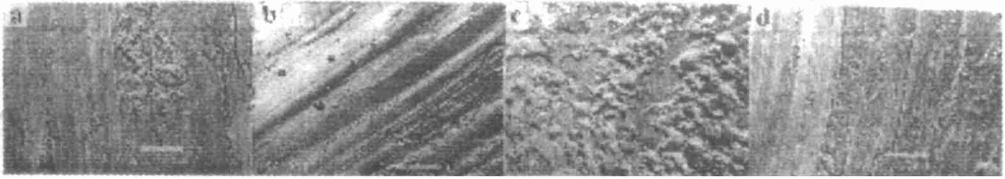


Fig. 1 SEM images of worn surfaces 200^x
a—room temperature b—300℃ c—450℃ d—300℃ after LBQ

2.2 温度、表面处理对磨损的影响

图 3 为名义接触应力 500MPa 条件下, 钛合金的磨损失重量与试验温度和循环次数(×10⁵)的关系。图 4 为相同条件下, 激光表面处理前后磨损量的对比及其和温度的关系。从图 3、图 4 可以看到, 450℃

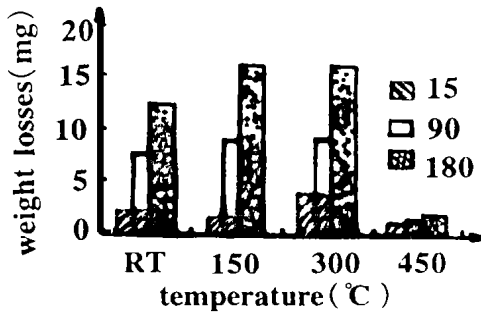


Fig. 3 Wear losses vs. temperature and running distance

2.3 磨损表面的成分分析

表 3 为不同实验条件下, 钛合金磨损表面成分的扫描电子显微测定结果。从测试结果可以看出, 随温度升高, 磨损面铁含量增加, 说明磨损使轴承钢向钛合金发生了转移, 这种转移在 450℃ 达到最大值, 这时, 无论试件是否经过激光淬火, 磨损区表面铁含量大幅度提高。和表面观察结果相对比, 对应工作面几乎被红色粉末所覆盖。为了弄清粉末成分及其与钛合金低磨损率之间的关系, 对磨损区, 激光处理后的磨损区及未参加工作的表面做了光电子能谱分析。图 5 为能谱图, 从结果可以看到, 有 TiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ 存在。

2.4 钛合金激光淬火前后的微观金相

钛合金经激光淬火的微观

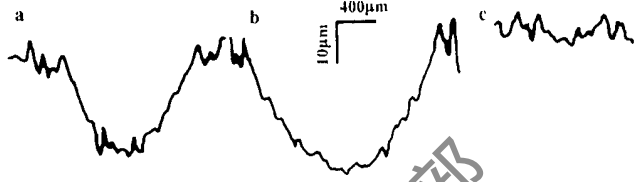


Fig. 2 Wear scars measured by a profilometer
a—room temperature b—300℃ c—450℃

磨损率最低。次之为室温下的磨损率。而在 150℃ 和 300℃ 磨损率较高。磨损率随温度的变化是非线性的。在所有实验条件下, 激光淬火试件的磨损量和未经处理的试件的值相比都有降低。但在 450℃, 这种差别不够明显。

实验测定了各种实验条件下的摩擦系数。由于测力传感器一直处于摩擦激振载荷作用之下, 反映出来的摩擦系数处于大幅度变化之中, 从而未看出明显的差别。

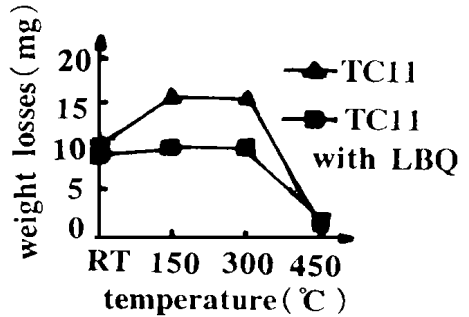


Fig. 4 Wear losses vs. temperature and surface treatment

Table 3 Surface compositions detected by SEM under various test conditions

temperature (°C)	TC11			TC11 with LBQ			
	20	300	450	20	300	450	450*
Al	5.21	5.17	3.23	5.14	4.94	4.18	4.90
Ti	93.01	91.85	65.72	94.27	91.00	82.36	94.03
Fe	1.78	2.98	30.73	0.59	4.06	13.46	1.07

* surface without wear

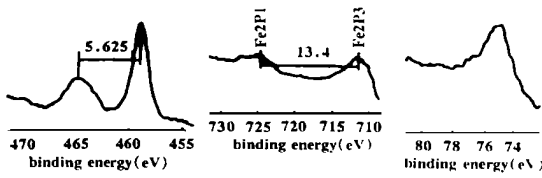


Fig. 5 XPS spectrum of worn surface

显细化,为针状马氏体结构,这些马氏体从晶界生长,垂直于晶界发展;这种结构强度较高,微观硬度HV362,比基体材料提高了56%。这都有助于提高其抗微动的能力。

2.5 磨损机理

磨损区形貌和磨

屑的显微观察,SEM观测和磨损区表面成分的XPS分析,揭示随温度变化,主要磨损机理是不同的。室温下机械应力作用是破坏的主导因素,表现为磨屑是金属色片状,磨损形貌有明显的犁沟特征,为较典型的粘着磨损。在450℃氧化作用占主导地位,这时,有大量的铁从轴承钢转移到钛合金磨损区表面,并伴随氧化反应。表现为磨损区氧原子浓度很高,X衍射证明磨损区表面为氧化物或无序结构。

对照图4和表2中 σ_b /HRC的变化,可见磨损失重量随温度的变化和 σ_b /HRC随温度的变化有明显的相似形,这暗示比强度对摩擦副的磨损率有明显影响。

3 主要结论

从室温到450℃,对钛合金和轴承钢配对副干摩擦条件下的实验结果,磨损表面的扫描电子显微分析,表面成分的光电子能谱分析结果可以得到以下主要结论:(1)钛合金TC11与轴承钢(GCR15)组成的,在滑动摩擦条件下的磨损机理与温度有明显的依赖性,室温下以粘着磨损为主,其磨屑为白色片状,破坏过程以力学过程为主。随温度升高,氧化磨损加强,在450℃磨损区几乎全为氧化物所覆盖。(2)激光相变硬化改善了钛合金的抗滑动磨损能力,其中,在室温和450℃效果不明显,而在150℃和300℃效果较好,这种相变硬化既提高了材料的硬度,又改善了其抗氧化能力。

我们的工作得到了航空科学基金和中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放试验室的资助。文中的SEM,XPS分别由固体润滑开放实验室赵家政教授、齐尚奎研究员、乔玉林、张军博士完成,金相分析由南京航空航天大学许洁同志完成,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 周芝骏,宁崇德. 钛的性质及应用. 北京:高等教育出版社,1993
- 2 Johnson R L, Bill R C. Fretting in Aircraft Turbine Engines. AGARD Conference Proceedings No. 161. Specialists Meeting on Fretting in Aircraft Systems, Munich, Germany, 6-12 October 1974: Paper 5

组织变化如图6所示。a为截面图,可见激光淬火对钛合金组织影响深度为0.4mm,其中0.15mm~0.2mm为白亮层,它由超细针状马氏体组成;b为基材金相,由粗大晶粒组成,晶界清晰,微观硬度HV232。c为激光淬火后的金相,晶粒明

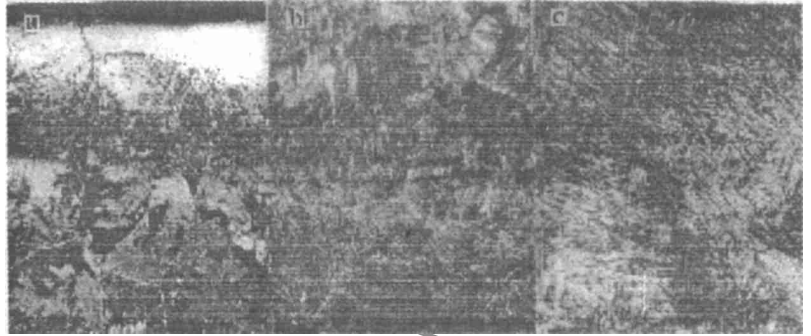


Fig. 6 Metallograph of TC11 250 \times

a—the cross section b—base materials c—after LBQ treatment

YAG 激光器电源节能技术与机器寿命的研究

张新宝 李 柱 谢铁邦

(华中理工大学机械学院仪器系, 武汉, 430074)

摘要: 在研究连续光泵浦 YAG 激光器电源特性及光学泵浦用氪灯特性的基础上, 设计出新的电源, 使连续光泵浦 YAG 激光器总的能耗下降 43%, 无故障寿命延长一倍, 对连续光泵浦 YAG 激光器广泛应用具有重大的实用意义。

关键词: YAG 电源 氪灯 节能技术

Theoretical analysis and tests of low energy consumption technology and apparatus life-span of YAG laser

Zhang Xinbao, Li Zhu, Xie Tiebang

(Department of Instrumentation, School of Mechanical Science and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Now we have developed a new power source for continuous light pumped YAG laser, whose energy consumption is reduced 43% and the non failure life span is doubled. The key technology of the new power source is to keep a proper current in Kr lamp. Generally, the current is a very high and the super high voltage is used to make the Kr lamp break down. We analyzed the negative resistant property of Kr lamp and designed a new circuit to reduce the maintenance current from several amps to less one amp. The experimental results show that circuit reduced the power consumption very much.

Key words: YAG electric power source Kr lamp low energy consumption technology

引 言

随着特种加工技术的普及, 激光技术越来越显得突出, 尤其是连续光泵浦 YAG 连续、脉冲和倍频激光器, 它们在医疗激光外科和工业激光加工中都成为重要的分支。而连续光泵浦 YAG 激光器却因光电效率低和无故障寿命短在国内的推广受到限制, 因此, 设计一种耗能少、

- 3 Yang D H, Zhang X Sh. Fretting wear characteristics of laser transformation hardened and laser melt solidification cemented stainless steel. Proceeding of China International Symposium for Youth Tribologists, Lanzhou, 1992: 303~ 307
- 4 Stokes P S N, Stott F H, Wood G C. The Influence of Laser Surface Treatment on the High Temperature Oxidation of Cr_2O_3 Forming Alloys. Conference: 2nd International Symposium on High Temperature Corrosion of Advanced Materials and Coatings. II, Les Embiez, France, 22~ 26 May 1989

* * *

作者简介: 戴振东, 男, 1962 年 11 月出生。副教授。现主要从事摩擦磨损过程的热力学模型、减摩耐磨表面改性技术(含激光处理和等离子喷涂)、机械系统设计等方面工作。