

文章编号: 0258-7025(2008)09-1423-06

红外激光划痕涂层的应力应变理论分析与试验研究

殷苏民 叶勇 冯爱新 程昌

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为研究涂层的热应力和应变与涂层结合强度之间的关系,对红外激光划痕后的涂层的热应力应变进行了理论分析,建立了涂层的热应力理论模型和应变公式。红外激光划痕涂层的试验结果表明,激光划痕后涂层在沿其厚度方向上的应变量有明显的突变过程,突变点的位置即是涂层从基体脱离下来的临界位置;激光划痕时涂层的剥离应力随涂层的温度增大而增大,并会呈现出两个阶段过程变化,进而说明了两个阶段之间的转折点反映了涂层结合强度的大小。

关键词 激光技术;激光划痕;应力应变;热应力模型;涂层;结合强度

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1423

Theoretical Analysis and Testing Research of Stress-Strain of Coating Scratched by Infrared Laser

Yin Sumin Ye Yong Feng Aixin Cheng Chang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract To research the relationship among the thermal-stress, strain and interfacial adhesion strength of coating. Thermal-stress and strain of coating were theoretically analyzed, and theoretical model of coating's thermal-stress and strain formulas were established. The infrared-laser scratch testing indicates that there is an evident break process along the thickness of coating after it was scratched by infrared laser and the position of break point is the critical location where the coating is broken off from substrate. The research results also show that the separate-stress of coating becomes stronger with the coating's temperature increasing when the coating is scratched by infrared laser. And the separate-stress presents two-phase process, which further illuminates that the turning point of two-phase process reflects the interfacial adhesion strength of coating.

Key words laser technique; laser scratch; stress-strain; thermal-stress model; coating; adhesion strength

1 引言

表面涂层技术是保护基材、提高材料表面性能的重要手段之一^[1,2],应用领域十分广泛。然而,涂层与基体之间的良好结合强度是涂层得以发挥其作用的基本条件^[3]。因此,涂层-基体结合强度是评价涂层质量的关键指标之一,同时也是评价材料表面改性质量好坏的关键所在^[4]。了解涂层应力应变情况对涂层-基体间的界面结合强度的影响,对优化残余应力状态和控制涂层(薄膜)结合强度具有重要的意义^[5,6]。本文通过理论推导,对红外激光划痕后

涂层的应力应变进行了分析,建立了涂层热应力应变的理论模型;通过对某试样涂层的激光划痕试验,探讨了涂层结合强度与涂层应力应变之间的关系。

2 涂层应力应变模型

2.1 红外激光划痕涂层原理

长脉冲红外激光束经入射激光束光路系统直接辐射薄膜试样表面,利用激光束对试样表面几十微米厚涂层的准静态加热,随热量的传导,在涂层-基体系统中形成温度场^[7]。由于涂层、基体材料的热

收稿日期:2008-03-11;收到修改稿日期:2008-04-30

基金项目:国家自然科学基金(50405035)和江苏省自然科学基金青年科技创新人才学术带头人项目(BK2007512)资助课题。

作者简介:殷苏民(1956—),男,江苏人,教授,主要从事激光加工与检测技术的研究。E-mail: smyin@ujs.edu.cn

膨胀系数和温度的差异,在涂层中形成热应力,当热应力达到一定值时,涂层与基体的结合界面开始发生变化,涂层材料产生脱粘。随后,伴随激光束能量的逐渐增大,涂层进一步发生界面裂纹扩展、翘曲、贯穿裂纹形成与扩展和剥落,图 1 所示为涂层界面的失效过程。激光能量连续增加的同时,试样相对于激光束作匀速进给运动,从而在试样表面形成划痕。

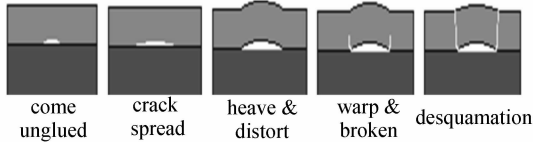


图 1 涂层界面失效过程

Fig. 1 Failure process of coating interface

2.2 划痕后涂层应力应变模型

假设激光辐照涂层时,涂层吸收部分的激光光强在 z 方向上的分布遵守光的吸收定律;并且由于热量在 z 方向上的传导深度远远小于激光在 x - y 平面的照射范围,所以只需考虑热传导在 z 方向的一维传导方程^[8]。那么,可以认为当激光划痕时,涂层产生的热应力 σ_{th} 主要集中在 z 方向上。又由于均匀涂层在 z 方向的尺寸比 x 方向(也是激光划痕方向)和 y 方向的尺寸要小得多,根据研究对象的这一特点及涂层界面失效形式,可以得出涂层被激光划痕后存在如图 2 所示的受力情况:1) 垂直于涂层结合界面的剥离应力为 σ_s , 并且容易知道涂层的剥离应力 σ_s 是激光划痕后产生的热应力 σ_{th} 与涂层内原来残余应力 σ_z 的代数和,即 $\sigma_s = \sigma_{th} + \sigma_z$; 2) 垂直于涂层结合界面断裂处的正应力为 σ_x ; 3) 涂层下表面与基体上表面之间的剪应力为 τ_{zx} 。而其他应力分量均为零^[9]。

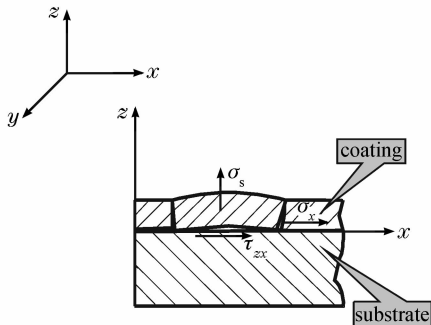


图 2 激光划痕后涂层受力示意图

Fig. 2 Force diagram of coating scratched by laser

因为热弹性材料受热后产生的总应变应该是由外力产生的应力应变与温度变化产生的应力应变两者叠加的结果,所以根据弹性力学中的热应力的广

义虎克定律^[10],有激光划痕后的涂层产生的应力与应变的理论关系式为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_z) + \alpha t, \\ \epsilon_y &= -\frac{\mu}{E}(\sigma_z + \sigma_x) + \alpha t, \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_x) + \alpha t, \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 E 为弹性模量; μ 为泊松比; α 为材料的线膨胀系数; t 为涂层的温度变化量; $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, 为剪切弹性模量。

由(1)式可知 ϵ_y 应变变量与 ϵ_x 和 ϵ_z 相比较很小,所以可以忽略不计,则(1)式可以进一步化简为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_z) + \alpha t, \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_x) + \alpha t, \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

从(2)式可以看出,涂层在 z , x 方向的应变变量不仅与该方向的正应力大小有关,还与材料的线膨胀系数、温度变化量有关,当温度变化量越大时应变变量也越大。

2.3 涂层热应力模型

图 3 为涂层受热应力模型,设涂层厚度为 δ ,当红外连续激光直接辐照在涂层表面时,涂层表面被加热,而由于涂层有一定的厚度,则会在涂层上、下表面产生温度差,设涂层上、下表面温度分别为 t_1 , t_2 , 则温度差为 $t = t_1 - t_2$ 。又因涂层较薄,可认为温度沿涂层厚度方向作线性变化,故对应的热膨胀也沿 δ 作线性变化。

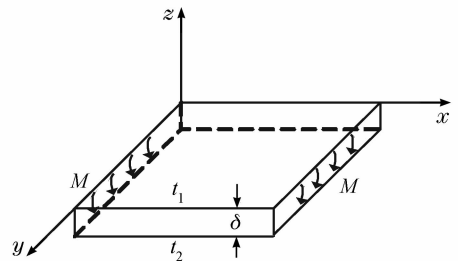


图 3 涂层受热应力模型

Fig. 3 Model of coating's thermal-stress

如果涂层材料是自由无约束的,那么当涂层上下表面有温度差时则会使涂层变成球面状,假设其中性面处的曲率半径等于 R ,当曲率半径很大(即曲率很小)时,则有^[10]

$$\frac{\alpha t}{2} = \frac{\delta}{2R} \quad (3)$$

以上是在自由胀缩下的弯曲,不产生热应力。但实际涂层由于有结合力,涂层本身存在内应力,则会在涂层上产生弯矩,此弯矩应与球面的曲率相抵消,即有

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} = \frac{12M}{E\delta^3}, \quad (4)$$

式中 M, I 分别为涂层单位长度的弯矩和惯性矩,且 $I = \frac{\delta^3}{12}$ 。由(3)式得出 R 并代入(4)式,则有

$$M = \frac{\alpha t E \delta^2}{12} \quad (5)$$

弯矩 M 作用在厚度为 δ , 宽度为单位长度的矩形面积上引起的弯曲热应力为

$$\sigma_{th} = \frac{M}{W} = \frac{\alpha t E \delta^2}{12} \cdot \frac{6}{\delta^2} = \frac{\alpha E t}{2}, \quad (6)$$

可见, σ_{th} 与 α, E 及温差 t 成正比。又因为 $\sigma_s = \sigma_{th} + \sigma_z$, 则有

$$\sigma_s = \frac{\alpha E t}{2} + \sigma_z, \quad (7)$$

可以看出,当涂层内残余应力 σ_z 一定时,涂层的热应力 σ_{th} 增大,其涂层的剥离应力 σ_s 也随之增大。那么当 $\sigma_s \geq \sigma_{co}$ (σ_{co} 为涂层与基体间的结合应力)时,则会出现涂层与基体脱离的情况。

3 试验研究

3.1 试样制备

将一块长 110 mm, 宽 70 mm, 厚度为 1.5 mm, 牌号为 304 的不锈钢板经过 1000# 砂纸磨光, 其表面粗糙度大约为 $1.6 \mu\text{m}$ 。再均匀涂上一层厚度大约 50 μm 的涂层, 该涂层主要成分为丙烯酸有机高分子, 其主要性能如表 1 所示^[11]。

表 1 涂层主要性能

Table 1 Main characteristics of coating

Name	Acrylic acid paint
Density / (g/cm ³)	1.05
Modulus of elasticity E / GPa	1.32~1.42
Poisson ratio μ	0.3~0.34
Coefficient of thermal expansion	2.5~5.0

3.2 试验装置

图 4 为试验装置示意图^[12], 由红外激光系统、工作平移台系统、激光划痕界面结合状况检测诊断系统、计算机及控制系统等组成。

激光器系统是在电脑控制下功率可在 0~

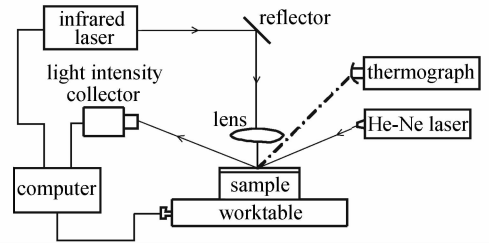


图 4 试验装置示意图

Fig. 4 Sketch map of testing equipment

200 W 范围内线性可调的红外连续半导体激光器, 输出波长为 976 nm, 激光光束经过 30 cm 的聚焦透镜汇聚后, 光斑直径可达到 1.0 mm 以内。工作台平移系统由一套二维平移台(在平面上的 x 方向和 y 方向)和步进电机组成, 步进电机可以分别控制平移台在平面 x 方向和 y 方向上以最小 0.1 mm/s 的速度直线运动。激光划痕界面结合状况检测诊断系统由 He-Ne 激光器、功率计和热成像仪等组成。He-Ne 激光器功率为 5 mW, 发出波长为 632.8 nm 的可见激光, 光斑直径大约为 2 mm; 功率计可探测光的波长范围为 400~1100 nm, 可测量光强度范围为 50 nW~50 mW; 热成像仪是一种能实时检测出被检测对象的温度参数和红外图像参数的仪器, 其实时检测温度精度可达 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 检测温度范围为 $-25 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。计算机及控制系统由工控机和控制软件组成, 对试验系统的红外激光器、工作平移台和光强度功率计进行控制。

3.3 试验参数

依据本试验对象的特点, 经过前期反复的试验和摸索, 最终设定的激光划痕试验参数如表 2 所示。

表 2 试验参数

Table 2 Test parameters

Laser power / W	0~50
Diameter of laser beam / mm	1.0
Scratch speed / (mm/s)	1.0
Scratch length / mm	100
Scratch time / s	100
Detection range of light collector	50 nW~50 mW
Detection wavelength / nm	632.8
Sampling point number	100
Sampling frequency / Hz	1
Sampling time / s	100
Detection range of temperature / $^{\circ}\text{C}$	$-25 \sim 300$
Sampling precision / $^{\circ}\text{C}$	0.1
Sampling point number	62
Sampling frequency / Hz	0.625
Sampling time / s	99.2

3.4 试验方法

试验过程分为两个阶段,在前一阶段里,首先在涂层试样表面上预先均匀选取 100 个采样点,并使这 100 个采样点均匀分布在长为 100 mm 的直线上。然后将试样放置在工作平移台上,打开 He-Ne 激光器(该激光器功率非常小,不会对涂层产生任何影响),使激光束直接辐照在第 1 个采样点上,与此同时,放置在对立侧的光强度功率计接收从涂层表面反射过来的激光束,接着利用计算机控制工作平移台带动涂层试样以 1.0 mm/s 的速度作进给运动,运动距离为 100 mm,那么 He-Ne 激光器光束就会按顺序逐个辐照这 100 个采样点,同时功率计通过采样点处反射光的强度会检测出这 100 个采样点表面状况。第二阶段里,首先关闭 He-Ne 激光器和功率计,打开红外半导体激光器,让计算机控制输出激光功率在 100 s 时间内从 0 W 线性递增到 50 W,保持光斑直径不变,并且计算机又控制工作台以 1.0 mm/s 的速度匀速直线运动 100 mm 的距离,那么就会在涂层试样 100 个采样点处上形成一道由浅渐深的直线划痕。在划痕过程中,热成像仪实时检测并记录涂层划痕处的温度变化值,其采样频率为 0.625 Hz。涂层划痕完后,关闭半导体激光器,并等待涂层试样自然冷却到室温,然后再次打开 He-Ne 激光器和功率计,以同样的方法检测涂层被划痕后的涂层表面原 100 个采样点的变化状况。

4 试验结果与分析

图 5 是激光划痕前检测到的涂层表面 100 个采样点处反射的 He-Ne 激光束强度的大小。图 6 是激光划痕后所检测到的该 100 个采样点处反射过来的激光束的强度。图 7 是激光划痕涂层时,热成像仪所检测到的涂层划痕处的实时温度值,可以看出

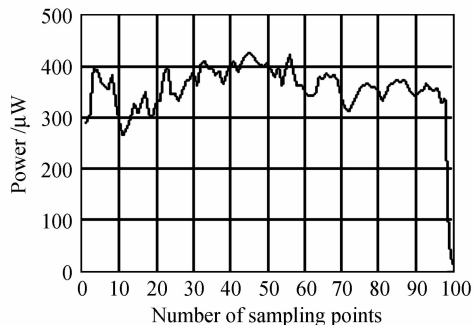


图 5 划痕前采样点处反射的光强度

Fig. 5 Power of reflection of sampling points before being scratched

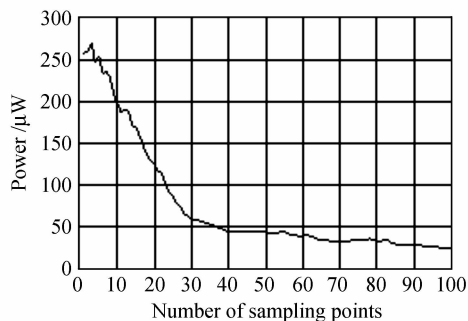


图 6 划痕后采样点处反射的光强度

Fig. 6 Power of reflection of sampling points after being scratched

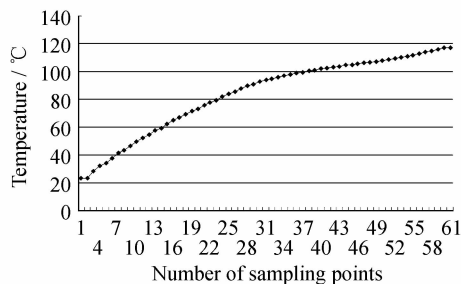


图 7 激光划痕时采样点的温度值

Fig. 7 Temperature of sampling points when coating is scratched by laser

温度升高的速率呈现两个阶段的变化。

从图 5 可以看出,涂层被激光划痕前表面状况是均匀的,采样点处反射光的强度主要分布在 300~400 μW 之间。从图 6 可以看出,激光划痕后涂层表面各采样点的反射光强度有显著的不同。

对比图 5 和图 6 可以看出:1) 划痕后的反射光强度在第 1~35 个采样点处大幅度减弱,以后就几乎不发生变化。这是由于红外激光划痕涂层后,涂层受热辐射作用后在其表面不同处发生了不同程度的破坏。当激光功率不大时,在涂层表面产生的热辐射作用不大,对涂层几乎没什么影响,功率计所接收的反射光强度减弱也很少;当激光功率逐渐增加时,对划痕处涂层的热辐射作用越来越大,就会使局部涂层的温度升高,涂层发生变形、膨胀起泡,与基体间产生脱胶,此时涂层的局部变形、凸凹不平使辐照在其表面的 He-Ne 激光束产生漫反射,从而减弱了功率计接收反射光的强度;当激光的功率进一步加大时,划痕处涂层就发生翘变、破裂,从基体上脱落后,功率计在该处能接收的反射光强度进一步减弱;最后当激光功率升到一定值后,激光划痕完全把涂层破坏掉了,并且涂层与基体发生了剥离脱落,如图 8 所示。所以自该处以后功率计能接收到的反射

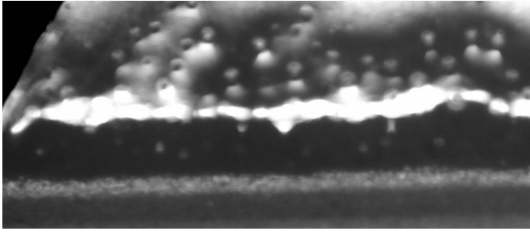


图8 激光划痕后涂层破坏点放大50倍后的光学显微图

Fig. 8 Optical micrograph with 50 times enlarging of broken coating after being scratched by laser

光就很弱,并且几乎保持不变。

2) 由于在试验过程中,激光划痕处的涂层表面产生明显的膨胀、变形、翘变和脱落等破坏主要是沿涂层厚度方向(z 方向)发生的,因此可以认为涂层在 z 方向的应变变化情况是影响涂层与基体结合强度的最主要因素。在忽略其他次要因素后,通过功率计检测划痕前后反射光强弱的参数来反映涂层在 z 方向的应变情况^[13],即利用宏观的涂层划痕处的变形量来间接反映涂层划痕处的应变。

图9是均匀选取划痕处19个样点(在原来100个采样点中每隔5个选取1个)对应的反射光强度所计算出的涂层在 z 方向的变形量,计算公式为

$$\epsilon_z = \frac{P_{\text{before scratching}} - P_{\text{after scratching}}}{P_{\text{before scratching}}} \times 100\%, \quad (8)$$

从图9可以看出,划痕处采样点在 z 方向的变形量呈明显的两个阶段过程。即从第1个采样点到第35个采样点的位置(样点 $7 \times 5 = 35$)处,涂层的变形量呈线性递增,第35个采样点以后划痕处的涂层的变形量达到最大并几乎不变。

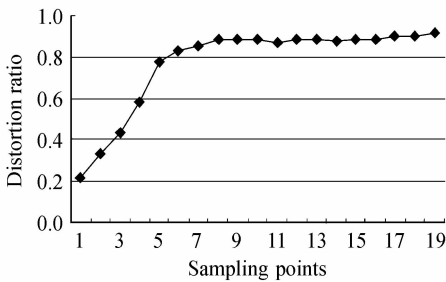


图9 划痕后采样点在 z 方向的变形量

Fig. 9 Rate of strain of sampling points in z direction after being scratched

另一方面,由(2)式中的一个子公式

$$\epsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_x) + \alpha t, \quad (9)$$

可以看出,在 E, μ, α, σ_z 和 σ_x 保持不变的情况下, $\epsilon_z \propto t$ 。再结合激光划痕时涂层的温度曲线(图7),可以得出划痕后涂层在 z 方向的应变呈如图8所示

两个阶段的变化是成立的。

图9中第35个采样点以后涂层的变形量达到最大并几乎保持不变,可以得出在划痕处第35个采样点位置附近涂层的变形量就是涂层与基体结合强度大小在应变上的具体反映。从而可知,该点位置即是涂层脱离基体的临界位置。

从(7)式可以得出,当激光划痕前涂层在 z 方向的残余应力 σ_z 保持不变时,并暂不考虑基体受热对涂层应力产生的影响,涂层与基体间的剥离应力 σ_s 与 t 呈线性关系。另外,从图7还可以看出,涂层的剥离应力 σ_s 会随激光划痕时温度变化速率的不同分两个阶段变化,即在前一个阶段(从第1个采样点到第34个采样点),剥离应力 σ_s 随划痕处涂层温度快速升高而显著增大;在后一个阶段(从第35个采样点到第62个采样点),剥离应力 σ_s 随涂层温度变化量不大而增加较少。由于计算的剥离应力 σ_s 是 z 方向的,再结合(9)式可以看出 z 方向的应力越大,涂层在 z 方向的应变 ϵ_z 也越大。

另外激光划痕时涂层出现如图7所示的温度变化是由于不同材料对红外激光吸收率不同所引起的^[14]。在前一阶段,激光辐照在涂层表面,使涂层材料带间跃迁或碰撞电离,形成大量自由载流子,结果使材料对激光的吸收系数迅速增大^[15],从而使涂层温度快速升高;而后一阶段,由于激光把涂层已经破坏掉了,所以激光辐照的是基体表面,而基体材料是金属不锈钢,它对长波长的激光吸收率很低^[16],远不及涂层材料,所以,在后一阶段划痕涂层处的温度升高得不是很快。从而可以得出两个阶段的转折点处即是涂层与基体发生剥离破坏的临界位置,而此时对应的剥离应力 σ_s 即是涂层与基体结合强度大小的直接反映。

5 结论

1) 建立了涂层在热应力应变下的理论模型,得出涂层的剥离应力与激光划痕产生的热应力和涂层本身的残余应力之间的关系。

2) 结合剥离应力公式(7)和试验时温度参数,利用涂层在 z 方向的应力与应变的公式(9)分析验证了在激光划痕时涂层的应变呈出两个阶段的变化。并且得出涂层-基体间的结合强度与涂层的应变量的关系,进而得出薄膜涂层破坏的临界点与激光功率参数和温度场参数之间的关系。

3) 通过推导的热应力模型公式和试验温度参数得出了激光划痕处涂层剥离应力变化规律,即剥

离应力随温度的变化呈现出两个阶段的变化,并且得出两个阶段的转折点处对应的剥离应力即是该涂层与基体结合强度大小的直接反映。

参 考 文 献

- Feng Aixin, Xie Huakun, Zhang Yongkang *et al.*. Study on stress-strain diagnosis technology of bonding state of film-substrate interface [J]. *Tool Technique*, 2003, **37**(12):44~46
冯爱新,谢华锬,张永康等.膜-基界面结合状况应力-应变诊断技术研究[J].工具技术,2003,**37**(12):44~46
- Feng Aixin, Zhang Yongkang, Xie Huakun *et al.*. Characterization of interfacial adhesion and bond strength between thin film coating and substrate by scratch testing [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2003, **24**(2):15~19
冯爱新,张永康,谢华锬等.划痕试验法表征薄膜涂层界面结合强度[J].江苏大学学报(自然科学版),2003,**24**(2):15~19
- Su Xiuliang, Zhang Xinyu. Interfacial bonding strength between surface coating and substrate and its measurement [J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2004, **24**(2):6~11
苏修梁,张欣宇.表面涂层与基体间的界面结合强度及其测定[J].电镀与环保,2004,**24**(2):6~11
- Kurt. H. Stem. Metallurgical and Ceramic Protective Coating [M]. London: Chaopman & Hall, 1996. 306~333
- Deng Shuifeng, Yang Jiantao, Zheng Xuejun. Residual stress in $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ ferroelectric thin films prepared by pulsed laser deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1693~1698
邓水凤,杨建桃,郑学军.脉冲激光沉积法制备的PZT铁电薄膜的残余应力[J].中国激光,2005,**32**(12):1693~1698
- Kong Dejun, Zhang Yongkang, Chen Zhigang *et al.*. Effects of laser heat treatment on properties of Ni-P alloy film by chemical deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):871~875
孔德军,张永康,陈志刚等.激光热处理对化学沉积Ni-P合金薄膜性能的影响[J].中国激光,2007,**34**(6):871~875
- A. X. Feng, Y. K. Xie, L. Cai *et al.*. A study on the new method of laser scratch testing technique to characterize interfacial adhesion and bond strength between thin film and substrate [J]. *Key Engineering Material*, 2004, **259-260** (Suppl.):615~619
- Song Feng, Zou Wanfang, Tian Bin *et al.*. Model of one-dimensional thermal stress applied in paint removal by Q-switched short pulse laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (11):1577~1581
宋峰,邹万芳,田彬等.一维热应力模型在调Q短脉冲激光除漆中的应用[J].中国激光,2007,**34**(11):1577~1581
- Zhang Yongkang, Kong Dejun, Feng Aixin *et al.*. Study on the determination of interfacial binding strength of coatings (I): Theoretical analysis of stress in thin film binding interface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6):2897~2900
张永康,孔德军,冯爱新等.涂层界面结合强度检测研究(I):涂层结合界面应力的理论分析[J].物理学报,2006,**55**(6):2897~2900
- Li Weite, Huang Baohai, Bi Zhongbo. Theoretical Analysis and Application of Thermal-Stress [M]. Beijing: China Electricity Press, 2004. 59~62,69~82
李维特,黄保海,毕仲波.热应力理论分析及应用[M].北京:中国电力出版社,2004.59~62,69~82
- Xian Guan, Shen Zhicong, Wang Tang. Coefficient of thermal expansion and adhesion strength of coating [J]. *Coatings and Finishing Consultation*, 2007/8/10
贤官,沈志聪,王塘.涂层的热膨胀系数与附着力[J].涂料涂装资讯网,2007/8/10
- Feng Aixin, Zhang Yongkang, Zhou Ming *et al.*. The method and equipment of infrared laser scratch testing technique to characterize interfacial bond strength of film-substrate [P]. China Patent: 02138511.4,2003-03-26
冯爱新,张永康,周明等.界面结合强度的准静态激光划痕测量方法及装置[P].中国专利:02138511.4,2003-03-26
- He Ning, Liao Xin, Ao Faliang. Application of laser in the measurement of object surface coating uniformity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(Suppl.):189~192
何宁,廖欣,敖发良.激光在物体表面涂层均匀度探测中的应用[J].中国激光,2008,**35**(增刊):189~192
- Chen Qinghua. Selection of absorption films and its application in infrared laser treatments of metallic materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1023~1026
陈庆华.吸收膜的选择及其在红外激光金属表面处理中的应用[J].中国激光,2002,**A29**(11):1023~1026
- Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, Ye Yunxia. Machining Technique of Laser [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 152~158
张永康,周建忠,叶云霞.激光加工技术[M].北京:化学工业出版社,2004.152~158
- Cui Chunyang, Wu Wei, Yu Gang *et al.*. On laser absorptivity of ductile iron [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):977~980
崔春阳,吴炜,虞钢等.球墨铸铁材料对激光的吸收率[J].中国激光,2006,**33**(7):977~980