doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.01.005

# 基体材料对 TiN 薄膜表面液滴及薄膜结合力的影响

龚 才<sup>1,2</sup>,代明江<sup>2</sup>,陈明安<sup>1</sup>,韦春贝<sup>2</sup>,侯惠君<sup>2</sup>

(1. 中南大学 材料科学与工程学院,长沙 410083;2. 广东省工业技术研究院(广州有色金属研究院)新材料 研究所,广州 510651)

摘 要:采用真空阴极电弧离子镀技术分别在 4Cr5MoSiV1(H13)模具钢、Cr18Ni9Ti(304)不锈钢、YG6 硬 质合金、Ti6Al4V(TC4)钛合金 4 种基体表面沉积 TiN 薄膜。利用扫描电镜(SEM)对薄膜表面液滴进行观察 分析,通过划痕仪对薄膜的膜/基结合力进行表征。结果表明:基体材料不同,TiN 薄膜上液滴的密度、尺寸 存在明显的区别。其中,镀膜后 H13 钢和 304 不锈钢表面的液滴数量最多,YG6 硬质合金次之,TC4 钛合金 最少;薄膜的膜/基结合强度依次为 YG6 硬质合金>H13 钢>304 不锈钢>TC4 钛合金。

关键词:真空阴极电弧离子镀;TiN薄膜;液滴;膜/基结合力

中图分类号: TG174.444; O484.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2013)01-0027-07

#### Effects of Different Substrates on the Droplets and Adhesion Strength of TiN Films

GONG Cai<sup>1,2</sup>, DAI Ming-jiang<sup>2</sup>, CHEN Ming-an<sup>1</sup>, WEI Chun-bei<sup>2</sup>, HOU Hui-jun<sup>2</sup>

 School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083; 2. Institute of Surface Engineering, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510651)

**Abstract**: TiN films were deposited on 4Cr5MoSiV1(H13) die steel, Cr18Ni9Ti(304) stainless steel, YG6 cemented carbide and Ti6Al4V (TC4) titanium alloy substrates, respectively, by vacuum cathodic arc ion plating. Droplets on TiN films were observed and analysed by scanning electron microscopy (SEM) and the adhesion strength of the coating was characterized by scratching tester. The results show that droplets' densities and sizes on the film surfaces have evident difference among the four different substrates. From the statistical analysis of the experimental results, the number of droplets on H13 steel and 304 stainless steel are much more than that on YG6 cemented carbide and TC4 titanium, and the droplets' densities on TC4 titanium is the least. Adhesion strength of the films on the four substrates are also different. From the highest to the lowest, the adhesion strength of films on different substrates are, in order, YG6 cemented carbide, H13 steel, 304 stainless steel and TC4 titanium.

Key words: vacuum cathodic arc ion plating; TiN films; droplets; film/substrate adhesion strength

#### 0 引 言

电弧离子镀 TiN 薄膜目前已在刀具、模具及 装饰等领域得到了广泛应用,它因沉积速度快、 金属粒子离化率高、镀膜过程控制稳定、设备和 维护成本较低,已经成为真空物理气相沉积技术 在工业镀膜应用市场上影响最大的一个分支<sup>[1]</sup>。 电弧离子镀 TiN、CrN、ZrN 等薄膜具有优异的物 理、化学性能,具有硬度高,耐磨性好,摩擦因数 小以及良好的化学相容性等优点,已经得到了广 泛的应用<sup>[2-3]</sup>。但是,真空电弧离子镀存在一个很 大的弱点,就是真空电弧产生的阴极射流中存在 着相当数量的液滴,其大小在微米数量级,最大 可以达到数十个微米。液滴的存在,大大降低了 薄膜的物理、化学、机械等方面的性能,因而限制

收稿日期: 2012-11-06; 修回日期: 2013-01-05

作者简介: 龚才(1987-), 男(汉), 湖南常德人, 硕士生; 研究方向: 材料表面改性处理

网络出版日期: 2013-01-14 11:44; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130114.1144.002.html 引文格式: 龚才,代明江,陈明安,等. 基体材料对 TiN 薄膜表面液滴及薄膜结合力的影响 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1):27-33.

了这种方法的应用范围。因此,对液滴产生的原因,以及影响液滴数量、尺寸、形貌、空间分布的因素的研究是非常有意义的。

近年来,随着研究人员对金属液滴研究的不 断深入,已发现镀膜时的沉积参数(弧电流、反应 气体分压、脉冲偏压等)对液滴的形貌、尺寸及其 分布有着重要的影响。但是,不同基体材料对液 滴影响的相关报道则比较少。文中选择了 4Cr5MoSiV1(H13)模具钢、Cr18Ni9Ti(304)不 锈钢、YG6硬质合金、Ti6Al4V(TC4)钛合金4种 基体材料,沉积TiN薄膜,并分析了不同基体材 料对TiN薄膜表面液滴和膜/基结合力的影响。

## 1 试验方法

试验在国产的 AS700DTX 型自动控制多弧 离子镀膜机中进行。该设备炉内共装有 12 个圆 形靶材,如图 1 所示。



图 1 电弧离子镀设备结构示意图 Fig. 1 Scheme of the arc ion plating system

试验所用 Ti 靶的纯度为 99.9%, 氩气和氮 气的纯度为 99.999%。试验用基体材料的化学 成分见表 1。

表1试验用基体材料的化学成分(质量分数/)	%)
-----------------------	----

Table 1 T	`he component	of the	different	substrate	materials	(w/%	)
-----------	---------------	--------	-----------	-----------	-----------	------	---

Materials	Elements/ %								
H13	С	Si	Mn	Cr	Mo	V	Р	S	Fe
	0.32~0.45	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20	≪0.03	≪0.03	Bal.
304	Cr	Ni	Ti	С	Si	Mn	Р	S	Fe
	18.0~20.0	8.0~10.5	0.50~0.80	≪0.08	≪1.00	≪2.00	≪0.04	≪0.03	Bal.
TC4	Ti	Al	V	Fe	С	Ν	Н	0	
	Bal.	5.50~6.80	3.50~4.50	≪0.03	≪0.01	≪0.05	≪0.01	≪0.20	
YG6	WC	Co							
	94	6							

4 种基体材料(H13 钢、304 不锈钢、TC4 钛合 金、YG6 硬质合金)最终热处理后的硬度分别为 578 HV<sub>0.3</sub>、330 HV<sub>0.3</sub>、310 HV<sub>0.3</sub>和 1670 HV<sub>0.3</sub>。 基体材料 H13 钢、304 不锈钢、TC4 钛合金为棒 材,线切割成 $\phi$  30 mm×7 mm 的试样,YG6 硬质 合金的规格为 10 mm×10 mm×3 mm。样品通 过砂纸打磨后在抛光机上抛光至镜面,然后分别 用无水乙醇溶液和丙酮溶液超声波清洗,烘干后 放进真空镀膜室。

TiN 薄膜沉积前,本底真空抽至 5×10<sup>-3</sup> Pa, 用 -1 000 V 偏压对样品进行离子轰击清洗 20 min,去除样品表面的氧化物及吸附的污物; 为了便于观察表面液滴的数量,镀膜时间为 5 min。TiN 薄膜的沉积工艺如下:基体偏压-50 V, 电流 105 A,氮气压强 0.5 Pa,温度 350 ℃,时间 5 min,Ti 靶/样品之间的距离为 150 mm。测试 薄膜结合力所用的试样镀膜时间延长至 30 min。

采用 JEOL JSM-5910 型 SEM 对 TiN 薄膜 表面液滴进行观察。同一样品随机选取 6 个观 察区域进行拍照,倍数为 1 000 倍,并使用科学图 像分析软件 ImageJ 对试样的 SEM 照片进行分 析测量,取 6 次测量结果的平均值,最后对液滴 的数量、尺寸、面积进行统计<sup>[4-5]</sup>。

薄膜厚度采用 6JA 光干涉显微镜进行测试。 采用 HH-3000 薄膜结合强度划痕试验仪测量 膜/基结合力,最大载荷为 100 N,加载速度为 100 N/min, 划痕速度为4 mm/min。

# 2 试验结果与讨论

## 2.1 不同基体材料对薄膜沉积速率的影响

测试发现在试验所设置的同一工艺参数条 件下,沉积在不同基体材料表面的 TiN 薄膜厚度 并无明显差别。沉积时间为 5 min 时,薄膜厚度 约为 0.18  $\mu$ m;沉积时间为 30 min 时,薄膜厚度 约为 1.08  $\mu$ m;薄膜的沉积速率均为 36 nm/min。 基体材料对薄膜沉积速率并没有影响。

#### 2.2 不同基体材料镀膜后的表面形貌

镀膜后,通过 SEM 观察到不同基体材料表 面大液滴的形状都包含了4种典型的类型,只是 不同形状的大液滴在不同的基体上数量不一样 而已,TC4 钛合金表面4 种典型的大液滴形状如 图 2 所示。

从图中可以看到,大液滴的形貌差别较大, 主要有中间凹陷四周凸起的圆盘形(图中液滴 1)、表面平坦的圆饼形(图中液滴 2)、梭形(图中 液滴 3)、向一端凹陷的长条形或椭圆形(图中液 滴 4)等类型。

大液滴中间有时会凹陷,这可能是由于液滴 沉积到基体表面时,心部温度高,这些液滴的周 边先冷却,心部在随后的冷却过程中发生收缩, 形成图中液滴1所示的形状<sup>[2]</sup>。液滴2的形成原 理与液滴1类似,只是它的尺寸比液滴1小,在空 间飞行过程中温度比液滴1降低的快<sup>[6]</sup>,到达基 片前为半凝固态,以一定速度撞击到基片上发生 变形继而迅速凝固成表面平坦的圆饼形。

大液滴之所以会出现一端凹陷的长条形或 椭圆形,这可能是液滴与阴极表面以一定的角度 (≥15°<sup>[7]</sup>)、一定的速度(10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup> m/s<sup>[8]</sup>)从阴极 靶表面喷出后,到达基片之前仍以液态形式存 在,在到达基片瞬间仍然遵从液体流动规律<sup>[9]</sup>。 当较大的液滴以较小的角度从阴极表面发射出 来后,顺着工件架旋转的方向以一定速度到达基 片上时,由于惯性作用它将继续向前运动。同 时,由于飞行过程中温度的降低使液滴的粘性增 大流动性降低,金属液滴在基片上运动很小的距 离后剩下的动能不足以使它继续运动,但是还是 有继续运动的趋势,这就造成了流动的液体在前 进方向的一端发生堆积,这时距离液滴到达基体 已有一定时间,此时液滴迅速收缩凝固,所以形 成了图中所示的向一端凹陷的长条形或椭圆形 的液滴。



图 2 镀膜后 TC4 钛合金表面大液滴的形貌 Fig. 2 Droplets morphologies of the TiN films on TC4 titanium alloy substrate

## 2.3 不同基体材料表面液滴的数量和尺寸分析

对不同基体电弧离子镀 TiN 薄膜后的表面 形貌进行扫描电镜观察,如图 3 所示。从图 3 中 可以观察到镀膜后 H13 钢与 304 不锈钢(图 3(a) 和 3(b))表面的液滴数量和尺寸明显比 YG6 硬 质合金(图 3(c))和 TC4 钛合金(图 3(d))的多和 大,同时 YG6 硬质合金表面的液滴数量也比 TC4 钛合金的多。

使用图像分析软件 ImageJ 进行分析后,4 种 不同基体表面液滴数量、尺寸分布如表 2 所示。从 表 2 中可以明显的看出镀膜后 H13 钢表面的液滴 数量最多,为 7.53×10<sup>4</sup> 个/mm<sup>2</sup>;304 不锈钢表面 液滴数量和 H13 钢差不多,为 7.08×10<sup>4</sup> 个/mm<sup>2</sup>; YG6 硬质合金较少,为 5.00×10<sup>4</sup> 个/mm<sup>2</sup>;TC4 钛 合金最少,为 3.07×10<sup>4</sup> 个/mm<sup>2</sup>。H13 钢、304 不 锈钢、YG6 硬质合金、TC4 钛合金表面液滴总面积 与薄 膜 面 积 的 比 率 分 别 为 3.400%、3.383%、 2.725%、1.900%(如表 2 所示),也证明了上面的 现象。



(a) H13 (b) 304 (c) YG6 (d) TC4

图 3 不同基材镀膜后表面的 SEM 图

Fig. 3 SEM photos of different substrates after plating

## 表 2 不同基体表面液滴的数量和尺寸分布

Table 2 The numbers and sizes distribution of droplets on different substrates

Materials	Numbers of	Number ratio of droplets	Droplets/Film	Mean droplet	Maximum	
	droplets/( $10^4 \text{ mm}^{-2}$ )	less than 3 $\mu m/\%$	area ratio/%	diameter/ $\mu$ m	droplet size/ $\mu$ m	
H13	7.53	98.13	3.400	0.579	21.693	
304	7.08	98.98	3.383	0.618	25.538	
YG6	5.00	98.13	2.725	0.783	23.666	
TC4	3.07	99.08	1.900	0.803	20.451	

同时从表 2 中还可以看出 4 种不同基体表面 液滴尺寸 $\leq 3 \mu m$ 的数量占总数量的比例都超过 了 98%,说明 4 种不同基体表面液滴的尺寸主要 集中在 0.2~3  $\mu m$ 的范围内,超过 3  $\mu m$ 的大液 滴数量很少,这从图 3 中也可以看出来。

液滴尺寸之所以主要集中在 0.2~3 μm 的 范围内,主要是由靶材自身和沉积参数决定的。 因为 Ti 的熔点较高(1 670 ℃),在电弧离子镀过 程中,同样的沉积参数条件下,Ti 阴极表面形成 的熔池较小,故不易发射尺寸较大的液滴;Ti 有 较低的蒸汽压 26 Pa(2 000 ℃),从 Ti 阴极靶熔 地发射的液滴在空间飞行时不易蒸发,能顺利的 到达基体表面<sup>[10-11]</sup>。文献[10-11]对一定沉积参 数下,不同靶材电弧离子镀膜过程中向空间发射 液滴的情况进行了研究,研究表明:Ti 靶向空间 发射液滴的平均尺寸为 0.55  $\mu$ m,最大尺寸为 5.3  $\mu$ m,90%的液滴尺寸都小于 1.01  $\mu$ m。分析 表明:4 种基体能统计到的最小液滴尺寸均为 0.283  $\mu$ m。这是由图片的分辨率决定的,1 000 倍 下的 SEM 图,ImageJ 软件能识别的颗粒最小尺 寸为 0.283  $\mu$ m。

此外,从表2还可以看出,4种基体表面最大

液滴的尺寸基本上没有区别。主要是阴极熔池 发射出来的超大液滴的体积较大,在空间飞行过 程中蒸发的比较少,到达基体表面时尺寸基本上 没发生多大变化。

4 种基体材料表面不同尺寸范围的液滴分布 规律如图 4 所示。由图 4 可以明显看出:4 种基 体材料表面液滴数量的差异主要集中在 0.2~ 1.0 μm的范围内,即主要集中在小液滴的数量 上。液滴尺寸在 0.2~0.3 μm 范围内的数量, H13 钢(图 4(a))和 304 不锈钢(图 4(b))的差不 多,它们分别是 YG6 硬质合金(图 4(c))的 2 倍, 是 TC4 钛合金(图 4(d))的 3.3 倍。由表 2 可知: YG6 硬质合金表面液滴的总个数相对于 H13 钢减 少了 33.51%,而液滴所占面积才减少了 19.85%,这说明 YG6 硬质合金表面上小液滴  $(0.2 \sim 1.0 \mu m)$ 相对于较大液滴 $(1.0 \sim 3.0 \mu m)$ 减少得快些,即差异主要集中在 0.2 ~ 1.0 μm 范 围内;TC4 钛合金表面液滴的总个数相对于 H13 钢减少了 59.24%,而液滴所占面积才减少了 44.12%也是这个原因。

另外,造成表 2 中 4 种基体上液滴平均尺寸 TC4>YG6>304>H13,同样也是上述原因。





Fig. 4 Distribution of droplets on different substrates surface after plating

#### 2.4 不同基体材料对薄膜性能的影响

图 5 为 4 种不同基体材料镀膜后的表面划痕 形貌。由图可知:4 种材料中 YG6 硬质合金的结 合力最好,100 N时也未见有薄膜剥落,如图 5(a); H13 钢次之,薄膜与基体的结合力约为 60 N,如 图 5(b);304 不锈钢较差,结合力约为 35 N,如 图 5(c);TC4 钛合金最差,结合力约为 20 N,如 图 5(d)。此外,H13 钢和 304 不锈钢划痕表面、 划痕边缘有崩膜点,划痕内部有裂纹产生,但直 到 100 N时薄膜也没有被划破。而 TC4 表面薄 膜在 20 N时已经露出了基体,薄膜被划破。这 说明 TiN 薄膜更容易在 H13 钢和 304 不锈钢基 体表面形成结合良好的膜层。

薄膜与基体之间的结合强度与基体的硬度、

结构和表面状态有关。对于硬质薄膜来说,基体的 硬度越高,在载荷的作用下越不容易发生塑性变 形,从而对薄膜起到一个强的支撑作用,延缓了由 于基体塑性变形所造成的薄膜过早撕裂和剥落,从 而使膜层与基体结合的更好。如果基体硬度低,则 在载荷作用下,硬而薄的膜层易产生变形、开裂以 致剥落,从而使结合力下降。4种基体材料的硬度 YG6 (1 670  $HV_{0.3}$ ) > H13 (578  $HV_{0.3}$ ) > 304 (330 HV<sub>0.3</sub>)>TC4(310 HV<sub>0.3</sub>)。YG6 硬质合金的 硬度比其它3种材料的硬度高很多,因此膜/基结 合力最大。H13 钢的硬度次之,其表面薄膜的膜/ 基结合力也相应的低些。304 不锈钢和 TC4 钛合 金的硬度相差不多,然而 304 不锈钢薄膜的膜/基 结合力却优于 TC4 钛合金的结合力。由此可见, 除基体材料的硬度外,膜/基结合力还应与基体 的结构、成分等有关。

另外,YG6硬质合金中总存在着一定量的游 离碳,这部分碳的活性较大,有利于与钛离子及 氮离子结合成碳氮化物,从而有助于薄膜与基体 的结合。同时,在较高的镀膜温度与离子轰击条 件下,TiN薄膜中的 Ti 元素有向基体扩散的趋 势,同样 YG6硬质合金基体中的 W、Co 元素也 向薄膜中扩散,扩散的程度比较深,这样就在界 面处形成了一个致密的物理混合层,即"伪扩散 层",更加有利于 TiN 膜层与基体的结合<sup>[12]</sup>。而 在研究大颗粒数量时由于镀膜时间只有 5 min, 元素还来不及扩散,因此大颗粒与界面的结合比 较差,容易被后继的离子轰击而脱落,因此颗粒 的数量并不是最多。H13 钢中含有合金元素 Cr、 V 容易与液滴表面的 N 结合形成氮化物,与 TiN 属于同一晶格结构,它有利于薄膜的区域外延生 长<sup>[13]</sup>,提高了基体对薄膜的亲和力,同样的也有 利于熔滴在表面的结合,使后续离子不易把它从 界面处轰击下来。由此可见 H13 钢表面存在较 多的大颗粒的同时也具有较高的膜/基结合力。

304 不锈钢基体的硬度和 TC4 钛合金基体 的硬度差不多,但前者镀膜后表面液滴的数量明 显多于 TC4 钛合金的,而且前者的膜/基结合力 比后者的好。主要原因应是 304 不锈钢基体中 含有大量的 Cr 元素,Cr 与 N 结合形成的 CrN 有 利于薄膜在基体表面的外延生长,薄膜应具有较 好的结合,同样的大颗粒结合得也比较好,因此 大颗粒的数量也比较多。而 TC4 钛合金表面易 氧化,导致薄膜与基体润湿性下降,使得薄膜与 基体结合不好,导致膜/基结合力差;同时从阴极 喷溅出的颗粒到达基体表面时吸附作用很弱,容 易被后续的离子从薄膜上轰击下来,所以薄膜表 面的颗粒数量较少。



(a) YG6 (b) H13 (c) 304 (d) TC4

图 5 不同基体材料镀 TiN 薄膜后表面的划痕形貌 Fig. 5 Scratch morphologies of different substrates after plating TiN films

# 3 结 论

(1) 镀膜后,4 种不同基体表面 98%以上液 滴的尺寸在 0.2~3.0 μm 的范围内;不同的基体 其液滴的数量是不一样的,H13 钢表面和 304 不 锈钢表面的液滴数量最多,YG6 硬质合金的次 之,TC4 钛合金表面的最少。

(2)4种基体材料镀 TiN 薄膜后的膜/基结合 力差异很大,其中 YG6 硬质合金表面的膜/基结合 力大于 100 N,H13 钢表面的膜/基结合力约为 60 N,304 不锈钢表面的膜/基结合力约为 35 N, TC4 钛合金表面的膜/基结合力约为 20 N。

#### 参考文献

- [1] 董骐,田凯,胡中军,等. 阴极电弧 TiN 膜层的观察检测 和比较 [J].中国表面工程,2010,23(1):63-68.
- [2] 史新伟,邱万奇,刘正义. 电弧离子镀 TiN 薄膜中的缺陷 及其形成原因 [J]. 中国表面工程,2006,19(1):43-46.
- [3] 孙伟, 宫秀敏, 叶卫平, 等. 三种材料多弧离子镀 TiN 涂
  层性能比较 [J]. 电加工与模具, 2000(1): 31-33.
- [4] Abramoff M D, Magelhaes P J, Ram S J. Image processing with imageJ [J]. Biophotonics International, 2004, 11(7): 36-42.
- [5] 戴华.真空阴极电弧离子镀层宏观颗粒去除技术研究 [D].上海:上海交通大学,2009.
- [6] 刘春, 邹积岩. 真空电弧宏观颗粒动力学过程研究 [J]. 高 压电器, 1999(6): 8-11.
- [7] Miernik K, Walkowicz J. Spatial distribution of microdroplets generated in the cathode spots of vacuum arcs [J]. Surface and Coatings Technology, 2000,125(1/2/3): 161– 166.
- [8] 戴达煌,周克崧,袁镇海.现代材料表面技术科学 [M].

北京:冶金工业出版社,2004:475.

- [9] 王浩, 邹积岩, 程礼椿,等. 宏观颗粒影响薄膜性能的机 理分析[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(10): 18-21.
- [10] Creasey S, Lewis D B, Smith I J, et al. SEM image analysis of droplet formation during metal ion etching by a steered arc discharge [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 97(1/2/3): 163-175.
- [11] Xiao J Q, Lang W C, Gong J, et al. Effects of axisymmetric magnetic field on the distribution of macroparticles on TiN and (Ti, Al)N films by arc ion plating [J]. Physics Procedia, 2011, 18, 193-201.
- [12] 郑莉芬. 硬质合金刀具表面涂层的制备及性能研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2009.
- [13] 孙伟, 宫秀敏, 叶卫平, 等. 多弧离子镀 TiN 涂层结合力 的影响因素 [J]. 材料保护, 2000, 33(8): 31-32.

**作者地址:** 广州市天河区长兴路 363 号 510651 广州有色金属研究院新材料研究所 Tel: (020) 3723 8263 E-mail: gongcail2@163. com

## 第五届全国青年表面工程学术会议将在银川举行

中国机械工程学会表面工程分会计划于 2013 年 5 月 29~31 日在宁夏银川组织召开"第五届全国 青年表面工程学术会议"暨表面工程分会第一届青年工作委员会成立会议。本次会议将通过学术活动 和产品展示等交流我国青年表面工程学界在表面工程研究和应用方面取得的最新成果和进展。同时 还将产生中国机械工程学会表面工程分会第一届青年工作委员会。本次大会的主题是"绿色表面工程 及其创新应用"。

会议征文范围包括表面工程研究和应用的各个方面,主要专题(不限)包括:①表面工程基础理论、 表界面科学;②物理气相沉积和化学气相沉积薄膜技术;③电/化学沉积、阳极/微弧氧化等液相表面 处理技术;④喷涂及自动化表面工程技术;⑤化学表面热处理、三束材料表面改性技术;⑥氮化、渗 碳、三束等材料表面改性技术;⑦功能薄膜(光、电、磁功能薄膜);⑧有机涂层技术;⑨分子薄膜、微纳 表面工程;⑩摩擦、磨损与润滑;⑪腐蚀与防护技术;⑫生物表面工程;⑬其它表面工程相关研究。

会议征集的论文,会议组委会会前将印制非正式出版的论文/论文详细摘要文集,供会议交流使用,论文不收取版面费。

摘要征文截止日期为 2013 年 4 月 1 日,论文全文截止日期为 2013 年 4 月 30 日。请将论文摘要/ 论文全文的电子版通过 E-mail(会议统一投稿信箱:gazhang@licp.cas.cn)提交至大会秘书处,并注明 会议论文。

会议联系人:张广安(18709483679);蒲吉斌(18693108345);万善宏(13893279220);鲁志斌(18693116199)

联系地址:甘肃省兰州市天水中路18号中科院兰州化学物理研究所(730000)

电子邮件:gazhang@licp.cas.cn