

DOI: 10.3901/JME.2013.20.055

Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层划痕试验中的表面裂纹分析*

谭援强¹ 胡斌梁^{1,2} 冯剑军¹

(1. 湘潭大学机械工程学院 湘潭 411105;
2. 湘潭大学土木工程与力学学院 湘潭 411105)

摘要: 为了揭示 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层的失效机理, 对 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层进行划痕试验和划痕过程的有限元模拟。划痕试验表明在 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层的划痕表面上产生了一定间隔距离的横向表面裂纹。划痕过程的有限元模拟揭示在划痕过程的不同阶段涂层表面和界面上应力分布规律, 揭示涂层表面裂纹产生的模式和形成的机理。划痕过程分为划针尖端压入涂层表面、在涂层表面上滑动和从涂层表面升高等 3 个阶段。前两个阶段由于划针尖端对涂层表面的作用, 在涂层表面形成划痕沟槽, 引起涂层表面产生裂纹。应力分析表明在划痕过程中涂层表面裂纹形成有两种方式。第一种方式是首先在涂层界面产生裂纹, 然后裂纹向表面扩展形成表面裂纹; 第二种方式是涂层表面直接形成表面裂纹。表面裂纹是最大拉应力引起的, 因此, 表面裂纹是第一型裂纹。划针尖端从涂层表面升高后在涂层中留下了较大的残余应力, 最大残余拉伸应力是出现在接触中心之下的界面上的第一残余主应力。这些结果将为涂层设计和应用提供依据。

关键词: 复合涂层 划痕试验 有限元法 应力分析 表面裂纹

中图分类号: O343

Surface Crack Analysis in Scratch Test on Ni-P-Al₂O₃ Complex Coating Surface

TAN Yuanqiang¹ HU Binliang^{1,2} FENG Jianjun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105;
2. School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

Abstract: In order to reveal the failure mechanism of coating, both scratch test on Ni-P-Al₂O₃ complex coating surface and the simulation of scratch process with finite element method are carried out. Scratch test shows that transverse surface cracks in an interval between two neighboring cracks appear on the scratch groove surface of Ni-P-Al₂O₃ complex coating. Finite element simulation of scratch process indicates distributing rules of stress in the coating surface and interface at different stages of scratch process, and reveals coating surface cracks generating mode and forming mechanism. Scratch process is divided into three stages that are stylus tip indenting coating surface, slipping on coating surface and rising from coating surface. In former two stages the scratch groove is formed on the coating surface and the surface cracks are induced by stylus tip acting on coating surface. The stress analysis shows that there are two ways of forming coating surface cracks. One is that coating interface cracks are firstly induced, thus they are propagated to the coating surface, and finally the surface cracks are formed. Other is that cracks are directly formed in the coating surface. Because they are induced by maximum tensile stress, surface cracks are mode I. After stylus tip rising from coating surface, biggish residual stresses remain in the coating. Maximum residual tensile stress is first residual principal stress at the coating interface below the contacting central. Those will supply the basis of coating design and application.

Key words: Complex coating Scratch test Finite element method Stress analysis Surface crack

0 前言

重要的机械元件采用涂层结构, 可以大大地提

高机械元件性能, 满足机械元件表面的高性能要求。Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层具有高硬度、耐磨、耐热、耐腐蚀等功能^[1-3], 在工作中元件的滑动接触表面采用 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层, 可以减小摩擦, 降低磨损等, 它在汽车、航空、电子、机械、化工、轻工、石油工业等领域具有广泛的用途。为了优化涂层结构设

* 国家自然科学基金(51275435)、湖南省高校科技创新团队计划和湖南省自然科学基金(13JJ6043)资助项目。20130422 收到初稿, 20130810 收到修改稿

计,必须了解在不同尺度条件下,涂层的接触特性,涂层的失效机理。为了研究涂层的性能和失效机理,许多研究者采用划痕法对此进行研究^[4-13]。划痕法作为一种研究方法,广泛应用在材料领域^[4-7]、加工领域^[8]和新材料领域^[9-13]。涂层材料虽然有许多优点,但是常常出现剥落失效。涂层失效的主要形式有断裂和分层,在摩擦滑动接触中由于应力集中更容易产生微裂纹,随着裂纹的扩展,从而引起涂层失效。研究涂层的失效就必须研究涂层在工作中的应力分布。许多研究者对此开展了理论和数值研究^[14-16]。在理论研究方面,RHIMI等^[14]研究了功能梯度涂层与刚性球冲头的双面收缩轴对称接触问题。MALITS^[15]在忽略摩擦、只考虑弹性变形等条件下研究了刚性冲头与不可压缩涂层的黏着接触和局部粘着接触问题。目前理论计算的研究还不能完全满足应用的需要。HOLMBERG等^[16]采用三维有限元法对加载的金刚石球形尖端在TiN薄涂层(厚度为2 μm)进行了划痕模拟,研究了涂层表面裂纹形成的问题。因此,采用三维有限元法模拟涂层材料的摩擦接触过程,研究涂层内应力的分布和涂层材料在摩擦接触中的失效机理是一种理想的方法。

本文对Ni-P-Al₂O₃复合涂层进行了划痕试验,观察了划痕表面裂纹的分布情况;采用三维有限元法模拟了划痕过程,分析了Ni-P-Al₂O₃复合涂层中的应力分布,探索了涂层表面产生裂纹的机理,为研究摩擦接触中涂层的失效机理提供依据。

1 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层划痕试验

Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层试样采用脉冲电沉积方法将Ni-P-Al₂O₃混合物沉积在Q235钢基底上,试样尺寸如下:长为60 mm,宽为40 mm,厚为6 mm,涂层厚度为20 μm。在CETR-U II型摩擦试验机上对试样进行了划痕试验;划针尖端是球顶圆锥形,球的半径为200 μm,球的上部为圆锥形,锥形角为120°,材料是金刚石。

划痕过程分为以下三个阶段。

(1) 划针尖端压入阶段。压头向下移动,划针尖端刚好与试样接触;摩擦试验机在划针上沿法向加载20 N,划针尖端压入涂层表面。

(2) 划针尖端在涂层表面滑动阶段。在摩擦试验机的驱动下,划针尖端沿着涂层表面水平滑动15 mm,在涂层表面形成了划痕沟槽。在滑动中,涂层表面受到划针尖端的切向力作用,切向力相对于滑动距离的变化规律如图1所示。为了获得划痕过程中接触表面之间的摩擦因数,从稳定滑动过程

中提取了1 217个切向力数据,计算平均摩擦因数 $f=(\sum F_{xi})/(1\ 217p)=0.241\ 7$ 。式中, F_{xi} 为切向力, p 为作用在划针上的法向载荷。

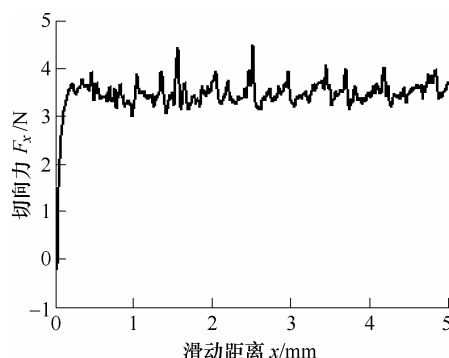


图1 切向力相对于滑动距离的变化曲线

(3) 划针尖端升高阶段。当涂层试样划痕试验完成后,采用光学数码显微镜DSX500拍摄了划痕表面形貌图,如图2所示。划痕表面形貌图表明在划痕表面出现了平均间距约为29.5 μm的表面裂纹。这种表面裂纹的方向接近于与滑动方向垂直;在划针尖端滑动初期,裂纹的间距较大,随着划针尖端滑动距离增大,间距逐渐减小,最后间距达到近似稳定值。

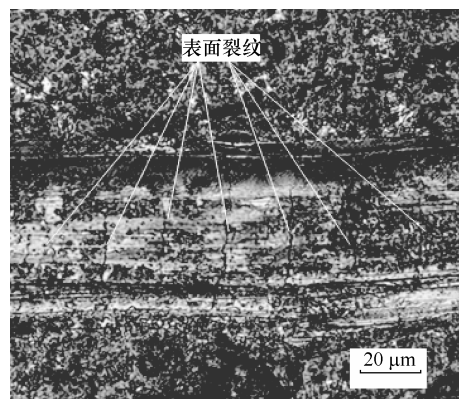


图2 涂层表面划痕形貌图

2 涂层表面划痕的三维有限元模拟

为了弄清楚Ni-P-Al₂O₃复合涂层试样在划痕试验中表面裂纹产生的原因,采用Abaqus有限元软件对涂层表面划痕过程进行模拟。

2.1 划痕过程的力学模型和三维有限元模型

涂层表面划痕过程有限元模拟的力学模型和三维有限元模型分别如图3和图4所示。在模型中Ni-P-Al₂O₃复合涂层的性能参数^[17-18]如下:弹性模量为205.33 GPa,泊松比为0.29,涂层厚度为20 μm,极限抗拉强度为15 GPa。划针尖端是球顶圆锥形,球的直径为0.2 mm,圆锥角为120°,材料为金刚石,

金刚石^[10-13]弹性模量为 1 140 GPa,泊松比为 0.007,硬度为 80 GPa,在模拟中看作刚体。基底为 Q235 钢, Q235 钢的性能参数从一般材料手册中可以查到,其弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.29,屈服强度为 335 MPa,抗拉强度为 570 MPa。涂层结构模型宽度为 4 mm,其他尺寸如图 3 所示。由于划痕的对称性,只取涂层结构宽度的一半作为模拟对象。涂层和基底之间采用绑定约束;在划针尖端和涂层表面间的相互作用的切向行为用库仑摩擦公式表示,依据前面的试验结果,滑动摩擦因数为 0.241 7;单元和网格分别采用 8 节点矩形体杂交单元和结构化网格;涂层共划分为 6 264 个单元,基底共分为 14 094 个单元。

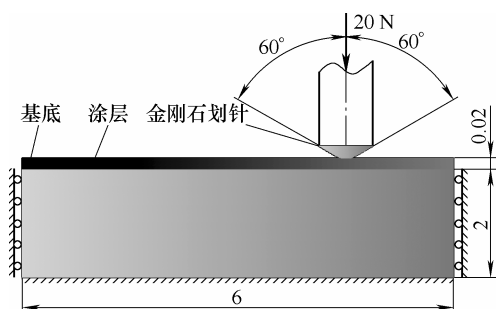


图3 涂层表面划痕试验力学模型

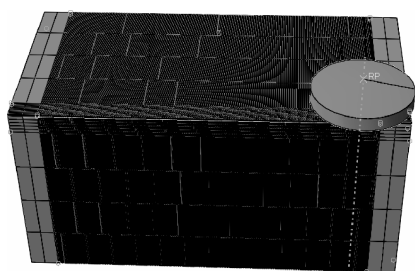
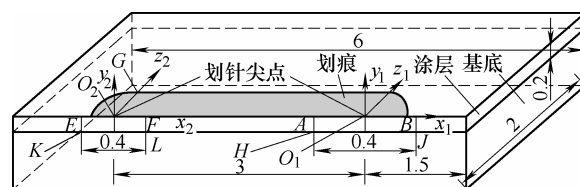


图4 涂层表面划痕试验三维有限元模型

涂层表面划痕过程模拟分为三个阶段：第一阶段是划针尖端压入弹性涂层，划针法向加载 20 N，基底发生弹塑性变形；第二阶段是划针尖端在涂层表面水平滑动，水平滑动距离为 3 mm，在涂层表面形成划痕；第三阶段是划针尖端从涂层表面升高，划针尖端升高距离为 1 mm，这时涂层结构中的应力是划痕后的残余应力。为了分析涂层划痕中表面裂纹产生的原因，下面主要分析划针尖端在涂层表面压入、滑动和升高三个运动阶段后涂层表面和界面的应力分布规律以及表面裂纹形成机理。在分析中，假定 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。分析划针尖端压入后涂层中的表面应力时，由于应力分布的对称性，只分析如图 5 中沿着直线 AB 和 HJ 的应力分布；分析划针尖端滑动和升高后涂层表面的应力和残余应力时，只分析如图 5 中沿着直线 EF、O₂G 和 KL 的应力分布。

图5 涂层中直线 AB、EF 和 O₂G 的位置示意图

2.2 划针尖端压入涂层表面的应力分析

当法向载荷作用在划针上时，划针尖端压入涂层表面，相应地涂层表面产生变形和应力。由模拟的场输出数据可获得划针尖端压入涂层深度约为 13 μm ，接触中心的最大 x 轴向接触压应力为 $p_0 = 8\,890.2\text{ MPa}$ ；根据模型的变形图可以估计接触半宽，接触半宽约为 50 μm 。在图 2 中，根据标尺可测出划痕的平均宽度约为 85.2 μm ，与模拟划针尖端压入涂层的接触宽度比较，相对误差约为 14.8%。当表面应力超过了涂层材料的强度极限时，涂层表面就会出现表面裂纹。划针尖端压入涂层表面后，未变形的涂层结构中第一主应力云图如图 6 所示，涂层表面上沿直线 AB 和界面上沿直线 HJ 的应力分布如图 7 和图 8 所示。

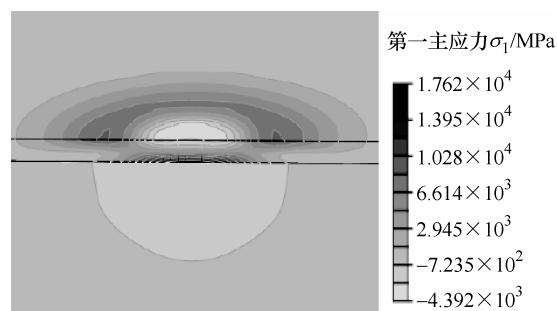


图6 划针尖端压入后在涂层中第一主应力云图

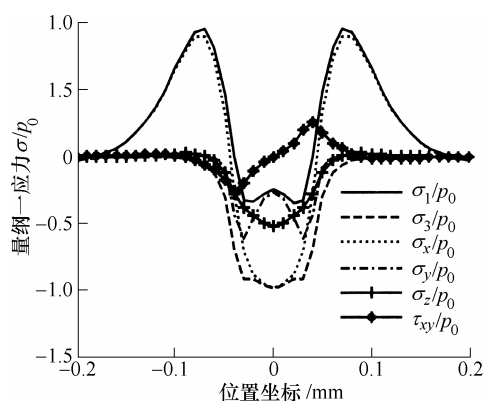


图7 划针尖端压入后沿直线 AB 的应力分布图

图 6 表明在接触中心附近区域，第一主应力是压应力，在接触边缘附近及外侧邻近区域为拉应力，最大拉应力出现在接触边缘外侧的邻近区域。图 7 表明在接触中心附近区域，第一主应力和 x 轴向应力均为压应力， x 轴向应力在接触中心存在极大压

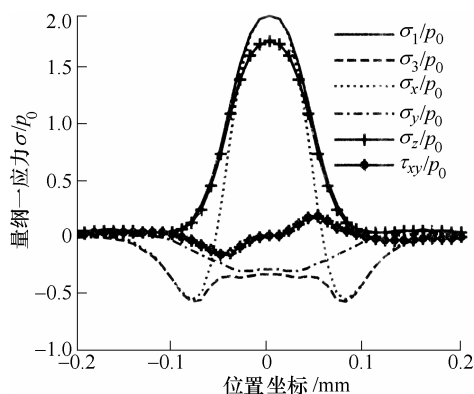


图8 划针尖端压入后沿直线 HJ 的应力分布图

应力,而在接触边缘内侧, $x_1 = -0.08$ mm 的点存在极大拉应力, $\sigma_x/p_0 = 0.9138$ 。第三主应力、 y 轴向应力和 z 轴向应力均为压应力;在接触中心, z 轴向应力存在最大压应力, $\sigma_z/p_0 = -0.5289$ 。但是,第一主应力和 x 轴向应力在接触边缘内侧均为拉应力,两者相比,第一主应力的拉应力更大, $(\sigma_1/p_0)_{\max} = 0.9651$ 。由于接触中心没有产生滑动,表面切应力 τ_{xy} 在接触中心为零,而左、右侧的切应力分别指向外侧。

图8表明划针尖端压入涂层表面后在涂层界面上沿直线 HJ 的应力分布。在接触中心正下方的界面上,第一主应力、 x 轴向应力和 z 轴向应力均具有最大拉应力,它们的最大值分别为 $\sigma_1/p_0 = 1.9820$ 、 $\sigma_x/p_0 = 1.9819$ 和 $\sigma_z/p_0 = 1.7440$ 。在界面上,当 $x_1 = -0.08$ mm 时 x 轴向应力存在极大压应力, $\sigma_x/p_0 = -0.5692$;在涂层界面上,第三主应力和 y 轴向应力均为压应力;在接触中心正下方的界面两侧 τ_{xy}/p_0 接近对称,即大小接近相等,方向相反。

由此可知:第一主应力和 x 轴向应力在接触表面边缘邻近区域均为拉应力,在 $x_1 = -0.07$ mm 和 $x_1 = -0.08$ mm 的点,第一主应力和 x 轴向应力均存在最大拉应力,它们分别为 $(\sigma_1/p_0)_{\max} = 0.9651$ 和 $(\sigma_x/p_0)_{\max} = 0.9138$, $(\sigma_1/p_0)_{\max} > (\sigma_x/p_0)_{\max}$ 。如果划针尖端压入涂层表面后涂层表面产生了表面裂纹,则这种表面裂纹是由第一主应力引起的 I 型裂纹。在 AB 直线上,与划针右边最大第一主应力相对应的应力分量分别为 $(\sigma_x/p_0) = 0.9102$, $(\sigma_y/p_0) = -0.0195$, $(\tau_{xy}/p_0) = -0.0619$,第一主应力方向角可按公式 $\tan 2\alpha = -2\tau_{xy}/(\sigma_x - \sigma_y)$ 计算,最大第一主应力方向角为 $\alpha = 4.21^\circ$,表面裂纹的开裂角(即第一主应力方向与 x 轴正向之间的夹角)为 -85.79° ,表面裂纹将向外侧扩展。因此,划针尖端压入涂层表面产生的表面裂纹是接触边缘的圆形,裂纹面是截锥面。

赫兹接触裂纹的研究表明单一材料接触时裂纹首先出现在接触表面,然后,裂纹将向接触体内部扩展。但是,涂层压入接触时,涂层界面上的应

力远比涂层表面上的拉应力大,从应力的角度分析,表面裂纹有可能先在涂层界面产生,然后扩展到表面。然而,如果界面上首先产生裂纹,这将会受到界面周围材料的约束,同时界面上涂层材料存在缺陷相对涂层表面较少,因此,涂层压入接触时,接触表面也有可能首先产生裂纹。

2.3 划针尖端在涂层表面滑动后的应力分析

划针尖端在涂层表面滑动,在涂层表面形成划痕沟槽。在划痕过程中,划针尖端对涂层主要有四种作用:划针尖端对涂层表面的法向压入作用,当涂层或基底发生了塑性变形时,这种作用引起划针头部之下的涂层和基底材料向周边堆积;划针尖端对滑动方向前面涂层材料的推挤作用,这种作用引起划针尖端前面涂层材料产生更高的堆积,划针尖端后面涂层材料堆积减小;划针尖端对滑动方向前面材料沿侧向的推挤作用,引起划针尖端侧面涂层材料产生更高的堆积;划针尖端对涂层表面的摩擦力拖动划针尖端后面的涂层材料,引起划针尖端后面涂层材料产生拉应力,前面涂层材料产生压应力。划针尖端在涂层表面上滑动 3 mm 后,未变形的涂层结构中第一主应力和 x 轴向应力云图如图9和图10所示,图11~13表示在涂层表面上沿直线 EF 、 O_2G 和界面上沿直线 KL 的应力分布曲线。

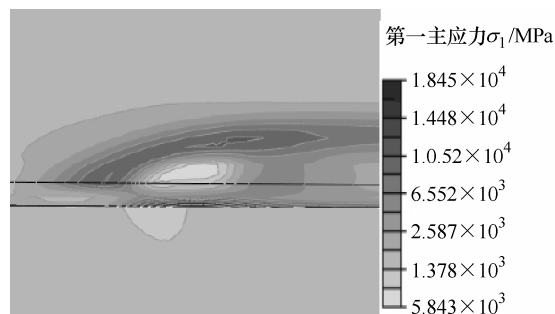


图9 划针尖端滑动后第一主应力云图

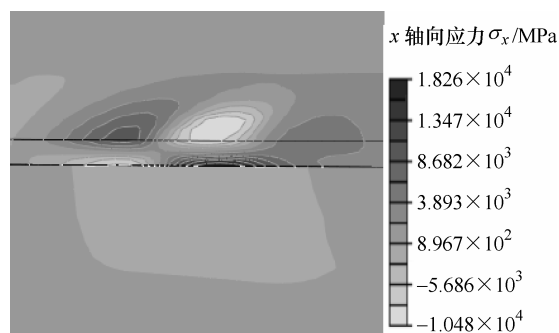


图10 划针尖端滑动后 x 轴向应力云图

图9和图10表明划针尖端从压入涂层后沿水平向左滑动时,在接触区周边外侧形成了环形区域,在区域中第一主应力和 x 轴向应力均存在较大拉应力;在接触中心附近区域都是压应力;但是,在图

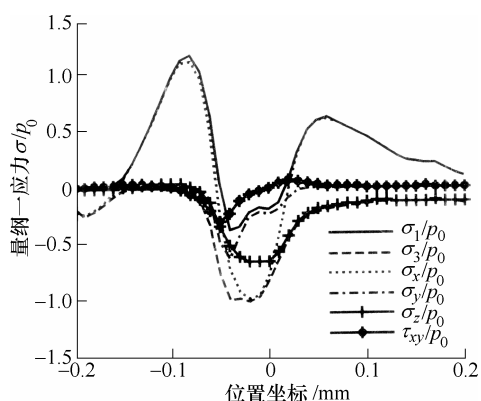


图 11 划针尖端滑动后沿直线 EF 的应力分布图

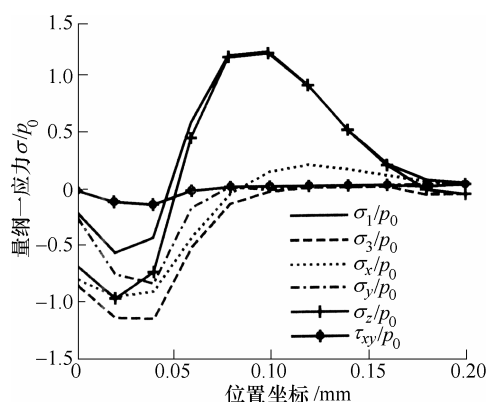


图 12 划针尖端滑动后沿直线 O₂G 的应力分布图

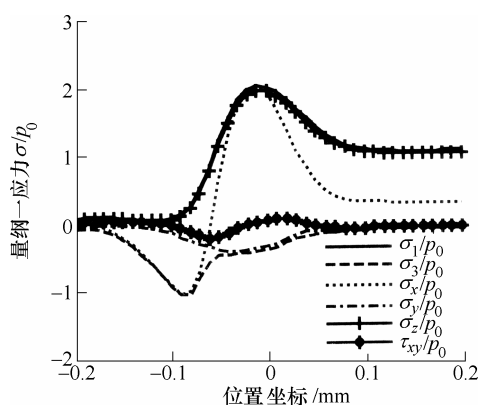


图 13 划针尖端滑动后沿直线 KL 的应力分布图

10 中, 划针尖端滑动方向的前面和后面都存在一个小区域, 在这两个区域中 x 轴向拉应力较大。

图 11 表明涂层表面沿直线 EF 的应力分布。从图 11 可知第一主应力和 x 轴向应力在划针尖端滑动方向的前面均存在最大拉应力, 它们的量纲一应力分别为 $(\sigma_1/p_0)_{\max}=1.191\ 0$ 和 $(\sigma_x/p_0)_{\max}=1.134\ 8$; 在导向边, 最大第一主应力比最大 x 轴向应力更大, 涂层表面裂纹是由第一主应力引起的第 I 型裂纹, 表面裂纹开裂角可以用裂纹面与 x 轴负向之间的夹角表示。最大第一主应力与 x 轴负向之间的夹角按公式 $\tan 2\alpha = -2\tau_{xy}/(\sigma_x - \sigma_y)$ 计算, 与最大第一主应力对应的应力分量为 $\sigma_x/p_0=1.134\ 8$, $\sigma_y/p_0=-0.027\ 5$,

$\tau_{xy}/p_0=-0.067\ 2$, 从而可计算第一主应力方向角为 $\alpha=3.66^\circ$, 裂纹面与 x 轴负向之间的夹角为 -86.34° , 滑动时表面裂纹将向接触区外侧扩展。

图 12 表明第一主应力和 z 轴向应力在接触边缘附近区域均存在最大拉应力, 最大量纲一应力分别为 $(\sigma_1/p_0)_{\max}=1.200\ 3$ 和 $(\sigma_z/p_0)_{\max}=1.193\ 4$; 最大第一主应力比最大 z 轴向应力更大, 涂层表面裂纹是最大第一主应力引起的第 I 型裂纹。但是, 两个最大应力的差别很小, 这是由于 O_2G 与滑动方向垂直, 划针尖端相对于涂层表面沿 z 轴向只存在微滑移, 划针尖端对涂层表面在 z 轴向没有犁沟作用, $|\tau_{yz}/p_0|$ 很小。与最大第一主应力相对应的应力分量为 $\sigma_z/p_0=1.193\ 4$, $\sigma_y/p_0=-0.025\ 6$, $\tau_{yz}/p_0=-0.003\ 1$, 于是, 可获得主应力方向角 $\alpha=0.16^\circ$; 在涂层表面 O_2G 直线上, 最大第一主应力引起的涂层表面裂纹开裂角可用裂纹面与 z 轴向之间的夹角表示, 开裂角为 -89.84° , 涂层表面裂纹会向接触区外侧扩展。

如果涂层表面裂纹开裂角用裂纹面与径向线之间的夹角表示(以划针尖端顶点为坐标原点的 $O_2x_2y_2$ 平面上, 如图 5 所示), 则在导向边的表面裂纹开裂角均小于 $|-90^\circ|$, 这就表明表面裂纹首先会向接触边缘的外侧扩展。从径向线 O_2E 转到径向线 O_2G 过程中, 径向线上的最大第一主应力由大逐渐变小, 开裂角绝对值逐渐增大。这就表明涂层表面裂纹首先会出现在平行于滑动方向的径向线 O_2E 上; 在径向线 O_2E 上对应于最大第一主应力的点首先产生裂纹, 在继续滑动中, 由于滑动方向一侧的裂纹面会产生位移, 径向线 O_2E 上最大第一主应力首先较小, 随着滑动距离增大, 它又逐渐增大; 如果最大第一主应力增大到涂层强度极限, 又一次产生了新的裂纹。因此, 随着划针尖端的滑动, 划痕表面会产生间隔裂纹。由于径向线 O_2E 上产生了裂纹, 与径向线 O_2E 邻近的径向线上最大第一主应力会增大, 如果最大第一主应力达到涂层强度极限, 同样, 邻近的径向线上也会产生裂纹; 随着滑动的持续和裂纹依次在不同的径向线上不断产生, 于是就形成了划痕表面上的横向裂纹。

图 13 表明划针尖端在涂层表面滑动后, 第三主应力和 y 轴向应力均为压应力。在界面上 $x_2=-0.01\ \text{mm}$ 处第一主应力、 x 轴向应力和 z 轴向应力均具有最大拉应力, 它们分别为 $\sigma_1/p_0=2.075\ 0$ 、 $\sigma_x/p_0=2.054\ 0$ 和 $\sigma_z/p_0=2.006\ 6$; 与第一主应力对应的其他应力分量为: $\sigma_y/p_0=-0.327\ 6$, $\tau_{xy}/p_0=0.041\ 2$ 。如果界面产生裂纹, 主要是 $(\sigma_1/p_0)_{\max}$ 引起的; 在 x 、 y 和 z 三个轴向应力分量中, y 轴向应力最小, 所以, 裂纹会发生在与 $O_2x_2y_2$ 平行的平面内; 第一主应力方向可

以用与 x 轴负向之间的夹角用 α 表示, 则 $\alpha=1.1^\circ$, 而开裂角为 -88.9° , 接近于与 x 轴垂直的方向。因此, 涂层划痕过程中, 如果涂层界面上没有缺陷和界面黏结强度较高时, 界面上首先产生的裂纹是沿着与涂层界面倾斜方向, 然后扩展到涂层表面; 界面裂纹扩展一旦引起了涂层界面和表面之间的贯通裂纹, 相应地就会产生表面裂纹; 贯通裂纹随后将会进一步向界面扩展, 引起界面分层裂纹。因此, 用划痕法测试涂层界面的黏结强度时, 必须要考虑涂层表面裂纹的形成机理, 涂层表面断裂强度越高, 用划痕法测试的涂层界面黏结强度将会越大。

由此可知, 划针尖端和涂层表面接触的边缘邻近区域有一个环形拉应力带, 在导向边的径向线上(在 $O_2x_2z_2$ 平面上, 以划针尖点为圆心的圆面上)径向应力分量和第一主应力均存在最大拉应力; 而在每一条径向线上最大第一主应力都比最大径向应力大。因此, 表面裂纹是最大第一主应力引起的第一型裂纹。随着划针尖端的滑动, 在导向边的每一条径向线上最大第一主应力规律性变化, 在划痕表面就会产生一定间距的横向裂纹。

涂层表面裂纹产生有两种方式: 第一种方式是界面上最大拉应力引起近似垂直于界面的第 I 型裂纹, 裂纹扩展到表面, 相应地形成表面裂纹; 第二种方式是直接由表面最大拉应力引起表面裂纹。涂层应力分析结果表明第一种方式引起表面裂纹的可能性更大, 涂层表面断裂强度将会影响界面黏结强度。

2.4 划针尖端升高后涂层表面的残余应力分析

划针尖端在涂层表面滑过, 接着从涂层表面升高后, 由于基底的塑性变形, 在涂层表面就会留下截面为下凹曲线的沟槽。因此在涂层中就会引起残余应力。图 14 和图 15 分别表示划针尖端升高后未变形涂层结构中第一残余主应力和 x 轴向残余应力云图, 图 16~18 分别表示涂层表面上沿直线 EF 、 O_2G 和界面上沿直线 KL (直线位置如图 5 所示)的残余应力分布曲线。

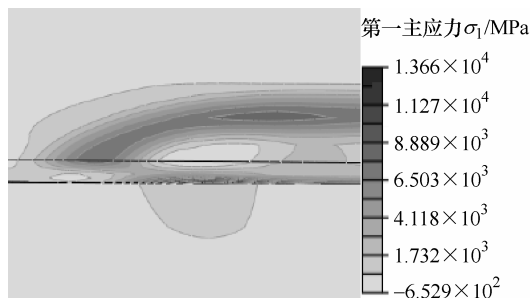


图 14 划针尖端升高后第一主应力云图

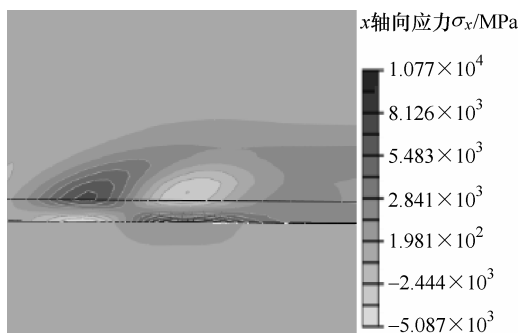


图 15 划针尖端升高后 x 轴向应力云图

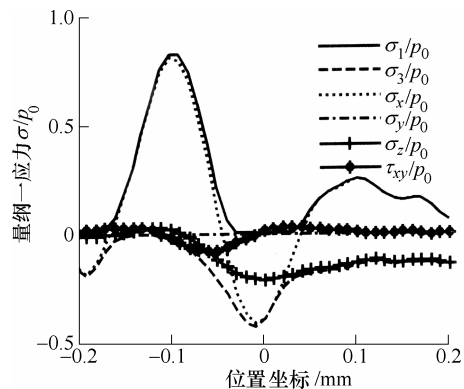


图 16 划针尖端升高后沿直线 EF 的应力分布图

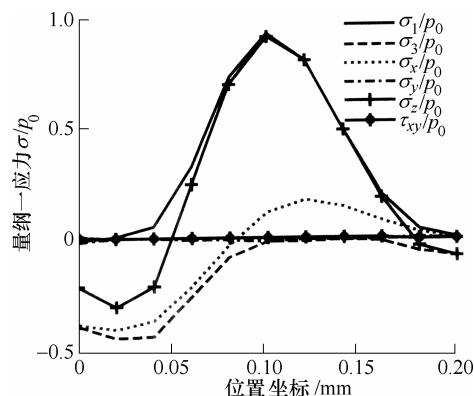


图 17 划针尖端升高后沿直线 O_2G 的应力分布图

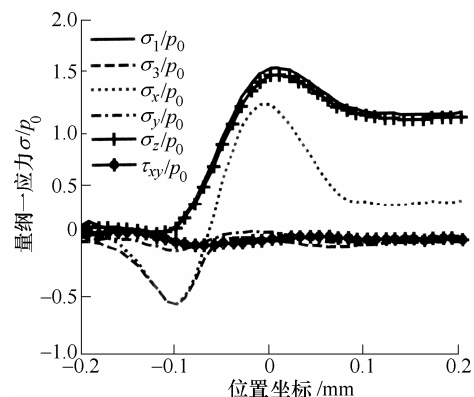


图 18 划针尖端升高后沿直线 KL 的应力分布图

图 14 表明了涂层表面的划痕外侧存在第一残余主应力的拉应力环形带, 划针尖端升高之前的涂层接触表面存在残余压应力, 划痕表面的其他区

域为残余拉应力;在接触区之下的界面上第一主应力存在较大的残余拉应力。图 15 表明了 x 轴向残余应力的分布与第一残余主应力的分布相似,不同的是在划针尖端升高之前的涂层表面接触区前面存在一个较高的拉应力区。图 16 表明了 EF 直线上划痕前面存在最大第一残余主应力和最大 x 轴向残余应力,它们分别为 $(\sigma_1/p_0)_{\max}=0.768\ 7$, $(\sigma_{xx}/p_0)_{\max}=0.692\ 7$;在划针尖端升高之前的接触中心,第三残余主应力和 x 轴向残余应力存在最大压缩应力,它们分别为 $(\sigma_3/p_0)_{\min}=-0.381\ 1$, $(\sigma_x/p_0)_{\min}=-0.306\ 2$ 。图 17 表明了 O_2G 直线上划痕侧面存在最大第一残余主应力和最大 z 轴向残余拉应力,两个最大残余拉应力分别为 $(\sigma_1/p_0)_{\max}=0.659\ 0$, $(\sigma_z/p_0)_{\max}=0.608\ 6$;在划针尖端升高之前的接触中心附近区域,第三残余主应力和 x 轴向残余应力存在最大压缩应力,其应力为 $(\sigma_3/p_0)_{\min}=-0.352\ 4$, $(\sigma_x/p_0)_{\min}=-0.306\ 2$ 。如果涂层继续承受外载荷作用,新的表面应力将和残余表面应力叠加,改变新的表面应力的分布,加剧涂层表面裂纹的扩展。

图 18 表明划针尖端升高后在涂层界面上沿直线 KL 的残余应力分布规律:残余应力 σ_y/p_0 、 τ_{xy}/p_0 均较小,对涂层失效的影响较小;当 $x_2=-0.11$ 时,残余应力 σ_x/p_0 和 σ_3/p_0 均存在最大压应力,最大残余压应力分别为 $\sigma_x/p_0=-0.572\ 2$ 和 $\sigma_3/p_0=-0.584\ 6$;当 $x_2=0$ 时, $(\sigma_1/p_0)_{\max}=1.527\ 2$;当 $x_2=-0.02$ 时, $(\sigma_x/p_0)_{\max}=1.148\ 7$;当 $x_2=0.01$ 时, $(\sigma_z/p_0)_{\max}=1.473\ 8$ 。因此,界面上的残余应力对涂层失效影响最大的是最大第一残余主应力、 x 轴向残余应力和 z 轴向残余应力。

由此可知,对于涂层发生弹性变形、基底发生弹塑性变形的涂层结构,在涂层表面上,划痕过程产生的最大残余应力主要集中在划痕结束时划针头部之下的区域(残余压缩应力)和划针尖端前面和侧面的堆积区(残余拉伸应力);在涂层界面上残余拉应力很大,它们对涂层失效将产生严重影响;这些应力分别是最大第一残余主应力、 x 轴向残余应力和 z 轴向残余应力。由于这些残余应力较大,当涂层继续承受外载荷时,它们将严重影响涂层的承载能力和寿命。

3 结论

本文介绍了 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层的划痕试验和划痕过程的有限元模拟,获得了如下结论。

(1) Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层的划痕试验表明在划痕表面产生了近似垂直于滑动方向的横向裂纹,裂

纹的平均间距约为 $29.5\ \mu\text{m}$ 。

(2) 划针尖端压入 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层表面,接触区边缘会出现最大第一主应力;当法向载荷较大时,最大第一主应力会引起接触区边缘产生圆形裂纹,裂纹面是截锥面;同样,在涂层界面上最大第一主应力会引起界面圆形裂纹,裂纹向涂层表面扩展形成表面圆形裂纹,裂纹面也将是截锥面。

(3) 划针尖端在 Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层表面滑动时,在接触区的导向边,每一条径向线上(以划针尖端顶点为坐标原点)存在最大第一主应力,裂纹首先出现在导向边的接触边缘(划痕对称线上);由于裂纹的出现,在导向边的每一条径向线上最大第一主应力会产生规律性变化,在划痕表面会产生一定间距的横向裂纹;同样,如果在涂层界面上首先产生近似垂直于界面的横向裂纹,界面上的裂纹将向表面扩展形成表面横向裂纹。应力分析表明后者的可能性更大,表面裂纹可能会在界面分层裂纹产生之前出现。

(4) Ni-P-Al₂O₃ 复合涂层划痕后,在划痕表面及邻近区域、划痕表面之下的涂层界面存在较大残余应力。在涂层表面的最大残余应力主要集中在划痕结束时划针头部之下的区域(残余压缩应力)和划针尖端前面和侧面的堆积区(残余拉伸应力);在涂层界面上对涂层失效影响最大的残余拉应力分别是最大第一残余主应力、 x 轴向残余应力和 z 轴向残余应力。由于这些残余应力较大,当涂层继续承受外载荷时,它们将加剧涂层的失效。

参 考 文 献

- [1] 高加强,刘磊,沈彬,等. 纳米 Al₂O₃ 粒子增强化学镀 Ni-P 复合镀层的组织结构[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(2): 265-269.
GAO Jiaqiang, LIU Lei, SHEN Bin, et al. Microstructure of nanometer-sized Al₂O₃ composite coating prepared by electroless plating[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(2): 265-269.
- [2] 罗守福,顾明元,胡文彬. 镍磷化学镀层的性质与磷含量和热处理工艺的关系[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(4): 98-103.
LUO Shoufu, GU Mingyuan, HU Wenbin. Relationship of proper ties of electro less Ni-P deposits with phosphorus content and heat treatment[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31(4): 98-103.
- [3] 向永华,董世运,徐滨士. N-Al₂O₃/Ni-P 复合电刷镀层的组织及摩擦磨损特性[J]. 中国表面工程, 2005(2): 15-18.

- XIANG Yonghua, DONG Shiyun, XU Binshi. Microstructure, friction and wear characteristics of brush-plated $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni-P}$ composite coating[J]. Chinese Surface Engineering, 2005(2): 15-18.
- [4] NARASIMMAN P, PUSHPAVANAM M, PERIASAMY V M. Wear and scratch resistance characteristics of electrodeposited nickel-nano and micro SiC composites[J]. Wear, 2012, 292-293(6): 197-206.
- [5] SHARMA N, KUMAR N, DASH S, et al. Scratch resistance and tribological properties of DLC coatings under dry and lubrication conditions[J]. Tribology International, 2012, 56(12): 129-140.
- [6] YU Helong, ZHANG Wei, WANG Hongmei, et al. Bonding and sliding wear behaviors of the plasma sprayed NiCrBSi coatings[J]. Tribology International, 2013, 66(10): 105-113.
- [7] 王均涛, 刘平, 杨丽红, 等. TiAlN/AION 纳米多层涂层的微观结构和力学性能研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 72-77.
- WANG Juntao, LIU Ping, YANG Lihong, et al. Research on microstructure and mechanical properties of TiAlN/AION nanomultilayers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 72-77.
- [8] 言兰, 姜峰, 融亦鸣. 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 172-182.
- YAN Lan, JIANG Feng, RONG Yiming. Grinding mechanism based on single grain cutting simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 172-182.
- [9] BARNESA D, JOHNSON S, SNELL R, et al. Using scratch testing to measure the adhesion strength of calcium phosphate coatings applied to poly(carbonate urethane) substrates[J]. Journal of Thomechanical Behavior of Biomedical Material, 2012, 6(2): 128-138.
- [10] HOLMBERG K, LAUKKANEN A, RONKAINEN H, et al. Tribological analysis of fracture conditions in thin surface coatings by 3D FEM modelling and stress simulations[J]. Tribology International, 2005, 38(11-12): 1035-1049.
- [11] HOLMBERG K, LAUKKANEN A, RONKAINEN H, et al. Surface stresses in coated steel surfaces-influence of a bond layer on surface fracture[J]. Tribology International, 2009, 42(1): 137-148.
- [12] HOLMBERG K, RONKAINEN H, LAUKKANEN A, et al. Residual stresses in TiN, DLC and MoS_2 coated surfaces with regard to their tribological fracture behaviour[J]. Wear, 2009, 267(12): 2142-2156.
- [13] LAUKKANEN A, HOLMBERG K, KOSKINEN J, et al. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface, Part III: Fracture toughness calculation and influence of residual stresses[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(12-13): 3824-3844.
- [14] RHIMI M, BORGI S E, LAJNEF N. A double receding contact axisymmetric problem between a functionally graded layer and a homogeneous substrate[J]. Mechanics of Materials, 2011, 43(12): 787-798.
- [15] ARGATOV I I, MISHURIS G S. Axisymmetric contact problem for a biphasic cartilage layer with allowance for tangential displacements on the contact surface[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2010, 29(6): 1051-1064.
- [16] MALITS P. Contact with stick zone between an indenter and a thin incompressible layer[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2011, 30(6): 884-892.
- [17] BRUCK H A, GERSHON A L. Three-dimensional effects near the interface in a functionally graded $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ plate specimen[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(2): 547-557.
- [18] ZHANG Wenlong, DING Dongyan, GU Mingyuan. Influence of Ni-P coating on fatigue life of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite wire[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(26): 7109-7114.
-
- 作者简介: 谭援强, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为工艺力学及摩擦学。
E-mail: tanyq@xtu.edu.cn