doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.017

重载条件下钢基体表面涂层裂纹及分层失效*

邹梦杰,石万凯,肖洋轶,杨槐峰 (重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆400044)

摘 要:用有限元法分析了Hertz接触应力下钢基体表面涂层裂纹和分层失效状况,采用无预制裂纹状况下的扩展有限元(XFEM)技术和内聚力(Cohesive)模型研究了涂层的裂纹扩展和分层失效过程。分析表明:涂层的裂纹萌生于涂层表面,并向内部扩展;涂层弹性模量越大越易产生裂纹,且裂纹扩展越深。涂层的分层失效主要是由涂层-基体界面切应力造成;由于畸变应力的存在,较薄涂层(如物理气相沉积涂层),涂层越厚越易产生分层;较厚涂层(如等离子喷涂涂层),涂层越薄越易产生分层。在另一方面,涂层的裂纹和分层会相互影响,分层会使涂层更易产生裂纹,使裂纹扩展越深,影响裂纹扩展速度;涂层裂纹会使涂层更易分层,使分层区域在远离接触区域方向上不断扩展。对比分析表明,研究结果与前人的理论及实验结果吻合较好,为今后进行涂层失效数值模拟提供了依据。

关键词:裂纹;分层;扩展有限元;内聚力模型

中图分类号: TG174.442; TG115.57

文献标志码: A

文章编号:1007-9289(2016)06-0123-06

Cracking and Interfacial Delamination in Coated Steel Under Heavy Load Conditions

ZOU Meng-jie, SHI Wan-kai, XIAO Yang-yi, YANG Huai-feng

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: The cracking and interfacial delamination in coated steel under Hertz contact were investigated based on finite element method. The evolutions of the crack propagation and interfacial delamination were evaluated by using extended finite element method (XFEM) and cohesive zone model. The results show that the coating crack initiates from the coating surface, and propagates to the interface. The larger the coating elastic modulus, the more likelihoods of the cracking and the deeper crack. The delamination is mainly caused by the interfacial shear stress. In the case of the thin coating (e.g., physical vapor deposition coatings), it tends to cause interfacial delamination on the thicker coatings due to the distortional stress. Nevertheless, the vice is true for relatively thick coatings (e.g., plasma spraied coatings). On the other hand, the coating cracking and interfacial delamination can interact with each other. It is found that the coating cracking is more likely to occur in a coated system with interfacial delaminations having some influences on the crack propagation speed. Moreover, the coating cracking increases the probability of interfacial delamination, which causes the delamination to grow away from the contact area. Through the comparative analysis, the results of the current study agree well with the previous numerical and experimental findings, and provide a basis for the future numerical analysis of coating failures.

Keywords: cracking; delamination; extended finite element method (XFEM); cohesive zone model

通讯作者:石万凯(1968—),男(汉),教授,博士;研究方向:摩擦学与表面工程;Tel: (023) 65102401; E-mail: wankai_shi@cqu.edu.en

网络出版日期: 2016-12-12 09:18; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161212.0918.002.html

引文格式: 邹梦杰, 石万凯, 肖洋轶, 等. 重载条件下钢基体表面涂层裂纹及分层失效[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 123-128. ZOU M J, SHI W K, XIAO Y Y, et al. Cracking and interfacial delamination in coated steel under heavy load conditions[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 123-128.

收稿日期: 2016-06-21; 修回日期: 2016-11-08; 基金项目: *国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046304); 国家自然科学基金 (51675061)

0 引 言

近代工业中,涂层表面工程技术被广泛地运 用于航天、航空、汽车、冶金、机械等行业设备中 以降低摩擦件的摩擦系数、提高其耐磨特性和承 载能力^[1]。尽管涂层表面工程技术的应用可以提高 零部件的摩擦学性能,但在某些特定条件下(例如 重载条件)涂层自身的裂纹和涂层-基体界面的分层 失效会直接影响其使用性能^[2-4],因此对涂层重载 条件下的裂纹和分层失效研究也显得尤为必要。

从Erdogan和Gupta^[5-6]开始,有许多学者对涂 层的分层和裂纹失效进行了研究,但研究的问题 大都为预制下单个裂纹的分析。直到Breton和 Dubourg^[7-8]用数值分析法分析了界面以及内部裂纹 的扩展状况,涂层裂纹和分层问题才得到广泛研 究。近年来,有限元法被广泛的运用于涂层的裂 纹和分层失效的研究中。肖洋轶和石万凯等[9-11]在 预制裂纹下利用有限元方法对涂层的残余应力、 分层和裂纹现象做了系统性分析。A.L. Mohd Tobi等^[12]在不同接触应力下利用有限元法对脆性 涂层裂纹的扩展进行了分析。Holmberg等[13]通过 三维有限元方法建立了TiN涂层表面压痕下的有限 元模型,通过与实验数据对比得出:涂层的裂纹 产生是由涂层表面的弯曲应力和拉伸应力造成 的。Sonia^[14]采用二维有限元法研究了接触载荷下 硬质薄涂层的失效机理。

虽然有限元法被广泛运用于涂层的研究,但 目前的研究大都是采用预制裂纹,并假想涂层和 基体为理想结合下的压痕涂层失效机理,未考虑 涂层基体界面刚度和涂层基体结合强度的问题, 且忽略了分层失效现象。文中采用无预制裂纹的 扩展有限元方法(XFEM)和内聚力(Cohesive)模型 精确模拟了Hertz接触下涂层的裂纹和分层失效, 采取了Python语言网格优化技术,确保了模型的 收敛性,分析了涂层裂纹和分层特征。

1 有限元模型建立

1.1 内聚力模型和扩展有限元技术

内聚力双线性本构模型能有效模拟涂层的分 层失效^[15-16]。内聚力单元损伤原理如图1所示,t和 δ为相应方向名义主应力和相对位移。t⁰为内聚力 强度,0~δ⁰为材料未达到强度极限前的线弹性 段,δ⁰~δ⁰为材料达到强度极限前的线性降低软化





阶段(损伤阶段)。曲线下的面积代表材料的内聚能 T。当相应方向的名义主应力t>t^o时,基体损伤演 变开始,损伤应变δ>δ^o时,基体损伤演变完成。

由断裂力学可知,在断裂模型中存在3种断裂 形式,由于文中研究为平面应变模型,故只考虑 两种断裂形式。 t_n 、 t_t 、 T_n 、 T_s 分别表示两种断裂 形式名义主应力和能量值,模型采取最大应力损 伤准则max { t_n/t_n^0 t_t/t_t^0 }=1(其中 $t_n \ge 0$),当任 意一个名义应变比值达到1时,损伤演变开始。当 能量值达到能量定律(T_n/T_n^c)^{α}+(T_t/T_t^c)^{α}=1时, 单元损伤演变结束,通常状态*α*值取1。

扩展有限元法(XFEM)是在常规有限元法框架 内,基于单位分解法思想,以连续位移场函数假 设为基础,结合不连续函数,对不连续问题进行 求解的一种数值方法。其优点在于有限元网格与 裂纹相互独立,裂纹扩展不需重构有限元网格, 能有效分析含裂纹的不连续问题^[17]。在有限元分析时 采用最大主应力失效准则模拟裂纹自由扩展。

1.2 有限元模型

文中模拟在正向持续加载的接触应力下涂层 表面裂纹和分层状况,图2为等效平面有限元模型 示意图。有限元模型是基于经典的Hertz线接触理 论,满足:①材料为均质材料;②接触应变小; ③物体为弹性半空间;④接触表面无摩擦^[18]。 Hertz线接触下涂层表面应力分布为:

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad -a \le x \le a; \ a = \frac{4p_0 r}{E'} \quad (1)$$

式中: a为接触半宽, mm; p_0 为接触中心处 最大接触压力, N; r为接触曲率半径, mm; E'为 等效弹性模量, MPa。



图 2 简化模型以及边界条件 Fig.2 Simplified model and boundary conditions

模型假设为平面应变问题,涂层和基体采用 平面应变单元,涂层和基体间建立厚度h_b为0.1 µm 的结合层(结合层厚度相对于涂层基体可忽略,为 Cohesive单元)模拟涂层基体结合强度。基体基本 几何尺寸L=1 mm、h_s=0.5 mm。模型具体参数如 表1所示,可知基体材料为钢,研究对象是基于 FZG齿轮模型而建立的。以接触中心为原点建立 坐标系(图2),接触应力以接触点为原点按曲线 *p*(*x*)椭圆分布于涂层表面,基体底面固定。模拟涂 层的裂纹扩展时采用最大主应力失效准则,涂层 分层状况时,采用双线性内聚力失效准则。

Parameters	Substrate	Coating ^[9]	Bonding layer ^[9]
Young's modulus / GPa	206	120	100
Poisson's ratio	0.3	0.3	
Thickness / µm	100	2	0.1
Fracture strength / GPa		1	0.1
Adhesive toughness/ (J·m ⁻²)		30	150
Element type	Plane strain	Plane strain	Cohesive

表 1 有限元模型基本参数 Table 1 Parameters of the finite element model

为了优化模型的计算,保证模型的收敛性, 有限元模型采用了Python语言进行过渡网格的划 分,如图3所示,网格单元最小尺寸为0.1 μm。



Fig.3 Detail drawing of the finite element model mesh

2 结果与分析

在接触模型中接触半宽为变量,为避开接触 半宽对涂层分层和裂纹位置的影响,便于分析比 较,假定接触半宽a为0.05 mm。施压过程假设为 一个准静态过程,在重载Hertz分布应力3 200 MPa (此压力下开始出现明显的分层和裂纹现象,易于 结果分析,根据负载系数分析,此压力为重载状 况)作用下模型的最大主应力分布云图如图4(a) 所示。

分别取有分层和裂纹、只有裂纹和只有分层 等不同状态进行分析。如表1所示,涂层的强度极 限值和断裂能分别为 $\sigma_{max}=1$ 000 MPa和 $T^{c}=$ 0.03 J/mm²;结合层的内聚力强度和内聚能分别为 $t^{o}=100$ MPa和T=0.15 J/mm²。涂层-基体系统在产 生分层和裂纹后的应力云图如图4(b)所示;在只有 裂纹下的应力云图如图4(c)所示;在只有分层下的 应力云图如图4(d)所示。



图 4 涂层-基体系统不同状态下的应力云图

Fig.4 Stress contours of the coating-substrate system under different statuses

2.1 裂纹结果与分析

如图4(a)所示在接触区域边缘涂层出现最大主应力集中,且在接触上表面远大于结合界面。涂

层裂纹以最大主应力为损伤准则,由此可知涂层 裂纹发生在接触区域边缘,萌生于上表面。涂层 产生裂纹后在裂纹末端会产生应力集中使得涂层 迅速向内部扩展。与裂纹模拟状态保持一致,并 与聂璞林等^[19]结论相符。

涂层弹性模量影响着涂层表面的应力分布,为 分析涂层弹性模量对裂纹的影响,设定涂层厚度 (2 µm)相对值为10,不同弹性模量下涂层产生的裂 纹平均深度如图5所示。在弹性模量为70 GPa时, 涂层开始产生裂纹,当弹性模量达到135 GPa 时涂层完全断裂。由此可以得出涂层弹性模量越 大,涂层越易产生裂纹,与Abdul-Baqi等^[20]研究结 论保持一致。涂层弹性模量不仅影响着裂纹的产生, 同时也影响着裂纹的扩展,在涂层没完全断裂状 况下,涂层弹性模量越大涂层裂纹扩展越深。



图 5 不同弹性模量下裂纹深度

Fig.5 Crack depths of the coatings under different coating elastic modulus

2.2 分层结果与分析

涂层结合层采用内聚力损伤准则,在结合界 面处沿y方向拉伸应力o_y和沿x方向切应力o_t分布情 况如图6所示。结合界面处切应力在接触处边缘达 到最大值,最大值为o_t=350 MPa,而沿y方向应力 o_y为负值(压缩状态)。由此可知涂层的分层现象主 要由界面切应力造成,且在涂层接触区边缘最易 发生分层,与分层模拟状态保持一致,并与王海 斗等^[21]理论结果相符。

涂层表面裂纹的产生取决于涂层结合界面切 应力的大小,涂层弹性模量和厚度影响着涂层结 合界面处的切应力。肖洋轶和石万凯等¹⁹的研究表 明,涂层弹性模量越大时,涂层基体结合界面也





越容易产生分层。但对于涂层厚度对分层现象的 研究有限,大多只分析了较厚涂层的分层状况。 由于涂层的厚度很广,例如有较薄的物理气相沉 积涂层(1~10 µm)和较厚的等离子喷涂涂层(≥100 µm), 为合理分析不同涂层厚度对涂层分层现象的影 响,选取较薄涂层(厚度h_c=2、5、10 µm)和较厚涂 层(厚度h_c=100、200、300 µm)分别进行分析,其 结合界面切应力分别如图7(a)(b)所示。对于较薄



图 7 不同厚度薄涂层底面切应力分布

Fig.7 Interfacial shear stress distributions under different coating thicknesses

127

的涂层,涂层越厚在接触处边缘的最大切应力值 越大,涂层越易产生分层,与张显程和徐滨士等 分析结果类似^[22];当涂层为厚涂层时,涂层越 薄,涂层在接触处边缘的切应力值越大,涂层越 易产生分层。

涂层在接触边缘处存在切应力畸变如图7(b)所 示。可以看出,涂层越厚,切应力畸变范围越 大,而分布切应力越小。当涂层较薄时,畸变切 应力范围大于分布切应力,畸变切力是引起涂层 分层主要原因,因而涂层越厚越易产生分层;当 涂层较厚时,分布切应力远大于畸变切应力范 围,分布切应力是引起涂层分层主要原因,因而 涂层越薄越易产生分层。

2.3 涂层裂纹和分层的影响

假定涂层完全断裂相对长度为Ds=10,整个 Hertz接触过程时间为Dt=1,以接触边缘处(s= 0.05 mm)为原点涂层分层向左扩展0.1 μm为+1, 向右扩展0.1 μm为-1。在有裂纹和分层、只有裂 纹以及只有分层状态下涂层裂纹和分层随时间变 化状况如图8所示。







对比有分层和无分层状况下的裂纹曲线,在 有分层状况下涂层在Dt=0.73开始产生裂纹,最终 裂纹扩展深度为Ds=9;在无分层状况下涂层在 Dt=0.82才开始产生裂纹,最终裂纹扩展深度为 DS=9;裂纹在扩展过程中开始阶段的扩展速率为 K₁,未产生裂纹前的扩展速率为K₂,产生分层后 的裂纹扩展速率为K₃,其中K₂>K₁,K₂>K₃(图8)。 由此可知当涂层产生分层会使涂层更易产生裂 纹,且裂纹扩展越深,同时涂层分层后裂纹扩展 速度减缓。有分层状况下,涂层附着力较弱,使 得钢基体不能很好的分担涂层应力,导致涂层更 易产生裂纹,但涂层一旦产生分层后涂层应力得 到释放相应的涂层的裂纹扩展速度也得到缓解, 但其内部剩余的应力依然能使分层后的涂层裂纹 扩展更深。

对比有裂纹和无裂纹下的分层曲线,当有裂 纹时涂层在Dt=0.82时产生裂纹,裂纹向右扩展距 离Dr=-8;当无裂纹时涂层在Dt=0.97时产生裂 纹,裂纹向右扩展距离Dr=-3。由此可知涂层产生 裂纹后更易产生分层,且分层区域向远离接触区 域(右方向)扩大。涂层在接触边缘处产生裂纹后涂 层应力得到释放,使得裂纹边缘处远离接触区域 方向承受更大的剪切应力,因而使得涂层更易产 生分层,且朝着远离接触区域的方向扩展。

3 结 论

(1) Hertz接触状态下,裂纹大都产生在接触边缘区域;涂层裂纹萌生于涂层表面,并向内部不断扩展;当涂层弹性模量越大涂层表面越易产生裂纹,且裂纹扩展越深。

(2)涂层和基体界面的切应力是涂层分层失效的主要原因;涂层分层易发生于接触区域边缘处;由于切应力在接触边缘突变,对于薄涂层,涂层越厚越易发生分层,而对于厚涂层,涂层越薄越易发生分层。

(3)涂层分层和裂纹状态会相互影响,分层状态会使涂层更易产生裂纹。同时也会减缓裂纹扩展速度。涂层裂纹会使涂层更易分层,且使分层区域在远离接触区域方向上不断扩展。

参考文献

- [1] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 21世纪的再制造工程[C]. 中国科协2000年学术年会, 2000: 36-39.
 XU B S, MA S N, LIU S C, et al. Remanufacturing engineering in 21st century[C]. Academic Annual Meeting in 2000 of China Association for Science and Technology, 2000: 36-39 (in Chinese).
- [2] HAINSWORTH S V, MCGURK M R, PAGE T F. The effect of coating cracking on the indentation response of thin hard-coated systems[J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 102(1/2): 97-107.
- [3] OLIVEIRA S A G, BOWER A F. An analysis of fracture and delamination in thin coatings subjected to contact loading[J]. Wear, 1996, 198(1/2): 15-32.

2016年

- [4] HOLMBERG K, RONKAINEN H, LAUKKANEN A, et al. Friction and wear of coated surfaces-scales, modelling and simulation of tribomechanisms[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202(4/5/6/7): 1034-1049.
- [5] ERDOGAN F, GUPTA G D. Layered composites with an interface flaw[J]. International Journal of Solids & Structures, 1971, 7(8): 1089-1107.
- [6] ERDOGAN F, GUPTA G. The stress analysis of multilayered composites with a flaw[J]. International Journal of Solids & Structures, 1971, 7(1): 39-61.
- [7] BRETON E, DUBOURG M C. Paper II (ii) adhesion for coatings[J]. Tribology, 1992, 21: 41-47.
- [8] BRETON E, DUBOURG M C. Behaviour of cracked coatingsubmitted to Hertzian moving contact[C]. 18th Leeds-Lyon Symp on Tribology, September 4-7, INSA Lyon, Lyon, France.
- [9] XIAO Y Y, SHI W K, LUO J. Indentation for evaluating cracking and delamination of thin coatings using finite element analysis[J]. Vacuum, 2015, 122: 17-30.
- [10] XIAO Y Y, SHI W K, LUO J, et al. The tribological performance of TiN, WC/C and DLC coatings measured by the four-ball test[J]. Ceramics International, 2014, 40(5): 6919-6925.
- [11] XIAO Y, SHI W K, HAN Z, et al. Residual stress and its effect on failure in a DLC coating on a steel substrate with rough surfaces[J]. Diamond & Related Materials, 2016, 66: 23-35.
- [12] TOBI A L M, SHIPWAY P H, LEEN S B. Finite element modelling of brittle fracture of thick coatings under normal and tangential loading[J]. Tribology International, 2013, 58(2): 29-39.
- [13] 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, 2006, 38(11/12): 1035-1049.
- [14] OLIVEIRA S A G, BOWER A F. An analysis of fracture and delamination in thin coatings subjected to contact loading[J]. Wear, 1996, 198(1/2): 15-32.
- [15] ABDUL-BAQI A, GIESSEN E V D. Indentation-induced in-

terface delamination of a strong film on a ductile substrate[J]. Thin Solid Films, 2001, 381(1): 143-154.

- [16] LI W, SIEGMUND T. An analysis of the indentation test to determine the interface toughness in a weakly bonded thin film coating-substrate system[J]. Acta Materialia, 2004, 52(10): 2989-2999.
- [17] 李录贤, 王铁军. 扩展有限元法(XFEM)及其应用[J]. 力学 进展, 2005, 35(1): 5-20.
 LI L X, WANG T J. The extended finite element method and its applications[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 5-20 (in Chinese).
- [18] BENNANI H H, TAKADOUM J. Finite element model of elastic stresses in thin coatings submitted to applied forces[J]. Surface & Coatings Technology, 1999, 111(1): 80-85.
- [19] 聂璞林. 界面断裂韧性与膜基结合性能关系的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

NIE P L. Fractural study of interfacial adhesion measurement with interfacial toughness for coating/substrate system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009 (in Chinese).

- [20] Abdul-Baqi A, Giessen E V D. Numerical analysis of indentation-induced cracking of brittle coatings on ductile substrates[J]. International Journal of Solids & Structures, 2002, 39(6): 1427-1442.
- [21] 王海斗,张志强,李国禄,等.等离子喷涂层接触疲劳失效 模式及失效机理的研究[J].摩擦学学报,2012,32(3):251-257.

WANG H D, ZHANG Z Q, LI G L, et al. Investigation of contact fatigue failure mode and mechanism of plasma spraying coating[J]. Tribology, 2012, 32(3): 251-257 (in Chinese).

[22] 张显程, 徐滨士, 王海斗, 等. 应力诱导的涂层分层失效及 安全容限设计[C]. 青年表面工程学术论坛, 2006.
ZHANG X C, XU B S, WANG H D, et al. The coating layer failure induced by stress and safety tolerance design[C].
Youth Surface Engineering Academic Forum, 2006 (in Chinese).

(责任编辑:王文宇)