

热-力循环载荷下身管镀层裂纹扩展规律研究

李强, 邹利波, 冉相辰, 赵超

(中北大学 机电工程学院, 太原 030051)

摘要: **目的** 研究身管镀层裂纹的扩展机理, 提高身管寿命。**方法** 针对身管镀层裂纹损伤, 提出一种基于扩展有限元方法 (XFEM) 结合内聚力模型 (CZM) 的方法。建立热-力耦合的镀层身管有限元模型, 通过间接耦合的方式, 将温度场导入有限元模型, 通过 CZM 本构模型来模拟其损伤失效行为。对镀层初始裂纹在热-力载荷下扩展到镀层/基体界面的情况进行仿真分析。**结果** 在高温高压环境下, 镀层初始裂纹扩展速度很快, 在第 1 发射击完成后便扩展到基体结合面, 初始裂纹扩展到镀层/基体界面时, 裂纹尖端的存在使局部具有较大切应力, 达到 1 180 MPa。在连续射击工况下, 造成镀层结合面的开裂。**结论** 在高温高压载荷下, 镀层初始裂纹很快扩展到镀层/基体界面, 且身管镀层承受的热应力是导致镀层开裂的重要因素。

关键词: 镀层; 身管; 裂纹扩展; 扩展有限元; 内聚力模型; 热应力

中图分类号: TJ303

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)07-0026-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.004

Crack Propagation Law of Barrel Coating under Thermal Mechanical Cyclic Load

LI Qiang, ZOU Li-bo, RAN Xiang-chen, ZHAO Chao

(College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The falling off of the coating is an important factor affecting the service life of the barrel. To improve the service life of the barrel, the propagation mechanism of the coating crack of the barrel is studied. Aiming at the crack damage of barrel chromium layer, a method based on extended finite element method (XFEM) and cohesion model (CZM) is proposed. The thermal mechanical coupling finite element model of coating barrel is established. The temperature field is introduced into the finite element model in the way of indirect coupling. In addition, the strength and damage criterion of the interface between coating and substrate are simulated by CZM constitutive model. The initial crack of the coating extends to the coating/substrate interface under thermal stress load. Under the circumstance of high temperature and high pressure, the initial crack propagation speed of the coating is very fast, and it extends to the substrate joint surface after the completion of the first shot. When the initial crack extends to the coating/substrate interface, the existence of the crack tip makes the location have a large shear stress, up to 1 180 MPa, resulting in the cracking of the coating joint surface under the condition of continuous shooting. Under high temperature and high pressure load, the initial crack of the coating quickly extends to the coating/substrate interface, furthermore, the thermal stress borne by the barrel coating is an important factor leading to the cracking of the coating.

收稿日期: 2022-04-18; 修订日期: 2022-07-06

Received: 2020-04-18; Revised: 2022-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51175481)

Fund: The National Natural Science foundation of China (51175481)

作者简介: 李强 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为武器发射理论与技术。

Biography: LI Qiang (1971-), Male, Doctor, Professor, Research focus: weapon launch theory and technology.

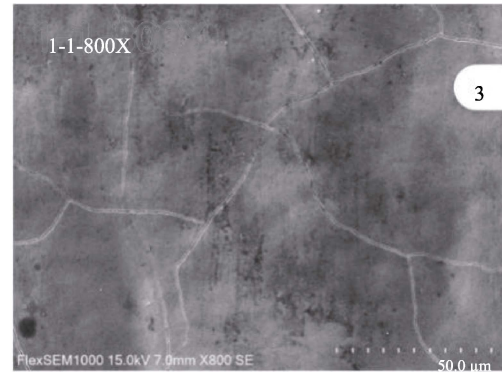
引文格式: 李强, 邹利波, 冉相辰, 等. 热-力循环载荷下身管镀层裂纹扩展规律研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 026-033.

LI Qiang, ZOU Li-bo, RAN Xiang-chen, et al. Crack Propagation Law of Barrel Coating under Thermal Mechanical Cyclic Load[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 026-033.

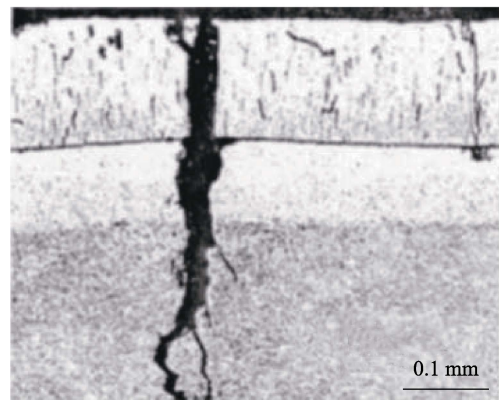
KEY WORDS: coating; barrel; crack propagation; XFEM; CZM method; thermal stress

镀层/钢基体结构在身管服役过程中, 为抵御高温火药燃气的热冲击、高速气流冲刷以及弹丸的机械摩擦磨损提供有效的防护作用。但由于镀层的固有属性和加工工艺的影响, 镀层中不可避免地产生初始裂纹, 如图 1a 所示。随着射击数的增加, 在外力作用下, 初始裂纹发生扩展, 导致镀层和镀层/钢基体界面处出现不同程度的损伤 (如图 1b 所示), 直至材料的功能失效, 身管武器的作战性能大幅下降。黄进峰等^[1]通过试验方法对身管表面镀铬、氮碳共渗 2 种表面处理下的身管失效机理进行了分析, 指出镀层内易产生显微裂纹, 裂纹扩展至镀层与基体界面处, 并沿着镀层与基体界面扩展, 从而导致镀层剥落。张国祥等^[2]通过对激光处理的基体镀铬身管进行了解剖分析, 指出镀层/基体界面处受力不协调是导致镀层/基体结构界面裂纹扩展的主要原因, 并分析了镀层、界面裂纹扩展的力学机理。王为介等^[3]建立了含初始裂纹扩展的身管有限元模型, 采用扩展有限元法 (XFEM) 分析了高膛压对自紧身管裂纹尖端产生的应力场及强度因子的影响。古斌等^[4]研究了膛内压力、弹带摩擦力、自紧残余应力等载荷作用对身管内壁裂纹扩展的影响规律, 得到了影响身管寿命的危险因素, 并通过理论计算获得了无镀层身管的剩余寿命。梁林等^[5]通过建立含镀层身管的热力耦合的二维平面应变有限元模型, 研究了热应力对身管镀层初始裂纹扩展的影响, 获得了镀层/基体界面的受力规律。在镀层裂纹扩展仿真计算方面, 吕凯等^[6]运用围线积分和内聚力单元法, 研究了陶瓷层表面裂纹与粘结层/氧化层在热载荷下的断裂参量及开裂状态。于庆民等^[7]采用 XFEM 分析了高温热失配应力对热障涂层多条裂纹扩展的影响, 指出表面裂纹位置、倾斜角度和长度对裂纹扩展有很大的影响。Mohammad 等^[8-9]采用 VCCT/CZM/XFEM 对二维和三维复合材料 DCB 样本的裂纹扩展进行了数值模拟, 从精度、效率和网格相关性角度进行了分析, 认为 XFEM-CZM 在裂纹扩展数值模拟上更适合。Konstantinos 等^[10]使用 XFEM/CAM 耦合方法计算了复杂载荷作用下韧性金属的裂纹扩展失效。Dekker 等^[11]研究了 CZM-XFEM 耦合方法在韧性金属材料疲劳裂纹扩展数值计算的合理性和有效性, 该方法能够精确描述韧性金属材料在同向和异向双轴加载下疲劳裂纹的生成行为。

在前人研究的基础上, 本文通过基于扩展有限元 (XFEM) 结合内聚力模型 (CZM) 的方法, 建立了热-力耦合的镀层身管有限元模型, 开展在高温高压循环载荷作用下镀层初始裂纹扩展至镀层/基体界面致界面损伤失效研究, 掌握镀层/基体界面损伤规律, 为含镀层身管寿命损伤机理研究提供一定的参考。



a 纵向裂纹



b 表面裂纹

图 1 镀层初始裂纹形貌^[12]

Fig.1 Coating crack morphology^[12]: a) longitudinal crack; b) surface crack

1 镀层裂纹扩展模型

1.1 扩展有限元法

XFEM 将研究对象的材料非线性和内部结构的边界非线性分开描述, 从而分别独立采用尽可能合理的方式描述研究对象的材料性质和内部非连续界面的接触性质^[12]。XFEM 方法以位移为基本未知量, 利用附加自由度构造的不连续位移场叠合常规自由度的位移场来描述位移的非连续现象, 其位移表达式为:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^{\text{cont}} + \mathbf{u}^{\text{disc}} \quad (1)$$

$$\mathbf{u}^{\text{cont}} = \sum_{I \in \psi} N_I(\mathbf{x}) \mathbf{u}_I \quad (2)$$

$$\mathbf{u}^{\text{disc}} = \sum_{I \in \psi} N_I(\mathbf{x}) \mathbf{q}_I (H - H_I) \quad (3)$$

式中: ψ 为域内所有结点集合; ξ 为域内富集结点集合, 即裂纹扩展区域, $\xi \subset \psi$; $N_I(\mathbf{x})$ 为形函数; $\mathbf{u}_I$ 为基本位移向量; $\mathbf{q}_I$ 为富集结点上描述不连续位移场的位移向量; H 为 Heaviside 阶跃函数。 H 的表达式为:

$$H[f(x)] = \begin{cases} 1, & f(x) > 0 \\ 0, & f(x) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f(x)$ 为有向距离函数。

1.2 镀层剪切失效模型

镀层的初始裂纹在到达基体材料后, 开始向界面扩展, 镀层界面剪切失效模型如图 2 所示, 一般用来描述镀层界面的损伤失效行为^[13-17]。射击过程中, 热膨胀应力超过界面的剪切强度是镀层脱落的主要原因。模型左端为张开型裂纹(模拟裂纹间隙对周围裂纹扩展的影响), 右端为闭合型裂纹。张开型裂纹的存在, 使热膨胀力作用在一个相对较小的区域上, 即图 2 中镀层与基体结合面靠近左侧裂纹处。镀层与基体结合面之间的损伤及裂纹扩展采用 CZM 方法建模。镀层内部的初始裂纹扩展到达结合面, 当裂纹尖端应力场达到镀层结合强度时, 即发生损伤与扩展。

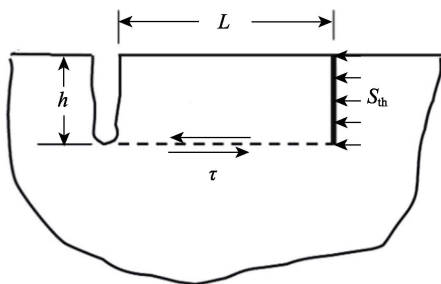


图 2 镀层剪切失效模型^[16]
Fig.2 Coating shear failure model^[16]

1.3 镀层/基体界面 CZM 模型

由于镀铬层初始裂纹的存在, 在弹丸对镀层表面拉伸作用下, 初始裂纹扩展至镀铬层与钢基体界面附件, 产生应力集中。该应力超过镀层结合强度时, 造成镀层脱落, 因此采用 CZM 本构模型来描述镀层/基体界面损伤演化及失效力学行为, 其损伤失效过程如图 3 所示。

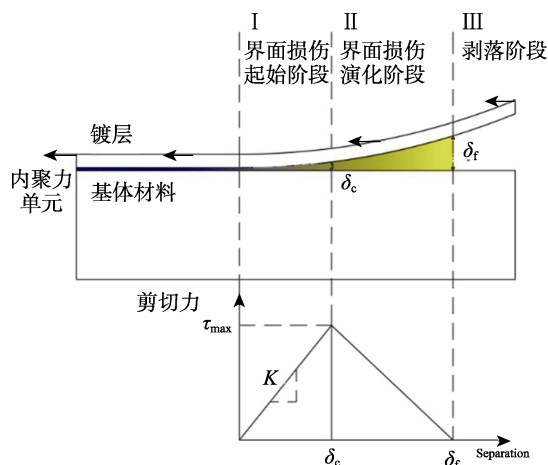


图 3 镀层/钢基体单元刚度模型
Fig.3 Element stiffness model of coating/steel substrate

在图 3 中的 I 阶段, 由于界面保持完整性, 界面之间不发生损伤; 在第 II 阶段, 界面开始发生损伤, 但能够保持一定的结合强度; 在第 III 阶段, 界面完全脱离, 单元失效。损伤系数 $D[0,1]$ 用以描述界面单元达到极限强度后的损伤状态, 反映该单元的刚度退化程度, 损伤系数 D 表示为:

$$D = \frac{\delta_f (\delta_{\max} - \delta_c)}{\delta_{\max} (\delta_f - \delta_c)} \quad (5)$$

式中: $\delta_{\max}$ 为单元的最大位移; δ_c 为损伤初始位移; δ_f 为损伤失效位移。

单元的法向刚度 k_n 与切向刚度 k_s 分别表示为:

$$k_n = (1-D)k_{n0} \quad (6)$$

$$k_s = (1-D)k_{s0} \quad (7)$$

对应的法向应力 σ_n 、切向应力 σ_s 则可以表示为:

$$\sigma_n = \begin{cases} (1-D)k_{n0}\delta_n, & \delta_n \geq 0 \\ k_{n0}\delta_n, & \delta_n < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_s = (1-D)k_{s0}\delta_s \quad (9)$$

式中: δ_n 为法向位移; δ_s 为切向位移。

基于剪切分离准则的双线性本构模型, 材料分为达到极限强度前的线弹性段和达到极限强度之后刚度降低的软化阶段^[18]。利用基于二次名义应力的损伤起始准则和基于能量的线性损伤演化准则进行模拟^[19]。

二次名义应力准则为:

$$\left(\frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_n^0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s^0} \right)^2 = 1 \quad (10)$$

式中: σ_n^0 和 σ_s^0 表示名义应力的峰值; $\langle \rangle$ 为函数的符号。

裂纹扩展基于能量的线性软化准则为:

$$\left(\frac{G_n}{G_{nc}} \right)^2 + \left(\frac{G_s}{G_{sc}} \right)^2 = 1 \quad (11)$$

式中: G_n 为法向能量释放率; G_s 为剪切方向能量释放率; G_{nc} 表示法向临界能量释放率; G_{sc} 表示剪切方向临界能量释放率, 且总的能量释放率 $G = G_n + G_s$ 。

2 计算模型

2.1 温度场计算

建立的计算模型为身管单条膛线的简化模型, 如图 4 所示。镀层宽度为 3.5 mm, 厚度为 0.1 mm, 模型外半径为 30 mm, 设置圆柱坐标系中心为圆心位置, 约束基体部分的切向位移。根据内弹道相关公式计算出膛内火药燃气温度和对流换热系数随时间变化的曲线, 如图 5 所示。由此作为边界条件施加在镀层表面, 计算出镀层与基体材料随时间变化的温度场。在计算连续射击工况时, 完成单次发射工况下温

度场的计算后,在下一个分析步中再次施加相同的边界条件,连续 10 次,每次分析步间隔 0.1 s。

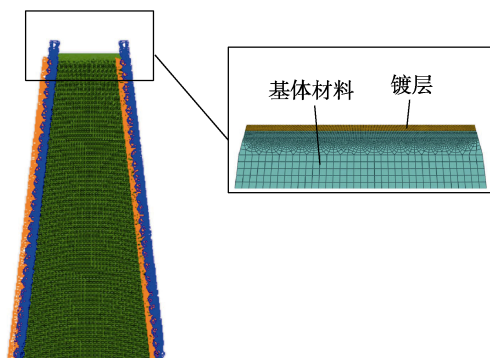


图 4 模型边界约束条件
Fig.4 Model boundary constraints

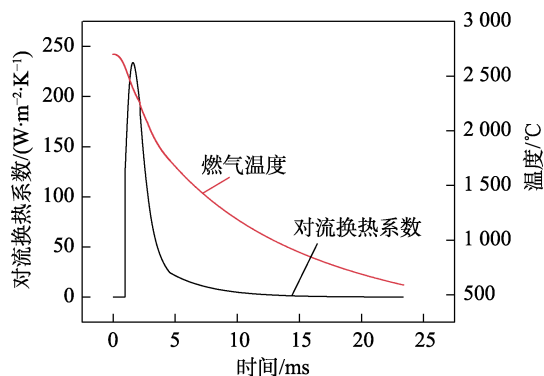


图 5 火药燃气温度与对流换热系数曲线
Fig.5 Curve of propellant gas temperature and convective heat transfer coefficient

射击第 1、10 发身管内表面温度最高时刻的温度云图如图 6 所示。连续射击 10 次工况下,身管内膛表面温度与镀层结合面的温度随时间变化情况如图 7 所示,温度峰值随射击次数上升。

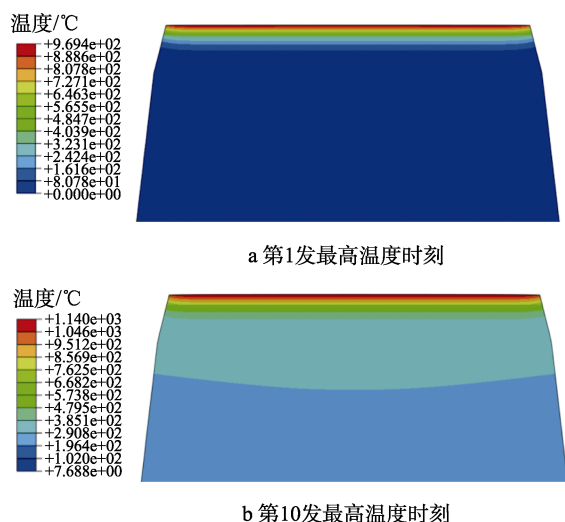


图 6 身管温度云图

Fig.6 Barrel temperature nephogram: a) maximum temperature time of the first engine; b) maximum temperature time of the tenth engine

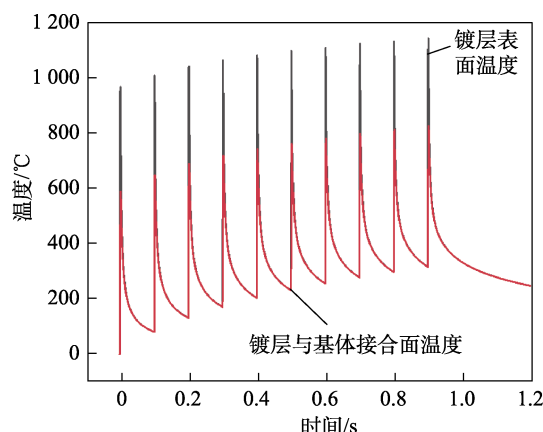


图 7 连续射击下镀层表面与结合面温度
Fig.7 Temperature of coating surface and joint surface under continuous firing

2.2 镀层主裂纹扩展模型

在镀铬的过程中,身管表面镀层会产生初始裂纹,使用扩展有限元方法可以在镀层表面预制裂纹模拟初始裂纹的状态,如图 8 所示。初始裂纹长度为 0.01 mm,镀层的断裂强度为 476 MPa^[20]。裂纹的扩展有限元方法无法与温度场进行直接耦合,将温度场作为载荷条件间接代入扩展有限元模型中。

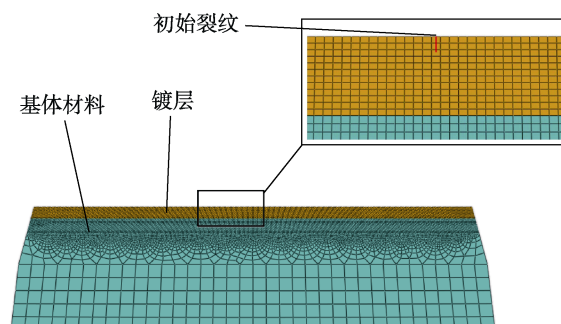


图 8 镀层裂纹扩展有限元模型
Fig.8 Finite element model of coating crack propagation

2.3 镀层/基体剪切失效模型

为了分析镀层初始裂纹扩展至镀层/基体界面损伤失效的影响因素,根据图 1b 的裂纹形貌和 1.2 节中剪切失效模型,建立了镀层/基体界面的剪切失效有限元模型,镀层与基体材料之间采用厚度为 0 的内聚力单元模型。内聚区中材料损伤的初始标准是二次名义应力准则,并使用能量控制方法在独立模式 (Mode-Independent) 下模拟损伤演化过程。

将模型左侧单元删除,模拟具有较大间歇的裂纹,相比扩展有限元方法更能表现存在裂纹间歇条件下单元的切向位移状况,右侧将单元节点切开设为闭合型裂纹,如图 9 所示。整个模型设置通用接触,避免裂纹面之间和镀层与基体结合面之间的干涉。

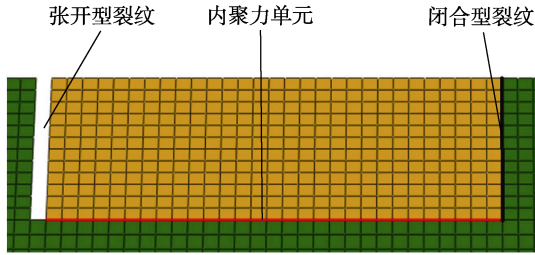


图9 镀层剪切失效有限元模型
Fig.9 Finite element model of coating shear failure

2.4 材料模型

内聚力单元模型相关参数根据文献[21-22]中的镀层开裂试验获得,其单元刚度为 2.05 GPa,剪切强度为 1.02 GPa,临界断裂能 756 J/m^2 。身管基体材料使用 30SiMn2MoVA,镀层材料为 Cr,相关材料参数见表 1 和表 2。

表 1 镀层材料参数^[23]

Tab.1 Coating material parameters^[23]

温度/℃	E/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	$K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\alpha/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$	μ
室温	206	7.8	48.0	11.5	0.3
400	186		43.1	14.8	
500	168		41.2		
600			37.5	10.4	
700			31.4	10.9	

表 2 基体材料参数^[24]

Tab.2 Substrate material parameters^[24]

温度/℃	σ_y/MPa	E/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	$K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\alpha/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$	μ
室温	918	280	7.19	34.6	10.0	0.22
400	730	186		41.8	10.1	
600	560			44.2	10.4	
800	340			47.0	10.9	

3 计算结果与分析

3.1 裂纹主裂纹扩展情况

镀层中的初始裂纹在高温高压循环载荷作用下,裂纹尖端产生应力集中,如图 10 所示。静态裂纹下尖端应力强度因子达到了 $9\,400 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ 。随着载荷的持续施加,当裂纹尖端应力达到扩展条件时,初始裂纹在镀层中扩展,其应力云图见图 11。从图 11 中可以发现,在单次热力耦合循环作用下,镀层初始裂纹很快地扩展到基体表面。文献[1]通过对镀铬身管进行烧蚀试验,指出镀层内部的裂纹在 2 次热循环作用下,便扩展到基体材料与镀层结合面。本文的计算结果与该文献中的试验结果具有相似性,在一定程度上可以证明本文所建立模型的准确性。

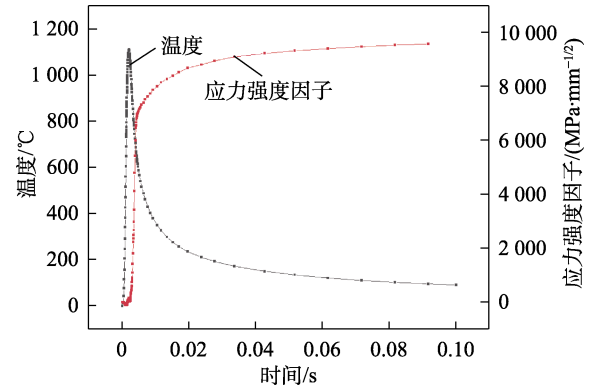


图 10 镀层温度与应力强度因子曲线
Fig.10 Curve of coating temperature and stress intensity factor

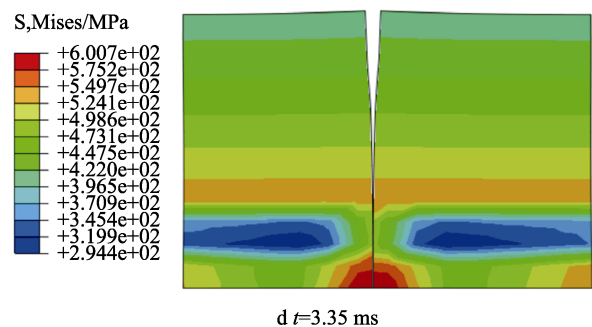
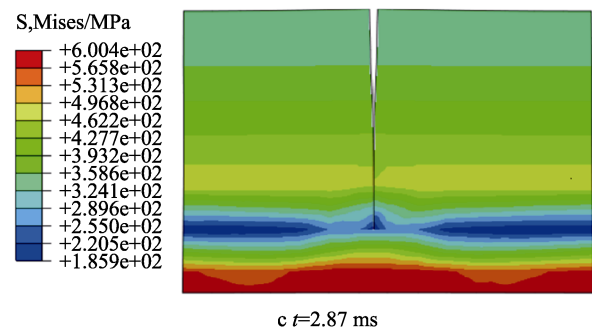
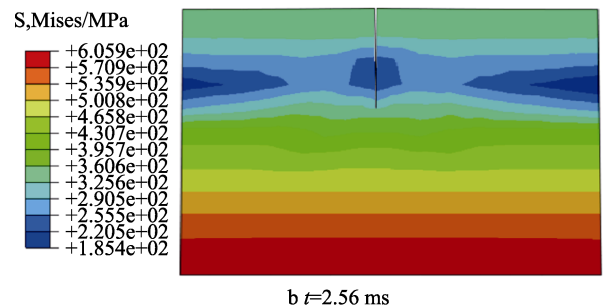
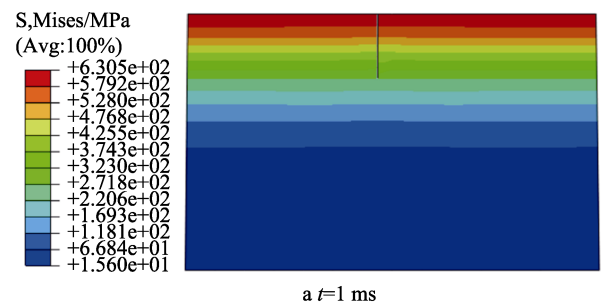


图 11 镀层中初始裂纹扩展情况
Fig.11 Coating crack propagation

3.2 镀层/基体结合面裂纹扩展情况

载荷为上文连续射击条件下的温度载荷和作用在镀层表面的膛压载荷, 计算获得热膨胀应力作用下镀层与基体结合面的切向应力。在不考虑损伤的条件下, 距离张开裂纹不同距离的内聚力单元的切应力和法向应力情况如图 12 和图 13 所示。

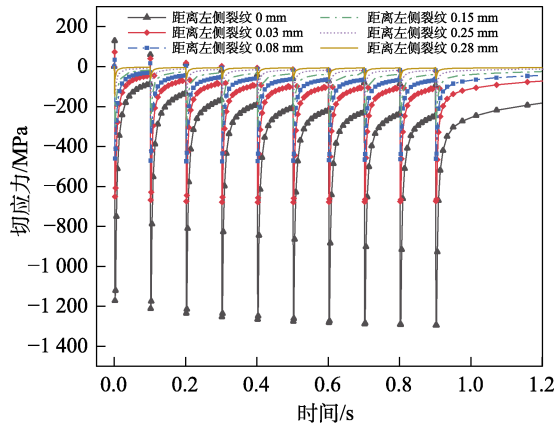


图 12 镀层/基体界面切应力
Fig.12 Shear stress of coating/substrate interface

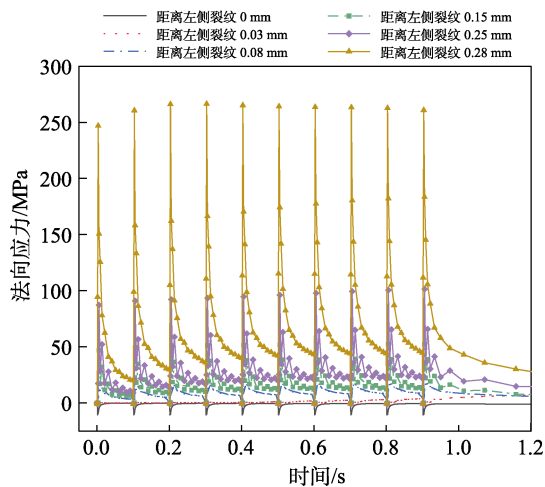


图 13 镀层/基体结合面法向应力
Fig.13 Normal stress of coating/substrate interface

由于张开型裂纹的存在, 使距离张开型裂纹更近的位置存在较大的切应力。在距离位置 0 mm 处, 镀层/基体界面的切向应力达到了 1180 MPa, 法向应力达到了 10.5 MPa; 在距离 0.28 mm 处, 镀层/基体界面的切向应力达到 57 MPa, 法向应力达到了 247 MPa。同时, 在该部分, 内聚力单元承受的切向应力远大于法向应力, 相比于张开型裂纹处, 在闭合裂纹处的内聚力单元承受更大的法向应力。随着射击次数的增加, 膛内温度峰值持续上升, 内聚力单元最大切应力也在增大。

内聚力单元在外载荷的作用下, 应力随着表面和底面之间位移的增加而线性增长, 张力达到最大值后, 内聚力单元开始损伤。该处应力值随着位移的增

大而减少, 其承受的载荷降低。当应力减小为 0 时, 镀层、基体结合面单元损伤值达到最大, 裂纹完全扩展, 开裂界面在该处开裂失效^[25]。在考虑内聚力单元损伤的情况下, 在左侧张开型裂纹处, 单元损伤情况如图 14 所示。可以看出, 内聚力单元损伤值为 0.97, 表明靠近裂纹处单元已接近完全损伤的状态, 该单元的在切向的应力位移曲线如图 15 所示。单元应力在到达最大应力后, 服从牵引分离准则, 最大应力随最大位移的增大而减小, 最终接近 0。

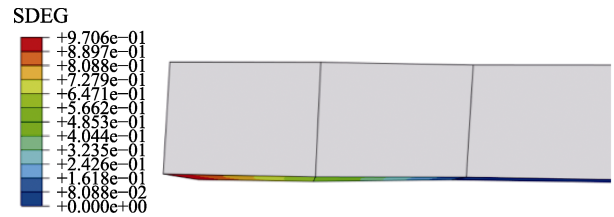


图 14 镀层结合面单元损伤情况
Fig.14 Unit damage of coating joint surface

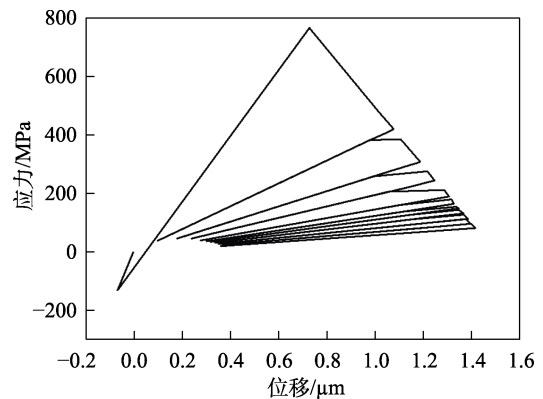


图 15 损伤单元应力位移曲线
Fig.15 Stress displacement curve of damage element

镀层/基体界面内聚力单元损伤值与镀层结合面的温度变化曲线如图 16 所示。镀层/基体界面单元在镀层温度快速上升阶段产生损伤, 损伤值达到了 0.8, 且该时刻镀层/基体界面单元瞬态温度大小达到了 705 ℃。可以看出, 在首发射击状态下, 镀层/基体界面单元已达到失效状态。随着射击次数的增加, 当连续射击到第 10 发时, 镀层/基体界面单元损伤值约为 1, 镀层/基体界面单元瞬态温度约为 800 ℃。由此可以得出, 镀层/基体界面处瞬态温度的增大导致其损伤量增大。图 16b 显示, 随单元损伤量增大, 单元刚度下降, 最大应力状况下降。

4 结论

通过基于扩展有限元方法 (XFEM) 结合内聚力模型 (CZM) 的方法, 建立了热-力耦合的镀层身管有限元模型, 开展了在高温高压循环载荷作用下镀层初始裂纹扩展至镀层/基体界面致界面损伤失效研究, 得出以下结论:

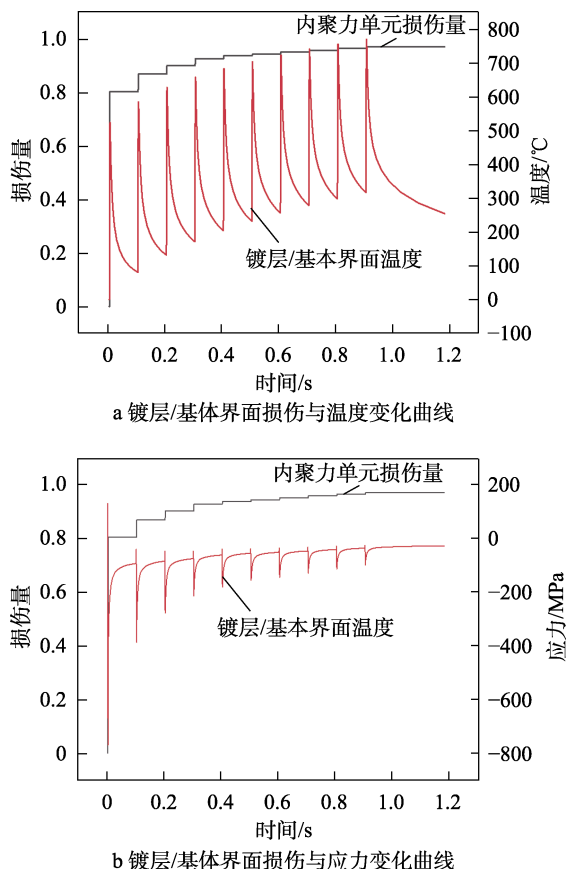


图 16 连续射击下单元损伤情况与温度

Fig.16 Unit damage and temperature under continuous firing: a) damage and temperature change curve of coating/substrate interface; b) damage and stress change curve of coating/substrate interface

1) 对于含初始裂纹的镀层, 在高温高压载荷作用下, 初始裂纹会很快扩展到镀层/基体界面。

2) 根据镀层剪切失效模型, 身管镀层由于裂纹间隙的存在, 对镀层/基体界面裂纹的扩展影响较为显著, 造成局部的应力集中, 促进了裂纹在基体结合面的扩展。

3) 基于内聚力模型来研究镀层/基体界面损伤失效行为, 在连续瞬态温度冲击下, 镀层与基体界面处应变不协调, 造成界面应力失配, 持续的界面应力失配造成界面刚度持续下降, 更易造成镀层的脱落。

参考文献:

- [1] 黄进峰, 连勇, 张程, 等. 不同表面处理条件下身管烧蚀研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(3): 323-327.
HUANG Jin-feng, LIAN Yong, ZHANG Cheng, et al. Study on Erosion of Gun Barrels with Different Surface Treatments[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(3): 323-327.
- [2] 张国祥, 姚东伟. 激光淬火基体对镀铬层界面剪切强度的影响[J]. 激光技术, 2012, 36(4): 527-531.
ZHANG Guo-xiang, YAO Dong-wei. Effect of Laser-Quenching Substrate on Interfacial Shear Strength of Chromium Plated Coatings[J]. Laser Technology, 2012, 36(4): 527-531.
- [3] 王为介, 曲普, 李强, 等. 多物理场作用下身管应力场及裂纹尖端强度因子分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 138-142.
WANG Wei-jie, QU Pu, LI Qiang, et al. Stress Field and Crack Tip Intensity Factor Analysis of Barrel under Multi Physical Fields[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 138-142.
- [4] 古斌, 宁变芳, 刘朋科, 等. 身管内壁裂纹扩展特性及剩余寿命研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2022, 43(1): 21-28.
GU Bin, NING Bian-fang, LIU Peng-ke, et al. Study on Crack Propagation Characteristics and Remaining Life of Gun Barrel Inner Wall[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2022, 43(1): 21-28.
- [5] 梁林, 郭昭蔚, 许俊, 等. 热应力对身管铬-钢结合面裂纹扩展的影响[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 6-10.
LIANG Lin, GUO Zhao-wei, XU Jun, et al. Influence of Thermal Stress on Crack Propagation of Chromium-Steel Interface of Gun Barrel[J]. Computer Simulation, 2020, 37(9): 6-10.
- [6] 吕凯, 徐颖强, 孙戡, 等. 热载荷下热障涂层表-界面裂纹间的相互影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 125-134.
LYU Kai, XU Ying-qiang, SUN Jian, et al. Interaction between Surface and Interface Cracks in Thermal Barrier Coatings under Thermal Load[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 125-134.
- [7] 于庆民, 石永志. 热失配应力下热障涂层表面裂纹扩展的数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(10): 3052-3057.
YU Qing-min, SHI Yong-zhi. Numerical Simulation of Surface Crack Propagation in Thermal Barrier Coatings under Thermal Mismatch Stress[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(10): 3052-3057.
- [8] HEIDARI-RARANI M, SAYEDAIN M. Finite Element Modeling Strategies for 2D and 3D Delamination Propagation in Composite DCB Specimens Using VCCT, CZM and XFEM Approaches[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 103: 102246.
- [9] BELLALI M A, SERIER B, MOKHTARI M, et al. XFEM and CZM Modeling to Predict the Repair Damage by Composite Patch of Aircraft Structures: Debonding Parameters[J]. Composite Structures, 2021, 266: 113805.
- [10] NIKOLAKOPOULOS K, CRÉTÉ J P, LONGÈRE P. Progressive Failure of Ductile Metals: Description via a Three-Dimensional Coupled CZM-XFEM Based Approach[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 243: 107498.
- [11] DEKKER R, VAN DER MEER F P, MALJAARS J, et al. A Cohesive XFEM Model for Simulating Fatigue Crack Growth under Various Load Conditions[J]. Engi-

- neering Fracture Mechanics, 2021, 248: 107688.
- [12] 高文, 张津, 黄进峰, 等. 身管内膛镀铬层-钢基体界面损伤退化行为研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(13): 90-98.
GAO Wen, ZHANG Jin, HUANG Jin-feng, et al. Research Progress of Degradation Failure of Interface of Chromium Coating and Steel Substrate in Gun Bores[J]. Materials Review, 2017, 31(13): 90-98, 125.
- [13] UNDERWOOD J H, VIGILANTE G N, MULLIGAN C P. Review of Thermo-Mechanical Cracking and Wear Mechanisms in Large Caliber Guns[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 1616-1621.
- [14] UNDERWOOD J H, TROIANO E. Critical Fracture Processes in Army Cannons: A Review[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2003, 125(3): 287-292.
- [15] 耿雪浩, 周克栋, 赫雷, 等. 基于镀层界面剪切疲劳损伤的枪管寿命预测研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 2416-2424.
GENG Xue-hao, ZHOU Ke-dong, HE Lei, et al. Life Prediction of Gun Barrel Based on Shear Fatigue Damage of Coating Interface[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(12): 2416-2424.
- [16] 耿雪浩, 周克栋, 赫雷, 等. 镀层材料热及力学特性对枪管寿命的影响[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(7): 711-718.
GENG Xue-hao, ZHOU Ke-dong, HE Lei, et al. Influence of Thermal and Mechanical Properties of Coating on Gun Barrel Life[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(7): 711-718.
- [17] 耿雪浩, 周克栋, 赫雷, 等. 基体材料高温强度对枪管寿命的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(2): 121-128.
GENG Xue-hao, ZHOU Ke-dong, HE Lei, et al. Influence of High-Temperature Strength of Substrate Steel on Barrel Life[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(2): 121-128.
- [18] 林德佳, 臧孟炎. 基于内聚力模型的夹层玻璃冲击破坏仿真分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 176-181.
LIN De-jia, ZANG Meng-yan. Research on Impact Fracture Behavior of the Laminated Glass Based on Cohesive Zone Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 176-181.
- [19] 吴艳青, 张克实. 利用内聚力模型(CZM)模拟弹粘塑性多晶体的裂纹扩展[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(4): 454-462.
WU Yan-qing, ZHANG Ke-shi. Crack Propagation in Polycrystalline Elastic-Viscoplastic Materials Using Cohesive Zone Models[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(4): 454-462.
- [20] 张国祥, 陈光南, 张坤, 等. 激光淬火基体对镀铬层断裂韧性的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(3): 52-55.
ZHANG Guo-xiang, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun, et al. Effect of Laser-Quenching Substrate on the Fracture Toughness of Chromium Plated Coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(3): 52-55.
- [21] LI Xiao-long, ZANG Yong, LIAN Yong, et al. An Interface Shear Damage Model of Chromium Coating/Steel Substrate under Thermal Erosion Load[J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 405-415.
- [22] 李小龙. 速射武器身管材料劣化行为与弹道性能退化机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
LI Xiao-long. Research on the Deterioration Behavior of the Barrel Material of the Rapid-Fire Weapon and the Degradation Mechanism of Ballistic Performance[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [23] HOLZWARTH U, STAMM H. Mechanical and Thermomechanical Properties of Commercially Pure Chromium and Chromium Alloys[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 300(2-3): 161-177.
- [24] 侯宗斌, 彭胜阳, 于庆民, 等. 瞬态热载荷下身管热防护涂层表面开裂行为[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(1): 28-34.
HOU Zong-bin, PENG Sheng-yang, YU Qing-min, et al. Surface Cracking Behavior of Thermal Protective Coating on Gun Barrel under Transient Thermal Load[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45(1): 28-34.
- [25] 黄刘刚. 内聚力模型的分析及有限元子程序开发[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
HUANG Liu-gang. The Analysis of Cohesive Zone Model and User-Defined Subroutine Development in Finite Element Method[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.

责任编辑: 刘世忠