

身管镀层界面失效分析及寿命预测研究

耿雪浩¹, 罗涛¹, 司志桢¹, 周克栋², 刘飞飞¹, 郭小源¹, 李建¹

(1.内蒙古北方重工业集团有限公司 南京研发中心, 南京 210049;

2.南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要: **目的** 研究热压耦合作用下身管镀层的界面失效机理, 预测身管寿命。**方法** 建立镀层界面剪切失效、界面弯曲失效和界面裂纹扩展失效 3 种失效模型, 并给出失效准则。以某小口径步枪身管为研究对象, 基于完整冷却周期的身管温度场数值模拟结果, 计算这 3 种失效在相同射击条件下的临界失效长厚比, 并对结果进行对比分析, 确定身管镀层的主要界面失效方式。结合镀层的界面失效机理和低周疲劳损伤累积理论, 建立基于镀层界面疲劳损伤累积的身管寿命预测模型, 对该小口径步枪身管的寿命进行预测。**结果** 临界失效长厚比计算结果表明, 界面剪切失效是身管镀层的主要失效方式。身管寿命预测结果与寿命试验结果相比, 误差小于 2%。**结论** 界面剪切失效是身管镀层的主要失效方式, 基于镀层界面疲劳损伤累积的身管寿命预测方法是可行的。

关键词: 身管; 镀层; 界面失效; 剪切; 疲劳损伤累积; 寿命预测

中图分类号: TJ204

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)07-0043-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.006

Analysis of Interface Failure and Life Prediction of Coating in Gun Barrel

GENG Xue-hao¹, LUO Tao¹, SI Zhi-hui¹, ZHOU Ke-dong², LIU Fei-fei¹, GUO Xiao-yuan¹, LI Jian¹

(1. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Limited Company Nanjing Institute, Nanjing 210049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the mechanism of interface failure mechanism of coating in gun barrel and predict the service life of gun barrel. Three interface failure models (interface shear failure, interface bending failure and interface crack growth failure) of coating in gun barrel are built, and the failure criterion is given correspondingly. Then a small caliber gun barrel is employed as study object and the critical failure L/h ratio of different failure models during firing process are calculated based on temperature field simulation result. By comparison of the calculation results, thus, the main interface failure way of coating in gun barrel is confirmed. Going forward, a life prediction method of gun barrel based on coating interface fatigue damage accumulation is proposed by comprehensive application of the theory of fatigue damage accumulation and the theory of coating interface failure mechanism. The life prediction model of gun barrel is

收稿日期: 2022-06-19; 修订日期: 2022-07-05

Received: 2022-06-19; Revised: 2022-07-05

基金项目: 国家部委基金 (30407)

Fund: Funds of National Ministries and Commissions (30407)

作者简介: 耿雪浩 (1990—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为身管镀层损伤机理及身管增寿技术。

Biography: GENG Xue-hao (1990-), Male, Doctor, Engineer, Research focus: gun barrel coating damage mechanism and gun barrel life extension technology.

引文格式: 耿雪浩, 罗涛, 司志桢, 等. 身管镀层界面失效分析及寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 043-050.

GENG Xue-hao, LUO Tao, SI Zhi-hui, et al. Analysis of Interface Failure and Life Prediction of Coating in Gun Barrel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 043-050.

built and the life of this small caliber gun barrel is predicted. In conclusion, the calculation results indicate that shear failure is the main interface failure way, and the differences between service life prediction results and life test results are less than 2%, which verifies that the prediction method proposed in this paper is feasible.

KEY WORDS: gun barrel; coating; interface failure; shear; fatigue damage accumulation; service life prediction

镀层的损伤失效过程大致可分为开裂和剥落 2 个阶段。镀层的初始裂纹可能在身管进行第一次射击之前就已经存在,例如电解沉积铬在沉积及热处理去氢过程中产生的残余应力即会导致镀层内部产生微裂纹^[1]。研究发现,一旦镀层的完整性遭到破坏,带镀层的身管烧蚀速度甚至比没有镀层的身管更快^[2]。

通过实弹试验发现,身管镀层表面在射击几十发甚至几发后便会形成大量的宏观裂纹,而镀层开裂并不会立即导致身管失效,后期的界面破坏导致的镀层剥落才会对身管寿命产生重要的影响。镀层的界面破坏则是一个长时间的过程,镀层开裂后仍然能承受成千上万次循环热载荷的冲击。因此,有理由认为,镀层的界面破坏是一个损伤累积的过程,镀层的剥落是循环热冲击作用下的疲劳行为。

对于身管镀层的界面失效机理,国内外学者做了大量研究^[3-7]。高文等^[8]对身管内膛镀铬层的界面损伤退化行为的过程、影响因素及研究方法进行了综述。胡春东等^[9]通过实验方法研究了某机枪身管的内膛损伤特征,并分析了其失效机制。梁林等^[10]从裂纹尖端剪应力和裂纹张开位移 2 个方面分析了不同厚度镀层在热循环下的裂纹扩展,总结了火炮连续高速射击对温度变化及裂纹尖端处剪应力的影响,揭示了身管铬钢结合面在热应力下的力学响应及裂纹扩展规律。张国祥等^[11]对身管内膛表面进行了激光离散淬火预处理,研究了基体界面腐蚀形貌与铬层剥落的关系,提出了基于烧蚀坑的镀层断裂失效模型。

对于身管寿命预测的研究,国内外学者同样做出了不懈努力。徐东升等^[12]通过分析火炮身管的烧蚀磨损过程,提出了一种基于膛线起始位置输入总热量和膛内输入总压力的火炮身管等效全装药寿命换算方法。孟祥飞^[13]基于灰色系统理论,建立了内膛磨损量和射弹数关系的身管寿命灰色预测模型。吴华晴等^[14-15]提出了一种基于融合理论退化模拟和试验数据的身管寿命预测方法。齐玉辉等^[16]基于对身管钢铬结合部疲劳寿命的计算,建立了使用条件与身管寿命关系的近似模型。闫建伟等^[17]基于退化数据分析法,建立了身管内膛疲劳损伤随射弹量变化的退化模型,并利用该模型对身管寿命进行了预测。

目前对于身管寿命预测的研究,多数仅从统计学规律方面入手,并未将内膛损伤机理和寿命预测模型相结合。为把身管内膛损伤机理和寿命预测结合起来,探索身管寿命预测新的途径,本文以某小口径步枪身管为研究对象,建立了 3 种热压耦合作用下的镀

层界面失效模型,给出了失效准则。然后基于完整冷却周期的身管温度场数值模拟结果,对比分析了 3 种失效方式发生的难易程度,确定了身管镀层的主要界面失效方式。最后,结合镀层的界面失效机理和低周疲劳损伤累积理论,建立了基于镀层界面疲劳损伤累积的身管寿命预测模型,并对该小口径步枪的身管寿命进行了预测。

1 镀层界面失效机理

1.1 界面剪切失效

射击过程中,在热载荷作用下,基体和镀层因热膨胀系数不一致会发生界面失配,进而在交界面处产生剪切应力,在此剪切应力作用下,镀层有可能发生界面剪切失效。根据界面剪切失效理论绘制的身管界面剪切失效镀层受力分析如图 1 所示。图 1 中,截面为身管横截面,射击方向垂直纸面向里, b 为镀层片段宽度, L 为镀层片段长度, h 为镀层厚度, τ 为镀层片段底部切应力, S_c 为镀层内部周向正应力。由图 1 可见,该镀层片段左侧存在一条张开型裂纹,右侧存在一条闭合型裂纹。射击时,镀层片段的热膨胀闭合裂纹处受到限制而产生周向正应力,该周向正应力可表示为^[18]:

$$S_c = E\alpha(T_{h/2} - T_{2h}) / (1 - \nu) - p \left[1 + \frac{4R^2}{(2r_0 + h)^2} \right] / \left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: E 为镀层的弹性模量; α 为镀层的热膨胀系数; $T_{h/2}$ 为镀层半厚处温度; T_{2h} 为 2 倍镀层厚度处温度; ν 为泊松比; p 为膛压; r_0 和 R 分别为身管内半径和外半径; r 为身管壁中某点距身管对称轴的距离。

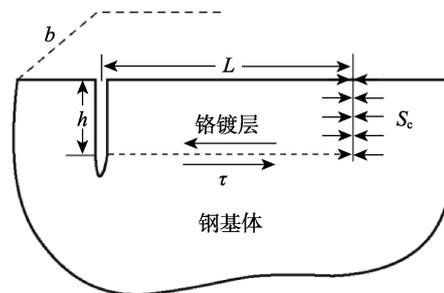


图 1 镀层界面剪切失效

Fig.1 Sketch of interface shear failure of coating

根据 Evans 等^[19]的界面失配力平衡概念,当镀层片段内产生周向力后,其底部会产生剪切力,以平衡

周向力, 力平衡公式可表示为:

$$\tau bL = S_c bh \quad (2)$$

式中: bL 表示镀层底部的受剪切力作用的面积; bh 表示镀层侧面受周向力作用的面积。

联立式 (1) 和式 (2), 镀层片段底部的剪切应力可表示为:

$$\tau = \frac{E\alpha(T_{h/2} - T_{2h}) / (1 - \nu) - p \left[1 + \frac{4R^2}{(2r_0 + h)^2} \right] / \left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right)}{L/h} \quad (3)$$

当该剪切应力超过镀层的界面剪切强度后, 镀层就会发生剪切失效。

1.2 界面弯曲失效

射击过程中, 镀层内产生的热压缩应力也会对界面产生压弯作用, 在弯曲应力的作用下, 镀层也有可能发生界面弯曲失效。根据界面弯曲失效理论绘制的身管横剖面镀层受力分析如图 2 所示, 射击方向垂直纸面向里。由图 2 可知, 周向应力 S_c 对界面产生了大小为 M_w 的弯矩, 除失效驱动力不同之外, 镀层界面弯曲失效的其他特征和界面剪切失效都相同。

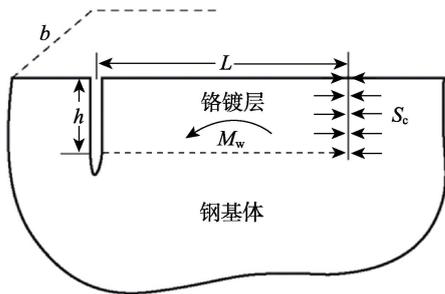


图 2 镀层界面弯曲失效
Fig.2 Sketch of interface bending failure of coating

把开裂后的镀层片段理想化为矩形结构, 则横力弯曲作用下界面上的弯曲应力 σ_w 为:

$$\sigma_w = \frac{M_w}{W} \quad (4)$$

式中: W 为界面的抗弯截面系数。对矩形截面而言:

$$W = bL^2 / 6 \quad (5)$$

$$M_w = F_w \cdot h / 2 \quad (6)$$

式中: F_w 为周向应力作用下的等效横力, $F_w = S_c \cdot bh$ 。将式 (1)、(5)、(6) 代入式 (4) 可得界面上的弯曲应力, 见式 (7)。

$$\sigma_w = \frac{3S_c}{(L/h)^2} = \frac{3 \left\{ E\alpha(T_{h/2} - T_{2h}) / (1 - \nu) - p \left[1 + \frac{4R^2}{(2r_0 + h)^2} \right] / \left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right) \right\}}{(L/h)^2} \quad (7)$$

当该弯曲应力超过镀层的界面抗弯强度后, 镀层就会发生弯曲失效。

1.3 界面裂纹扩展失效

根据界面裂纹扩展失效理论, 射击过程中, 当镀层-基体界面出现裂纹时, 在镀层内的热压缩应力作用下, 界面裂纹会有可能发生失稳扩展, 进而导致镀层发生界面失效。由于界面裂纹是 I 型和 II 型复合型裂纹, 因此当界面裂纹的 I 型和 II 型裂纹应力强度因子中的任意一个超过界面的断裂韧性时, 都会导致界面裂纹发生失稳扩展, 其失效示意图见图 3, 射击方向垂直纸面向里。镀层界面裂纹扩展失效的基本特征和前 2 种失效方式也基本相同, 唯一区别在于镀层-基体界面处存在一个长度为 a 的界面裂纹。

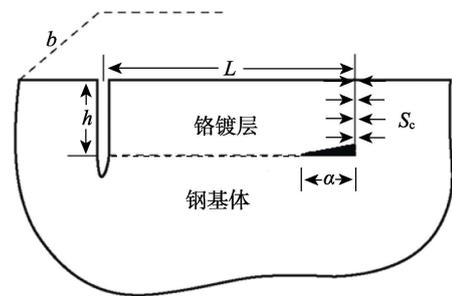


图 3 镀层界面裂纹扩展失效
Fig.3 Sketch of interface crack growth failure of coating

根据 Tada 等^[20]的研究, 当镀层片段两侧均不存在张开型裂纹时, 镀层界面裂纹的 I 型和 II 型裂纹应力强度因子分别为:

$$K_I = -0.561 \cdot S_c \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

$$K_{II} = 0.367 \cdot S_c \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

由式 (8)、(9) 可见, 由于 K_I 值是负值, 因此对界面裂纹而言, I 型扩展是不可能发生的; K_{II} 的值虽然是正的, 但在镀层内不存在张开型裂纹的情况下, 其值非常小, 使得界面裂纹的 II 型扩展也几乎不可能发生。由此可见, 当镀层内不存在张开型裂纹的情况时, 界面裂纹几乎不会发生失效扩展。

同样, 镀层内张开型裂纹的存在与否对界面剪切失效和弯曲失效也有着重要影响。当镀层内不存在张开型裂纹时, 镀层无论是发生剪切失效还是弯曲失效, 都要求其所有相连的镀层片段同时发生失效。这无疑大大扩展了镀层的失效区域, 使得镀层失效难以发生。此外, 在热载荷作用下, 两侧都是闭合裂纹的镀层片段会受到双向挤压。根据对称性, 这种情况下, 镀层内平行于界面的所有平面上切应力都为 0, 不存在剪切应力, 界面剪切失效更不可能发生。因此, 对这 3 种失效方式而言, 镀层内存在张开型裂纹是界面失效能够发生的必要条件。

如果镀层内存在张开型裂纹, 且界面受到弯曲应力作用时, 界面裂纹就有可能发生 I 型扩展。弯矩作

用下, 界面裂纹的 I 型应力强度因子为:

$$K_I = \frac{4M_w}{bL^{3/2}} = \frac{4S_c^2 h}{(L/h)^3} \quad (10)$$

在周向应力 S_c 的作用下, 当界面裂纹的 I 型应力强度因子超过界面断裂韧性时, 镀层就会发生界面裂纹扩展失效。

2 身管镀层界面失效分析

在实际身管射击试验时发现, 涂镀良好的电解沉积铬镀层, 界面强度比镀层和基体的强度都高, 而镀层的界面失效主要受界面附近钢基体的抗拉强度和断裂韧性控制, 材料的剪切强度约为其抗拉强度的 $1/2$ ^[21]。据此, 3 种失效方式的失效准则分别为: 剪切失效 $\tau \geq \sigma_{bs}/2$; 弯曲失效 $\sigma_w \geq \sigma_{bs}$; 界面裂纹扩展失效 $K_I \geq K_{IC}$ 。其中, σ_{bs} 和 K_{IC} 分别为钢基体的抗拉强度和断裂韧性。

由式 (3)、(7)、(10) 可知, 对于上述 3 种失效方式而言, 一旦给定了周向应力 S_c , 则失效驱动力只受镀层片段长宽比 L/h 的影响, L/h 越小, 失效驱动力越大, 镀层发生界面失效的可能性越大。因此, 不同的 S_c 都对应一个临界失效 L/h 值, 表明在该应力作用下, 只有 L/h 值小于临界值的镀层片段才会发生界面失效, 而临界 L/h 值越小, 则意味着镀层越难发生失效, 因为这要求镀层必须开裂成足够小的片段。因此, 通过对比同一应力作用下 3 种失效方式对应的镀层片段临界 L/h 值大小, 即可确定上述 3 种镀层失效机制发生的难易程度。

设剪切、弯曲和界面裂纹扩展 3 种失效方式对应的临界 L/h 值分别为 η_j 、 η_w 和 η_k , 则它们和 S_c 之间的关系见式 (11) — (13)。

$$\eta_j = \frac{2S_c}{\sigma_b} \quad (11)$$

$$\eta_w = \sqrt{\frac{3S_c}{\sigma_b}} \quad (12)$$

$$\eta_k = \sqrt[3]{\frac{4S_c^2 h}{K_{IC}^2}} \quad (13)$$

以某小口径步枪身管为研究对象, 开展镀层界面失效分析。首先, 利用有限差分法, 对该小口径步枪在一个完整冷却周期内的温度场进行数值模拟。根据 GJB 3484—98 的要求, 该小口径步枪 1 个完整冷却周期的射弹量为 150 发, 共发射 5 个弹匣。此 150 发弹在射击过程中需要按照一定比例分为单发、短点射和连发射击, 具体为: 单发×15—5 发×3—5 发×6—5 发×6—5 发×6—30 发×1, 其中每射击 30 发弹需换一次弹匣。每 2 个单发及点射之间间隔 1 s, 换弹匣时间为 5 s, 射击频率均为 600 rounds/min。

基于完整冷却周期身管温度场仿真结果和内弹

道膛压曲线仿真结果, 利用式 (1) 可获得完整冷却周期射击过程中镀层内周向应力 S_c 的变化情况。然后将结果代入式 (11) — (13), 即可计算得出完整冷却周期射击过程中这 3 种界面失效方式对应的镀层片段临界失效长厚比变化情况, 进而对比得出在完整冷却周期射击情况下, 哪种失效方式更容易发生。计算中所用的材料参数见表 1。

表 1 枪管材料参数

Tab.1 Material parameters of gun barrel

材料	E/GPa	ν	$\alpha/(10^{-6} \text{K}^{-1})$
钢基体	$929T^{-0.263}$	0.3	11.5
镀层	$720T^{-0.185}$	0.12	6.2

实际情况下, 镀层的界面失效是疲劳失效, 但在同一疲劳载荷作用下, 可以将问题简化。假设镀层在各发射击时的周向应力峰值作用下可以发生一次性失效, 然后只对比各发射击过程中应力峰值对应的临界 L/h 值大小。

本文研究的身管材料为高强度合金钢, 抗拉强度采用了随温度变化的数据。对实验实测的该枪钢不同温度下对应的抗拉强度数据进行指数拟合, 获得该枪钢材料在 20~700 °C 范围内抗拉强度随温度连续变化的曲线, 如图 4 所示。拟合后的抗拉强度随温度的变化公式为:

$$\sigma_b = 1\,254.9 - 49.96 \cdot e^{T/227.99} \quad (14)$$

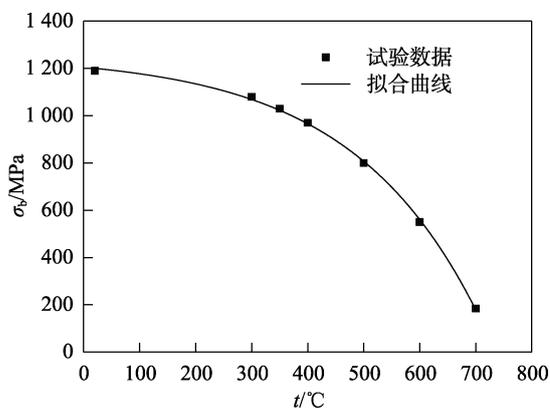


图 4 身管材料抗拉强度随温度变化拟合曲线

Fig.4 Fitted curve of variation of tensile strength at different temperatures for gun steel

在对身管寿命的研究过程中, 大量试验研究表明, 最大膛压区是关系身管寿命的重要部位之一。在射击过程中, 最大膛压区承受热冲击作用的时间最长, 工作环境最为恶劣^[22], 因此可以将身管最大膛压截面当做典型截面进行界面失效分析。将完整冷却周期内身管界面温度变化代入式 (14), 得出界面位置的 σ_b 在完整冷却周期内的变化情况。这里同样为了简化问题, 取各发射击过程中界面温度达到峰值时对应的 σ_b 作为该发射击对应的界面强度, 进行临界 L/h

值计算。

由于材料抗拉强度缺乏 700 °C 以上的实测数据, 而根据式 (14) 计算得出的 700 °C 以上的抗拉强度都极低, 甚至出现负值。事实上, 当温度超过 700 °C, 钢材的晶格会发生体心立方 (BCC) 到面心立方 (FCC) 的相变, 材料强度的下降幅度也会随之变缓, 且温度高于 700 °C 的时期在整个冷却周期内的占比非常小。因此, 在此阶段内, 是否采用更低的抗拉强度进行失效分析的影响不大。故本文在进行镀层界面失效分析及其后的寿命预测时, 700 °C 以上的界面抗拉强度都采用 700 °C 时的数据。完整冷却周期内, 界面温度及界面抗拉强度随射弹量变化情况分别如图 5 和图 6 所示。

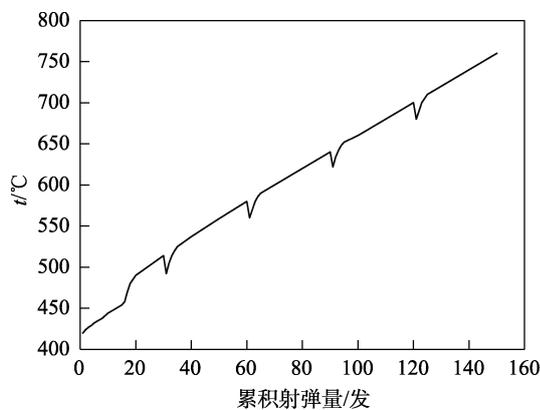


图 5 界面温度变化情况
Fig.5 Variation of interface temperature

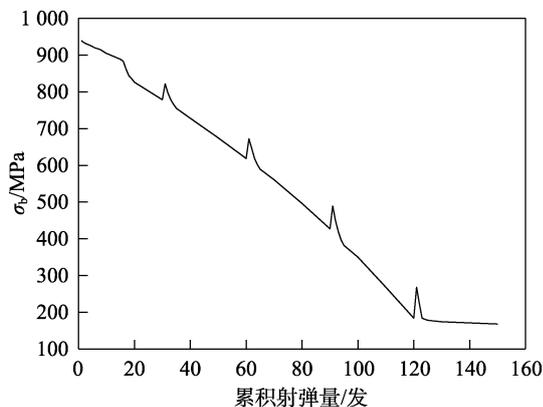


图 6 界面抗拉强度变化情况
Fig.6 Variation of interface tensile strength

该合金钢常温下的断裂韧性约为 50 MPa·m^{1/2}, 由于缺少该合金钢断裂韧性随温度变化的数据, 因此在计算 η_k 时, 全部采用常温断裂韧性。由于材料的断裂韧性随温度的升高而增大, 因此采用常温断裂韧性计算得出的 η_k 值要比实际情况大一些。

计算得出不同射击发数时 3 种失效方式对应的临界 L/h 值大小见表 2。不同射击发数时, η_j 的值都是最大的, 且随着射击发数增加, 其与 η_w 和 η_k 之间的差距越来越大。这表明在 3 种失效方式中, 界面剪

切失效是最容易发生的, 因此剪切失效是镀层界面失效的主要形式。采用常温数据计算所得偏大的 η_k 值相较于其他两者而言, 可以忽略不计, 说明界面裂纹扩展失效对于身管镀层而言, 极难发生, 并非常见的镀层界面失效形式。

表 2 不同射击发数时 3 种失效方式对应的临界 L/h 值
Tab.2 The critical L/h ratios of these three interface failure mechanisms for different fired rounds

射弹量/发	η_j	η_w	η_k
1	1.59	1.54	0.21
30	2.28	1.85	0.24
60	3.32	2.23	0.26
90	5.35	2.83	0.27
120	13.48	4.50	0.29
150	14.68	4.69	0.31

3 身管镀层界面寿命预测模型

镀层的界面破坏则是一个长时间的过程, 镀层开裂后仍然能承受成千上万次循环热载荷的冲击。有理由认为, 镀层的界面破坏是一个损伤累积的过程, 镀层的剥落是循环热冲击作用下的疲劳行为, 因此可以利用低周疲劳损伤理论预测镀层的疲劳寿命。由于镀层剥落后, 直接暴露于火药燃气环境中的钢基体会发生快速烧蚀, 导致身管寿终, 因此可以近似认为镀层的疲劳寿命等于身管寿命。

3.1 应力应变关系

低周循环加载下, 材料的循环应力-应变关系可表示为:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + \varepsilon'_f \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (15)$$

式中: $\Delta\varepsilon$ 为应变幅; $\Delta\sigma$ 为应力幅; ε'_f 为材料疲劳延性系数; σ'_f 为材料疲劳强度系数; n' 为循环应变硬化指数。

3.2 应变-寿命关系

修正后的 J. Monow 应变-寿命关系式为^[23]:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N)^{b'} + (\varepsilon'_f - \varepsilon_m) (2N)^{a'} \quad (16)$$

式中: b' 为疲劳强度指数; N 为载荷循环次数; a' 为材料的疲劳延性指数; σ_m 和 ε_m 分别为平均应力和平均应变。

3.3 疲劳性能参数估计

在无试验数据时, 可通关四点关联法确定材料的疲劳性能参数。经验表明, 由此得到的材料疲劳性能参数与材料的实际疲劳性能较好地吻合。四点关联法

中的4个参数可以通过式(17)求出。

$$\begin{cases} a' = -\lg(8\varepsilon_f^{-0.75}\varepsilon_f') \\ b' = -[0.0792 + 0.179\lg(\sigma_f/\sigma_b)] \\ n' = a'/b' \\ \sigma_f' = 1.12\sigma_b(\sigma_f/\sigma_b)^{0.893} \\ \varepsilon_f' = 0.413\varepsilon_f[1 - 81.8(\sigma_b/E)(\sigma_f/\sigma_b)^{0.179}]^{-1/3} \end{cases} \quad (17)$$

3.4 疲劳累积损伤计算

根据 Miner 线性累积损伤理论, 损伤可以叠加。当损伤累加达到某一数值时, 结构件就会产生疲劳破坏。设加载历史由 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_l$ 等 l 个不同的应力水平构成, 各应力水平下的疲劳寿命依次为 N_1, N_2, \dots, N_l , 各应力水平下的循环次数依次为 n_1, n_2, \dots, n_l , 则零件的疲劳寿命为^[24-25]:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^l n_i}{\sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i}} \quad (18)$$

3.5 寿命预测计算流程

1) 对枪管镀层进行局部应力应变分析, 基于基体-镀层界面的切应力的应力幅变化, 利用式(15)计算得出加载过程中的界面剪切应力对应的应变幅变化情况。

2) 将求得的应变幅和枪管材料疲劳性能参数代入式(16), 对单次加载情况下的枪管等幅载荷疲劳寿命进行估算。

3) 根据 Miner 线性累积损伤理论和等幅载荷疲劳寿命计算结果, 利用式(18)计算枪管的疲劳损伤累积寿命, 该疲劳损伤累积寿命即为枪管的预测寿命。

4 身管寿命预测

由于界面剪切失效是身管镀层的主要失效方式, 故基于镀层剪切失效模型和低周疲劳损伤累积理论, 对该小口径步枪身管寿命进行寿命预测分析, 这里同样以最大膛压截面作为研究对象。

完整冷却射击周期内, 最大膛压截面的界面剪切应力平均应力和应力幅变化情况如图7所示。射击过程中, 平均应力整体上随射弹量的增加而变大, 但在换弹匣间隙, 短暂空冷引起的身管温度下降会导致平均应力也出现小幅下降。在冷却周期前期, 平均应力都有一段负值, 表明这段时期内, 镀层内的周向正应力以膛压载荷引起的拉应力为主导, 而界面剪切应力的应力幅整体上则呈略微下降趋势。

基于前文所述的平均应力、应力幅及界面抗拉强度计算结果和式(16), 进行身管寿命预测。最大膛

压截面在完整冷却射击周期内等幅载荷寿命预测结果如图8所示。可以看出, 随着累积射弹量增加, 身管温度上升, 身管的等幅载荷寿命会急剧下降。

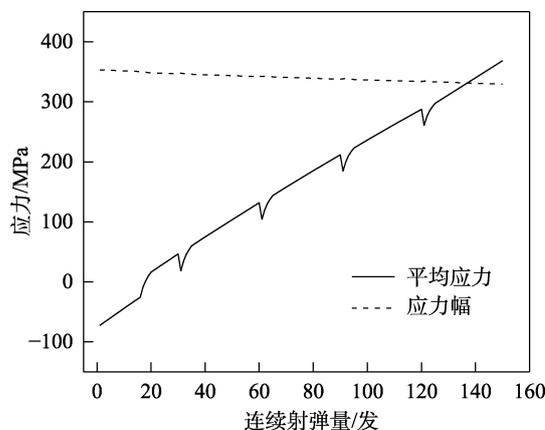


图7 平均应力和应力幅变化情况

Fig.7 Variation of mean stress and stress amplitude

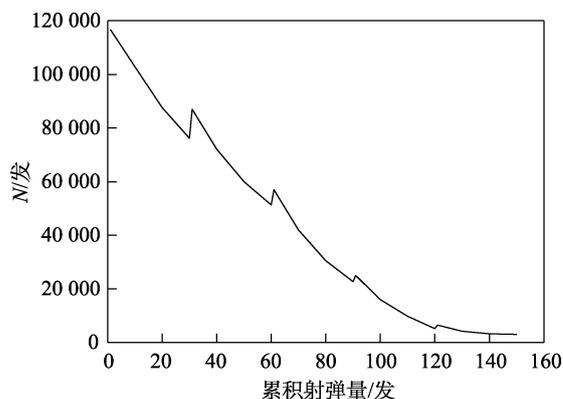


图8 等幅载荷寿命变化情况

Fig.8 Variation of predicted life under equal amplitude loading

根据疲劳损伤累积理论, 结合图8所示的完整冷却射击周期内等幅载荷寿命预测结果和式(18), 计算得出最大膛压截面对应的疲劳损伤累积寿命为10446发。为验证寿命预测模型的可行性, 开展了寿命射击试验, 试验流程按 GJB 3484—98 的规定, 被试枪支数量为2, 枪支状态与仿真模型相同。经试验, 2支被试枪支的寿终射弹量分别为10299、10634发。基于镀层剪切疲劳损伤累积的身管寿命预测模型计算所得的身管寿命预测值与2支被试身管的寿命误差分别为1.4%、1.8%, 说明本文所提出的寿命预测方法是可行性的, 镀层界面剪切疲劳失效是导致身管寿终的重要原因。

5 结论

1) 剪切失效是身管镀层的主要界面失效方式, 界面裂纹扩展失效对于身管镀层而言, 极难发生, 并非常见的身管镀层界面失效形式。

2) 身管的等幅载荷寿命会随着累积射弹量的增

加和身管温度的上升而急剧下降。

3) 身管寿命预测值和试验值相比, 误差小于 2%, 本文所提出的寿命预测方法是可行性的。

参考文献:

- [1] COTE P J, RICKARD C. Gas-Metal Reaction Products in the Erosion of Chromium-Plated Gun Bores[J]. *Wear*, 2000, 241(1): 17-25.
- [2] MAWELLA J. Protection of Gun Barrels From Wear and Erosion[R]. Canada: Energetic Materials and Propulsion Technology Workshop, 1998.
- [3] 张金, 赵亮, 王鑫, 等. 火炮身管内膛损伤机理分析[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(5): 8-14.
ZHANG Jin, ZHAO Liang, WANG Xin, et al. Mechanism Analysis of Internal Defects in Barrels[J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(5): 8-14.
- [4] 乔自平, 李峻松, 薛钧. 大口径机枪枪管失效规律研究[J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2231-2240.
QIAO Zi-ping, LI Jun-song, XUE Jun. Research on the Performance Decay Rule of Large Caliber Machinegun Barrel[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(12): 2231-2240.
- [5] 蒋泽一, 李强, 薄玉成, 等. 火炮身管损伤的研究[J]. *机械工程与自动化*, 2013(5): 221-222.
JIANG Ze-yi, LI Qiang, BO Yu-cheng, et al. Summary on Damage of Gun Barrels[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2013(5): 221-222.
- [6] 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.
- [7] 顾玮. 弹带挤进及火炮内膛损伤的数值模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
GU Wei. The Research on Numerical Simulation of Driving Band's Engraving Process and the Damage Mechanism of Bore[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [8] 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.
- [9] 胡春东, 董瀚, 赵洪山, 等. 某机枪枪管内膛损伤特征[J]. *兵工学报*, 2019, 40(3): 480-487.
HU Chun-dong, DONG Han, ZHAO Hong-shan, et al. Bore Damage Characteristics of a Machine Gun Barrel[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(3): 480-487.
- [10] 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.
- [11] 张国祥, 张坤, 陈光南, 等. 钢基身管内镀铬层下的激光淬火基体界面腐蚀与铬层剥落[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2006, 18(6): 418-421.
ZHANG Guo-xiang, ZHANG Kun, CHEN Guang-nan, et al. Interfacial Corrosion and Spallstion of Cr-Plated Coating on a Gun Barrel Steel Substrate Pre-Trated by Laser Spiraly Queching[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2006, 18(6): 418-421.
- [12] 徐东升, 刘广生, 贾长治, 等. 火炮身管等效全装药寿命换算方法研究[J]. *火炮发射与控制学报*, 2013, 34(1): 89-92.
XU Dong-sheng, LIU Guang-sheng, JIA Chang-zhi, et al. Research on Life Transform Coefficient for Gun Barrel in Equivalent Full Charge[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2013, 34(1): 89-92.
- [13] 孟翔飞. 武器身管寿命预测模型及内膛参数综合检测系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
MENG Xiang-fei. Research on Life Prediction Model and Bore Comprehensive Parameters Detection System for Gun Barrel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [14] 方峻, 吴华晴. 融合理论退化模拟与试验数据的身管寿命预测[J]. *机械科学与技术*, 2014, 33(10): 1468-1472.
FANG Jun, WU Hua-qing. Prediction of the Barrel Life Based on the Theoretical Degradation Simulation and the Experimental Data[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2014, 33(10): 1468-1472.
- [15] 吴华晴. 基于退化数据的身管使用寿命预测与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
WU Hua-qing. Prediction and Analysis of the Barrel Life Based on the Degradation Data[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [16] 齐玉辉, 杨明华, 单永海, 等. 典型使用条件对大口径机枪枪管寿命影响研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(11): 1976-1982.
QI Yu-hui, YANG Ming-hua, SHAN Yong-hai, et al. Influences of Typical Service Conditions on the Barrel Life of Large-Caliber Machine Gun[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(11): 1976-1982.
- [17] 闫建伟, 方峻. 身管疲劳损伤与可靠寿命分析[J]. *机械设计与制造*, 2016(9): 7-11.
YAN Jian-wei, FANG Jun. Fatigue Damage and Reliabil-

- ity Analysis for Life of the Barrel[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(9): 7-11.
- [18] 耿雪浩. 镀铬枪管镀层损伤与枪管寿命预测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- GENG Xue-hao. Study on Coating Damage and Life Prediction of Chromium-Plated Gun Barrel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [19] EVANS A G, HUTCHINSON J W. The Thermomechanical Integrity of Thin Films and Multilayers[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995, 43(7): 2507-2530.
- [20] TADA H, PARIS P C, IRWIN G R. *The Stress Analysis of Cracks Handbook, Third Edition*[M]. Louis: ASME Press, 2000.
- [21] UNDERWOOD J H, WITHERELL M D, SOPOK S, et al. Thermomechanical Modeling of Transient Thermal Damage in Cannon Bore Materials[J]. *Wear*, 2004, 257(9-10): 992-998.
- [22] 卓穗如. 机枪枪管寿命预测技术[M]. 北京: 中国兵器工业第二零八研究所, 1996.
- ZHUO Sui-ru. *Machinegun Barrel Life Prediction Technology*[M]. Beijing: No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, 1996.
- [23] MORROW J D, LABORATORY. Simulation of Low Cycle Fatigue Behavior of the Hook Region of a Steam Turbine Blade Subjected to Star-Stop Cycles[C]//*Proceedings of the 4th National Congress on Pressure Vessel and Piping Technology*. Portland: [s. n.], 1983.
- [24] 刘惟信. *机械可靠性设计*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- LIU Wei-xin. *Mechanical Reliability Design*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [25] 赵少汴. 常用累积损伤理论疲劳寿命估算精度的试验研究[J]. *机械强度*, 2000, 22(3): 206-209.
- ZHAO Shao-bian. Study on the Accuracy of Fatigue Life Predictions by the Generally Used Damage Accumulation Theory[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2000, 22(3): 206-209.

责任编辑: 刘世忠