不同温度热–冷循环处理对炮钢摩擦磨损性能的影响

徐张，曹守范，杨国来，梁医
（南京理工大学 机械工程学院，南京 210094）

摘要：目的 研究不同温度热–冷循环处理对炮钢摩擦磨损性能的影响及其磨损机理。**方法** 将 PCrNi3MoVA 炮钢分别在 400、800 ℃的加热温度下进行热–冷循环处理，采用立式万能摩擦磨损实验机在不同的滑动速度下测试炮钢销与 H96 黄铜盘配副时的摩擦磨损性能，记录摩擦系数，测量炮钢销和黄铜盘的磨损量。采用扫描电子显微镜和能谱仪测量磨损后的炮钢销表面形貌及化学成分，分析其磨损机理。**结果** 热–冷循环处理对炮钢销在 100 r/min 滑动速度下的摩擦系数的影响较小。随着热–冷循环处理中加热温度的升高，炮钢销的磨损量增大，而黄铜盘的磨损量受炮钢销热–冷循环处理的影响较小。炮钢销的磨损表面可见明显的因材料塑性变形剥落造成的凹坑和沟槽。随着滑动速度的增大，800 ℃–室温循环处理后，炮钢销的摩擦系数降低，磨损量在 400 r/min 时最大，在 800 r/min 时反而下降到接近于 0。分析磨损表面发现，800 r/min 时，黄铜磨屑与炮钢磨屑发生掺杂混合，附着于炮钢销的磨损表面，从而影响了炮钢销的摩擦磨损性能。**结论** 热–冷循环处理对炮钢销–黄铜盘摩擦副摩擦系数的影响较小，但随着热–冷循环中加热温度的升高，炮钢销的耐磨损性能下降。滑动速度对炮钢销摩擦系数和磨损量的影响都较大，高的滑动速度下，黄铜磨屑与炮钢磨屑混合，并附着于炮钢销磨损表面，改变炮钢销的磨损机理。

关键词：火炮挤进；炮钢；热–冷循环；摩擦；磨损；高温氧化
中图分类号：TJ04；TG115.5+8 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2022)07-0058-08
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2022.07.008

Effect of Heating-Cooling Cycles of Different Temperatures on Friction and Wear Properties of Gun Steel

XU Zhang, *CAO Shou-fan*, *YANG Guo-lai*, *LIANG Yi*
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

收稿日期：2022–05–08；**修订日期：**2022–07–15
Received：2022-05-08；**Revised：**2022-07-15
基金项目：军委科技委基础加强重点项目（2019-JCJQ-ZD-133-04-02）；南京理工大学大型仪器设备开放基金
Fund：Key Project of Basic Strengthening of Science and Technology Commission of the Military Commission (2019-JCJQ-ZD-133-04-02); Open Funding for Large Instruments and Major Facilities of NJUST
作者简介：徐张（1999—），男，硕士研究生，主要研究方向为挤进过程火炮身管的烧蚀磨损。
Biography：XU Zhang (1999-), Male, Postgraduate, Research focus: erosive wear of artillery bore in the extrusion process.
通讯作者：曹守范（1986—），男，博士，副教授，主要研究方向为极端环境下金属材料的磨损和腐蚀。
Corresponding author：CAO Shou-fan (1986-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: wear and corrosion properties of metallic materials in harsh environments.
引文格式：徐张，曹守范，杨国来，等. 不同温度热–冷循环处理对炮钢摩擦磨损性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 580-066.
XU Zhang, CAO Shou-fan, YANG Guo-lai, et al. Effect of Heating-cooling Cycles of Different Temperatures on Friction and Wear Properties of Gun Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 580-066.

ABSTRACT: The objective of this paper is to study the effect of heating-cooling cycles of different temperatures on the friction and wear properties of gun steel and its wear mechanism. Heating-cooling cycles were performed on the PCrNi3MoVA gun steel at 400 ℃ and 800 ℃, respectively. A universal tribometer was used to test the friction and wear properties of the gun steel pin paired with H96 brass plate at different sliding speeds. The friction coefficient was recorded and the wear of the gun steel pin and brass plate was quantified. The worn surface morphology and chemical composition of the gun steel pin was observed and analyzed using scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer, and the wear mechanism was analyzed. The results showed the heating-cooling cycles had little effect on the friction coefficient of the gun steel pin at the sliding speed of 100 r/min. With the increase of heating temperature in the heating-cooling cycles, the wear loss of the gun steel pin increased, while the wear loss of the brass disk was little affected by the heating-cooling cycles of the gun steel pin. The worn surface of the gun steel pin after heating-cooling cycles showed obvious pits and grooves caused by material plastic deformation induced spalling. When the sliding speed increased, the friction coefficient of the gun steel pin decreased, and the wear loss reached the maximum at 400 r/min, but decreased to almost 0 at 800 r/min. The worn surface analysis showed that, at 800 r/min, the friction and wear properties of the gun steel pin were affected by the mixing of brass and gun steel wear debris. It is concluded that the heating-cooling cycles have little effect on the friction coefficient of the gun steel-brass friction pair, but with the increase of heating temperature in the heating-cooling cycles, the wear resistance of the gun steel pin decreases. The sliding speed has great influence on friction coefficient and wear loss of the gun steel pin. At high sliding speed, the mixing of brass and gun steel wear debris exists and attaches to the worn surface of the gun steel pin, which can change the wear mechanism of the gun steel pin.

KEY WORDS: extrusion process of artillery; gun steel; heating-cooling cycles; friction; wear; high temperature oxidation

炮身是火炮系统中最重要的组成部分。炮身由身管、炮尾、炮闩等部件组成，其中身管是重中之重。身管赋予了火炮最重要的战斗性能，是生成火炮战斗力的主体[1-2]。火炮身管在服役过程中，会因为身管内壁的烧蚀磨损而造成火炮射击初速和射击精度的降低，最终导致火炮寿命的终结[3-4]。因此，研究火炮的烧蚀磨损性能和机理对于提高火炮的作战能力及服役寿命具有重要意义。

火炮身管的烧蚀磨损十分复杂，受到火药燃气温度[5]、热–冷循环温度和频率[6]、火药燃气产物[7]、弹丸运动速度[8]、身管材料[9]等多种因素的影响，是热、化学和机械等因素相互作用的结果[10-11]。现有研究表明，火炮身管的烧蚀磨损主要集中在膛线起始部位[12]。火炮发射时，弹丸在高温高压燃气的推动下启动，铜弹带被身管内壁的膛线切割，克服变形阻力和摩擦力而逐渐挤进膛线，直至弹带及其延伸部分完全挤进全深膛线[13]。弹带挤进过程是火炮初始内弹道的一个重要组成部分，决定了弹丸膛内运动的起始状态，也会影响火炮的射击精度，同时对坡膛和膛线的磨损以及身管寿命有着重要影响[14-16]。

为了研究弹带挤进过程中的摩擦磨损机理，国内外学者进行了大量研究。Wu 等[17]模拟了不同装弹条件下 2 种挤进工况的摩擦磨损试验，分析了 2 种工况下铝青铜涂层的磨损特性，得到了热喷涂后的铝青铜涂层具有较高的粘结强度和良好塑性的结论。殷军辉等[18-19]通过研究弹丸膛内摩擦过程以及膛线挂铜现象，得到了弹带材料的变化机理以及弹带塑性变形的宏观与微观机理。姜啸天等[20]基于火炮不同的损伤程度建立有限元模型，得到了不同程度的膛线磨损对弹丸挤进过程的影响。李政等[21]利用非弹性功转化热因素的热力耦合挤进模型进行了数值模拟研究，得到了挤进过程中速度、磨削面积变化率、能量等参数的变化规律。胡慧斌等[22]通过销–盘摩擦试验，得到了炮钢–黄铜在不同滑动速度、接触压力和温度下的摩擦系数以及身管材料的磨损规律。

事实上，在弹丸挤进过程中，身管膛线切割弹带，膛线表面与弹带紧密接触。挤进初期，与弹带接触的膛线基本不与火药气体接触，因此受到火药气体的烧蚀作用较小，温度也较低，而膛线与弹带之间的磨损是造成此处身管损伤的主要原因。弹带挤进后期及挤进完成后，坡膛处的身管内壁会受到后续火药燃气的高温烧蚀作用。因此，火炮身管在服役过程中，身管内壁受到弹丸发射时的加热和发射后的冷却这一热–冷循环作用[4]，此循环作用对身管膛线在挤进初期的摩擦磨损性能的影响目前还不清楚。因此，本文通过测试不同温度热–冷循环处理后的炮钢与黄铜配副在不同滑动速度下的摩擦磨损性能，研究炮钢在不同热–冷循环处理温度和不同滑动速度下的磨损机理，为火炮发射弹带挤进过程中身管膛线的摩擦磨损性能提升提供一定的理论和试验依据。

1　试验

1.1　材料及热处理

本文所采用的销–盘摩擦副中，销材料选用 PCrNi3MoVA 炮钢，符合 GJB 3783—99 的要求，其

化学成分见表 1，盘材料为 H96 黄铜。

参照文献[23]介绍的火炮身管的热处理流程对本试验使用的炮钢原材料进行热处理。首先将样品置于 870 ℃的电阻炉中保温 60 min，取出立即置于水中冷却，淬火完成；然后将淬火后的样品在 580 ℃的炉中保温 120 min，取出在空气中冷却，第一次回火完成；最后将一次回火后的样品置于 600 ℃的炉中保温 120 min，取出立即置于水中冷却，第二次回火完成。

表 1　PCrNi3MoVA 钢的化学成分（质量分数，%）

Tab.1 Chemical composition of PCrNi3MoVA steel (mass fraction, %)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	S	P
0.34~0.41	0.25~0.50	0.17~0.37	1.20~1.50	3.00~3.50	0.35~0.45	0.10~0.25	≤0.020	≤0.025

将热处理后的炮钢原材料加工成尺寸为 ϕ 4.8 mm×12.7 mm 的销。销与盘接触的一端的曲率半径为 4.75 mm，另一端经砂纸逐级打磨至 2500#。由黄铜加工的盘的尺寸为 ϕ54 mm×10 mm，盘与销接触的一侧逐级打磨至 1500#。分别使用丙酮和酒精对炮钢销和铜盘进行超声清洗，各 10 min，然后立即用风筒吹干样品，留待试验使用。

1.2　炮钢销热-冷循环处理

炮钢销的热–冷循环处理方法为，将炮钢销置于电阻炉中恒温加热 6 min 后，取出在空气中冷却，一般在 6 min 内可以冷却至室温。上述过程反复循环 10 次。弹带挤进过程中，因火炮身管口径、火药种类以及发射间隔等的不同，身管内壁表层所达到的温度有所不同，一般可达 800 ℃左右[24-26]。因此，本试验中电阻炉的恒温温度选取 400、800 ℃ 2 档作为代表，同时取不进行热–冷循环处理的炮钢销作为对照试验（不进行热–冷循环处理也可以认为是室温–室温循环）。

1.3　摩擦磨损试验

摩擦磨损试验在 MM-W1B 型立式万能摩擦磨损实验机上进行。采用销–盘干摩擦副，运动形式为销在盘上转动。火炮发射的挤进初期，弹丸在膛内的运行速度（也即弹带与身管膛线之间的相对滑动速度）由 0 升高到数米每秒，因此本试验中选取 100、400、800 r/min 等 3 个转速作为代表，对应线速度分别为 0.24、0.97、1.93 m/s。试验加载力为 10 N，摩擦时间为 10 min。同组试验重复 3 次，防止偶然性误差。

磨损量采用精密天平（精度为 0.1 mg）对磨损前后的炮钢销进行测量，取差值。摩擦副的摩擦系数计算公式为：

$$\mu=\frac{T}{P\cdot R} \tag{1}$$

式中：T 为摩擦力矩，N·m；P 为试验机施加在销试样上的法向压力，N；R 为摩擦半径，即盘与销接触点的轨迹半径，R=46.155/2 mm。

试验后，采用 Phenom Pro 和 FEI Quanta 250F 扫描电子显微镜（SEM）观察炮钢销的磨损表面形貌，通过扫描电镜配备的 EDS 能谱仪分析磨损表面的化学成分，最后分析炮钢销的磨损机理。

2　结果与讨论

2.1　不同温度热-冷循环处理后的炮钢销在 100 r/min 滑动速度下的摩擦磨损性能

2.1.1　摩擦系数和磨损量

不同温度热–冷循环处理后，炮钢销与黄铜盘在 100 r/min 滑动速度下的摩擦系数曲线如图 1 所示。滑动开始后，3 种样品的摩擦系数都迅速上升到 0.4 左右。之后，摩擦系数都有下降趋势，最后稳定在 0.35 左右。另外，800 ℃–室温循环处理的炮钢销的摩擦系数（见图 1c）保持在 0.4 一段时间后，才缓慢下降

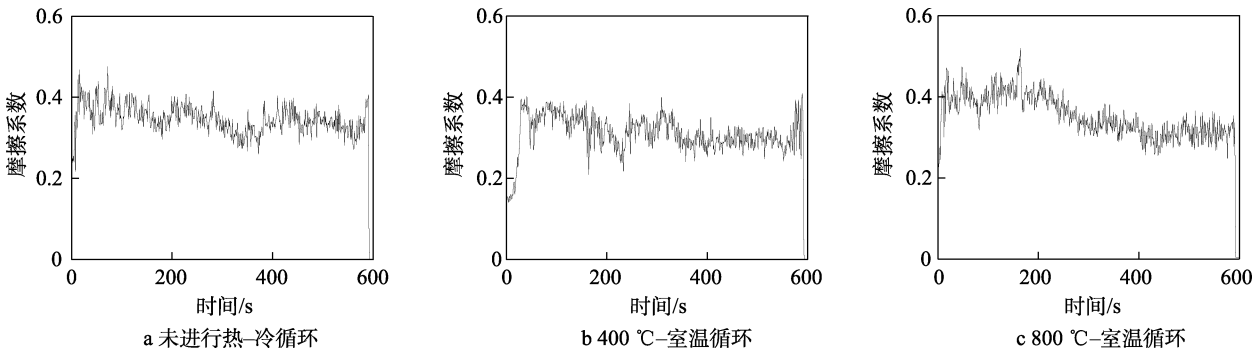


图 1　滑动速度为 100 r/min 时不同温度热–冷循环处理后炮钢的摩擦系数曲线

Fig.1 Friction coefficient curves of gun steel after different temperatures of heating-cooling cycles at the sliding speed of 100 r/min: a) no heating-cooling cycle; b) 400 ℃-room temperature cycling; c) 800 ℃-room temperature cycling

到 0.35，与另外 2 种处理方式的炮钢的摩擦系数变化趋势稍有不同。3 种处理方式所获得的摩擦系数在整个摩擦时间里的平均值见表 2，可见 800 ℃–室温循环处理的炮钢的摩擦系数比另 2 种处理方式的炮钢的摩擦系数稍高。

表 2　滑动速度为 100 r/min 时不同温度热–冷循环处理后炮钢销与黄铜盘的摩擦系数和磨损量

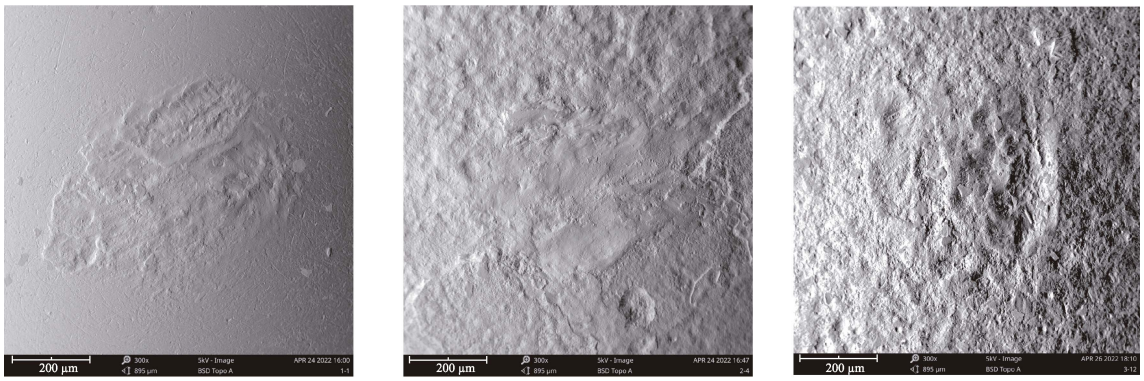
Tab.2 Friction coefficient and wear loss of gun steel pin and brass disk after different temperatures of heating-cooling cycles at sliding speed of 100 r/min

处理方式	摩擦系数	炮钢销磨损量/mg	黄铜盘磨损量/mg
未进行热–冷循环	0.32±0.02	–0.15±0.05	3.15±0.15
400 ℃–室温循环	0.30±0.01	0.20±0.01	2.95±0.05
800 ℃–室温循环	0.34±0.01	0.85±0.05	2.75±0.25

表 2 还列出了不同温度热–冷循环处理后的炮钢销与黄铜盘在 100 r/min 下的磨损量。未进行热–冷循环的情况下，炮钢销的磨损量为 – 0.15 mg，表明磨损后炮钢销的质量没有减小，反而有所增加。对于进行热–冷循环处理的样品，随着加热温度从 400 ℃增加到 800 ℃，炮钢销的磨损量由 0.2 mg 增加到 0.85 mg。与 3 种处理方式的炮钢销摩擦后，黄铜盘的磨损量均在 2.95 mg 左右，并未像炮钢销那样随加热温度的不同而变化，这说明黄铜盘的磨损受炮钢销热–冷循环处理的影响较小。

2.1.2　磨损形貌分析

不同温度热–冷循环处理后的炮钢销与黄铜盘在 100 r/min 的滑动速度下的磨损 SEM 形貌如图 2 所示。相比于未进行热–冷循环处理的炮钢销，经过热–冷循环处理后，炮钢销表面明显变粗糙。这可能是因为热–冷循环使炮钢表面氧化，并有不同程度的剥落造成的。同时，这也导致 400 ℃–室温循环处理和 800 ℃–室温循环处理的炮钢销的磨损区域不容易辨识，如图 2b、c 所示。图 2a 为未进行热-冷循环处理的炮钢销的磨损表面形貌，可以看到磨损较轻微，磨损区域内既有因为磨损而凹下的区域，也有凸出的区域，说明磨损产生的一部分磨屑粘着到炮钢销表面。也正是因为磨屑的粘着量与炮钢销磨损量的相互抵消作用，试验后测得的未进行热–冷循环处理的炮钢销的磨损量出现负值。



a 未进行热–冷循环　　b 400 ℃–室温循环　　c 800 ℃–室温循环形貌

图 2　100 r/min 下不同温度热–冷循环处理后炮钢销的磨损表面形貌

Fig.2 Worn surface morphologies of gun steel pin after different temperatures of heating-cooling cycles at sliding speed of 100 r/min: a) no heating-cooling cycle; b) 400 ℃-room temperature cycling; c) 800 ℃-room temperature cycling

如图 2b、c 所示，对于进行了热–冷循环处理的炮钢销来说，虽然其磨损区域的轮廓不易辨识，但在可辨识的磨损面内，能够看到较深的凹坑或长条状沟槽，尤其是在 800 ℃–室温循环情况下。这说明进行了热–冷循环处理的炮钢销更容易在磨损中发生表面损伤和剥落。表 2 中的磨损量结果也表明，随着加热温度的升高，炮钢销的磨损量增大。

随着加热温度的升高，炮钢销表面的氧化变严重，氧化物生成量增加，铁氧化物的塑性和机械强度都比金属铁更差一些，因此在磨损过程中更容易发生变形和脱落，从而造成炮钢销的耐磨损性能变差[27]。另一方面，由于热–冷循环处理中炮钢销表面的氧化物发生局部脱落，表面变粗糙，磨损过程中受到的局部接触应力更大，磨损量更大。另外，炮钢销表面氧化膜的存在也会影响炮钢与黄铜之间的摩擦系数。图 1c 中摩擦系数在初始阶段较高，可能是与此时表面主要为铁的氧化物有关，而当表面的氧化物被逐渐磨掉后，摩擦系数值降低到炮钢基体与黄铜的摩擦系数。

2.2　800 ℃–室温循环处理后的炮钢销在不同滑动速度下的摩擦磨损性能

2.2.1　摩擦系数和磨损量

800 ℃–室温循环处理后，炮钢销在不同滑动速度下的摩擦系数变化曲线如图 3 所示。当滑动速度为 100 r/min 时（见图 3a），摩擦系数在 0.4 上下维持一

段时间后，有缓慢下降的趋势，并稳定在 0.35 左右。当滑动速度为 400 r/min（见图 3b）和 800 r/min（见图 3c）时，炮钢销的摩擦系数在摩擦全过程中都较为稳定，同时摩擦系数也较低，400 r/min 时约为 0.26，800 r/min 时约为 0.28。800 ℃–室温循环处理后的炮钢销在不同滑动速度下的平均摩擦系数值见表 3。

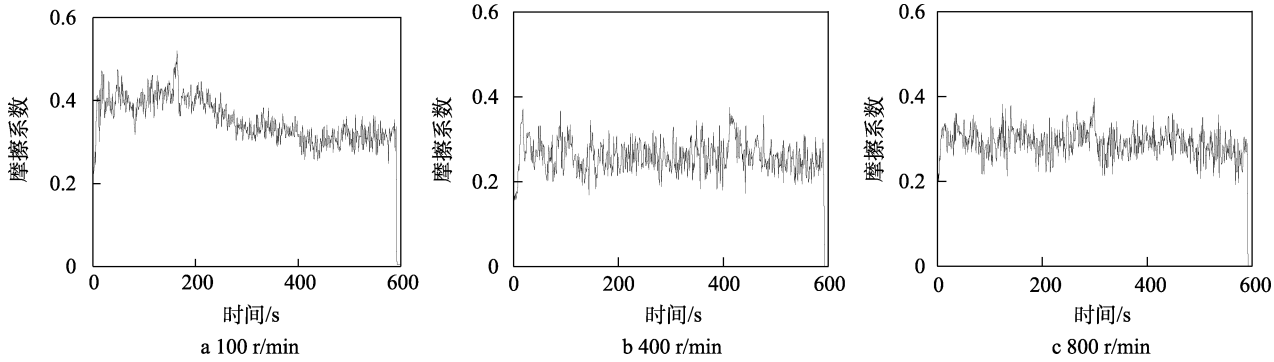


图 3　800 ℃–室温循环、不同滑动速度下的摩擦系数曲线

Fig.3 Friction coefficient curves at different sliding speeds after 800 ℃-room temperature cycles

表 3　800 ℃–室温循环处理后不同滑动速度下炮钢销与黄铜盘的摩擦系数和磨损量

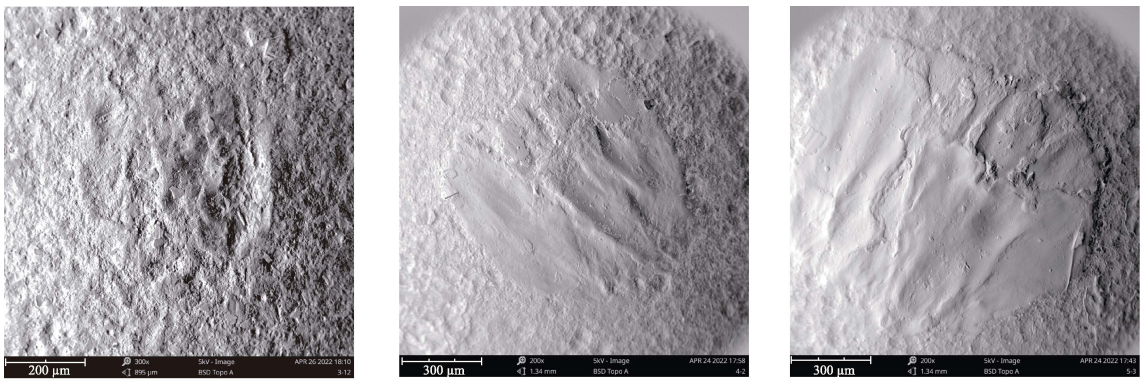
Table 3 Friction coefficient and wear loss of gun steel pin and brass plate at different sliding speeds after 800 ℃-room temperature cycles

转速/(r·min^{-1})	摩擦系数	炮钢销磨损量/mg	黄铜盘磨损量/mg
100	0.34±0.01	0.85±0.05	2.75±0.25
400	0.26±0.01	2.05±0.45	9.15±0.05
800	0.28±0.02	0.20±0.10	20.65±0.35

表 3 还列出了 800 ℃–室温循环处理后不同滑动速度下炮钢销与黄铜盘的磨损量。在速度为 100 r/min 时，炮钢销的磨损量为 0.85 mg；当滑动速度为 400 r/min 时，炮钢销的磨损量升高到 2.05 mg；当滑动速度继续升高到 800 r/min 时，炮钢销的磨损量没有继续上升，而是降为 0.2 mg。对于黄铜盘来说，其磨损量随着滑动速度的增加呈现明显逐渐增大的趋势。

2.2.2　磨损形貌分析

800 ℃–室温循环处理后，3 种滑动速度下炮钢销的磨损表面 SEM 形貌如图 4 所示。炮钢销在 100 r/min（见图 4a）的滑动速度下，磨损表面可见明显的因材料塑性变形而剥落产生的凹坑，磨损表面较为粗糙。当滑动速度为 400、800 r/min 时，炮钢销磨损表面呈现出完全不同于滑动速度为 100 r/min 时的磨损形貌，如图 4b、c 所示。此时的磨损表面整体较为平滑，局部有一些凸起的长条或块状形貌。800 r/min 时磨损痕迹的尺寸要大于 400 r/min 时的磨损痕迹。



a 100 r/min　　b 400 r/min　　c 800 r/min

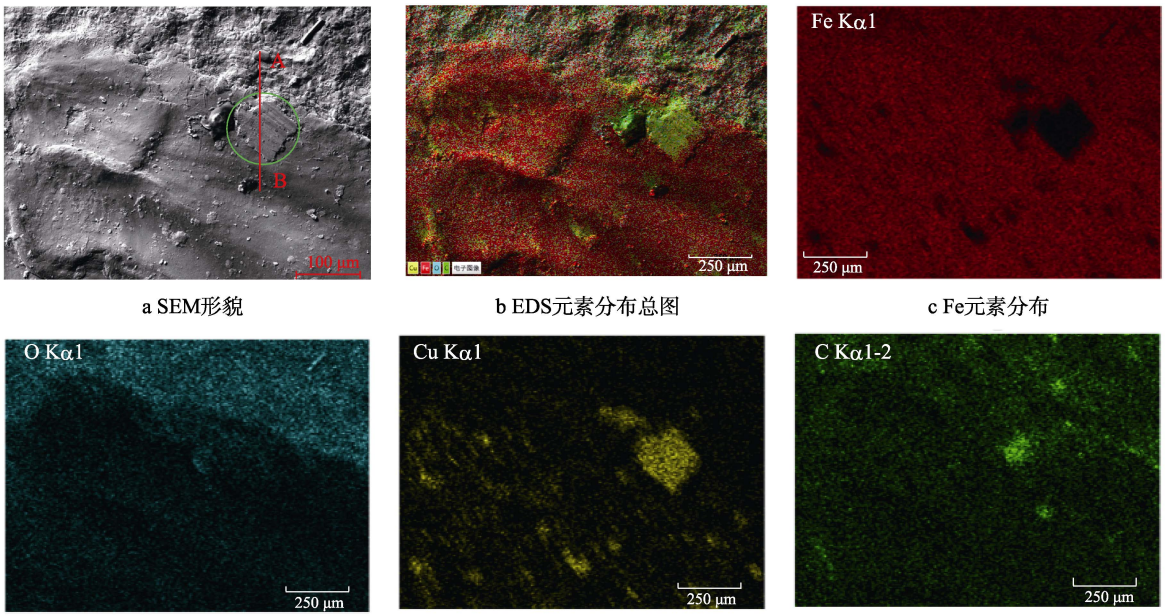
图 4　800 ℃–室温循环处理后，不同滑动速度下炮钢销磨损表面 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of worn surface of gun steel pin at different sliding speeds after 800 ℃-room temperature cycles

2.2.3　磨损表面成分分析

800 ℃–室温循环处理的炮钢销在 800 r/min 滑动速度下测试后，磨损区域与未磨损区域交界处的 SEM 图与 EDS 化学成分如图 5 所示。图 5a 中上部较粗糙的区域为未磨损区域，中下部的较光滑区域为磨损表面。EDS 分析采用面扫描的方式，检测到的主要元素为 Fe、O、Cu 和 C。由图 5b—d 可以看出，磨损区域和未磨损区域的 Fe 含量都很高，但是未磨损区域的 O 含量很高，而磨损区域内的 O 含量很低。这是因为炮钢销在热–冷循环后，表面生成了大量的 Fe 氧

化物，而在磨损过程中，表面的氧化物被磨掉了。同时，磨损区域内的 O 含量较低也说明 800 r/min 的高速滑动并未造成磨损区域内金属材料的明显氧化。其次，由图 5b、e 可以看出，磨损区域内含有明显的 Cu 元素，而磨损区域外基本检测不到 Cu 元素，说明磨损产生的铜磨屑部分转移到炮钢销的磨损表面上。在图 5b 中，炮钢销的磨损区域内 Fe 元素与 Cu 元素较为均匀地混合在一起，说明在炮钢销的磨损表面上，Fe 元素和 Cu 元素是混合掺杂在一起的。最后，由图 5a、b、e 可以看出，炮钢销的磨损表面上也存在大块的铜粘着（图 5a 中圆圈标识内的块状物），这在图 6 的线扫描结果中也得到了验证。另外，图 5f 中的 C 元素主要是来自空气中的碳在样品上的附着。



a SEM形貌　b EDS元素分布总图　c Fe元素分布

d O元素分布　e Cu元素分布　f C元素分布

图 5　800 ℃–室温循环处理的炮钢销在 800 r/min 下试验后磨损区域与未磨损区域交界处的 SEM 与 EDS 形貌

Fig.5 SEM and EDS images of the junction between the worn areas and the unworn area of the gun steel pin at 800 r/min sliding speed after 800 ℃-room temperature cycles: a) SEM morphology; b) EDS element distribution map; c) Fe element distribution; d) O element distribution; e) Cu element distribution; f) C element distribution

图 6 为在图 5 的观察区域内进行的一条线扫描成分图，线的位置如图 5a 中的线 AB 所示，图 6 的左侧为图 5a 中的 A 端，右侧为 B 端，中间为图 5 中发现的铜粘着块。从图 6 的线扫结果可以发现，未磨损区域的 O 含量较高，而磨损区域内的 O 含量很低，验证了由图 5 得出的结论。图 6 的中间部分 Cu 元素含量明显增加，其余元素基本检测不到，说明此处是一个块状或片状的铜粘着。

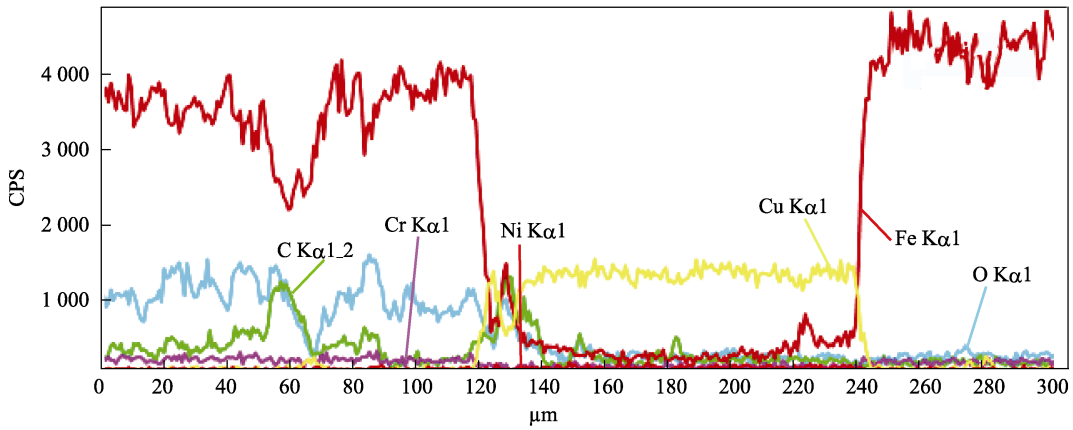


图 6　800 ℃–室温循环处理的炮钢销在 800 r/min 下试验后磨损表面的 EDS 线扫描成分

Fig. 6 EDS line scanning component analysis of worn surface of gun steel pin at 800 r/min sliding speed after 800 ℃-room temperature cycles

以上对 800 ℃–室温循环处理的炮钢销在 800 r/min 滑动速度下磨损表面形貌和化学成分的分析表明，炮钢销的磨损痕迹尺寸较大，磨损表面较光滑，而磨损试验后测得的炮钢销的磨损量却很小。化学成分分析结果显示，炮钢销的磨损区域内有明显的 Cu 元素存在，这说明磨损过程中一定发生了铜材料向炮钢销表面的转移。高速摩擦下，黄铜存在一定的受热软化，磨损量较大，而且滑动速度较高时，铜磨屑不能及时被排出磨损区域，造成更多的黄铜聚集在炮钢销的磨损表面上。此时，很容易发生黄铜磨屑与炮钢磨屑相互掺杂混合，并随着炮钢销和黄铜盘接触表面的相对滑动而附着到磨损表面上，类似于在炮钢销表面“涂抹”了一层 Fe 和 Cu 的混合物。一方面，这层混合物附着于炮钢销的磨损表面，造成磨损试验后测得的炮钢销的磨损量（实际为炮钢的磨损量减去铜的附着量）很小，甚至接近于 0；另一方面，这层混合物的存在也对炮钢销起到保护作用，从而减少炮钢销的磨损。

3 结论

1）在 100 r/min 的滑动速度下，不同温度热–冷循环处理的炮钢销与黄铜盘之间的摩擦系数变化较小，摩擦系数均在 0.32 左右。当滑动速度从 100 r/min 升高到 400、800 r/min 时，摩擦系数降低到 0.27 左右。

2）在 100 r/min 的滑动速度下，随着热–冷循环处理中加热温度的升高，炮钢销的磨损量逐渐增大，而黄铜盘的磨损量受炮钢销热–冷循环温度的影响较小。当滑动速度从 100 r/min 升高到 400 r/min 时，炮钢销的磨损量增大；当滑动速度进一步升高到 800 r/min 时，炮钢销的磨损量降低到接近于 0。铜盘的磨损量随滑动速度的升高呈现不断增大的趋势。

3）磨损机理分析表明，随着热–冷循环处理中加热温度的升高，炮钢销表面氧化严重，磨损表面形貌由未做热–冷循环处理时的轻微磨损转变为因磨损表面塑性变形而部分剥落造成的凹坑和沟槽。随着滑动速度的升高，磨损形貌不再是凹坑和沟槽，而是变平滑。高速摩擦下，铜磨屑与炮钢磨屑发生掺杂混合，在炮钢销磨损表面形成一层铁和铜的混合物，从而影响炮钢销的摩擦磨损性能，这种特殊的机理也造成了炮钢销的实际磨损量难以测量。

参考文献：

[1] 张月星, 李强. 浅谈火炮身管加工工艺[J]. 装备制造技术, 2014(2): 241-242.
ZHANG Yue-xing, LI Qiang. Study on Processing Craft of Gun Barrel[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(2): 241-242.

[2] ZHAO Chao, ZHANG Jin, FU Jia-wei, et al. Low-Cycle Fatigue Behavior of the Novel Steel and $30SiMn_2MoV$ Steel at 700 ℃[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(24): 5753.

[3] 张振山, 吴永峰. 炮管内膛烧蚀磨损现象的分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2003, 17(2): 67-70.
ZHANG Zhen-shan, WU Yong-feng. The Analysis of the Rubbing Abrasion and Erosion on the Barrel Bore[J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2003, 17(2): 67-70.

[4] LI Xiao-long, MU Lei, ZANG Yong, et al. Study on Performance Degradation and Failure Analysis of Machine Gun Barrel[J]. Defence Technology, 2020, 16(2): 362-373.

[5] 刘朋科, 杨雕, 王军, 等. 身管材料烧蚀磨损性能研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2021, 42(4): 28-33.
LIU Peng-ke, YANG Diao, WANG Jun, et al. Study on Ablation and Wear Properties of Barrel Materials[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2021, 42(4): 28-33.

[6] 崔军, 吴东亚, 陈博. 火炮身管寿命影响因素分析[C]//应用高新技术提高维修保障能力会议. 北京: 中国兵工学会, 2005.
CUI Jun, WU Dong-ya, CHEN Bo. Analysis on Influencing Factors of Gun Barrel Life[C]//Conference on Improving Maintenance and Support Ability with High and new Technology. Beijing: China Armaments Society, 2005.

[7] 梁文凯. 身管烧蚀磨损问题的分析与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
LIANG Wen-kai. Analysis and Research on Ablative Wear of Body Tube[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.

[8] 贡芬云, 姚养无, 贾陆阳. 不同射速对身管内壁烧蚀的影响[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(7): 85-89.
GONG Fen-yun, YAO Yang-wu, JIA Lu-yang. Influence on Ablation of Inner Wall of Barrel at Different Firing Rates[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(7): 85-89.

[9] 袁晓冬, 高灵清, 张海峰. 炮管材料的发展现状与趋势[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(5): 98-104.
YUAN Xiao-dong, GAO Ling-qing, ZHANG Hai-feng. Development and Prospect of Gun Barrel Materials[J]. Development and Application of Materials, 2017, 32(5): 98-104.

[10] JOVANOVIC D, JANJIC R, STOJANOVIC B. Capacity for Improving Tribological Characteristics of Barrel Interior Line on a Gun[J]. Journal of the Balkan Tribological Association, 2016, 22(1):17-27.

[11] SOPOK S, RICKARD C, DUNN S. Thermal-Chemical-Mechanical Gun Bore Erosion of an Advanced Artillery System Part One: Theories and Mechanisms[J]. Wear, 2005, 258(1-4): 659-670.

[12] 易怀军. 火炮身管烧蚀磨损的影响研究[D]. 南京: 南

京理工大学, 2016.
YI Huai-jun. Research on The Influence of Ablative Wear of Gun Barrel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[13] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
JIN Zhi-ming. Ballistics in Gun[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2004.

[14] 周彦煌. 实用两相流内弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
ZHOU Yan-huang. Practical Two-Phase Flow Internal Ballistics[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1990.

[15] 张喜发, 卢兴华. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
ZHANG Xi-fa, LU Xing-hua. Interior Ballistics of Erosion Guns[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

[16] 孙全兆. 大口径榴弹炮弹带挤进动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
SUN Quan-zhao. Study on Dynamics of Rotating Band Engraving for Large Caliber Howitzers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[17] WU Bin, FANG Ling-hui, CHEN Xiao-lei, et al. Fabricating Aluminum Bronze Rotating Band for Large-Caliber Projectiles by High Velocity Arc Spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(3): 447-455.

[18] 殷军辉, 郑坚, 倪新华, 等. 弹丸膛内运动过程中弹带表层热软化机理分析[J]. 弹道学报, 2012, 24(2): 106-110.
YIN Jun-hui, ZHENG Jian, NI Xin-hua, et al. Mechanism Analysis of Thermal Softening of Rotating Band Surface in Process of Projectile Motion in Bore[J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(2): 106-110.

[19] 殷军辉, 郑坚, 倪新华, 等. 弹丸膛内运动过程中弹带塑性变形的宏观与微观机理研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(6): 676-681.
YIN Jun-hui, ZHENG Jian, NI Xin-hua, et al. Research on Macroscopic and Microscopic Mechanism of Plastic Deformation of Bearing Band[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(6): 676-681.

[20] 姜啸天, 郝永平, 张嘉易. 火炮膛线磨损对弹带挤进过程的数值仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2021(5): 85-87.
JIANG Xiao-tian, HAO Yong-ping, ZHANG Jia-yi. Numerical Simulation Analysis of Artillery Rifling Wear on Projectile Belt Extrusion Process[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(5): 85-87.

[21] 李政, 张相炎, 刘宁. 火炮磨损身管中弹带挤进过程模拟研究[J]. 弹道学报, 2018, 30(4): 85-91.
LI Zheng, ZHANG Xiang-yan, LIU Ning. Numerical Research on Band Engraving Process in the Abraded Barrel[J]. Journal of Ballistics, 2018, 30(4): 85-91.

[22] 胡慧斌, 陈树肖, 王洪波, 等. 弹带挤进膛线过程摩擦磨损试验及失效机理分析[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(12): 167-170.
HU Hui-bin, CHEN Shu-xiao, WANG Hong-bo, et al. Tribological Test and Failure Mechanism Analysis of Driving Band's Engraving Processunder[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(12): 167-170.

[23] 王毛球, 董瀚, 王琪, 等. 高强度炮钢的组织和力学性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(2): 7-10.
WANG Mao-qiu, DONG Han, WANG Qi, et al. Microstructures and Mechanical Properties of High Strength Gun Steels[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(2): 7-10.

[24] SUSANTEZ C, CALDEIRA A B. Heat Transfer Modelling and Simulation of a 120 mm Smoothbore Gun Barrel during Interior Ballistics[J]. Defence Science Journal, 2022, 72(1): 30-39.

[25] FAN Wei, GAO Ping. A Review on Erosion-Reducing Additive Materials to Extend the Lifespan of Gun Barrels[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(36): 19767-19790.

[26] LIAO Xue-bing, ZHOU Ren-bin, YANG Yun-fei, et al. Study on the Erosion and Abrasion Mechanism of the Modern Artillery Barrel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 456: 433-437.

[27] 金浩, 李德元, 张罡, 等. 炮钢表面的抗高温氧化性能研究[J]. 材料保护, 2018, 51(4): 130-133.
JIN Hao, LI De-yuan, ZHANG Gang, et al. High Temperature Oxidation Resistance of Gun-Steel Surface[J]. Materials Protection, 2018, 51(4): 130-133.

责任编辑：刘世忠