



三种 155 mm 口径火炮弹带的磨损研究

徐子晴¹, 秦国辉¹, 张辰涵¹, 李一鸣², 张 庆², 李 政^{1*}, 刘 瑛¹, 王经涛¹

(南京理工大学 1.材料科学与工程学院;2.机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:为深入研究弹带的磨损机制,探索弹带塑性变形的本质,对 155 mm 口径火炮 3 种弹带的表面形貌、成分、各部分组织及硬度进行对比。研究表明:尽管弹带具有不同的结构设计、成分构成以及各异的服役条件,但在服役后,其组织分布呈现出共性规律,其磨损程度与空间位置密切相关。非导转侧磨损普遍较轻,其组织结构主要为等轴组织;弹带凸起部位顶部因摩擦产生细晶组织,而内部组织形貌基本保持不变;导转侧上部磨损最为严重,组织演变由表及里呈现出细晶组织、纤维组织、长条组织、等轴组织的空间分布;导转侧底部的磨损程度低于上部;弹带工作过程中变形集中在表面,距离表面 200 μm 以上的内部组织形貌几乎不发生变化。硬度分析显示,非导转侧的硬度与弹带内部相近,而弹带凸起位置上部与导转侧上部均出现“软-硬”结构,其中细晶组织的硬度最低,纤维组织的硬度最高,等轴组织硬度居中。在 3 种弹带中,H96-2 磨损最为严重,而 H96-1 磨损最小。

关键词:弹带;梯度组织;塑性变形;磨损

中图分类号:TJ385 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)01-0113-08

Research on the Wear of Three Driving-bands of 155 mm Caliber Artillery

XU Ziqing¹, QIN Guohui¹, ZHANG Chenhan¹, LI Yiming², ZHANG Qing², LI Zheng^{1*}, LIU Ying¹, WANG Jingtao¹

(1.School of Materials Science and Engineering;2.School of Mechanical Engineering,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China)

Abstract: In order to deeply research the wear mechanism of driving bands and explore the essence of the plastic deformation of driving bands, a comparison was made on the surface morphology, composition, microstructure and hardness of three driving-bands of 155 mm caliber artillery. The research results show that although the driving bands have different structural designs, compositional makeups and diverse service conditions, their microstructure distributions present common patterns after being in service, and their wear degrees are closely related to spatial positions. The wear on the non-driving side is generally lighter, and its microstructure is mainly equiaxed structure. Due to friction, fine-grained microstructure is generated at the top of the protruding part of driving band, while the internal microstructure morphology remains basically unchanged. The wear on the upper part of the driving side is the most serious, and the microstructure evolution presents a spatial distribution of fine-grained microstructure, fibrous microstructure, elongated microstructure and equiaxed microstructure from the surface to the inside. The wear degree at the bottom of the driving side is lower than that of the upper part. During the working process of the driving band, the deformation is concentrated on the surface, and the internal microstructure morphology above 200 μm from the surface hardly changes. The hardness analysis shows that the hardness

on the non-driving side is similar to that inside the driving band, while both the upper part of the protruding position of the driving band and the upper part of the driving side present a "soft-hard" structure. Among them, the hardness of the fine-grained microstructure is the lowest; the hardness of the fibrous microstructure is the highest; the hardness of the equiaxed microstructure is in the middle. Among the three driving-bands, the wear of H96-2 is the most serious, while wear of H96-1 is the least.

Key words: driving band; gradient microstructure; plastic deformation; wear

在旋转稳定弹丸的设计中,弹带的直径略大于膛线阴线的直径。当弹丸被发射时,弹带迅速嵌入膛线,这不仅为弹丸提供了必要的旋转速度,还有效地密封了火药产生的高压气体。弹带在身管内的运动过程可分为两个关键阶段:首先,在极短的时间内,弹丸从静止状态迅速加速至每秒几十米的速度。这一高速启动导致弹带在极高的应变率下发生剧烈的塑性变形,进而与膛线紧密咬合。接着,弹带在高温、高压的极端环境下继续高速运动,并与膛线持续产生摩擦。加上火药等化学气体的侵蚀作用,共同导致了弹带的磨损,甚至可能使其失效。弹带的磨损不仅会降低火炮的射击精度,其对身管产生反作用力,达到一定周期还会导致身管疲劳甚至开裂,从而大幅缩短其使用寿命^[1-3]。研究弹带的磨损,对于新型弹带材料的开发及火炮身管寿命的延长具有重要意义。

众多学者探索弹带的摩擦磨损性能,其中, MONTGOMERY 等^[4-7]研究了 5 种合金身管与铜弹带的相互作用。在射击实验中,仅 René 41 合金身管与铜合金弹带产生了强烈的相互作用,导致身管表面遭受严重侵蚀。进一步研究发现,弹带在不同速度段的磨损机制不同,在高滑动速度下,弹带表面会熔化并渗透到身管内壁,形成一层熔化膜。这层膜的存在显著降低了弹丸在身管中运动的摩擦系数,其特性成为决定摩擦系数的关键因素。MONTGOMERY 还观察到,弹带在身管中的运动涉及两种截然不同的磨损机制。在初始阶段,弹带与身管之间主要发生金属与金属的黏着磨损。然而,随着弹带滑动几厘米后,其表面逐渐形成熔化膜,磨损机制转变为熔化磨损。与此同时,殷军辉等^[8-11]认为这种熔化膜是抑制塑性变形向内层延伸的重要因素之一,对铜弹带的剧烈塑性变形机制进行了深入研究,比较弹带各部分的组织和硬度变化规律,发现纤维组织是在弹丸发射时瞬时挤压产生的剧烈塑性变形下形成的,这种组织含有大量的位错和位错缠结,硬度极高,呈现出加工硬化的现象。随着温度

的升高,弹丸在身管中继续运动,弹带与膛线不断摩擦。此时,弹带表层开始出现细小晶粒,这是再结晶组织的特征。值得注意的是,弹带表面不仅会发生静态再结晶,还会在动态条件下发生再结晶。WU 等^[12-13]为了模拟弹丸发射过程,分别对配备铜、铝青铜和尼龙弹带的弹丸进行了准静态与动态实验。实验结果显示,尼龙弹带的变形程度最小,而铜弹带的变形则显著受到应变速率和温度的影响。在准静态实验中,铜弹带的横截面沿摩擦方向发生了明显的塑性变形,其组织结构从顶部的细长纤维状到底部逐渐转变为较大的条状,呈现出不同程度的径向变形。相比之下,在动态实验中,仅弹带顶部发生了塑性变形,形成了细长的纤维组织,而其余部分则保持了原始的等轴组织状态。这一现象归因于准静态加载时,载荷有足够时间传递到弹带内部,导致全面变形;而在动态实验中,由于时间短暂,载荷未能充分传递,变形因此局限于顶部。此外, XUE 等^[14]深入研究了弹带的几何形状和材料对弹丸动力学的影响,发现弹性模量较小的材料作为弹带时,能展现出更优越的稳定性。MIODRAG 等^[15]融合理论分析与实验验证,深入探究了弹带的磨损机制。弹带的磨损程度主要受三大因素影响:内弹道特性、材料的热性能,以及弹带与炮管间的摩擦系数。这为理解并优化弹带性能提供了重要依据。

前人针对弹带摩擦磨损的基础共性研究,为理解该问题创造了良好的前提,如前所述,弹带的摩擦磨损与服役环境密切相关。聚焦于 155 mm 口径火炮,本文开展了 3 种弹带的组织结构与力学性能的比较分析,旨在揭示 155 mm 口径火炮弹带塑性变形的普遍规律,为理解其弹带摩擦磨损行为及优化材料选择提供科学依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

选取 155 mm 口径火炮的 3 种弹带作为研究对

象。如图 1 所示。已知 H96-1 和 H96-2 为 2 种黄铜,B5 为镍白铜。3 种弹带的结构图如图 2 所示。



图 1 弹带表面形貌图

Fig. 1 Surface topography image of the driving band

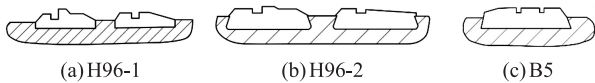


图 2 弹带结构图

Fig. 2 Structural diagram of the driving band

1.2 实验方法

通过电火花线切割,以及机械研磨、机械抛光、电化学抛光和化学腐蚀,得到环形弹带的横截面试样,如图 3 所示。采用 CX-9800 直读光谱仪进行成分测试,用 SU1510 型电镜对弹带表面进行 EBSD 分析,加速电压为 20 kV,采用 HVT-1000A 显微硬度计测量,载荷 25g,加载时间 15 s。

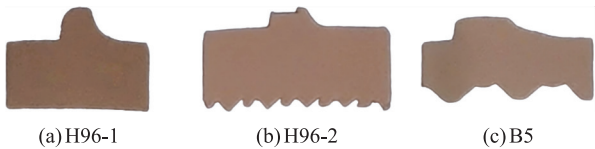


图 3 弹带横截面图

Fig. 3 Cross-sectional view of the driving band

2 表面形貌与成分分析

2.1 铜合金弹带表面形貌对比

上文图中图 1 为 3 种 155 mm 口径火炮发射后弹丸上的弹带形态,图 2 为 3 种弹带的结构图。其中 H96-1 与 H96-2 为双排弹带,而 B5 为单排弹带。相较于单排弹带,双排弹带在挤进阻力、气密性以及对身体管的磨损控制方面表现更佳^[16]。在图 1(a)中,弹带在径向受挤压后形成的凸起部分大小不一,这归因于该弹带所适配的火炮身管采用了渐紧膛线设计。这种膛线特征在于:其阴线宽度沿炮口方向逐渐减小,有效提升了火药燃气的封闭性,但加工工艺相对复杂。相比之下,图 1(b)与图 1(c)中的弹带,其凸起部位大小基本一致,这是因为它们适配的火炮身管采用了等齐膛线。等齐膛线设计简化了身管

的加工过程,但弹带在膛线导转侧承受的力较大,可能导致身管更易发生烧蚀磨损。图 3(a)弹带的凸起部位远大于图 3(b)与图 3(c)的弹带。这表明 H96-1 弹带发射时所用的身管为深膛线设计,这种设计通常应用于最大膛压与初速度要求较高的火炮。而 H96-2 与 B5 弹带发射时所用的身管则为浅膛线设计^[17]。并且,图 3(b)中凸起部分顶部并不是完全水平的,凸起部位右侧明显高于左侧,可能出现弹带并未填满膛线阴线的情况。

2.2 3 种铜合金弹带成分分析

3 种铜合金弹带成分 w_i 如表 1~表 3 所示。H96 为 96 号黄铜,为铜锌合金,对比 H96-1 和 H96-2 两种黄铜的成分,H96-1 的合金元素的含量高于 H96-2,尤其是 Zn 与 Pb 的含量。Zn 含量增加可以提高黄铜的强度,但会使其塑性、导电、导热性下降。Pb、Bi、Sb 的熔点较低,容易与铜形成脆性化合物,所以一般要求不大于 0.005%。Sn 含量的增加能够提高黄铜的性能。两种黄铜相比,H96-1 中 Zn 与 Sn 的含量明显高于 H96-2,而 Pb、Bi、Sb 3 种元素总和相差不大,所以,从成分上看,可以认为 H96-1 的综合性能优于 H96-2。B5 为铜镍合金(白铜),Ni 的添加使得白铜具有优良的塑性和优良的耐蚀性能。

表 1 H96-1 样品的成分

Table 1 Composition of H96-1 samples

成分	$w_i/\%$		成分	$w_i/\%$	
	H96-1	GB/T 5231-2022		H96-1	GB/T 5231-2022
Cu	95.899	95.0~97.0	Sn	0.013	—
Zn	3.985	余量	P	≤0.01	—
Pb	0.044	0.03	Sb	≤0.01	—
Bi	0.034	—	Ni	≤0.01	—
Fe	0.015	0.10	—	—	—

表 2 H96-2 样品的成分

Table 2 Composition of H96-2 samples

成分	$w_i/\%$		成分	$w_i/\%$	
	H96-2	GB/T 5231-2022		H96-2	GB/T 5231-2022
Cu	95.984	95.0~97.0	Sn	0.003	—
Zn	3.920	余量	P	≤0.01	—
Pb	0.027	0.03	Sb	≤0.01	—
Bi	0.036	—	Ni	≤0.01	—
Fe	0.015	0.10	—	—	—

表 3 B5 样品的成分
Table 3 Composition of B5 samples

成分	$w_i\%$		成分	$w_i\%$	
	B5	GB/T 5231-2022		B5	GB/T 5231-2022
Cu	95.182	余量	Zn	0.020	-
Ni+Co	3.100	4.4~5.0	Bi	0.007	-
Fe	0.922	0.20	Sn	0.002	-
Si	0.284	-	As	≤0.01	-
Sb	0.008	-	Al	≤0.01	-
Bi	0.007	-	B	≤0.01	-
Pb	0.021	0.01	Be	≤0.01	-

3 铜合金弹带的典型组织及其分布对比

弹带横截面各个位置的组织由于受到的膛内载荷作用不同而表现出明显差异,未变形部分的弹带为粗大等轴组织,而变形后的弹带产生了细晶组织、纤维组织、条状组织以及这几种组织的混合组织。

3.1 弹带的典型组织

以 B5 白铜材质单排弹带样品为例,弹带服役后的典型组织如图 4 所示。图 4(a) 的细晶组织,位于弹带表层,晶粒大小约为 2 μm ,远小于弹带未变形区的晶粒尺寸,是弹带表面发生塑性变形最严重的区域,也是材料由轻微磨损到严重磨损转变的依据^[18]。弹带表面产生这种细小的等轴组织是再结晶组织。弹带挤进身管的过程中发生了剧烈塑性变形,点阵缺陷密度增加,为再结晶提供了极大的储存能和驱动力。当弹带温度升高至一定程度时,储存能释放,促进晶界迁移,形成再结晶组织。在此过程中,由于热传导时间过短以及火炮发射时剧烈的振动,导致再结晶晶核数增加,限制了晶粒继续长大。弹带挤进身管后,与膛线的摩擦仅引起了轻微的塑性变形,但此时弹带表层温度较高,远超过动态再结晶临界温度,所以此时高温、高应力的环境使得弹带表层发生动态再结晶。处于再结晶临界状态的区域不断形成再结晶晶核,已发生再结晶的区域会不断重复发生再结晶^[8]。

图 4(b) 为弹带中的纤维组织,沿着相同的方向呈现狭长形态,晶粒破碎,周围形成了一些小晶粒,是弹带挤进初期,身管阳线挤压作用下形成的。较大的塑性变形使得此处含有大量的位错并且产生位错缠结,出现加工硬化。纤维组织在经历回复、再结晶等过程释放形变储存能后,将逐渐演化为细小的

等轴组织,即细晶组织,所以在空间上,再结晶细晶等轴组织“伴生”于变形严重的纤维组织附近。

图 4(c) 为弹带中的长条组织,呈现细长形态,其晶粒尺寸远大于纤维组织,一般出现在纤维组织附近,位于纤维组织与内部粗大等轴组织之间,也是在弹带挤进初期,身管阳线挤压作用下形成的,与纤维组织相比,长条组织更靠近弹带内侧,所受到的挤压力更小,所以变形程度没有纤维组织剧烈。

图 4(d) 为弹带中的等轴组织,位于弹带内部,等轴组织在弹带占据巨大的位置,这是由于弹丸发射过程是瞬时的,导致弹带表面发生严重塑性变形,而内部受影响相对较小。其微观组织主要是粗大等轴晶和退火孪晶,可以推测,该区域的微观组织接近弹带服役前的原始组织。

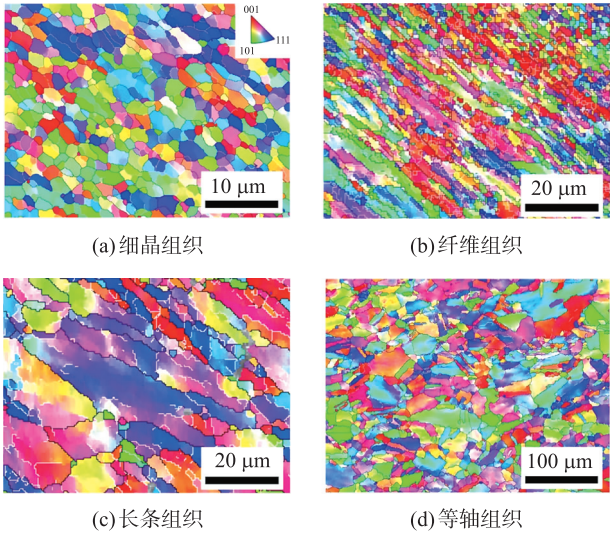


图 4 B5 弹带中典型组织图
Fig. 4 Typical microstructure diagram of the B5 driving band

3.2 3 种铜合金弹带组织对比

弹带横截面各个位置的组织表现出明显差异。从 1~5 纵向对比来看,图 5(a₁) 与图 5(a₂) 大部分晶粒为等轴组织,掺杂部分条状晶粒。图 5(a₃) 上部边缘位置存在 10~20 μm 厚度的细晶组织,下部则是晶粒较大的条状组织。图 5(a₄) 出现了细晶组织、纤维组织、长条组织以及等轴组织。图 5(a₅) 显示大部分晶粒呈现等轴组织,存在部分条状组织与细晶组织,孪晶较多。图 5(b) 与图 5(c) 中的情况与图 5(a) 中类似。但图 5(b₃) 中并未出现细晶组织以及纤维组织。图 5(b₅) 出现了细晶组织以及纤维组织。

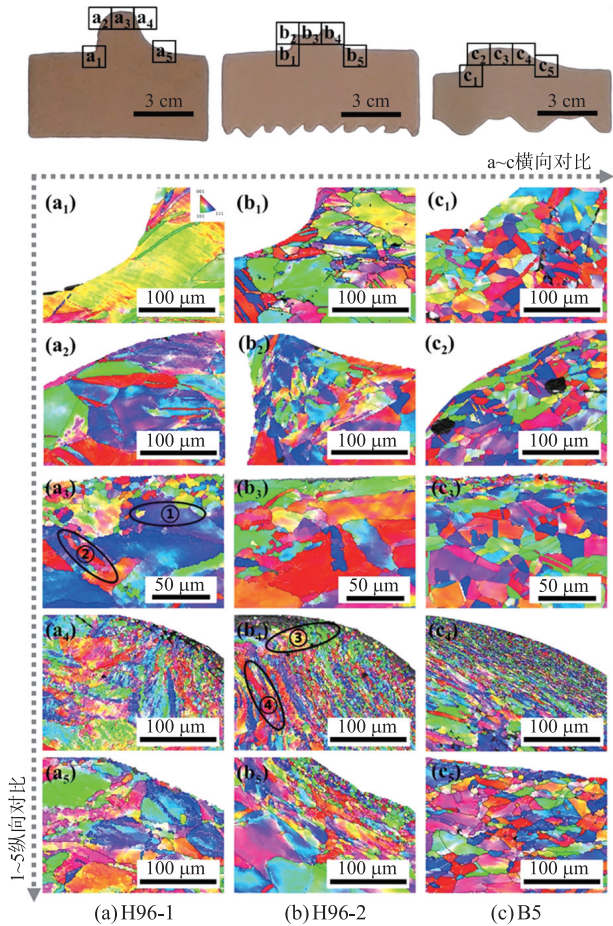


图 5 3 种弹带表层组织的对比图

Fig. 5 Comparison diagram of the surface microstructures of three driving-bands

从 a~c 横向对比来看。图 5(a₁)与图 5(a₂)、图 5(b₁)与图 5(b₂)、图 5(c₁)与图 5(c₂)均为弹带非导转侧,这些区域大部分晶粒为等轴组织,掺杂部分条状晶粒,表明此处变形量有限,基本没有受到膛线的挤压。图 5(a₃)、图 5(b₃)、图 5(c₃)为弹带凸起部位顶部,图 5(a₃)上部边缘位置存在 10~20 μm 厚度的细晶组织,下部是晶粒较大的条状组织,没有出现纤维组织。椭圆①中条状晶粒方向与上部边缘平行,椭圆②中条状晶粒走向基本平行于弹带导转侧切向,说明此处晶粒受到身管阴线的挤压和导转侧的作用。图 5(b₃)上部晶粒被挤压成条状。图 5(c₃)同样出现细晶组织,其晶粒比 5(a₃)中的更细小。

图 5(a₄)、图 5(b₄)、图 5(c₄)为弹带导转侧上部。由表及里均出现细晶组织—纤维组织—长条组织—等轴组织的空间分布。图 5(a₄)边缘晶粒走向

平行于导转侧的切向,细晶组织比图 5(a₃)更细小,因为受到的膛线挤压作用更大,变形度更大,内部缺陷更多,再结晶驱动力更大。图 5(b₄)中椭圆④纤维状组织平行于右侧导转侧边缘,椭圆③纤维状组织平行于上部边缘,且与椭圆④处的组织相连,此处晶粒在弹带挤进身管瞬间发生剧烈塑性变形,形成自上而下的条状组织,弹带在身管中转动时,顶部组织与身管阴线反复剧烈摩擦,导致上部条状组织方向改变。图 5(c₄)中组织的走向基本与外边缘平行。

图 5(a₅)、图 5(b₅)、图 5(c₅)为弹带导转侧底部。图 5(a₅)与图 5(c₅)大部分晶粒呈现等轴组织,存在部分条状组织与细晶组织,孪晶较多。图 5(b₅)在靠近边缘处形成狭长的纤维组织,其方向与右侧弹带边缘方向一致,靠近边缘部分出现细晶组织,但细晶组织与纤维组织比图 5(b₄)少。

图 6 为 3 种弹带样品内部组织的对比图。这些区域均处于弹带剖面内部,受到膛内载荷的影响较小,所以晶粒并没有明显的变形,都是等轴组织。但因位置不同,其晶粒尺寸有一些差别。图 6(a₆)为弹带凸起部,晶粒尺寸约为 40.58 μm,大角度晶界占 41.8%,孪晶占 0.64%,并且 a₆ 处多数大晶粒平行于顶部边缘,只有少数小晶粒平行于导转侧边缘,说明 a₆ 处受到顶部的径向压缩应力大于导转侧的切向滑动应力。图 6(a₇)晶粒尺寸约为 87.46 μm,大角度晶界占 70.7%,孪晶占 5.57%,晶粒尺寸远大于 a₆ 处,这是因为 a₇ 处晶粒基本没受到膛内载荷的影响,最接近服役前的原始组织。a₆ 大角度晶界与孪晶数远小于 a₇ 区域,且晶粒形貌已明显偏离等轴状,由于 a₆ 处受到来自顶部的压缩应力较为集中,塑性变形作用下原本等轴状的晶粒形貌在应变主轴方向被压扁,在随后的回复退火过程中,这些形变晶粒内部通过位错重排和多边形化机制,逐渐形成大量小角度晶界及亚晶结构。图 6(a₈)晶粒尺寸约为 56.25 μm,大角度晶界占 57.8%,孪晶占 3.82%,晶粒尺寸与大角度晶界数均大于 a₅ 且小于 a₆,这是因为 a₈ 处主要受到阳线的径向压缩应力,所受的力小于 a₆ 且大于 a₇,所以其晶粒尺寸在两者之间。图 6(b₆)中晶粒没有像图 6(a₆)一样发生明显的变形,为较均匀的等轴组织。但图 6(b)中的晶粒尺寸与图 6(a)中一样,均是 b₆<b₈<b₇,其受到的外力大小为 b₆>b₈>b₇。图 6(c₆)、图 6(c₇)、图 6(c₈)的晶粒尺寸相差不大,远小于 H96-1 与 H96-2。

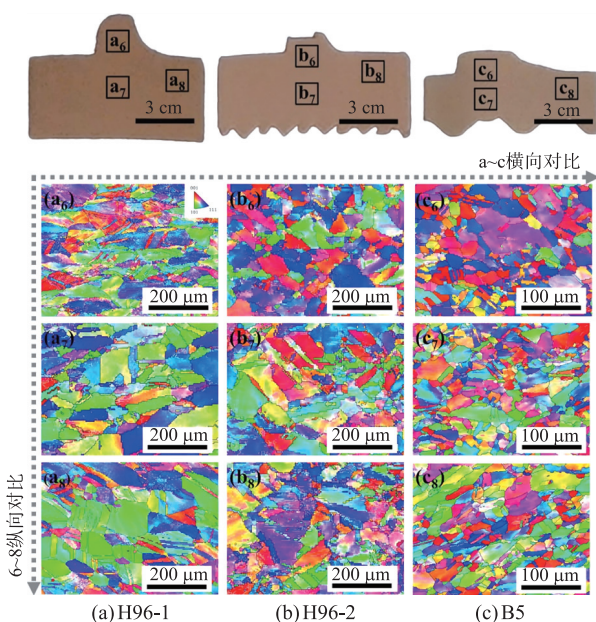


图6 3种弹带内部组织的对比图

Fig. 6 Comparison diagram of the internal microstructures of three types of driving bands

3.3 3种铜合金弹带的硬度分布对比

图7为H96-1的硬度分布图。由于H96-1样品 a_3 与 a_4 区域组织出现“多层”组织结构,所以按距离外侧边缘的远近,将 a_3 与 a_4 区域分为 a_3 -1、 a_3 -2、 a_4 -1、 a_4 -2、 a_4 -3,分别代表 a_3 区域细晶组织、 a_3 区域等轴组织、 a_4 区域细晶组织、 a_4 区域长条组织、 a_4 区域等轴组织。

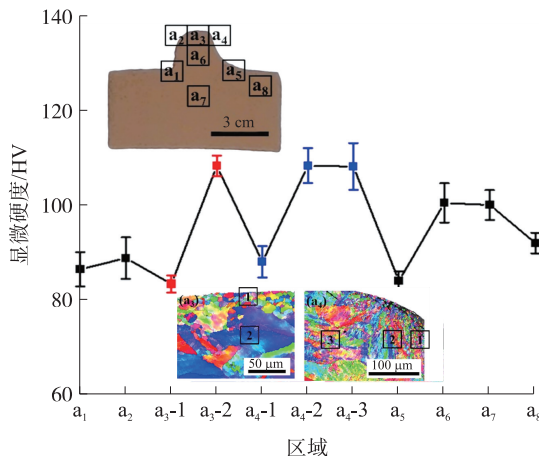


图7 H96-1各区域硬度分布图

Fig. 7 Hardness distribution diagram of each region of H96-1

非导转侧(a_1, a_2)的硬度略低于弹带内部(a_6, a_7, a_8)。弹带凸起部位顶部(a_3 -1、 a_3 -2)、导转侧上部(a_4 -1、 a_4 -2、 a_4 -3)均出现了由低硬度到高硬度的变化。具体而言, a_3 -1与 a_4 -1的硬度较低,为细晶

组织, a_3 -2虽为等轴组织,但由于其距离弹带顶部边缘较近,承受更大的塑性变形量,导致位错密度显著增加,因而其硬度值明显高于弹带内部 a_6 区域。 a_4 -2区域的纤维组织和 a_4 -3区域的长条组织由于加工硬化效应,硬度最高。导转侧底部(a_5)的硬度较低。 a_6 的晶粒尺寸远小于 a_7 ,但由于 a_7 处大角度晶界较多,阻碍位错的运动和扩散,所以两个区域硬度相差不大, a_8 硬度则明显小于 a_6 和 a_7 。

图8为H96-2的硬度分布图。将 b_3 与 b_4 区域分为 b_3 -1、 b_3 -2、 b_4 -1、 b_4 -2、 b_4 -3,分别代表 b_3 区域细晶组织、 b_3 区域等轴组织、 b_4 区域细晶组织、 b_4 区域纤维组织、 b_4 区域长条组织。从图上可以看到,非导转侧(b_1, b_2)的硬度、弹带凸起部位顶部(b_3 -1、 b_3 -2)与弹带内部(b_6, b_7, b_8)相差不大。导转侧上部(b_4 -1、 b_5)的硬度较低,此处为细晶组织,导转侧上部(b_4 -2、 b_4 -3)的硬度较高,分别为纤维组织与长条组织。导转侧底部 b_5 的硬度较低。

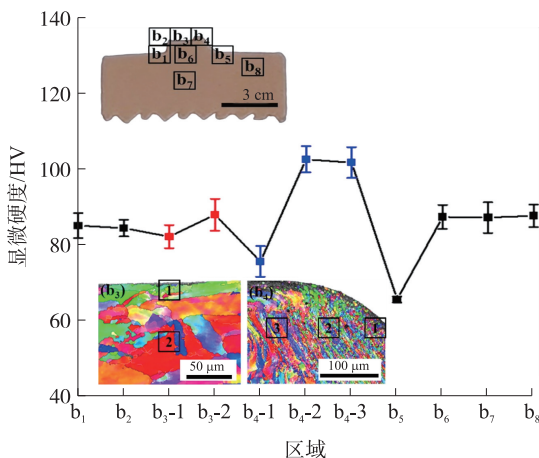


图8 H96-2各区域硬度分布图

Fig. 8 Hardness distribution diagram of each region of H96-2

图9为B5的硬度分布图。将 c_3 与 c_4 区域分为 c_3 -1、 c_3 -2、 c_4 -1、 c_4 -2、 c_4 -3,分别代表 c_3 区域细晶组织、 c_3 区域等轴组织、 c_4 区域细晶组织、 c_4 区域纤维组织、 c_4 区域长条组织。

非导转侧(c_1, c_2)的硬度略小于弹带内部(c_6, c_7, c_8)。弹带凸起部位顶部(c_3 -1、 c_3 -2)、导转侧上部(c_4 -1、 c_4 -2、 c_4 -3)均出现了由低硬度到高硬度的变化。其中 c_3 -1与 c_4 -1的硬度较低,均为细晶组织。纤维组织(c_4 -2)的硬度最高,大于长条组织(c_4 -3)。导转侧底部(c_5)的硬度较低,与细晶组织(c_3 -1、 c_4 -1)的硬度相近。

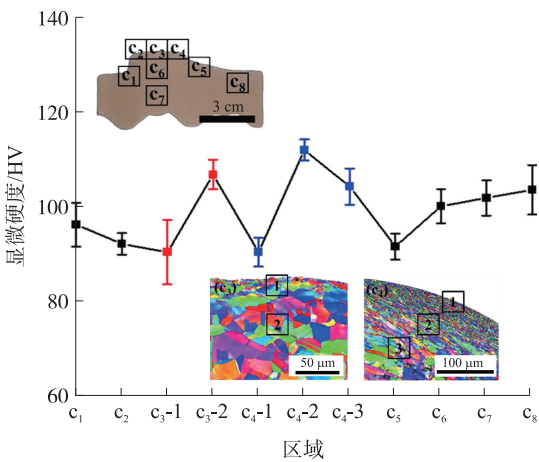


图 9 B5 样品各区域硬度分布图

Fig. 9 Hardness distribution diagram of each region of the B5 sample

4 分析与讨论

据前人研究发现,弹带剖面体具有明显的层状特征,外层至内层依次呈现为细小的等轴晶粒、纤维状组织、条带状晶粒以及较大尺寸的等轴晶粒^[8]的“多层”组织结构。本文在此基础上,以 155 mm 口径火炮为研究对象,对 3 种弹带的组织结构分布进行了深入探讨。结果表明,弹带的组织分布与其所处的空间位置存在密切关联。弹带的磨损主要集中在表面区域。具体而言,在导转侧上部近表面区域,磨损现象尤为显著;而导转侧底部的磨损程度则相对较轻。非导转侧的磨损普遍较为轻微,其组织结构以等轴形态为主。对于弹带凸起部位的顶部,根据磨损程度的不同,可能会出现细晶组织。值得注意的是,在距离表面 200 μm 以上的区域,磨损现象基本消失,其内部组织形貌也基本保持不变。

在挤进初期,弹带导转侧上部受到膛线挤压产生剧烈塑性变形,由于应变梯度的作用,由表及里形成纤维组织、长条组织、等轴组织。接着弹带在膛线中运动,剧烈的摩擦作用以及火药燃烧产生的热作用使得表层的部分纤维组织发生再结晶,形成细晶组织。由于细晶组织的硬度较低,纤维组织的硬度较高,这种“软-硬”结构^[8]使得弹带表面利于润滑,而内部承受载荷,从而抑制塑性变形向内继续扩展,并且弹带挤进过程始终处于动态变化状态。正如前文在动态实验中所观察到的:由于整个过程时间极为短暂,载荷未能充分向弹带内部传递^[12-13]。变形集中在表面,距离表面 200 μm 以上的内部组织形

貌几乎不发生变化。导转侧下部仅有图 5(b₅)出现“多层”组织结构,且变形没有图 5(b₄)严重,这说明对于 155 mm 火炮弹带来说,导转侧上部承受的应力最大,磨损最严重。而弹带非导转侧大部分区域为等轴组织,在整个服役过程中基本没有受到膛线的挤压,相较于弹带内部而言,其硬度值略低。

弹带在身管运动过程中,膛线与弹带之间产生剧烈摩擦^[19],摩擦产生的热量使该区域温度迅速升高,同时形变储存能也不断增加。当温度和形变储存能达到再结晶所需的临界条件时,细晶组织便会在该区域形成。H96-1 与 B5 弹带上部凸起边缘均出现了细晶组织。摩擦所受的力小于挤进过程中的力^[20],所以顶部的纤维组织与长条组织较少。而 H96-2 并未出现细晶组织,其凸起部位右侧(图 5 中 b₄ 位置)高于凸起部位顶部中心(图 5 中 b₃ 位置),且图 5(b₄)顶部由于与身管阴线的摩擦导致上部的条状组织方向发生改变,说明 b₄ 位置与膛线阴线接触,b₃ 位置在弹丸挤进后期并未接触到阴线,出现弹带并未填满膛线阴线的情况,边缘位置弹带的运动过程中并未与膛线产生摩擦,形变储存能以及温度并未达到再结晶条件,所以 H96-2 上部凸起边缘并未出现再结晶组织。

从所用身管的膛线类型对比来说,H96-1 的受力情况应小于 H96-2,H96-2 的受力情况应小于 B5^[16]。从成分上看,H96-1 的性能优于 H96-2。从硬度上看,H96-1 与 B5 的硬度相差不大,H96-2 硬度最小。从服役后的组织上看,H96-2 导转侧的变形更为剧烈,磨损更严重。H96-1 导转侧上部细晶组织的区域小于 B5,磨损最小。

5 结束语

根据弹带截面形貌、成分、各部分组织及硬度的对比,得出以下结论。

结构、成分、服役条件不同的弹带,服役后弹带组织分布情况具有共性规律:弹带磨损主要集中在表面区域,具体表现为导转侧上部近表面区域磨损现象尤为显著。这主要是由于弹带挤进初期,导转侧上部受到膛线挤压,导致剧烈塑性变形;而导转侧底部磨损程度相对较轻。非导转侧磨损普遍较轻,其组织结构以等轴形态为主,在整个服役过程中基本未受膛线挤压影响。对于弹带凸起部位顶部,在身管运动过程中,膛线与弹带间剧烈摩擦,使其达到再结晶所需的温度与形变储存能,最终形成细晶

组织。在距离表面 200 μm 以上的区域,磨损现象基本消失,内部组织形貌也基本保持不变。

非导转侧的硬度与弹带内部的硬度相近。弹带凸起位置上部与导转侧上部均出现“软-硬”结构,其中细晶组织的硬度最低,纤维组织的硬度最高。导转侧底部虽未出现细晶组织,但其硬度较低,与细晶组织较为接近。

对比 3 种弹带,H96-2 磨损最严重。H96-1 磨损最小,这与弹带的成分、结构以及所用身管的膛线类型密切相关。弹带在服役前均为粗大的等轴组织,服役后在内膛挤压、摩擦力及高温的共同作用下,表面组织发生了显著塑性变形,伴随动态回复与再结晶过程,导致晶粒细化,从而在弹带由表及里演变出“多层”组织结构。考虑到再结晶行为对初始组织的敏感性,如果通过机械及热处理手段,制备出强度塑性匹配的细晶组织替换现有的粗晶态组织,作为弹带服役前的初始组织,提高组织流动性,增强弹带形变的协调能力,提高发生显著再结晶软化的临界变形量和温度,则在服役过程中,有望提高弹带的稳定性以及耐磨性。

参考文献

- [1] WU B,ZHENG J,TIAN Q,et al. Tribology of rotating band and gun barrel during engraving process under quasi-static and dynamic loading[J]. Friction,2014,2(4):330-342.
- [2] 王舜. 铜合金弹带材料的摩擦磨损性能及数值模拟研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2021.
WANG Shun. Research on friction and wear properties and numerical simulation of projectile band of copper alloy [D]. Shenyang:Shenyang Ligong University,2021. (in Chinese)
- [3] ANDREWS T D. Projectile driving band interactions with gun barrels[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2006,128(2):273-278.
- [4] MONTGOMERY R S. Interaction of copper-containing rotating band metal with gun bores at the environment present in a gun tube[J]. Wear,1975,33(1):109-128.
- [5] MONTGOMERY R S. Surface melting of rotating bands[J]. Wear,1976,38(2):235-243.
- [6] MONTGOMERY R S. Friction of gilding metal sliding on chromium-plated steel[J]. Wear,1978,50(2):387-392.
- [7] MONTGOMERY R S. Wear of projectile rotating bands[J]. Wear,1985,101(4):347-356.
- [8] 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 Junhui, ZHENG Jian, NI Xinhua, et al. Research on macroscopic and microscopic mechanism of plastic deformation of bearing band [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(6):676-681. (in Chinese)
- [9] 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 Junhui,ZHENG Jian,NI Xinhua,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. (in Chinese)
- [10] YIN J H,ZHENG J,JIA C Z,et al. Analysis of severe plastic deformation and recrystallization of Cu under instantaneous extrusion and high speed friction [J]. Advanced Materials Research,2011,204:123-126.
- [11] YIN J H,ZHENG J,JIA C Z,et al. Plastic deformation and surface recrystallization of Cu-4 mass%Zn alloy under instantaneous extrusion and high speed friction[J]. Key Engineering Materials,2011,467-469:1280-1284.
- [12] WU B,ZHENG J,TIAN Q,et al. Friction and wear between rotating band and gun barrel during engraving process[J]. Wear,2014,318(1-2):106-113.
- [13] WU B,FANG L H,ZHENG J,et al. Strain hardening and strain-rate effect in friction between projectile and barrel during engraving process[J]. Tribology Letters,2019,67(2):39.
- [14] XUE T,ZHANG X,CUI D. Dynamic analysis of a guided projectile during engraving process[J]. Defence Technology,2014,10(2):111-118.
- [15] LISOV M. Modeling wear mechanism of artillery projectiles rotating band using variable parametars of internal ballistic process [J]. Scientific-Technical Review,2006,56(2):11-16.
- [16] 陆鸿睿,陶钢,苗军,等. 线膛无坐力炮膛线数和弹带结构对挤进过程影响[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(3):38-43.
LU Hongrui,TAO Gang,MIAO Jun,et al. Influence of the number of rifling and belt structure on the en-graving process of rifled recoilless guns[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2023,44(3):38-43. (in Chinese)
- [17] 宁全利,杨清文,陈翠华,等. 火炮与自动武器[M]. 北京:北京理工大学出版社,2022.
NING Quanli,YANG Qingwen,CHEN Cunhua,et al. Artillery and automatic weapons [M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2022. (in Chinese)
- [18] ZHANG J,ALPAS A T. Transition between mild and severe wear in aluminium alloys[J]. Acta Materialia,1997,45(2):513-528.
- [19] 吴斌,郑靖. 枪炮射击过程中弹丸与身管相互作用及其影响[J]. 四川兵工学报,2011,32(5):20-23.
WU Bin,ZHENG Jing. Projectile interaction with gun barrel and its effect during firing process[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2011,32(5):20-23. (in Chinese)
- [20] 陈龙森,林贵,李森. 弹丸高速挤进过程动态试验设计与分析[J]. 南京理工大学学报,2015,39(2):139-143.
CHEN Longmiao, LIN Gui, LI Miao. Design and analysis of dynamic experiment for engraving process of high-speed projectile[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2015,39(2):139-143. (in Chinese)