

强流脉冲离子束辐照 WC-Ni 硬质合金的摩擦磨损性能^{*}

张锋刚¹, 朱小鹏², 雷明凯²

(1. 陕西理工学院 材料科学与工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为进一步提高 WC-Ni 硬质合金的表面耐磨性, 采用强流脉冲离子束(HIPIB)对其表面进行辐照处理。利用扫描电子显微镜、显微硬度计和环-块式摩擦磨损试验机研究了 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金的微观组织、硬度分布和摩擦磨损性能。结果表明: HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金表面发生快速重熔与烧蚀, 组织显著细化、致密化; 随着束流密度和辐照次数的增加, 熔层厚度与硬化层深度增加、摩擦因数和磨损率降低, 束流密度 300 A/cm² 辐照 10 次, 熔层厚度约 4 μm, 硬化层深度可达 160 μm, 摩擦因数和磨损率分别降低 45% 和 70%。辐照硬质合金表面重熔层的磨损主要表现为以均匀微观切削为主的磨粒磨损, 近表层冲击硬化区的磨损仍以 Ni 粘结相的微观磨损和 WC 晶粒脱落为主, 但辐照应力波的长程硬化作用使硬质合金中 WC 晶粒与 Ni 粘结相之间的结合力增强以及 Ni 粘结相自身强化有效抑制了这类磨损。

关键词: 强流脉冲离子束(HIPIB); WC-Ni 硬质合金; 摩擦因数; 耐磨性

中图分类号: TG174.44; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)01-0096-07

Tribological Properties of WC-Ni Cemented Carbide Irradiated by High Intensity Pulsed Ion Beam

ZHANG Feng-gang¹, ZHU Xiao-peng², LEI Ming-kai²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning)

Abstract: WC-Ni cemented carbide surface was irradiated by high-intensity pulsed ion beam (HIPIB) to enhance its wear resistance in this research. The microstructure, microhardness-depth profile and tribological properties of HIPIB irradiated WC-Ni cemented carbide were investigated by using SEM, microhardness tester and block-on-ring wear tester, respectively. The results show that HIPIB irradiation induces the surface remelting and ablation, and its microstructure is significantly refined and densified. With increasing ion current density and shot number, the depth of the remelting layer and hardening layer increase, friction coefficient and wear rate decrease. The depth of the remelting layer and hardening layer for 300 A/cm² with 10 shots reaches 4 μm and 160 μm, and the friction coefficient and wear rate are reduced by 45% and 70%, respectively. The wear of the surface remelting layer on the irradiated samples is micro-abrasion, and the wear of impact hardening zone on the subsurface layer involves micro-abrasion of Ni binder phase and subsequent pull-out of WC grains; however, it is significantly suppressed by combined enhancements in the bonding force between WC grains and Ni binder phase, and strengthening of binder phase itself by the hardened effect in the long range from stress wave of HIPIB irradiation.

Keywords: high-intensity pulsed ion beam(HIPIB); WC-Ni cemented carbide; friction coefficient; wear resistance

收稿日期: 2015-08-23; **修回日期:** 2015-11-09; **基金项目:** * 陕西省自然科学基金(2015JQ5193); 陕西理工学院科研基金(SLGQD14-12)

通讯作者: 张锋刚(1982—), 男(汉), 讲师, 博士; **研究方向:** 金属复合材料及载能束材料表面改性; **Tel:** (0916) 2641 711; **E-mail:** 0207124322@163.com

网络出版日期: 2016-01-30 17:59; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160130.1759.028.html>

引文格式: 张锋刚, 朱小鹏, 雷明凯. 强流脉冲离子束辐照 WC-Ni 硬质合金的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 96-102. ZHANG F G, ZHU X P, LEI M K. Tribological properties of WC-Ni cemented carbide irradiated by high intensity pulsed ion beam[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 96-102.

0 引言

以 Ni 代 Co 的 WC-Ni 硬质合金具有优异的耐高温、耐腐蚀性、防辐射等性能,可满足高温、高压、腐蚀介质、放射环境以及含有固体颗粒介质等复杂、苛刻的工况要求^[1-2],但力学性能和耐磨性较 WC-Co 降低,硬质合金零件的使用寿命下降;同时,摩擦磨损工况硬质合金零件的失效主要表现为表面磨损。

表面改性技术可改善硬质合金的表面性能,目前主要的表面改性技术有表面涂层技术^[3-4]、离子注入^[5-6]、载能束辐照技术(包括离子束、电子束和激光等)^[7-9],在这些表面改性技术当中,表面涂层技术将硬质合金基体的强韧性与涂层的耐磨性相结合,提高硬质合金的综合性能,一定程度上提高了硬质合金的使用寿命,但很难从根本上解决涂层与基体结合力的问题,制约该技术的发展和应用;离子注入技术虽可克服涂层与基体结合力差的问题,但离子注入深度浅,限制了其在苛刻条件的应用;载能束辐照技术受到国内外学者的广泛关注。

强流脉冲离子束(High-intensity pulsed ion beam, HIPIB)技术作为一种短脉冲、高能量密度特征的载能束技术,可在极短时间(小于 1 μs)内在材料表面沉积很高的能量,引发材料表面急剧升温($\sim 10^{10}$ K/s),发生快速重熔与烧蚀,随后快速冷却($\sim 10^9$ K/s)形成非平衡组织结构,同时,离子束的热冲击以及烧蚀物质喷射的强烈反冲在材料表层形成由表及里的应力波,使材料表层成分与组织发生显著变化,从而改善材料的表面性能^[10]。迄今为止,HIPIB 在改善 Cu 及合金^[11]、不锈钢^[12]、钛合金^[13]、镁合金^[14]和 WC-Co 硬质合金^[15]等材料的摩擦磨损性能方面取得了显著改善。

文中采用强流脉冲离子束对 WC-Ni 硬质合金进行表面辐照处理,研究 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金的摩擦磨损性能,并探讨辐照硬质合金的磨损机制。

1 材料及方法

材料为 WC-Ni 硬质合金,其化学成分(质量分数)为 87% WC 和 13% Ni,WC 平均晶粒尺寸 2 μm 。利用线切割将硬质合金棒料切成尺寸为 6 mm $\times$ 6 mm $\times$ 8 mm 的块状试样,然后用金刚

石砂和 200 号 SiC 金相砂纸研磨,去除线切割热影响区,经丙酮清洗烘干、备用。

在 TEMP-6 型强流脉冲离子束装置上进行 WC-Ni 硬质合金表面辐照试验,辐照工艺参数为:离子能量 E 为 300 keV,束流密度 J 分别为 100、200 和 300 A/cm²,脉冲宽度 τ 为 70 ns,辐照次数 N 分别为 1、5 和 10 次。离子束成分(原子数分数)主要由 70% H⁺ 和 30% C⁺ 组成。

用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样截面组织形貌;用 HXD-1000TM 型维氏显微硬度计测量试样截面显微硬度,所用载荷 200 g,加载时间 10 s。以显微硬度平均值高于基体平均硬度约 5% 的位置处至表面的垂直距离作为硬化层深度,表征辐照 WC-Ni 硬质合金的硬化效果。摩擦磨损试验在 MM200 型环-块式摩擦磨损试验机上进行,摩擦副为内径 16 mm、外径 45 mm、厚度 10 mm 的 GCr15 钢环,硬度为 700 HV_{0.2}。摩擦磨损试验条件为室温、大气环境、干摩擦,载荷 98 N、滑动速度 0.47 m/s、滑动时间 2 100 s。摩擦磨损试验后,观察磨损试样表面形貌;在超声波中用丙酮清洗磨损试样,烘干后,利用精度 0.1 mg 的电子天平测量试样磨损前后重量的变化,并计算比磨损率,比磨损率值是相同工艺下 3 个试样的平均值。

2 结果与讨论

2.1 截面组织和硬度分布

图 1 为原始及 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金截面 SEM 形貌。可以看出,原始硬质合金表面存在亚微米量级的起伏,局部可观察到凹坑、微孔等缺陷,同时硬质合金内部存在孔洞缺陷(见图 1(a));较低束流密度 100 A/cm²,硬质合金表面熔层浅,但表面微观不均匀被择优烧蚀,微观尺度范围较原始硬质合金平整、致密(见图 1(b));束流密度为 200 A/cm²,硬质合金表面发生重熔与烧蚀,形成尺度较小的“峰-谷”起伏烧蚀重熔形貌,峰谷表面光滑致密,熔层约 1.6 μm ,且近表层数微米区域内晶粒细化(见图 1(c));较高束流密度 300 A/cm²,硬质合金表面发生强烈的重熔与烧蚀,1 次辐照形成尺寸较小的“峰谷”型烧蚀重熔形貌,熔层较浅(图 1(d));5 次、10 次辐照的反复重熔与烧蚀使表面“峰-谷”尺寸增大,表面起伏扩展到更大范围,峰谷表面光滑致密,熔层厚

度分别增加至 2 μm 和 4 μm ,且近表层数微米区域内晶粒细化(图 1(e)和图 1(f));仔细发现,较高束流密度多次辐照熔层中有烧蚀孔和晶粒烧蚀熔合的痕迹,揭示了 HIPIB 辐照过程中 Ni 粘

结相择优烧蚀,WC 颗粒熔化、相互熔合的表面烧蚀重熔过程。熔层以下区域为冲击硬化区,该区域组织较原始硬质合金未有明显特征,但显微硬度有显著变化。

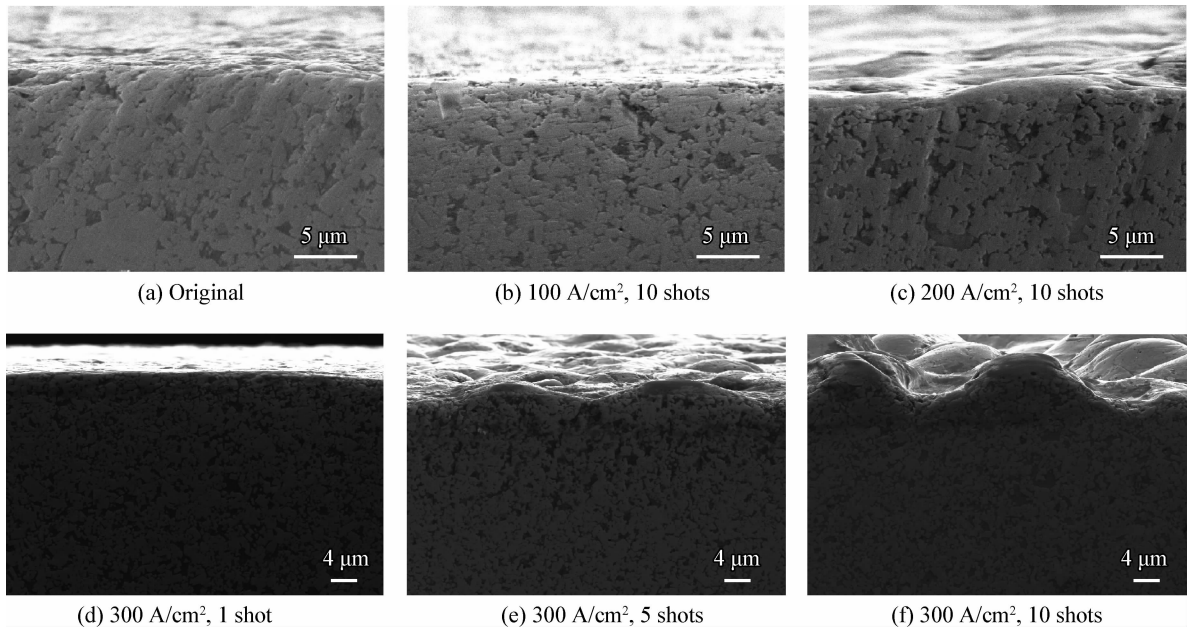


图 1 原始及 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金截面形貌

Fig. 1 Cross section morphologies of the original and HIPIB irradiated WC-Ni cemented carbide

图 2 为原始及 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金硬度-深度分布曲线。可以看出, HIPIB 辐照使硬质合金表层显著硬化,硬化层深度随辐照束流密度增加,300 A/cm² 辐照硬化层深度可达约 160 μm (图 2(a))。辐照次数对硬化层深度的影响规律与束流密度相似,硬化层深度随辐照次数增加(图 2(b))。HIPIB 辐照具有显著的“长程效

应”,使 WC-Ni 硬质合金近表层百微米范围内显著硬化。这源于强脉冲能量沉积诱发的热-力学效应, HIPIB 辐照在极短时间(小于 1 μs)内在材料表面沉积很高的能量,引发材料表面急剧升温($\sim 10^{10}$ K/s),发生快速重熔与烧蚀,离子束的热冲击以及烧蚀物质喷射的强烈反冲在材料表层形成由表及里的应力波,导致材料远大于离子射

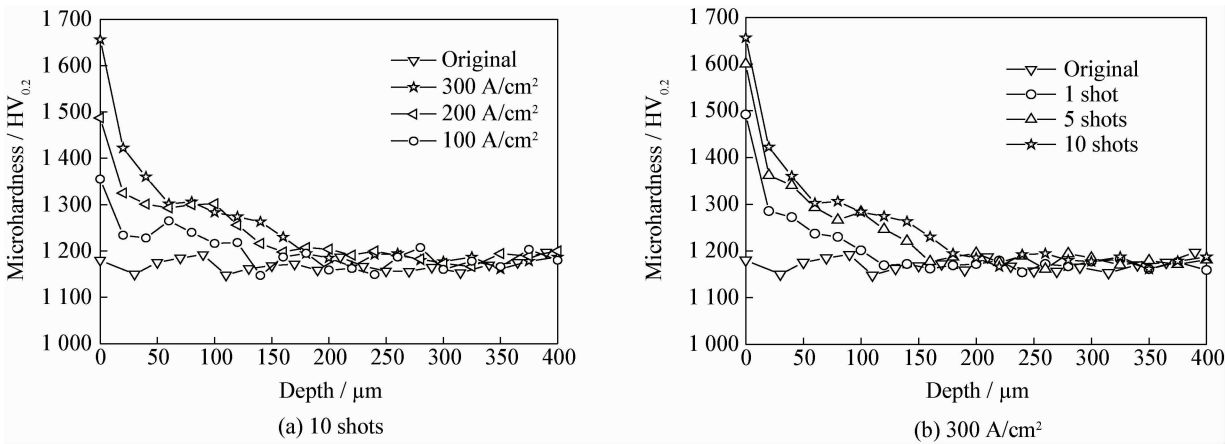


图 2 原始及 HIPIB 辐照硬质合金显微硬度-深度分布曲线

Fig. 2 Microhardness-depth profiles of the original and HIPIB irradiated WC-Ni cemented carbide

程深度内的组织形成大量位错、空位等晶体缺陷而硬化^[10]。HIPIB 辐照诱导的应力波宽度 Δx 和应力波强度 P 可以表示为^[11,16]：

$$\Delta x=R_0+C_L\cdot\tau_p\tag{1}$$

$$P=G\cdot W\tag{2}$$

式中, R_0 为离子射程, μm ; C_L 为材料中的纵声波速, m/s ; τ_p 为 HIPIB 的脉冲持续时间, ns 。当 $R_0\ll C_L\cdot\tau_p$ 时, Δx 由离子束的脉冲宽度决定; 当 $R_0\gg C_L\cdot\tau_p$ 时, Δx 取决于离子束的能量 E ; G 为 Gruneisen 系数, W 为吸收的能量体密度。试验采用的 HIPIB 的脉冲持续时间 τ_p 约 120 ns , 离子射程约 $1.8\text{ }\mu\text{m}$; 对于 WC-13Ni 硬质合金, C_L 和 G 分别为 $6\text{ }700\text{ m/s}$ 和 1.7 。 $R_0\ll C_L\cdot\tau_p$, Δx 由离子束的脉冲宽度决定。因此,束流密度从 100 A/cm^2 增加至 300 A/cm^2 , HIPIB 辐照在 WC-13Ni 硬质合金中诱导的应力波宽度 Δx 约为 $805\text{ }\mu\text{m}$, 应力波强度 P 从 6 GPa 增加到 16 GPa 。研究表明,应力波强度取决于 HIPIB 的束流密度与材料的熔点,应力波强度随束流密度增加,熔点越高,应力波强度越低^[11]。

2.2 摩擦因数与磨损率

图 3 为载荷 98 N 、滑动速度 0.47 m/s 干摩擦条件下 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金摩擦因数与束流密度和辐照次数的关系曲线。摩擦因数为稳定阶段的摩擦因数。可以看出,原始硬质合金的摩擦因数为 0.8 , HIPIB 辐照对硬质合金起到了一定的减摩作用。辐照硬质合金摩擦因数显著降低,且随束流密度的增加而降低,束流密度为 300 A/cm^2 时,辐照硬质合金摩擦因数为 0.5 ,较原始硬质合金降低约 38% 。辐照次数对摩擦因数的影响与束流密度类似,辐照硬质合金的摩擦因数随辐照次数的增加而显著降低。摩擦因数的降低与 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金的表面状态相关,一方面 HIPIB 辐照的热冲击使硬质合金表面形成峰谷起伏烧蚀重熔形貌,且起伏程度随束流密度和辐照次数增加,使实际摩擦接触面积减小;另一方面, HIPIB 辐照的热冲击使硬质合金表层长程硬化,硬化层可减轻磨损过程中的粘着磨损,良好支撑磨损载荷,降低摩擦因数^[11]。 Uglov 等^[9] 采用强流脉冲电子束处理 WC-15TiC-6Co 硬质合金发

现,辐照可使硬质合金的摩擦因数显著降低,且随能量密度增加而降低,这源于辐照改性层硬度的增加。

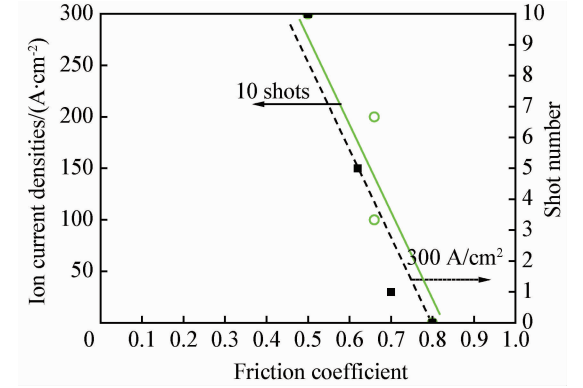


图 3 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金摩擦因数与束流密度和辐照次数的关系

Fig. 3 Relationships of friction coefficient of the HIPIB irradiated WC-Ni cemented carbide with ion current density and shot numbers

图 4 为载荷 98 N 、滑动速度 0.47 m/s 干摩擦条件下 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金的磨损率与束流密度和辐照次数的关系曲线。可以看出,原始硬质合金试样的平均磨损率约为 $1.2\times 10^{-6}\text{ mm}^3/\text{Nm}$, HIPIB 辐照可显著提高 WC-Ni 硬质合金的耐磨性,辐照硬质合金的磨损率随束流密度的增加而减小, 300 A/cm^2 辐照磨损率可降低至 $3.6\times 10^{-7}\text{ mm}^3/\text{Nm}$,降低约 70% ; 辐照次数对硬质合金磨损率的影响与束流密度相似,辐照硬质合金的磨损率随辐照次数的增加而显著降低。测量磨损试样的磨痕深度发现,摩擦

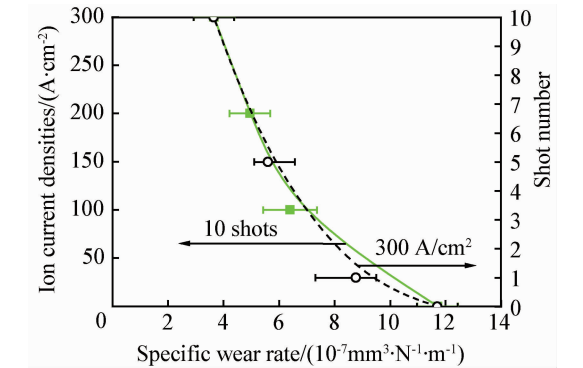


图 4 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金的磨损率与束流密度和辐照次数的关系

Fig. 4 Relationships of specific wear rate of the HIPIB irradiated WC-Ni cemented carbide with ion current density and shot numbers

磨损试验的所有硬质合金试样磨痕深度均小于 20 μm ,远小于辐照硬质合金硬化层深度,表明辐照硬质合金试样的磨损过程均在硬化层内进行。一般来说,WC 基硬质合金的硬度越高,耐磨性越好^[17-18]。耐磨性提高主要源于 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金表层的深度硬化。

2.3 磨痕形貌

由于 HIPIB 辐照表面改性试样表层组织的特殊性,而辐照 WC-Ni 硬质合金试样的磨损过程均在硬化层内进行,可从表面磨痕边界和磨痕心部的磨损形貌特征判断磨损过程中辐照硬质合金表面重熔层和冲击硬化区的磨损机制。图 5 为原始及束流密度 300 A/cm² HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金表面磨痕边界形貌。可以看出,原始硬质合金磨痕边缘存在尺寸较大的去除坑、空隙、碎屑(图 5(a)),并可以观察到 WC 晶粒破碎、脱离基体的现象。因此,原始硬质合金的磨损机制为 Ni 粘结相优先去除引发 WC 颗粒剥落去除,磨损过程中的塑性变形和微观磨损的共同作用^[19]使部分 Ni 粘结相首先从 WC 晶粒间去除,随着磨损过程的进行,更多的 Ni 粘结相去除,

WC 晶粒之间的结合强度降低,失去支撑而脱落。1 次辐照硬质合金表面磨痕边缘表面重熔烧蚀层被均匀的磨削去除,并可以观察熔层中的烧蚀孔(图 5(b)),这源于离子束单次辐照的重熔与烧蚀使表层 Ni 粘结相烧蚀、WC 晶粒细化以及组织致密化;5 次和 10 次辐照,硬质合金表面磨痕边缘呈现均匀的磨削特征(图 5(c)和图 5(d)),揭示了初始磨损阶段辐照硬质合金表面重熔层的磨损以微观切削为主。在磨损初期,外加载荷直接作用在表面重熔微观凸起处,摩擦过程中的强烈挤压和摩擦使其内部位错密度显著增加,当位错密度积累到一定量时,在微观凸起上形成微裂纹;随后的不断磨损使微裂纹沿微观凸起与熔层界面或穿过微观凸起而扩展,产生显微脆断,形成磨屑;一部分磨屑随摩擦副的旋转带出磨损区域,而一部分磨屑则保留在磨损区充当磨粒参与后续的磨损过程;在外加载荷的作用下,压迫磨粒进入表面产生微观切削。因此,HIPIB 辐照硬质合金表面重熔层的磨损是以均匀的微观切削为主的磨粒磨损。

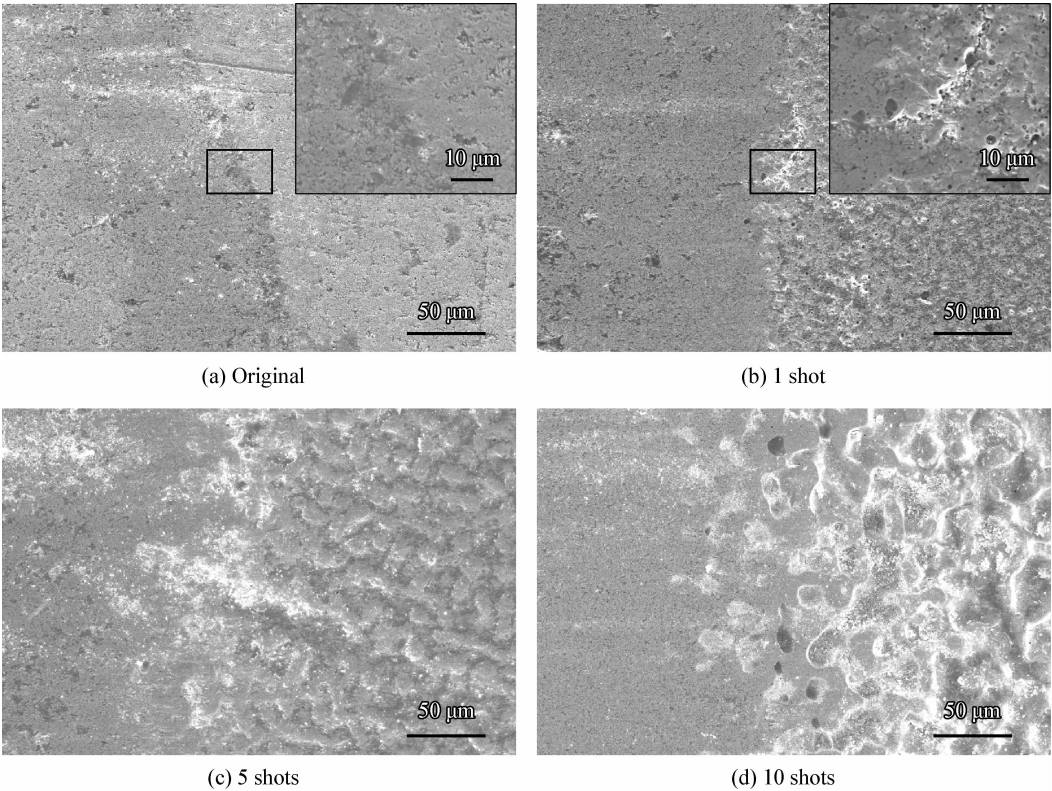


图 5 原始及 300 A/cm² HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金表面磨痕边界形貌
Fig. 5 Boundary morphologies of worn surface of the original and HIPIB irradiated WC-Ni cemented carbides at 300 A/cm²

图 6 为原始及束流密度 300 A/cm^2 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金表面磨痕心部形貌。可以看出,原始硬质合金磨痕心部存在因 WC 晶粒破碎、脱落而形成的较大尺寸的去除坑(图 6(a)),揭示了原始 WC-Ni 硬质合金近表层的磨损仍以

Ni 粘结相的塑性变形和 WC 晶粒脱落为主要特征;1 次辐照硬质合金磨痕心部去除坑尺寸减小(图 6(b)),离子束单次辐照的热冲击使近表层组织致密化、硬化,WC 晶粒与 Ni 粘结相之间的结合力增强,导致 Ni 粘结相的塑性变形、去除以及

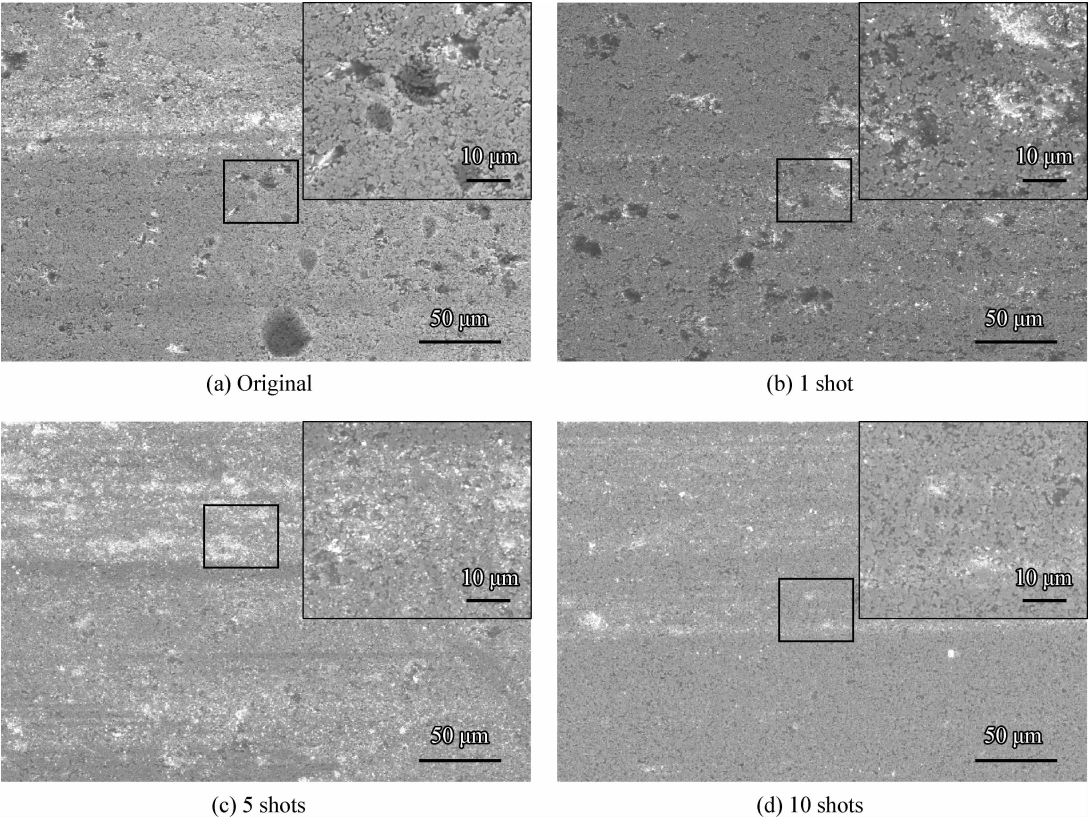


图 6 原始及 300 A/cm^2 HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金表面磨痕心部形貌

Fig. 6 Core morphologies of worn surface of the original and HIPIB irradiated WC-Ni cemented carbides at 300 A/cm^2

WC 晶粒脱落现象减弱;5 次和 10 次辐照硬质合金磨痕心部的去除坑尺寸和数量显著减少,碳化物破碎、去除现象显著减少(图 6(c)和图 6(d)),离子束辐照的反复热冲击使表层组织更加致密、硬化,Ni 粘结相和 WC 颗粒难以去除。因此,稳定磨损阶段,HIPIB 辐照硬质合金近表层冲击硬化区的磨损机制与原始硬质合金相似,仍以 Ni 粘结相优先去除引发 WC 颗粒剥落去除为主要特征,但辐照应力波在较长范围的“长程硬化”使硬质合金中 WC 晶粒与 Ni 粘结相之间的结合力增强,同时辐照应力波在 Ni 粘结相内诱发位错等缺陷使 Ni 粘结相自身强化,有效抑制了滑动摩擦磨损过程中 Ni 粘结相的微观磨损和随后 WC 晶粒的脱落。

3 结 论

- (1) 强流脉冲离子束辐照 WC-Ni 硬质合金表面发生快速重熔与烧蚀,组织显著细化、致密化,随着束流密度和辐照次数的增加,熔层厚度与硬化层深度显著增加, 300 A/cm^2 10 次辐照,熔层厚度约 $4\text{ }\mu\text{m}$,硬化层深度可达 $160\text{ }\mu\text{m}$ 。
- (2) HIPIB 辐照可以显著改善 WC-Ni 硬质合金的摩擦学性能,摩擦因数和磨损率随束流密度和辐照次数的增加而降低, 300 A/cm^2 10 次辐照摩擦因数和磨损率分别由原始的 0.8 和 $1.2\times 10^{-6}\text{ mm}^3/\text{Nm}$ 降低至 0.5 和 $3.6\times 10^{-7}\text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。
- (3) HIPIB 辐照 WC-Ni 硬质合金表面熔层的磨损主要表现为以均匀微观切削为主要特征的磨粒磨损,近表层冲击硬化区的磨损机制与原

始硬质合金相似,但辐照应力波在较长范围的长程硬化使硬质合金中 WC 晶粒与 Ni 粘结相之间的结合力增强以及 Ni 粘结相自身强化有效抑制了摩擦磨损过程中 Ni 粘结相的微观磨损和随后 WC 晶粒的脱落。

参考文献

- [1] 吴月天. 机械密封用耐磨、耐蚀硬质合金材料- YCN3 合金研制[J]. 硬质合金, 1996, 13(2): 95-98.
WU Y T. A new kind of wear-resistance and corrosion-resistance alloy- YCN3 made for mechanical seal[J]. Cemented Carbide, 1996, 13(2): 95-98 (in Chinese).
- [2] 温庆丰, 刘莹, 黄伟峰, 等. 机械密封端面材料 WC-Ni 硬质合金的研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(1): 1-6.
WEN Q G, LIU Y, HUANG W F, et al. Development of research on WC-Ni cemented carbides of mechanical seal face materials[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(1): 1-6 (in Chinese).
- [3] ZHAO S L, ZHANG J, ZHANG Z, et al. Microstructure and mechanical properties of (Ti, Al, Zr)N/ (Ti, Al, Zr, Cr)N films on cemented carbide substrates[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2014, 21(1): 77-81.
- [4] YAN P, DENG J X, RONG Y M. Performance of PVD (Zr, Ti)N-coatings cemented carbide inserts in cutting processes [J]. International Journal of Manufacturing Technology, 2014, 73(9): 1361-1371.
- [5] SAKLAKOGLU I E, SAKLAKOGLU N, CEYHUN V, et al. The life of WC-Co cutting tools treated by plasma immersion ion implantation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47 (3/4): 715-719.
- [6] WANG S X, LI C, XIONG B J, et al. Surface modification of hard alloy by Y ion implantation under different atmosphere[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(13): 5826-5830.
- [7] UGLOV V V, REMNEV G E, KULESHOV A K, et al. Formation of hardened layer in WC-TiC-Co alloy by treatment of high intensity pulse ion beam and compression plasma flows[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204 (12/13): 1952-1956.
- [8] ARROYO J M, DINIZ A E, FERNANDES DE LIMA M. S. Cemented carbide surface modifications using laser treatment and its effects on hard coating adhesion[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(15): 2410-2416.
- [9] UGLOV V V, KULESHVOV A K, SOLDATENKO E A, et al. Structure, phase composition and mechanical properties of hard alloy treated by intense pulsed electron beams [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(11/12): 2972-2976.
- [10] LEI M K, ZHU X P, LIU C, et al. A novel shock processing by high-intensity pulsed ion beam[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(3): 031013.
- [11] 董志宏. 强流脉冲离子束特性优化及辐照力学效应研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
DONG Z H. Characteristic optimization and dynamic effect irradiated by high-intensity pulsed ion beam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007 (in Chinese).
- [12] WANG X, HAN X G, LEI M K, et al. Effect of high-intensity pulsed ion beams irradiation on corrosion resistance of 316L stainless steel[J]. Material Science and Engineering A, 2007, 457(1/2): 84-89.
- [13] 胡永峰, 朱雪梅, 朱小鹏, 等. 强流脉冲离子束辐照合金 Ti6Al4V 的耐腐蚀性[J]. 大连铁道学院学报, 2002, 23(3): 84-87.
HU Y F, ZHU X P, LEI M K, et al. Corrosion resistance of alloy Ti6Al4V irradiated by high-intensity pulsed ion-beam[J]. Journal of Dalian Railway Institute, 2002, 23 (3): 84-87 (in Chinese).
- [14] LI P, LEI M K, ZHU X P. Dry sliding tribological behaviour of AZ31 magnesium alloy irradiated by high-intensity pulsed ion beam[J]. Applied Surface Science, 2010, 257(1): 72-81.
- [15] 刘臣. 强流脉冲离子束辐照的冲击加工与强化作用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
LIU C. On shock processing and strengthening by irradiation using high-intensity pulsed ion beam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009 (in Chinese).
- [16] VALYAEV A N, LADYSEV V S, MENDYGALIEV D R, et al. Defects in α -Fe induced by intense-pulsed ion beam (IPIB)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2000, 171(4): 481-486.
- [17] JIA K, FISCHER T E. Abrasion resistance of nanostructured and conventional cemented carbides[J]. Wear, 1996, 200(1/2): 206-214.
- [18] SAITO H, IWABUCHI A, SHIMIZU T. Effects of Co content and WC grain size on wear of WC cemented carbide [J]. Wear, 2006, 261(2): 126-132.
- [19] LARSEN-BASSE J. Binder extrusion in sliding wear of WC-Co alloys[J]. Wear, 1985, 105(3): 247-256.