DOI:10.20038/j.cnki.mra.2025.000204



强流脉冲离子束技术在金属表面处理领域的研究进展

连庆宙1,唐鑫1,李朋2*

(1. 桂林理工大学材料科学与工程学院, 广西桂林 541004; 2. 商丘师范学院电子电气工程学院, 河南商丘 476000)

摘要: 强流脉冲离子束技术(High-intensity pulsed ion beam, HIPIB)通过纳秒级脉冲产生高能离子束,在金属表面引发瞬时热力学效应与应力波作用,实现精确的表面改性。近年来,该技术在金属表面处理领域得到了广泛的应用,并引起研究者的重视。但是,该技术目前存在,如束流参数与材料性能改变的定量关联尚未明确,多脉冲作用下的累积效应机制有待进一步探索,以及针对不同金属体系的辐照工艺缺乏系统优化的问题。为优化强流脉冲离子束技术工艺参数,从热力学效应、微观组织演变与宏观性能提升3个方面进行了分析,建立了束流参数与表面特性之间的定量关系,同时阐述了强流脉冲离子束技术对金属表面的影响机理。强流脉冲离子束技术在金属表面引发熔融、气化和烧蚀等现象,促使纳米晶、非晶相及其他非平衡相的形成,从而改变材料的微观组织和表面形貌,提高材料的硬度、耐磨性和耐腐蚀性,延长金属材料的使用寿命。未来研究应集中于多尺度热-力-化耦合模型的建立,通过离子种类与参数协同调控,实现纳米晶、非晶复合结构的精准构筑,并扩展至医疗、新能源等领域。推动强流脉冲离子束技术与人工智能的深度融合,为制造业的发展和创新提供技术支撑。

关键词:强流脉冲离子束;表面形貌;相变;表面处理;表面性能;力学性能;热力学;影响机理
 中图分类号:TG17
 文献标志码:A
 文章编号:1673-9981(2025)02-0249-08

引文格式:连庆宙,唐鑫,李朋.强流脉冲离子束技术在金属表面处理领域的研究进展[J].材料研究与应用,2025,19(2): 249-256.

LIAN Qingzhou, TANG Xin, LI Peng. Research Progress of High-Intensity Pulsed Ion Beam Technology in Metal Surface Treatment[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(2): 249-256.

0 引言

强流脉冲离子束技术起源于 20 世纪 70 年代对 惯性约束核聚变点火技术的研究,物理、化学、材料 科学等学科的交叉发展进一步推动了该技术的发 展^[1-3]。20 世纪 80 年代初期,美国首次将强流脉冲 离子束技术应用于半导体材料的快速退火和离子注 入研究,并成功研制出首台用于材料表面工程的中 低功率装置。1987年,美国 Sandia 实验室开发出 20 MeV强流脉冲电子束装置,为后续发展奠定实验基 础。1993年,俄罗斯 Tomsk 团队基于 PIII 技术开发 出表面改性系统,首次实现了大面积材料处理,使工 业化应用成为可能^[47]。北京大学、大连理工大学等 国内机构也相继开展了相关研究^[8-9],从最初的半导 体退火,逐步扩展到材料改性^[10]、硬质薄膜制备^[11]、 航空航天^[12]、核电及新材料开发等领域。

强流脉冲离子束技术所载能量在时间和空间上 高度压缩,通过输入外部高密度能量使材料产生显

著的热力学效应。这种非接触式加热方式能使材料 熔融、气化、烧蚀并沉积能量,引发材料表面温度迅 速变化,变温速率高达10⁷—10¹⁰ K·s⁻¹。此外,强流 脉冲离子束辐照引起的高频变化产生热应力与冲击 波^[13]。这些效应使材料表层形成各种奇特形貌和 大量缺陷,如纳米晶、非晶相和第二相等非平衡相, 从而提升金属表面的力学性能、耐高温性能、抗辐射 性能等^[14-17]。

探究材料在辐照过程中的应力应变规律、残余 应力的成因及材料表面强化的机理,对于优化强流 脉冲离子束表面改性技术有着极为重要的意义。本 文聚焦强流脉冲离子束技术在金属表面处理中的最 新研究进展,系统梳理其作用机理。通过多尺度机 理整合,将热力学效应、微观组织演变与宏观性能提 升进行跨尺度关联分析,建立束流参数与表面特性 的定量关系,揭示了强流脉冲离子束在新兴领域的 应用潜力。

收稿日期:2023-10-18

基金项目:商丘学者奖励计划项目(SQRC202212003)

作者简介:连庆宙,硕士研究生,研究方向为离子束材料表面改性。E-mail:2504785427@qq.com。

通信作者:李朋,博士,教授,研究方向为等离子体/离子束材料表面改性。E-mail:plisurfeng@126.com。

1 强流脉冲离子束对材料表面形貌的影响

张锋刚等^[18]在强流脉冲离子束辐照WC-Co硬 质合金的实验中发现,当辐照次数为1次且束流密 度较低时,合金表面的重熔现象不明显,但出现了大 尺寸裂纹。随着束流密度增加,合金表面的磨制划 痕消失,出现大量密集烧蚀孔和尺寸较小的熔坑。 由于辐照过程中烧蚀物质的回流沉降,合金表面附 着大量白色烧蚀颗粒,表明发生液滴喷射现象。当 辐照束流密度达到200 A·cm⁻²时,合金表面出现尺 寸较大的烧蚀孔和熔坑,但白色烧蚀颗粒减少,由于 表面快速加热熔化与快速冷却的非平衡过程,产生 了微裂纹。此时增加辐照次数,合金表面烧蚀孔减少,熔坑尺寸显著增大,并出现网状裂纹。辐照次数增至10次时,表面凸起尺寸继续增大,形成网状"峰-谷"重熔烧蚀形貌,烧蚀坑和烧蚀颗粒减少,表面裂纹网密度增加,合金表面呈现微区光滑致密化特征(见图1)。李明娟等^[19-21]在强流脉冲离子束轰击钛合金表面的研究中,观察到类似的结果。Korotaev^[22-24]在强流脉冲离子束辐照镍、钼等金属时,还发现熔坑附近有明显的波浪形起伏。Ivanov^[25]和李旻才^[26]在辐照AZ91等合金的实验中,也观察到类似现象。



(a) 一原始态; (b) -50 A·cm⁻², 辐照1次; (c) -100 A·cm⁻², 辐照1次; (d) -200 A·cm⁻², 辐照1次; (e) -200 A·cm⁻², 辐照5次; (f) -200 A·cm⁻², 辐照10次。
(a) -the original state; (b) -50 A·cm⁻², 1 shot; (c) -100 A·cm⁻², 1 shot; (d) -200 A·cm⁻², 1 shot; (e) -200 A·cm⁻², 5 shots; (f) -200 A·cm⁻², 10 shots.

图 1 强流脉冲离子束辐照 WC-Co硬质合金表面 SEM 形貌^[18] Figure 1 SEM morphology of the surface of WC-Co cemented carbide irradiated by intense pulsed ion beam

熔坑和烧蚀坑的出现引起了研究者的关注,并 提出了不同的解释模型。王旭等^[27]认为熔坑的产 生是由于靶材不均匀性导致的选择性烧蚀而导致, 陈海龙等^[28]则认为这是在辐照过程中热力学耦合 作用形成的反脉冲从表面喷发,快速冷却后保留了 形貌。随着辐照次数增加,熔坑可能被再次填补或 在熔融材料的张力作用下变得光滑。烧蚀坑则被认 为是由空位扩散迁移或次表层的液体喷发所致^[19]。

2 强流脉冲离子束对材料微观组织的影响

合金表面空洞在低束流密度离子束辐照后会出 现元素偏聚现象,其中熔点较低的元素和脉冲离子 在熔坑处聚集,而非熔坑区的轻元素杂质含量减少。 随着脉冲次数的增加,轻元素杂质基本消失,熔点较 低的元素富集在被轰击的材料表面^[20]。增加束流 密度,表面元素逐渐呈现层状均匀分布,材料表面层 出现微小非晶相。但随着束流密度和脉冲次数进一 步增加,材料表面温度急剧上升,导致表层元素快速 扩散并重新分布,脉冲结束后,表面迅速凝固,将重 新分布的元素冻结,形成具有一定程度择优取向的 细小"形变织构"^[24,29]。经过强脉冲离子束辐照,一 般金属材料的表面通常会形成厚度为几十纳米的结 晶层。然而,当低束流密度离子束辐照高熔点金属 时,由于热效应影响,金属晶粒反而会增大^[30]。

Shymanski等^[31]在使用强流脉冲离子束对钨合 金进行改性时发现,注入的离子在压缩等离子体流 的作用下,会与基体元素结合形成新相,并改变晶格 大小。当无压缩等离子体流的影响时,合金表面同 样会形成新相,但注入的元素大部分会迁移到晶界, 重新分布得更加均匀^[32]。

3 强流脉冲离子束对性能的影响

3.1 强流脉冲离子束对硬度的影响

强流脉冲离子束辐照合金表面能使其显著硬 化,硬化层深度通常随辐照束流密度和次数的增加 而增大^[33-37]。然而,某些合金在辐照下,表面硬度在 达到一定值后,会由于新相的显著增加或表面网状 裂纹的形成而降低(见图2)^[13,18,38-39]。Zou等^[30]研究 发现,用强流脉冲离子束照射钼时,在低能量密度离 子脉冲辐照且无重熔现象发生时,金属钼表面硬度 反而随辐照次数和束流密度的增加而下降。





除表面硬化之外,离子注入作用范围外还存在 一个硬度强化区域^[19,40],这是由于快速加热与快速 冷却过程中产生的压缩波所致。Lavrentiev等^[41-42] 研究发现,45钢的硬度强化区会随着脉冲次数增加 而略微向样品表面移动(见图3)。



图 3 45 钢经多次辐照后的表面硬度及影响层深度的 变化^[42]

Figure 3 The surface hardness of 45 steel after repeated irradiation and the change of affected layer depth

3.2 强流脉冲离子束对耐磨性的影响

材料表面经强流脉冲离子束辐照后,出现晶粒 细化现象,硬度和韧性均有所提升。辐照后,材料表 面产生大量位错,显微硬度增加,并形成残余压应 力。材料表层发生相变,析出硬度较高的相,形成韧 性和硬度较高的辐照改性层,其深度随辐照次数增 加而增大。辐照产生的热冲击使合金表面形成峰谷 起伏的熔坑,且起伏程度随束流密度和辐照次数增 加而更加明显,这导致实际摩擦接触面积减小,摩擦 系数降低,耐磨性进一步提升^[33-37, 39,4345]。然而,当 束流密度超过某一临界值后,由于温度梯度引起的 热应力和内应力无法完全释放,过量的应力导致微 裂纹形成、晶粒长大,耐磨性在一定幅度内下降,但 仍优于原始试样(见图4)^[13, 26]。



(a)—different shot times; (b)—different beam current density.

图 4 316L不锈钢经辐照后的摩擦系数^[13]

Figure 4 Friction coefficients of 316L stainless steel after exposures

3.3 强流脉冲离子束对耐腐蚀性能的影响

孙文飞等^[46]使用 M273 电化学测试系统,在 0.5 mol·L⁻¹的 H₂SO₄溶液中对 DZ4 合金样品进行 30 min 的腐蚀试验,测量其动电位扫描阳极极化曲 线。结果发现,辐照后的样品自腐蚀电位显著高于 未辐照样品(见图 5),表明 DZ4 合金得到了有效保 护。而腐蚀电流与氧化动力的大幅下降意味着腐蚀 和氧化速率的显著降低(见图 6),合金的耐蚀性大 幅提升。这是由于辐照后形成了非晶相、晶粒细化 和新的耐腐蚀相^[35,40]。辐照过程中去除了杂质,减 少了晶界腐蚀,并在表面形成均匀致密的钝化 膜^[46],进一步增强了合金耐腐蚀性。然而,当脉冲 次数增加到一定程度后,其对耐腐蚀性能的影响逐 渐减弱。









图 6 DZ4 合金经不同次数辐照后的腐蚀电流和 氧化动力^[46]

Figure 6 Corrosion current and oxidation dynamics of DZ4 alloy after different numbers of irradiation times

4 强化机理

强流脉冲离子束加工时间极短,材料表面的瞬态温度和应力场变化难以实时测量,这限制了研究 者对材料表面强化机理的认识^[27]。然而,随着计算 机技术的发展,利用计算模型并采用有限元法模拟 辐照过程,发现辐照点周围的温度显著下降,有利于 强化相析出和晶粒细化,强化结果由热力学耦合作 用决定^[47-49],与实际情况一致。

当离子束携带的能量较低时,辐照合金表面的 重熔现象不明显。离子与表面原子相互作用产生的 应力堆积和离子注入产生的新相,提升了材料的力 学性能、耐腐蚀性和耐磨性。然而,辐照过程中产生 的热效应导致晶粒长大,从而降低材料的性能^[50]。 在低离子能量辐照条件下,随着束流密度和辐照次 数的增加,热效应更加显著,材料性能下降更多,但 仍优于处理前。

随着离子束携带能量的增加,离子轰击合金表 面,不仅引起原子核间的弹性散射碰撞导致原子位 移,还与沿途电子发生非弹性碰撞,动能转化为热 能[51]。短时间内热力学耦合作用和能量沉积使合 金表面重熔,导致辐照过程中的选择性烧蚀^[52]。熔 点较低的元素优先熔融或气化逸出,缺陷向表面迁 移扩散,合金表面出现大量密集的烧蚀坑^[53-55]。划 痕处应力集中,优先熔融,促使划痕被填补至完全消 失。材料表面升温和熔融产生的应力波及合金表面 气化烧蚀产生的压缩波向合金内部传播,形成反冲 脉冲从表面喷射而出,导致合金表面熔坑的形成。 合金表面凹陷处聚集熔点较低的元素和逸出的杂质 轻元素,使表面成分不均,形成新相。辐照结束时, 新相和辐照过程中产生的奇特形貌因高速结晶得以 保留,但由于结晶温度梯度大,形成的晶粒极为细 小。细小晶粒和新相是合金强化的主要原因。

随着脉冲次数增加,表面熔融态时间延长,元素 充分扩散,分布更均匀,在熔融合金本身表面张力的 作用下,合金表面由凹凸起伏变得光滑平整。注入 的离子束保存了部分动能,继续沿样品的径向移动, 受到熔体粘度和表面张力的阻碍后,造成表面扰动, 形成波浪形并在辐照结束后快速结晶,形成围绕熔 坑的细密柱状晶粒。在多次的脉冲辐照下,快速加 热与冷却产生的压缩波使远超离子注入和熔融层影 响深度的区域形成硬化层,该硬化层厚度随脉冲次 数的增加而增大。但辐照次数过高可能导致材料的 塑性变形能力下降,从而影响硬化层的稳定性^[56]。 当使用超过1 MeV的强流离子辐照时,在离子 与合金表面的原子相互作用下,电子能量损失占主 导地位,导致强烈的局部电离,热能迅速转化,反应 更为剧烈^[48]。辐照后,熔坑面积增大,表面更加致 密,并形成大量纳米结构,从而提升合金的力学性 能。然而,随着脉冲次数的进一步增加,合金表面可 能因快速加热和冷却的非平衡过程而产生微裂纹, 反而降低合金的力学性能。

5 总结与展望

强流脉冲离子束技术在材料表面工程领域的应 用具有显著优势和巨大潜力,其在实际生产中具有 较高生产效率,并可覆盖较大范围的辐照区域。通 过计算机建模和模拟,可以评估材料特定特性对辐 照后性质的影响及其变化程度。尽管如此,建立实 验数据库的大量实验仍然至关重要,相关研究仍有 很大发展空间。

强流脉冲离子束技术因其高能量密度和超快热 力学效应,为材料表面改性提供了独特优势,其未来 发展方向主要包括:

(1)建立多尺度耦合模型:定量分析强流脉冲离 子束作用下的非平衡相变机制。

(2)设备性能优化与智能化:提升强流脉冲离 子束设备的能量传输效率和稳定性,结合人工智能 技术实现工艺参数的实时监测与自适应调节,以减 少辐照损伤并提高处理均匀性。

(3)开发新型表面结构:通过调控离子种类和辐照参数,在金属表面制备纳米晶、非晶或梯度结构。 不同离子注入可在异种金属界面实现原子级扩散, 为复合材料的连接提供新思路。

(4)跨领域应用:强流脉冲离子束技术在延长医 用金属使用寿命、提升新能源电池器件的性能等方 面具有广阔前景。

综上,强流脉冲离子束技术将在高精度、高性能 表面工程领域持续取得突破,与智能化、复合化技术 的融合将推动金属表面处理实现从"单一功能改 性"跨越到"定制化功能集成"。

参考文献:

[1] 张罡,毕鉴智,李玉海,等.强流脉冲离子束金属材料 表面强化技术在中国的研究进展[J]. 沈阳理工大学学 报,2005,24(1):1-5.

- [2] REMNEV G E, ISAKOV I F, OPEKOUNOV M S, et al. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 114(1): 206-212.
- [3] DAVIS H A, REMNEV G E, STINNETT R W, et al. Intense ion-beam treatment of materials [J]. MRS Bulletin, 1996, 21: 58-64.
- [4] REMNEV G E, SHULOV V A. Application of highpower ion beams for technology [J]. Laser and Particle Beams, 1993, 11(4): 707-731.
- [5] HASHIMOTO Y, YATSUZUKA M. Study on smoothing of titanium surface by intense pulsed ion beam irradiation [J]. Vacuum, 2000, 59(1): 313-320.
- [6] PIEKOSZEWSKI J, WERNER Z, SZYMCZYK W. Application of high intensity pulsed ion and plasma beams in modifi " cation of materials [J]. Vacuum, 2001, 63(1): 475-481.
- [7] KORENEV S A, PERRY A J. Pulsed high current ion beam processing equipment [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 90(1): 21-28.
- [8] 董志宏,徐忠成,苗收谋,等.金属材料表面强流脉冲 离子束辐照强化[J].金属热处理,2003,28(5):1-4.
- [9] HAN B X, YAN S, LE X Y, et al. The phase and microstructure changes in 45 by intense pulsed ion beams [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 128(1):387-393.
- [10] REJ D J, DAVIS H A, OLSON J C, et al. Materials processing with intense pulsed ion beams [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1997, 15(3): 1089-1097.
- [11] 林松盛,杨建成,汪唯,等.CrTiAlCuN多元硬质薄 膜的制备及其性能 [J].材料研究与应用,2021,15 (3):191-195.
- [12] 陈军,李伟,郝胜智.高能束表面改性技术在航空领域的应用[J]. 航空制造技术, 2024, 67(4): 32-43.
- [13] 王旭,董志宏,王兰芳,等.HIPIB 辐照处理对 316L 不锈钢耐磨性的改善[J].武汉理工大学学报,2007, 27(7):54-57.
- [14] RYABCHIKOV A, KORNEVA O, IVANOVA A, et al. Study of the influence of a powerful pulsed ion beam on titanium deeply-doped with aluminum [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2021, 500: 12-21.
- [15] JIANG W, SUN Y, DAI H, et al. Enhanced surface quality and properties of cold spray Al coating by high current pulsed electron beam treatment [J]. Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2023, 534: 1-10.

- [16] LI C, LI X C, LI J H, et al. Microstructural evolution of thermally grown oxide of an arc ion plated MCrAlX coatings after high-current pulsed electron beam treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 886: 160801.
- [17] TIAN N, ZHANG C L, LV P, et al. Impact of highcurrent pulsed electron beam modification on element diffusion and performance of Ti6Al4V/AISI 316L stainless steel diffusion bonded joints [J]. Materials Characterization, 2023, 202: 113007.
- [18] 张锋刚,朱小鹏,雷明凯.强流脉冲离子束辐照WC-Co硬质合金的组织与性能 [J].金属热处理,2016,41(3):118-124.
- [19] 李明娟,刘伟波.强流脉冲离子束轰击对钛合金表面的损伤研究[J].真空科学与技术学报,2011,31
 (3):372-375.
- [20] 李明娟,刘伟波.强流辐照对钛合金表面形貌及成分 的影响[J].核电子学与探测技术,2011,31(2): 239-242.
- [21] CHEN H, ZHANG C, TIAN N, et al. Surface modification of Al-W laser-alloyed layer by high current pulsed electron beam irradiation [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 115: 106301.
- [22] FENG Z Y, WANG J, ZHANG F J, et al. Effect of high current pulsed electron beam on surface microstructure and properties of cold-rolled austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 102-115.
- [23] YU X, ZHONG H, ZHANG Z, et al. Hydrodynamic effects on the surface morphology evolution of aluminum alloy under intense pulsed ion beam irradiation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 409: 158-162.
- [24] KOROTAEV A D, TYUMENTSEV A N, PINZHIN Y P, et al. Features of the morphology, defect substructure, and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion beam irradiation [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 185 (1): 38-49.
- [25] IVANOV Y F, BESSONOV D A, VOROB'EV S V, et al. On the fatigue strength of grade 20Cr13 hardened steel modified by an electron beam [J]. Journal of Surface Investigation X-Ray, Synchrotron

and Neutron Techniques, 2013, 7(1): 90-93.

- [26] 李旻才,郝胜智,董闯.强流脉冲电子束处理 AZ91
 镁合金的显微结构及磨损性能变化 [J]. 材料研究与应用,2009,3(1):5-8.
- [27] 张勤,朱小鹏, 雷明凯.强流脉冲离子束辐照金属表 面残余应力的热-力耦合形成机制研究 [J]. 材料保 护, 2019, 52(9): 31-37.
- [28] 陈海龙,杨晖.反应等离子喷涂 TiN 的反应过程及涂 层形成机理研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(20): 1-2.
- [29] ZHANG S, YUE X, ZHANG J, et al. Surface microstructure and phase structure of zirconia ceramics under intense pulsed ion beam irradiation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2022, 521: 45-54.
- [30] ZOU H, ZHANG L, GUAN T, et al. Effect on mechanics properties and microstructure of molybdenum by high intensity pulsed ion beam irradiation [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 384:125333.
- [31] SHYMANSKI V I, UGLOV V V, CHERENDA N N, et al. Structure and phase composition of tungsten alloys modified by compression plasma flows and highintense pulsed ion beam impacts [J]. Applied Surface Science, 2019, 491: 43-52.
- [32] WANG K, BANNISTER M E, MEYER F W, et al. Effect of starting microstructure on helium plasmamaterials interaction in tungsten [J]. Acta Materialia, 2017, 124: 556-567.
- [33] 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].金属表面工程, 2016,29(1):98-102.
- [34] 张锋刚,朱小鹏,王明阳,等.强流脉冲离子束辐照 WC-Ni硬质密封材料表面改性研究[J].金属学报, 2011,47(7):958-964.
- [35] 梅显秀,马腾才,王秀敏,等.强流脉冲离子束辐照 W6Mo5Cr4V2高速钢表面改性研究[J].金属学报, 2003,39(9):926-931.
- [36] 王旭,张俊善,雷明凯.强流脉冲离子束辐照对 316L 不锈钢表面改性的实验研究 [J].金属学报,2007,43 (4):393-398.
- [37] 张健,张罡,毕鉴智,等.强流脉冲碳离子束强化 T5K10刀具机理研究[J].腐蚀科学与防护技术, 2005,17(3):165-168.
- [38] SU D Y ,HU Q C ,WANG C , et al. Relatively low temperature synthesis of hexagonal tungsten carbide films by N doping and its effect on the preferred orientation, phase transition, and mechanical properties

[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, A. Vacuum, Surfaces, and Films, 2009, 27(2): 167-173.

- [39] UGLOV V V, REMNEV G E, KULESHOV A K, et al. Modification of hard alloy by the action of high power ion beams [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(5): 781-784.
- [40] 李玉海,邢贵和,李生志,等.M2高速钢强脉冲离子 束表面改性及其耐磨耐蚀性[J].沈阳工业大学学 报,2010,32(2):141-145.
- [41] LAVRENTIEV V, HAMMERL C, RENNER B, et al. Modification of titanium by high power electron beams [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 114(2-3): 143-147.
- [42] 陈卓君,张祖立,陈彬,等.强流脉冲离子束对45钢 表面改性的研究[J]. 沈阳建筑大学学报,2007,23 (2):324-327.
- [43] 曾令荣,牛建平,神克常,等.强流脉冲离子束辐照 金属材料表面的研究现状及进展[J]. 热加工工艺, 2013,42(10):23-26.
- [44] WAGNER K C, BYRD G D. Evaluating the effectiveness of clinical medical librarian programs: A systematic review of the literature. [J]. Journal of the Medical Library Association, 2012, 100: 23509432.
- [45] UGLOV V V, KULESHOV A K, SOLDATENKO E A, et al. Structure, phase composition and mechanical properties of hard alloy treated by intense pulsed electron beams [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(11-12): 2972-2976.
- [46] 孙文飞,梅显秀,李晓娜,等.强流脉冲离子束辐照 对 DZ4 合金性能的影响 [J].强激光与粒子束,2006, 18(12):2082-2086.
- [47] YILBAS B S, AKHTAR S S, KARATAS C. Laser surface treatment of Inconel 718 alloy: Thermal stress analysis [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(7-8): 740-749.
- [48] GHOSH S, SAHAY C, CONNORS J. Comparative study between FEA-based sequentially-coupled and fully-coupled thermal stress models in a laser hardening

process [J]. Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013, 15: 1-9.

- [49] 马锋,梁伟,郭科峰.基于直接耦合法的铝合金薄板 焊接数值模拟研究[J].试验与研究,2016,45(6): 33-37.
- [50] IVANOV K V, AKIMOV K O, FIGURKO M G. The effect of low-energy high-current pulsed electron beam irradiation on the structure, phase composition and mechanical properties of Ni₃Al and Ni₃Al-TiC composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 960: 170753.
- [51] ZHANG Y, VARGA T, ISHIMARU M, et al. Competing effects of electronic and nuclear energy loss on microstructural evolution in ionic-covalent materials
 [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014, 327: 33-43.
- [52] GUAN Q, HAN J, ZHOU S, et al. Improved mechanical and tribological properties of TiAlN coatings by high current pulsed electron beam irradiation [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024, 118: 107412.
- [53] CAIJ, LIXC, LVP, et al. Hot corrosion behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating modified using high-current pulsed electron beam in different corrosive salt environments [J]. Materials Characterization, 2024, 208: 113581.
- [54] 朱小鹏,田齐擎,杨振,等.基于强流脉冲离子束的 中子辐照模拟装置及评价技术[J].原子能科学技术, 2024,58(2):150-156.
- [55] 田齐擎.强流脉冲原子束辐照金属损伤行为及其原位 差热分析研究[D].大连:大连理工大学,2022.
- [56] WEBER W J, DUFFY D M, THOMé L, et al. The role of electronic energy loss in ion beam modification of materials [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2015, 19(1): 1-11.

Research Progress of High-Intensity Pulsed Ion Beam Technology in Metal Surface Treatment

LIAN Qingzhou¹, TANG Xin¹, LI Peng^{2*}

(1. College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. School of Electronic and Electrical Engineering, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

Abstract: High-Intensity Pulsed Ion Beam (HIPIB) technology generates a high-energy ion beam through nanosecond pulse, inducing instantaneous thermodynamic effect and stress wave action on metal surface to achieve precise surface modification. In

recent years, this technology has gained extensive applications and research attention in metal surface treatment. Current technical bottlenecks include the unclear quantitative correlation between ion beam parameters and changes in material properties, insufficient understanding of cumulative effect mechanisms under multi-pulse conditions, and a lack of systematic optimization across different metal systems. This study provided theoretical support for optimizing HIPIB process parameters and extending its engineering applications. The influence mechanisms of HIPIB technology on metal surfaces were comprehensively reviewed. Quantitative relationships between beam parameters and surface properties were established by analyzing thermodynamic effects, microstructure evolution, and macroscopic performance enhancements. The technology induces melting, vaporization, and ablation on metal surfaces while promoting the formation of nanocrystalline and amorphous non-equilibrium phases. These microstructural and topographical modifications improve material hardness, wear resistance, and corrosion resistance, ultimately extending service life. Future research should prioritize developing multi-scale thermal-mechanical-chemical coupling models, achieving controlled synthesis of nanocrystalline/amorphous composite structures through ion parameter optimization, and expanding applications in medical and renewable energy fields. Finally, integrating HIPIB technology with artificial intelligence will advance manufacturing innovations.

Keywords: high-intensity pulsed ion beam, surface topography, phase change, surface treatment, surface property; mechanical property; thermodynamics; mechanisms

(学术编辑:孙文)