

强流脉冲离子束表面再制造技术原理与应用*

朱小鹏, 董志宏, 刘 臣, 韩晓光, 雷明凯

(大连理工大学 材料科学与工程学院表面工程研究室, 大连 116024)

摘 要: 采用 TEMP-6 型强流脉冲离子束 (HIPIB) 装置开展了 HIPIB 表面再制造技术的研发。HIPIB 装置主体由高压脉冲电源系统和高功率离子二极管系统组成, 通过高压短脉冲在二极管中放电产生阳极等离子体并引出 ns 级强流离子束。HIPIB 辐照材料表面, 发生显著的熔融、蒸发和剧烈烧蚀, 物质喷射的反冲作用在辐照表面形成由表及里的应力波, 导致材料表层强烈的热-力学效应。利用 HIPIB 与材料表面的相互作用, 应用于涡轮叶片表面的清洗维修, 可有效去除涡轮叶片基体因高温氧化形成的氧化物, 伴随表层的重熔将叶片基体表面微观缺陷焊合, 获得了光滑、平整的涡轮叶片修复表面。实现了 HIPIB 辐照在涡轮叶片表面再制造方面的应用。

关键词: 强流脉冲离子束; 烧蚀; 重熔; 应力波; 表面清洗维修

中图分类号: O53;TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0143-03

Principle and Application of High-Intensity Pulsed Ion Beam for Remanufacturing Engineering

ZHU Xiao-Peng, DONG Zhi-Hong, LIU Chen, HAN Xiao-Guang, LEI Ming-Kai

(Surface Engineering Laboratory, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: High-intensity pulsed ion beam (HIPIB) technique was studied for remanufacturing engineering. Based on a HIPIB apparatus, TEMP-6, HIPIB-materials interactions were investigated experimentally and numerically. It was found that HIPIB irradiation led to significant thermal and dynamic effects, including surface melting, evaporation and ablation of target materials, and subsequently strong stress waves propagating into the materials. Utilizing these outstanding characteristics, the application for remanufacturing was demonstrated by surface cleaning and repairing of turbine blades where the oxide scales on the surface were efficiently removed and the repaired surfaces were simultaneously smoothed under the remelting.

Key words: high-intensity pulsed ion beam; ablation; remelting; stress waves; surface cleaning and repairing

0 引 言

发展先进装备再制造工程技术旨在实现材料回收和再利用、乃至进一步提高材料性能和质量, 是降低材料和能源消耗、减少环境污染等问题很有前景的解决途径之一^[1]。本文报道一种新的表面技术—强流脉冲离子束(HIPIB)技术的原理及其在装备再制造方面的应用探索。HIPIB技术源于20世纪70年代末期的惯性约束核聚变研究。具有超高温、超高压和强磁场等特性的强流脉冲离子束辐照固体材料, 可在小于1 s的时间内在表面实现1~100 J/cm²高能量密度沉积。辐照表面产生强烈的远离平

衡态的热效应和力学效应, 10^{9~10} K/s 的急剧升温 and 冷却, 发生显著的熔融、蒸发和剧烈烧蚀, 物质喷射的反冲作用在辐照表面形成由表及里的应力波, 造成表面成分、组织及性能的显著变化^[2]。与脉冲激光加工技术相比较, 强流脉冲离子束技术具有电效率高、加工面积大和能量沉积效率高等突出优点^[2~4]。因此, 文中针对涡轮叶片的制造成本高、亟需开展针对叶片基体清洗修复和涂层重新涂覆的再制造现状^[5], 利用强流脉冲离子束特性及其与材料的相互作用, 发展了强流脉冲离子束材料表面清洗维修技术, 实现了 HIPIB 辐照在涡轮叶片表面再制造方面的应用。

1 强流脉冲离子束表面再制造技术原理

图1所示为大连理工大学 TEMP-6 型强流脉冲

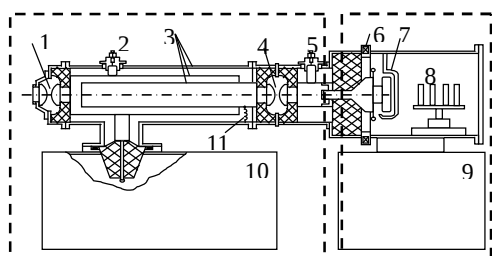
收稿日期: 2006-08-01

修回日期: 2006-09-10

基金项目: *国家自然科学基金(50575037)

作者简介: 朱小鹏(1974-), 男 (汉), 湖南人, 副教授, 博士。

离子束加工装置示意结构。用于产生离子束的主体包括高压脉冲电源和高功率离子二极管两部分。其中, 高压脉冲电源主要由 Marx 脉冲发生器和双同轴型脉冲形成线组成。高功率二极管安装于真空室内。该真空室同时也是工件处理加工室, 电动加工台可使待加工工件正反向转动, 实现工件批处理。装置基本工作过程如下: 首先由高压直流电源给 Marx 发生器中的 7 级电容并联充电, 随后脉冲触发器点火造成电容串联放电、经过脉冲形成线中间电极对形成线充电; 基于脉冲形成线气体开关自击穿导通机制, 脉冲形成线将 Marx 发生器形成的 μ s 级高压脉冲压缩成 ns 级高压脉冲、并传输到磁绝缘离子二极管, 产生阳极等离子体并引出离子束。



1, 4 — 气体开关; 2, 5 — 分压电阻; 3 — 双同轴脉冲形成线; 6 — Rogowski 线圈; 7 — 磁绝缘离子二极管; 8 — 工件; 9 — 真空机组; 10 — Marx 脉冲发生器; 11 — 形成线充电电感。

图1 TEMP-6 强流脉冲离子束装置结构示意图。左虚框范围内为高压脉冲电源系统, 右为高功率二极管系统
Fig.1 Schematic structure of TEMP-6 HIPIB apparatus. Left: high-voltage power supply; Right: high-power diode system

作为强流脉冲离子束设备的核心部件, 磁绝缘离子二极管工作稳定性是决定设备工作特性优劣的关键^[4]。图2所示为TEMP-6型强流脉冲离子束装置采用的外磁绝缘型磁绝缘离子二极管的结构; 同时给出了强流脉冲离子束辐照材料的力学效应测量原理图。外加脉冲电流在阴阳极间隙产生感应磁场, 用于抑制电子流和提高离子流, 即为磁绝缘。此离子二极管结构都有的特点是, 阴极由“包围”阳极的前后两部分组成, 有效地改善磁场分布的均匀性、降低电子流的损失和提高离子束输出的稳定性。为获得几何聚焦的离子束, 二极管阳极工作面和阴极引出区采用同轴圆柱面结构, 圆柱半径分别为 150 mm 和 140 mm。离子二极管电压的前一部分峰值对应于二极管阳极表面聚合物击穿闪络, 形成阳极等离子体, 随后阳极等离子体中的离子在电场中被加速, 穿越阴极引出区的栅格形成离子束。强流脉冲离子辐照的高能量密度沉积使材料数微米深度表层急速加热至熔点、沸点, 离子束的冲击作

用和强烈烧蚀导致了烧蚀物质爆炸性喷发、并在辐照工件中产生由表及里的应力波。采用基于焔法的二维轴对称相变传热模型^[6], 可计算出强流脉冲离子束辐照表面的温度场演变过程。通过图2所示采用压电陶瓷传感器的测量方法, 可测量到 HIPIB 辐照金属材料在其内部激发的应力波。

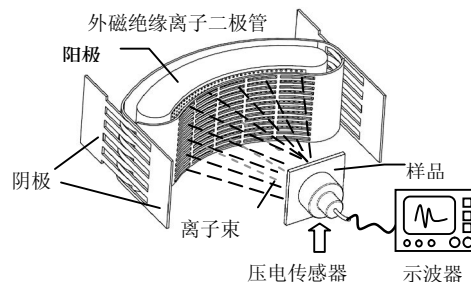


图2 外磁绝缘离子二极管结构原理及强流脉冲离子束辐照材料应力波的测量

Fig.2 Structure of external-magnetic MID and layout for measuring stress waves under HIPIB irradiation

图3给出了用压电陶瓷传感器测量到的 HIPIB 辐照热障涂层 $ZrO_2-8Y_2O_3$ 应力波典型波形。样品采用等离子体喷涂方法制备, 陶瓷涂层厚约 200-300 μ m, NiCrAlY 合金粘涂层厚约 100 μ m, 耐热钢基体厚 4 mm。应力波形中第一个负脉冲代表探测到的 HIPIB 烧蚀靶材反冲压力产生应力波的信号。经过换算, 测量到的烧蚀应力波峰值为 20 MPa 左右。考虑到热障涂层中孔隙、中间粘结层以及钢基体对应应力波传播过程中的吸收和反射作用, 实际上在热障涂层烧蚀前沿所产生的应力波峰值应高于这一值。采用束流密度为 300 A/cm² 的 HIPIB 处理高温合金的 Cr_2O_3 涂层, 随着辐照次数的增加, 涂层表面出现致密平整的光滑化趋势; 在辐照重熔和烧蚀反冲作用下, 涂层表层形成了连续致密的 μ m 量级深度重熔层, 且涂层整体上都变得相对致密^[7]。因

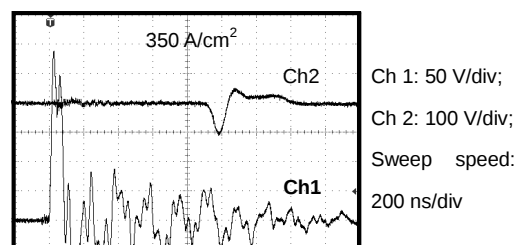


图3 强流脉冲离子束辐照等离子体喷涂热障涂层 $ZrO_2-8Y_2O_3$ (耐热钢基体) 在材料内激发和传播的典型应力波波形曲线: 信号通道 1 为外磁绝缘离子二极管电压波形, 通道 2 为应力波波形。

Fig.3 Stress wave (Ch1) in $ZrO_2-8Y_2O_3$ coating on heat-resistant steel under HIPIB irradiation and diode voltage (Ch2)

此, HIPIB 辐照固体材料能够导致表面微观突起或孔隙等缺陷发生选择烧蚀或填充, 在多次辐照条件下的反复重熔促使此类微观不平度依次降低、辐照表面逐步趋于光滑、平整和致密。利用强流脉冲离子束辐照固体材料的显著热-力学效应, 可以去除常规机械或化学方法难以清理的金属工件表面缺陷或附着物; 并且辐照表面同时光滑和致密化的特点不但可省去后续的打磨抛光处理等工序、简化了工艺和节约了成本, 还有望修复原始表面缺陷、进一步提高工件表面质量和物理化学性能。

2 强流脉冲离子束辐照清洗维修涡轮叶片的应用

清理涡轮叶片试验所采用的强流脉冲离子束辐照参数列于表 1。本试验所产生的离子束束斑面积范围为 $10\sim 100\text{ cm}^2$ 。辐照时的真空室本底真空度约为 10^{-3} Pa 。

表 1 TEMP-6 型强流脉冲离子束装置清洗维修涡轮叶片采用的辐照参数

Table 1 Typical parameters of TEMP-6 HIPIB apparatus for cleaning and repairing of turbine blades

Diode voltage/kV	350
Diode current/ kA	40
Ion current density/(A/cm ²)	350
Pulse width (FWHM)/ ns	70
Energy density/ (J/ cm ²)	~ 7
Species	70% H ⁺ +30% C ⁺
Shot number	20

图 4 给出了在 20 次条件下, 辐照某型号发动机涡轮叶片表面氧化物清洗维修效果的照片。1 号是经 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温氧化 15 h 后的涡轮叶片, 叶片表面发生了严重氧化, 表面覆盖有不连续的高温氧化物层, 外层氧化物已发生局部剥落, 暴露部分基体表面。2 号涡轮叶片是利用强流脉冲离子束辐照去除表面氧化物的叶片。经 20 次辐照后, 高温形成的氧化物完全被去除, 修复后的叶片表面光滑平整。多次辐照反复的均匀烧蚀、重熔和随后的快速凝



图 4 强流脉冲离子束清洗维修涡轮叶片表面宏观特征。
Fig. 4 Surface morphology of turbine blades before (No.1) and after (No.2) 20-shot HIPIB irradiation

固, 在去除叶片表面氧化物的同时造成了光滑、致密的修复表面, 与存在少量铸造缺陷的原始成品涡轮叶片相比较, 经过辐照清洗维修后的叶片表面缺陷消除、形成致密改性层, 改善了涡轮叶片表面的质量, 为重新制备热障涂层提供了条件。

3 结 论

采用 TEMP-6 型强流脉冲离子束装置开展了强流脉冲离子束表面再制造技术的研发。结果表明, 利用强流脉冲离子束辐照材料强烈的热-力学效应, 应用于涡轮叶片表面的清洗维修, 可有效去除涡轮叶片基体因高温氧化形成的氧化物, 辐照表面反复重熔使叶片表面微观缺陷焊合, 获得了光滑平整的修复表面, 叶片表面质量优于原始叶片, 实现了 HIPIB 辐照在涡轮叶片表面再制造方面的应用。感谢 G. E. Remnev、马腾才、苗收谋、高峰等的有益讨论和帮助。

参考文献:

- [1] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 张伟. 二十一世纪的再制造工程 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 36-39.
- [2] Davis H A, Remnev G E, Stinnett R W, et al. Intense Ion-beam Treatment of Materials [J]. MRS Bulletin, 1996, 21: 58-62.
- [3] Yilbas B S, Shuja S Z, Arif A, et al. Laser-shock Processing of Steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135: 6-17.
- [4] Zhu X P, Lei M K, Dong Z H, et al. Characterization of a High-intensity Unipolar-mode Pulsed Ion Source with Improved Magnetically Insulated Diode [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(1): 47-52.
- [5] Schulz U, Fritscher K, Leyens C, et al. Influence of Processing on Microstructure and Performance of Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD) Thermal Barrier Coatings [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124: 229-234.
- [6] Miao S M, Zhu X P, Lei M K. Numerical Analysis of Ablated Behaviors on Titanium Irradiated by High-intensity Pulsed Ion Beam [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2005, 229: 381-391.
- [7] Miao S M, Lei M K. Surface Morphology of Cr_2O_3 Coatings on Steel Irradiated by High-intensity Pulsed Ion Beam [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2006, 243: 335-339.

作者地址: 辽宁省大连理工大学材料科学与工程学院表面工程研究室 116024

Tel: (0411)84707255, 84706190; Fax: (0411)84709284;

联系人: 雷明凯 E-mail: xpzhu@dlut.edu.cn