

# 电子束抛光技术的研究进展

魏德强, 李新凯, 王晓冰

(桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 随着现代制造业的发展,人们对于工件表面的精密性和质量提出了更高层次的要求,而抛光工艺不但影响产品的使用性能而且也影响产品的档次。传统的抛光工艺存在一些难以克服的问题,已很难满足当前对高质量工件表面性能的需求,作为新型非接触式抛光工艺的一种——电子束抛光,在目前的研究领域展现出显著的优势。本文概述了几种抛光技术的优缺点,并重点介绍了一种新型材料表面处理技术——电子束抛光,阐述了电子束表面抛光的基本原理及国内外电子束抛光的发展。介绍了电子束抛光作为一种新型表面抛光方法在研究领域中的应用,并综述了近年来电子束抛光研究的发展动态,简述了国内外相关领域的主要研究成果及取得的进展,包括电子束抛光机理的研究、不同材料电子束工艺参数的确定、入射角度对抛光效果的影响、物理模型的建立以及电子束抛光产生的熔坑、裂纹研究,并对电子束抛光技术未来的发展方向和前景做出了展望。电子束抛光技术作为一种极具优势的高能束表面改性技术将占据无法替代的地位。

**关键词:** 电子束抛光; 材料表面处理; 表面性能; 传统抛光; 综述; 发展; 机理

**中图分类号:** TG175      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0175-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.029

## Research Progress of Electron Beam Polishing Technology

WEI De-qiang, LI Xin-kai, WANG Xiao-bing

(Guilin University of Electrical Technology, Guilin 541004, China)

**ABSTRACT:** With the development of modern manufacturing, higher requirements on the precision of workpiece surface and quality are put forward, and the use of polishing process does not only influence the product performance but also affects the grade of the product. There are some insurmountable problems in the traditional polishing process, leading to difficulty in meeting current demand for high-quality surface performance. As a kind of new contactless polishing technology, electron beam polishing shows a significant advantage in the current study field. This article summarized the advantages and disadvantages of several kinds of polishing technology. In this paper, a new material surface treatment technology was introduced, electron beam polishing, the basic principle of electron beam polishing and the development of electron beam polishing at home and abroad were expounded. Applications of electron beam polishing as a new type of surface polishing method in the field of research were introduced, and the research developments of electron beam polishing in recent years were reviewed. The main research results and progress, including the polishing mechanism of electron beam, process parameters determination for electron beam of different materials, the influence of inci-

收稿日期: 2015-12-26; 修订日期: 2016-01-27

Received : 2015-12-26; Revised: 2016-01-27

基金项目: 桂林市科学研究与技术开发计划项目(20150105-3); 桂林市科学研究与技术开发计划项目(20140101-7)

**Fund:** Supported by Guilin Science Research and Technology Development Project(20150105-3) and Guilin Science Research and Technology Development Project(20140101-7)

作者简介: 魏德强(1963—), 男, 教授, 副院长, 主要从事材料表面处理的研究。

**Biography:** WEI De-qiang(1963—), Male, Professor, Deputy dean, Research focus: material surface treatment.

dent angle on the polishing effect, the establishment of physical model and the melting pits and cracks generated by electron beam polishing were introduced, and the future development direction and prospect of electron beam polishing technology were presented. Electron beam polishing technology as a kind of extremely advantageous high energy beam surface modification technology will occupy irreplaceable position in the future.

**KEY WORDS:** electron beam polishing; surface treatment technology of material; surface performance; traditional polishing; review; development; mechanism

据统计,在机械制造行业中,因零件断裂或变形而引起的失效不足行业的20%,绝大多数零件失效而更替是由于其表面失效造成的。提高材料的表面性能,是延长零件使用寿命、合理配置性能、保障系统稳定性的关键。而抛光处理是材料表面加工的关键工序,所以各工业发达国家都深入地开展了这方面的研究。材料表面抛光主要目的是降低表面粗糙度,提高表面性能。

目前,对材料表面抛光的主要方法有机械抛光、电解抛光、化学机械抛光、化学抛光、激光抛光等。机械抛光是目前工业生产中应用最广泛的加工方法,并将在很长一段时期内占据主导地位,但其速率较低,成本高,此外机械抛光产生的热量和振动会导致工件的加工硬化及内应力。电解抛光可以增加工件表面抗腐蚀性且成本低廉,主要应用于原始表面粗糙度较低的金属制品,如反射镜、不锈钢餐具、装饰品等。但电解抛光质量与电解液及电流电压的规范有关,需要经过大量实验获得,所以难以广泛应用。化学机械抛光引起的冲击与振动会使工件受损。激光抛光成本较高,难以大量投入实际生产。电子束抛光技术是21世纪出现的新型材料表面处理技术,它是用高能密的电子通过聚焦形成电子束轰击材料表面,而使其表层熔化或蒸发从而获得粗糙度较低、力学性能较好的加工技术。传统抛光主要针对形状简单的平面进行,电子束抛光可以应用于曲面、轴承甚至孔的抛光中<sup>[1-2]</sup>,是一种很有应用前景的新型材料表面加工技术。

## 1 电子束抛光的机理

高能电子束表面抛光是近年来发展起来的技术。在真空度为  $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-4}$  Pa 的真空室中,电子束装置开机预热约半小时,灯丝加热到发射电子的温度,溢出的电子由电子枪的阴极发出,经阳极电压加速并通过聚焦线圈汇聚成电子束流,通过改变聚焦线圈和偏转线圈的参数可以控制束流的大小和通断,以适应不同功率的需要。电子的速度会被提升到

接近或达到光速的一半,电子将具有很高的动能。电子束(功率密度为  $10^6 \sim 10^9$  W/cm<sup>2</sup>)再经过聚焦线圈和偏转线圈的作用,汇聚成更细的束流,束斑的直径可达微米级。

当高能电子束撞击工件表面时,电子与金属表面发生碰撞而失去动能,电子的动能转化为熔化材料的热能,在很短的加工时间内材料近表面区域积累大量的热能,材料表面温度迅速升至工件熔点,表层材料中低熔点的杂质甚至直接气化而被去除,从而起到材料表面提纯的作用,而基体的温度基本保持在室温。由于液态金属的流动性,熔融金属会向曲率较低的方向流动,直至表层液态金属各处曲率趋于一致,其过程中可填充表层材料的机械加工痕迹和凹坑,从而达到自抛光的效果。同时,因表层与基体之间巨大的温差使得表层的热量迅速向基体扩散,已加工区域的熔融部分会快速凝固,最终获得光滑平整的表面,从而达到抛光的效果。加工中需注意材料熔融状态不应太长,因为表层热量会向工件内部传导,会使工件基体性能受到影响。因此,在电子束抛光过程中需要保持很高的温度梯度,以便材料快速冷却<sup>[4-7]</sup>,从而获得一般冷却速度下无法得到的化合物、过饱和固溶体以及微小晶粒,在实现表面抛光目的的同时可提升材料表面的抗腐蚀性、耐磨性、热强性等物理化学性能。图1为电子束抛光原理示意图。

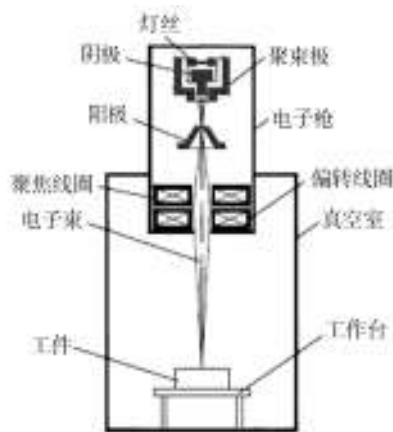


图1 电子束抛光原理示意图

Fig. 1 Principle for surface polishing of electron beam

## 2 电子束抛光的优点

电子束抛光在真空中进行,无氧化、无脱碳。抛光后的工件表面呈亮白色,几乎不发生变形,表面质量良好。与常规的抛光技术相比,电子束抛光的优点与技术特性有:变形量小,电子束抛光时,只针对工件表面处理,而工件整体未能达到高温状态,能量总量较少;可控性强,电子束加工作为非接触式加工的一种,具有很高的智能化,通过计算机连接可以控制熔深,限制被加工材料的温度;清洁无污染,电子束加工是在真空环境中进行,极大降低了空气中的杂质和气体对工件表面质量的影响,加工过程中不会引入其他元素;能量利用率高,电子束能量密度的利用率可达到90%以上,损耗的能量很少。

## 3 电子束抛光的国内外研究进展

随着电子束表面抛光技术的发展,研究人员发现电子束抛光技术在材料表面处理方面有着无可替代的优势,因此国内外的相关机构对其进行了大量而深入的研究。

### 3.1 国外研究进展

作为三束加工的一种——电子束技术在国外已

发展半个世纪之久,当前仍然是研究热门专业,日本、欧美等均展开了深入的研究,其研究内容主要有以下几点。

#### 3.1.1 电子束抛光工艺机理研究

UNO 等人<sup>[8]</sup>使用大面积电子束照射的方法,验证了电子束直径为60 mm的电子束,在照射时间为2~3  $\mu\text{s}$ ,并以0.2 Hz的频率照射下,能量密度为7.3 J/cm<sup>2</sup>时的光泽度最好;在相同条件下,照射次数在10次以下时,粗糙度随着照射次数的增加粗糙度降低,而当照射次数大于10时,粗糙度变化并不明显。随着材料表面温度的升高,表面在短时间内被迅速加热,熔化甚至气化,当辐照结束后,材料熔化区在较高温度梯度作用下迅速凝固,形成过饱和的固溶体、纳米晶甚至非晶等亚稳组织<sup>[9]</sup>。而冲击波的作用则使材料内部的晶体缺陷密度上升,提高了材料的表面硬度、耐摩擦性能及耐腐蚀性能<sup>[10]</sup>。

YU<sup>[11]</sup>用大面积电子束扫描的方法抛光模具表面,他们分别在抛光前后用扫描电镜观察其表面形貌,如图2所示,并采用耐腐蚀性盐水喷雾实验,验证了大面积电子束抛光技术不但能够提高表面光滑度,还可以提升工件表面的耐腐蚀性。

#### 3.1.2 工件倾斜角度对电子束抛光效果影响的研究

Y. Uno 等人<sup>[12]</sup>使用大面积电子束照射的方法(电子束直径为60 mm)对NAK80模具钢不同倾角进

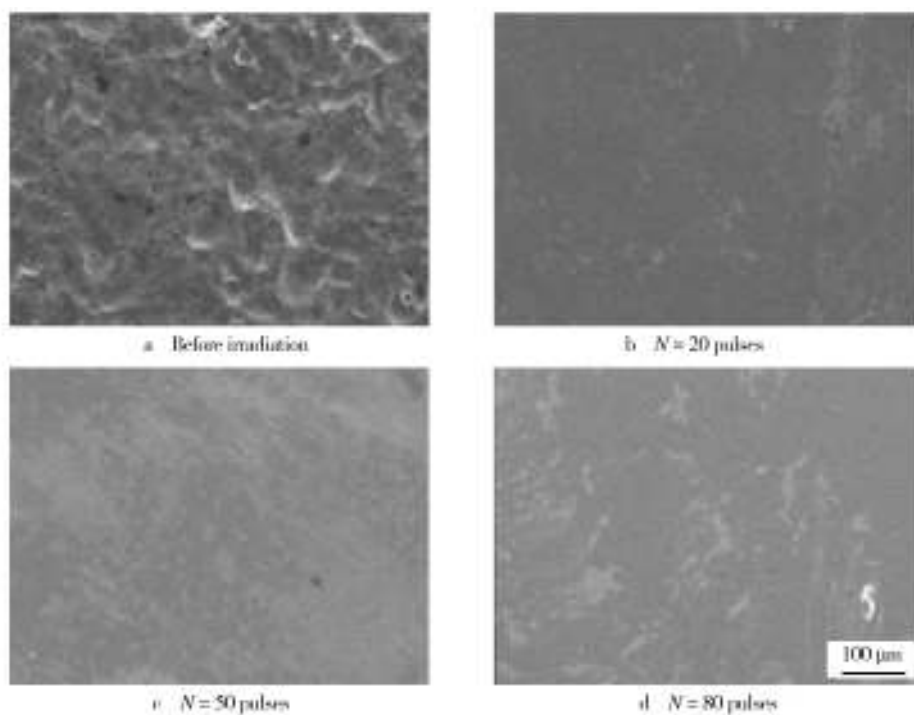


图2 不同电子束照射次数下的扫描电镜图

Fig. 2 SEM images of the EB-irradiated surfaces with increasing number of EB irradiation pulses

行抛光处理,证明了当工件在较小的倾斜角度下,粗糙度的变化并不大,而倾角大于 60°时,抛光效果明显下降,见图 3。能量密度计算所得粗糙度与实际测量粗糙度有一定偏差。

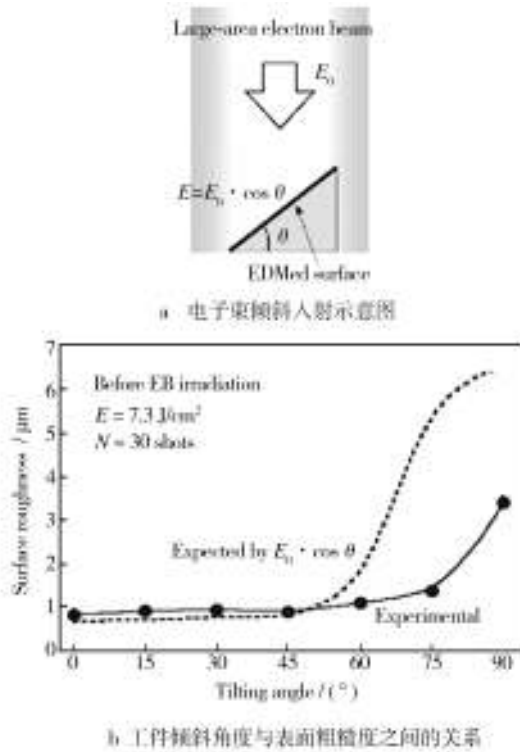


图 3 电子束照射倾斜角对表面粗糙度的影响

Fig. 3 Variations of surface roughness with surface tilting angle: a) electron beam oblique incidence, b) the relationship between tilting angle and surface roughness

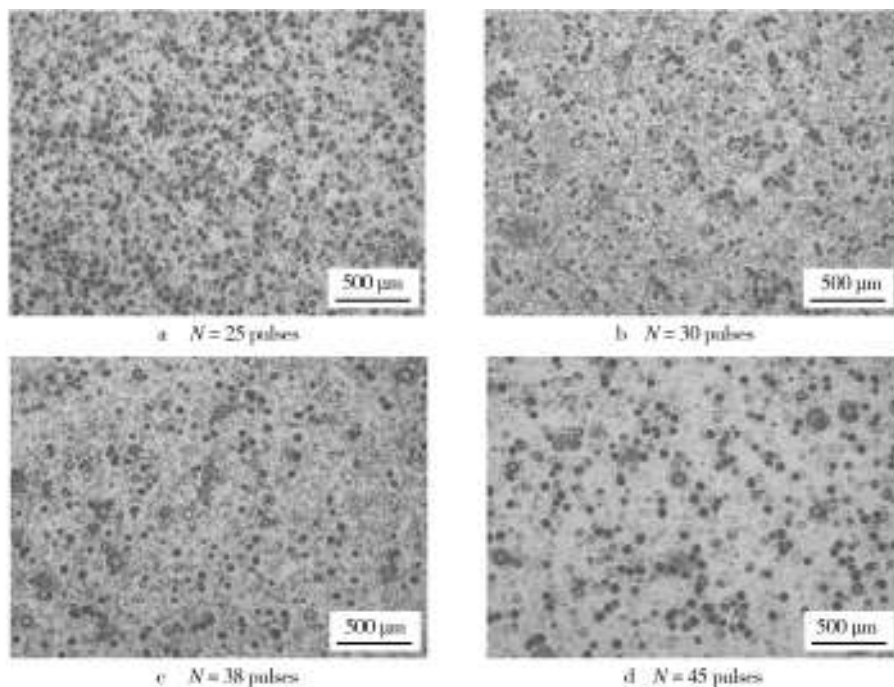


图 4 40Cr 钢电子束处理后表面显微形貌

Fig. 4 Surface microstructure of the specimen irradiated by HCPEB: a) 25 pulses, b) 30 pulses, c) 38 pulses, d) 45 pulses

### 3.1.3 电子束表面抛光对表面力学性能改善的研究

ROTSHTEIN V. P.<sup>[13]</sup>采用强流脉冲电子束对高速钢表面进行扫描,发现电子束辐照降低了钢的表面摩擦系数,钢表面晶粒细化,抗磨损性能增强。I. A. Bataev<sup>[14]</sup>采用不同电子束束流对低碳钢表面进行辐照,发现表层组织变为针状细小颗粒,冲击韧性随着电流的增加而降低。Rotshtein<sup>[15]</sup>采用低能强流脉冲电子束对奥氏体不锈钢表面进行辐照实验,在其他参数不变的情况下,随着轰击次数的增加,钢表面粗糙度呈下降趋势,钢的抗腐蚀性能有所增强。Kiseok Jeon<sup>[16]</sup>采用高能电子束辐照钢镓氧化锌(IGZO)表面,实验发现,加速电压为 4.5 kV 时,材料表层出现非晶状态和纳米晶体相,改善了材料的导电性。

## 3.2 国内研究进展

国内电子束表面抛光技术相对于国外还存在一定差距,但国内研究所和学校已在电子束加工方面展开了深入的研究。目前国内研究内容主要涉及以下几个方面。

### 3.2.1 电子束表面抛光实验参数的研究

许天才<sup>[17]</sup>采用束斑直径为 100 mm 的强流脉冲电子束对两种不同粗糙度的 40Cr 表面进行抛光处理研究,通过调整脉冲次数获取表面粗糙度的变化规律,见图 4。结果发现:未抛光处理表面粗糙度为 1.3 μm 的 40Cr 原始试样,经电子束照射 45 次后,粗糙度降低

至  $0.754\ \mu\text{m}$ , 下降幅度为 45%; 未抛光处理表面粗糙度为  $0.1\ \mu\text{m}$  的 40Cr 原始试样, 经电子束照射 30 次后, 机械磨痕被熔坑取代, 粗糙度上升至  $0.5\ \mu\text{m}$ , 随着脉冲次数的逐渐增大, 表面粗糙度上下波动。说明原始试样表面粗糙度对抛光效果有着决定性的影响。

胡建军、高玉魁等人<sup>[18]</sup>用强流脉冲电子束分别照射 40Cr 钢及钛合金 TC4、TC21, 通过改变电子束加速电压、照射距离(俗称靶距)和脉冲次数三大因素进行正交试验。结果发现: 电子束处理后, 材料表面的粗糙度与处理参数有直接关系, 且表面的熔化程度及熔坑的形成是影响处理后表面形貌的两个重要因素。当电压大、照射次数小时, 粗糙度会有不同程度的升高。当照射距离远时, 可以获得较小的材料表面粗糙度, 有利于提高材料的摩擦磨损性能。

### 3.2.2 电子束抛光缺陷的研究

赵晖<sup>[22]</sup>等人利用强流脉冲电子束(HCPEB)装置对高速钢进行表面辐照处理, 研究了该钢 HCPEB 处理后的表面形貌及表面性能的变化, 分析了熔坑形成的原因: 1) 碳化物喷发所致; 2) 大量非平衡空位和复合缺陷向表面迁移的结果。金铁玉<sup>[23]</sup>等人利用强流脉冲电子束对调质钢(40Cr)进行表面处理, 通过对脉冲次数与熔坑数量的研究, 得出使用低能量密度而多次辐照能够有效抑制熔坑的形成。Yi Tan<sup>[24]</sup>采用电子束流熔凝硅锭表面, 发现可以通过减小电子束流控制表层熔凝速率以获得优质形貌。

况军<sup>[25]</sup>利用强流脉冲电子束对 AZ31 镁合金表面进行扫描, 表层金属温度迅速升至镁的熔沸点并出现典型熔坑现象。凝固过程中, 依靠基体良好导热性, 使材料表面发生淬火效应, 起到固溶强化作用, 且重熔区晶粒细化, 提高了表面的耐磨性。同时, 电子束扫描导致表层铝镁元素含量和分布发生改变, 材料表层铝元素含量的提高并生成氧化膜是提高 AZ31 镁合金耐腐蚀性的主要原因。之后, 况军<sup>[26]</sup>又对 TA15 钛合金的耐磨蚀性进行了研究, 发现在相同脉冲次数处理下, 加速电压为 23 kV 时, 试样表面同样出现熔坑现象, 加速电压为 27 kV 时, 熔坑熔合成长条状。但由于材料表面“自淬火”效应, 起到固溶强化作用, 在加速电压为 27 kV、脉冲次数为 10 次时, 材料耐磨性有最大提高, 比原试样提高 3 倍。

### 3.2.3 电子束表面抛光的物理模型及数值模拟研究

徐芳君<sup>[27]</sup>在分析强流脉冲电子束表面改性工艺的基础上, 通过 ANSYS 软件建立模型, 得到 M50 钢加工过程中动态温度场的分布曲线, 并建立了有限元模

拟, 运用热力直接耦合方法对强流脉冲电子束作用下 40Cr 钢表层温度与热应力场进行耦合分析, 揭示了亚表层率先升温及熔化, 表层温度变化迅速, 从而实现快速熔凝。

肖志佩<sup>[28]</sup>通过 ANSYS 模拟强流脉冲电子束表面处理下多项合金的温度场分布, 发现在加速电压为 25 kV, 脉冲宽度为  $1.5\ \mu\text{m}$ , 脉冲间隔 10 s 的条件下, 材料表层在  $0.3\ \mu\text{m}$  处开始熔化,  $0.6\ \mu\text{m}$  处温度最高,  $0.9\ \mu\text{m}$  时表层温度又降至材料凝固点, 这与实验结果的快速凝固相吻合。

安健等人<sup>[29]</sup>在电子束表面改性的基础上, 通过数值计算法并利用固液相变潜热的温度补偿对 Al-Si-Pb 合金的温度场和应力场进行模拟, 得出在  $2.5\ \text{J}/\text{cm}^2$  能量密度下, 合金熔坑的最大深度为  $1.65\ \mu\text{m}$ , 表面层熔化最大深度为  $4.40\ \mu\text{m}$ , 揭示了表面熔坑形成机制和坡面硬度分布特征。

## 4 展望

近些年来, 世界主要工业发达国家, 如欧美、德国、日本、英国等, 均对电子束加工技术进行了研究, 国内部分高校及科研单位也对此领域展开了研究, 如哈尔滨工业大学、重庆理工大学、大连理工大学等<sup>[30-34]</sup>。从目前国内外发表的论文情况以及实用型装置来看, 电子束抛光技术在理论及实践方面已经取得了一定的进展及研究成果。如在电子束抛光技术对模具钢表面粗糙度的改良、工艺参数的研究<sup>[35-37]</sup>、表面熔坑的控制、温度场和应力场物理模型的建立、数值模拟等方面<sup>[38-41]</sup>都有所突破。但无论国内还是国外, 对电子束抛光的研究仍然局限在对某种金属材料求取最优工艺参数(加速电压、加速电流、辐照距离等), 而对多种金属材料的横向对比的研究少见报道。电子束在表面抛光的同时可以改善工件表面力学性能和表面质量, 获取理想的合金层组织<sup>[42-48]</sup>, 为了更好地满足工业需要, 有必要在以下几个方面进一步开展电子束抛光的研究工作。

1) 深入研究电子束与表层金属在抛光过程中的热力耦合规律, 有利于为实际生产或实验提供理论依据。

2) 目前国内外实验所用试样多为自制规格的样品, 与实际生产中的零件有很大差距, 因此如何实现科研与实际生产相结合仍需要进一步探讨。

3) 电子束抛光的扫描方式会影响最后的抛光效

果,目前单一的大面积电子束扫描具有很大的局限性。

4) 提高抛光效率。目前,电子束抛光最常用的方法是采用大面积脉冲电子束机对工件表面进行辐照处理,最大抛光面积为 100 mm<sup>2</sup>,只能抛光较小尺寸的材料,若能改善抛光方法,将会极大地提高生产效率。

## 5 总结

电子束抛光是一种行之有效的抛光工序,能够有效地降低工件表面粗糙度,并能大幅度提高材料表面的强度、硬度、耐磨性及使用寿命等,对工业产品的多样化发展起到决定性作用。

虽然电子束设备的高造价和操作工程中需要精确调控的要求在一定程度上限制了它的发展,但随着工业的发展,电子束机械价格日益下降以及对电子束技术不断深入的研究,电子束抛光技术一定会在未来表面处理方面占有重要地位。

## 参考文献

- [1] 陈元芳,鲜杨,金铁玉,等. 电子束加工技术及其应用[J]. 现代制造工程,2009(8):153—156.  
CHEN Yuan-fang, XIAN Yang, JIN Tie-yu, et al. Electron Beam Processing Technology and Its Application[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(8):153—156.
- [2] 刘楠,贾亮,杨广宇,等. 扫描策略及束流参数对 TC4 合金电子束快速成形过程的影响[J]. 热加工工艺,2015,44(12):47—52.  
LIU Nan, JIA Liang, YANG Guang-yu, et al. Scan Strategy and Beam Parameters on the Influence of TC4 Alloy Electron Beam Rapid Prototyping Process[J]. Journal of Thermal Processing, 2015, 44(12):47—52.
- [3] 王荣,李春建,魏德强. 电子束扫描铝硅合金表面熔融处理过程的失重分析[J]. 机械工程学报,2013,49(2):73—78.  
WANG rong, LI Chun-jian, WEI De-qiang. The Electron Beam Scanning Fused Aluminum Silicon Alloy Surface Treatment Process of Weightlessness Analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2):73—78.
- [4] 魏德强,陈虎城,王荣. 45<sup>#</sup>钢电子束相变硬化温度场数值模拟与实验验证[J]. 材料热处理学报,2012(8):161—166.  
WEI De-qiang, CHEN Hu-cheng, WANG Rong. 45<sup>#</sup> Steel Beam Transformation Hardening Temperature Field Numerical Simulation and Experimental Validation[J]. Journal of Material Heat Treatment, 2012(8):161—166.
- [5] 吴攀,付鹏飞,温家伶,等. 300M 钢电子束预热与焊接复合加工后的残余应力测试[J]. 金属热处理,2012,37(10):84—86.  
WU Pan, FU Peng-fei, WEN Jia-ling, et al. 300M Steel Pre-heating and Electron Beam Welding Residual Stress Test after Composite Processing[J]. Metal Heat Treatment, 2012, 5(10):84—86.
- [6] KIM D M, KIM J, PARK S S, et al. Surface Modification of the Patterned Al6060/SU304 Metalplates Using the Large Electron Beam[J]. Applied Surface Science, 2012, 261:458—463.
- [7] ZOU J X, GROSDIDIER T, BOLLE B, et al. Texture and Microstructure at the Surface of an AISI D2 Steel Treated by High Current Pulsed Electron Beam[J]. Metallurgical and Material Transactions A, 2007, 38:2062.
- [8] 宇野羲幸,冈田晃,数下法康,等. 大面积脉冲电子束对模具的精整与表面改性[J]. 模具加工技术,2004(4):27—31.  
YOSHIYUKI, OKADA, YABUSHITA, et al. Finishing and Surface Modification of the Moulds with Scale Pulse Electron-beam[J]. Mould and Technology, 2004(4):27—31.
- [9] OKADA A, UNO Y, MCGEOUGH B J A, et al. Surface Finishing of Stainless for Orthopedic Surgical Tools by Large-area Electron Beam Irradiation[J]. Manufacturing Technology, 2008, 57:223—226.
- [10] HAO Sheng-zhi, YAO Shan, GUAN Jiong, et al. Surface Treatment of Aluminum by High Current Pulsed Electron Beam[J]. Current Applied Physics, 2001(1):203—208.
- [11] 虞战波,樱井丰久,森冈雅男,等. 大面积电子束的模具精加工技术[J]. 机械工人(冷加工),2004(11):43—44.  
YU Zhan-bo, SAKURAI, OKADA, et al. Large Area of the Mould Finishing Technology of Electron Beam[J]. Mechanical Workers(Cold), 2004(11):43—44.
- [12] UNO Y, OKADA A, UEMURA K, et al. A New Polishing Method of Metal Mold with Large-area Electron Beam Irradiation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188:77—80.
- [13] ROTSHTEIN V P, PROSKUROVSKY D I, OZUR G E, et al. Surface Modification and Alloying of Metallic Materials with Low-energy High-current Electron Beams[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 180:377—381.
- [14] BATAEV I A, GOLKOVSKII M G, et al. Bataev Surface Hardening of Steels with Carbon by Non-vacuum Electron-beam Processing[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 242:164—169.
- [15] ROTSHTEIN V P, YU FIVANOVA, PROSKUROVSKY D I,

- et al. Microstructure of the Near-surface Layers of Austenitic Stainless Steels Irradiated with a Low-energy High-current Electron Beam[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 180:382—386.
- [16] KISEOK J, SEUNG W S, JAESEUNG J, et al. Effects of Electron-beam Irradiation on Structural, Electrical, and Optical Properties of Amorphous Indium Gallium Zinc Oxide Thin Films[J]. *Current Applied Physics*, 2014, 14: 1591—1595.
- [17] 许天才. 强流脉冲电子束作用下 40Cr 表面性能的研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2012.  
XU Tian-cai. Strong Current Pulse Electron Beam under the Action of 40Cr Surface Performance Research [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2012.
- [18] 胡建军, 许洪斌, 许天才, 等. 不同加工工艺材料表面电子束改性粗糙度分析[J]. *材料热处理技术*, 2012, 41(16): 150—153.  
HU Jian-jun, XU Hong-bin, XU Tian-cai, et al. Different Processing Materials on the Surface of the Electron Beam Modified Roughness Analysis[J]. *Journal of Material Heat Treatment Technology*, 2012, 9(16): 150—153.
- [19] 胡建军, 陈元芳, 许洪斌, 等. 强流脉冲电子束照射下 40Cr 的表面形貌及 XRD 分析[J]. *材料热处理技术*, 2010(4): 28—31.  
HU Jian-jun, CHEN Yuan-fang, XU Hong-bin, et al. Strong Flow under Pulsed Electron Beam Irradiation of 40Cr Surface Morphology and XRD Analysis [J]. *Materials Heat Treatment Technology*, 2010(4): 28—31.
- [20] 高玉魁. 脉冲电子束改性 TC4 钛合金微观组织和性能[J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(4): 120—124.  
GAO Yu-kui. Pulsed Electron Beam Modification of TC4 Titanium Alloy Microstructure and Sex [J]. *Journal of Materials Heat Treatment*, 2010, 31(4): 120—124.
- [21] 高玉魁, 陆峰, 王强. 脉冲电子束抛光改性处理对 TC21 钛合金表面形貌的影响[J]. *金属热处理*, 2009, 34(5): 38—40.  
GAO Yu-kui, LU Feng, WANG Qiang. Pulsed Electron Beam Polishing Modification of TC21 Titanium Alloy Surface Topography Influence [J]. *Metal Heat Treatment*, 2009(5): 38—40.
- [22] 赵晖, 王涛. 脉冲电子束处理对高速钢表面组织的影响[J]. *金属热处理*, 2004(6): 51—54.  
ZHAO Hui, WANG Tao. The Influence of Pulse Electron Beam Processing of High Speed Steel Surface Organization [J]. *Metal Heat Treatment*, 2004(6): 51—54.
- [23] 金铁玉, 许洪斌, 陈元芳, 等. 调质钢电子束表面处理组织及性能分析[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(5): 70—74.  
JIN Tie-yu, XU Hong-bin, CHEN Yuan-fang, et al. Quenched and Tempered Steel Beam Surface Treatment Organization and the Performance Analysis [J]. *China Surface Engineering*, 2009, 22(5): 70—74.
- [24] TAN Yi, SHI Shuang, GUO Xiao-liang, et al. Effect of Cooling Rate on Solidification of Electron Beam Melted Silicon Ingots[J]. *Vacuum*, 2013, 89: 12—16.
- [25] 况军, 李刚, 相珺, 等. 强流脉冲电子束表面改性 AZ31 镁合金的耐磨耐蚀性能[J]. *金属热处理*, 2009, 34(9): 25—28.  
KUANG Jun, LI gang, XIANG Jun, et al. Strong Current Pulse Electron Beam Surface Modification of AZ31 Magnesium Alloy Gold Wear-resisting Corrosion Resistance [J]. *Metal Heat Treatment*, 2009(9): 25—28.
- [26] 况军, 王岩. 强流脉冲电子束表面改性 TA15 钛合金的耐磨耐蚀性能[J]. *热处理技术与装备*, 2013, 34(1): 22—25.  
KUANG Jun, WANG Yan. Strong Current Pulse Electron Beam Surface Modification of TA15 Titanium Alloy Wear-resistant Corrosion-resistant Performance [J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2013(1): 22—25.
- [27] 徐芳君. 强流脉冲电子束辐照 M50 钢表面层组织调控与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.  
XU Fang-jun. Strong Current Pulse Electron Beam Irradiation M50 Steel Surface Layer Organization Regulation and Performance Study [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [28] 肖志佩, 周志明, 唐丽文, 等. CuFe10 合金强流脉冲电子束表面改性过程温度场模拟[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(22): 139—141.  
XIAO Zhi-pei, ZHOU Zhi-ming, TANG Li-wen, et al. Strong CuFe10 Alloy Flow Pulse Electron Beam Surface Modification Process Temperature Field Simulation [J]. *Journal of Hot Working Process*, 2014, 43(22): 139—141.
- [29] 安健, 李世龙, 曹占义, 等. Al-Si-Pb 合金强流脉冲电子束表面改性过程的数值模拟分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(7): 1140—1144.  
AN Jian, LI Shi-long, CAO zhan-yi, et al. Numerical Simulation of Surface Modification Process by High Current Pulsed Electron Beam for Al-Si-Pb Alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(7): 1140—1144.
- [30] 易赞. 4Cr13 不锈钢强流脉冲电子束表面处理[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2011.  
YI Yun. 4 Cr13 Stainless Steel Flow Pulse Electron Beam Surface Treatment [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [31] 岳晓峰, 王瑾, 梁亮, 等. 强流脉冲电子束作用下的不锈钢显微结构分析[J]. *金属热处理*, 2008, 33(9): 62—65.

- YUE Xiao-feng, WANG Jin, LAING Liang, et al. Strong Flow Pulse Electron Beam under the Action of Stainless Steel Microstructure Analysis [J]. *Metal Heat Treatment*, 2008(9):62—65.
- [32] 王瑾, 梁亮, 邵扬, 等. 纯铝强流脉冲电子束表面改性中火山坑形貌分析[J]. *金属热处理*, 2009, 34(9):32—36.
- WANG Jin, LIANG Liang, SHAO Yang, et al. Pure Aluminium Strong Current Pulse Electron Beam Surface Modification in the Volcanic Crater Morphology Analysis [J]. *Metal Heat Treatment*, 2009(9):32—36.
- [33] 李登波. 基于电子束金属表层熔深的模拟及加工优化[D]. 重庆:重庆理工大学, 2007.
- LI Deng-bo. Based on the Simulation of Electron Beam Depth of Molten Metal Surface and the Processing Optimization [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2007.
- [34] BAE I T, ZHANG Y, WEBER W J, et al. Temperature Dependence of Electron-beam Induced Effects in Amorphous Apatite [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2008, 266:3037—3042.
- [35] 陈元芳, 许洪斌, 胡建军, 等. 强流脉冲电子束对3Cr2W8V微摩擦磨损性能的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2011(11):19—23.
- CHEN Yuan-fang, XU Hong-bin, HU Jian-jun, et al. Strong Current Pulse Electron Beam Impact on 3Cr2W8V Micro Friction and Wear Properties [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011(11):19—23.
- [36] 鲜杨, 陈元芳, 胡建军, 等. 电子束表面处理40Cr粗糙度与形貌研究[J]. *材料热处理技术*, 2010, 39(2):112—114.
- XiAN Yang, CHEN Yuan-fang, HU Jian-jun, et al. Study of Electron Beam Surface Treatment of 40Cr Roughness and Shape [J]. *Materials Heat Treatment Technology*, 2010, 39(2):112—114.
- [37] 刘晓霞. 强流脉冲电子束钛合金表面改性数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- LIU Xiao-xia. Strong Current Pulse Electron Beam Titanium Alloy Surface Modification Numerical Simulation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [38] TOKUNAGA J, KOJIMA T, KINUTA S, et al. Large-area Electron Beam Irradiation for Surface Polishing of Cast Titanium [J]. *Dental Materials Journal*, 2009, 28(5):571—577.
- [39] 吴平生, 郝胜智, 张向东, 等. 强流脉冲电子束处理对SKD11钢表面形貌和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(3):168—170.
- WU Ping-sheng, HAO Sheng-zhi, ZHANG Xiang-dong, et al. Strong Current Pulse Electron Beam Processing Affect the Performance of SKD11 Steel Surface Morphology [J]. *Journal of Materials Heat Treatment*, 2008, 29(3):168—170.
- [40] ROTSHTEIN V P, IVANOV Y F, MARKOV A B. Surface Alloying of Stainless Steel 316 with Copper Using Pulsed Electron-beam Melting of Film-substrate System [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006(13):22—23.
- [41] CHEN Yuan-fang, PENG Xiao-dong, HU Jian-jun, et al. Influence of Electron Beam Pulsed Times on the Properties of 40Cr [J]. *Advanced Materials Research*, 2011(11):1170—1177.
- [42] 于永泗. 机械工程材料[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2010.
- YU Yong-si. *Mechanical Engineering Materials* [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2010.
- [43] 陈元芳, 鲜杨, 金铁玉, 等. 电子束加工技术及其应用[J]. *现代制造工程*, 2010(8):153—156.
- CHEN Yuan-fang, XiAN Yang, JIN Tie-yu, et al. Electron Beam Processing Technology and Its Application [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2010(8):153—156.
- [44] 赵晖, 易赞, 陈燕, 等. 强流脉冲电子束W18Cr4V高速钢表面处理[J]. *金属热处理*, 2011, 36(5):68—71.
- ZHAO Hui, YI Yun, CHEN Yan, et al. Strong Current Pulse Electron Beam W18Cr4V HSS Surface Treatment [J]. *Metal Heat Treatment*, 2011, 36(5):68—71.
- [45] 关庆丰, 陈波, 邹广田, 等. 强流脉冲电子束辐照下纯铝中的堆垛层错四面体[J]. *物理学报*, 2008, 57(1):392—397.
- GUAN Qin-feng, CHEN Bo, ZOU Guang-tian, et al. Under the Strong Current Pulse Electron Beam Irradiation in the Pure Aluminium Stacking Fault Tetrahedron [J]. *Journal of Physics*, 2008, 57(1):392—397.
- [46] 周永权, 赵洋, 王璞. 表面强化技术的研究及其应用[J]. *机械管理开发*, 2010(5):104—105.
- ZHOU Yong-quan, ZHAO Yang, WANG Pu. Surface Strengthening Technology Research and Its Application [J]. *Mechanical Management and Development*, 2010(5):104—105.
- [47] 陈明, 陈国清, 胡建军, 等. 强流脉冲电子束对TC4钛合金表面形貌的影响[J]. *热处理学报*, 2012, 33(6):158—163.
- CHEN Ming, CHEN Guo-qing, HU Jian-jun, et al. Strong Current Pulse Electron Beam to the Influence of TC4 Titanium Alloy Surface Morphology [J]. *Journal of Heat Treatment*, 2012(6):158—163.
- [48] XU Hong-bin, Xiao-bo, HU Jian-jun, et al. Thermal-mechanical Coupling Finite Element Analysis of Pulsed Electron Surface Remolding 40Cr Steel [J]. *Journal of Chongqing University of Technology*, 2011, 25(3):19—23.