

真空电子束熔覆工艺应用的研究现状

麻志伟¹, 赵春实¹, 徐晓龙², 缪俊彦¹, 张思宇¹, 邢森瑶¹, 常云龙¹

1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院 辽宁沈阳 110870

2. 沈阳金锋特种设备股份有限公司 辽宁沈阳 110027

摘要: 探讨了真空电子束熔覆 (EBCL) 技术的研究现状及其在多个工业领域的应用。首先, 介绍了EBCL技术的基本原理和特点, 包括其高能量密度、精确控制能力、真空环境操作以及对多种材料的适应性。其次, 详细讨论了EBCL技术在航空航天、汽车制造、模具制造和医疗器械等领域的应用实例, 特别是在提高部件性能和延长使用寿命方面的显著效果。再次, 指出了EBCL技术面临的挑战, 如高设备成本和工艺参数优化的复杂性, 并提出了可能的解决措施。最后, 展望了EBCL技术的未来发展, 强调了其在现代工业中提升材料性能和实现部件修复方面的潜力, 以及与其他先进制造技术结合的可能性, 并强调了EBCL工艺在工业应用中的创新性和对提升工业效率及可持续发展的重要性。

关键词: 真空电子束熔覆; 表面性能; 材料修复; 先进制造

Application research of vacuum electron beam cladding process

MA Zhiwei¹, ZHAO Chunshi¹, XU Xiaolong², MIAO Junyan¹, ZHANG Siyu¹,
XING Senyao¹, CHANG Yunlong¹

1. College of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China

2. Shenyang Jinfeng Special Equipment Co., Ltd., Shenyang 110027, Liaoning, China

Abstract: In this paper, the research status of vacuum electron beam cladding (EBCL) technology and its application in many industrial fields are discussed. This paper first introduces the basic principles and characteristics of EBCL technology, including its high energy density, precise control ability, vacuum environment operation and adaptability to various materials. Subsequently, the application examples of EBCL technology in the fields of aerospace, automobile manufacturing, mold manufacturing and medical equipment are discussed in detail, especially the remarkable effect in improving component performance and prolonging service life. The article also points out the challenges faced by EBCL technology, such as high equipment costs and the complexity of process parameter optimization, and proposes possible solutions. Finally, the article looks forward to the future development of EBCL technology, emphasizing its potential to improve material performance and realize component repair in modern industry, as well as the possibility of combining with other advanced manufacturing technologies, and the review emphasizes the innovation of the EBCL process in industrial applications and the importance of improving industrial efficiency and sustainable development.

Keywords: vacuum electron beam cladding; surface properties; material repair; advanced manufacture

基金项目: 辽宁省国际科技合作计划项目 (2023JH2/10700015)。

1 序言

随着现代工业的快速发展,对材料性能的要求日益提高,材料表面的耐磨性、耐蚀性及高温性能等特性往往决定了其在实际应用中的使用寿命和可靠性。真空电子束熔覆工艺作为一种先进的表面处理技术,因其能量密度高、局部处理可控、对材料有较好的保护及无污染等优点,在提高材料性能和拓展材料应用范围方面发挥了重要作用^[1]。真空电子束熔覆技术通过在材料表面形成具有特定合金成分及性能的改性层,显著提升了材料的表面性能。这种技术的应用,不仅能够延长材料的使用寿命,还能在航空航天、汽车制造及生物医学等关键领域中发挥重要作用^[2]。

尽管真空电子束熔覆工艺取得了一定的研究成果,但仍有优化空间。比如有目的地调控熔覆层的微观组织结构、建立电子束熔覆材料库、与其他传统和先进制造技术相结合以实现有目的地对材料微观结构进行控制、电子束设备开发等^[3],这些优化指出了真空电子束熔覆工艺当前面临的挑战和未来发展方向,需要通过进一步的研究和技术创新来克服。

2 真空电子束熔覆工艺原理与特点

真空电子束熔覆是指在真空环境中,电子束枪发射高能电子束,然后在加速电场的作用下,高速轰击材料表面,使材料表面或者压制的粉末片快速熔化、快速冷却凝固的过程。电子束熔覆原理如图1所示。在这个过程中,会传递给材料表面或粉末片超高的能量,使材料或粉末片速热急冷,最后凝固,同时电子束会对材料表面及粉末片产生较大的

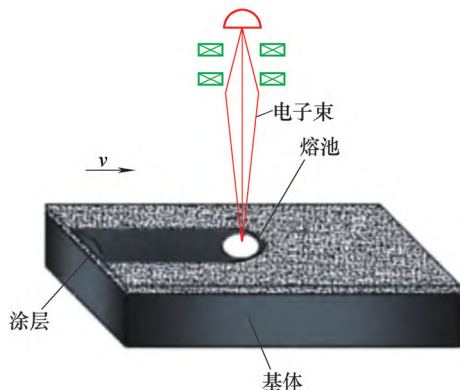


图1 电子束熔覆原理

冲击力,两者的协同作用对基体表面性能进行改善^[4]。电子束的能量高度集中,可在极短时间内将材料加热至熔化状态,从而实现与熔覆材料的良好结合。

真空电子束熔覆工艺具有如下特点。

(1) 高能量密度 电子束能量密度可高达 $10^6 \sim 10^9 \text{W/cm}^2$,能够使材料迅速熔化,熔覆层与基体之间形成牢固的冶金结合,且结合强度高。在实际应用中,电子束熔覆技术能够实现材料表面快速加热至奥氏体化温度或熔化温度,且冷却速度可达 $10^6 \sim 10^8 \text{°C/s}$,这种快速的加热和冷却过程有助于获得细小的晶粒结构,从而提高材料的表面性能^[2]。

(2) 精确控制 通过调整电子束的电流、电压、扫描速度等参数,可以精确控制熔覆层的厚度、成分和形状,实现对熔覆过程的高精度控制。这种精确控制能力使得电子束熔覆技术能够实现熔覆过程的高精度控制,优化工艺参数,以获得理想的熔覆层特性。刘海浪等^[5]通过设计正交试验分析工艺参数对熔覆层的影响,可以优化涂层的组织与性能。

(3) 真空环境 在真空条件下进行熔覆,可有效避免氧化、氮化等杂质的混入,提高熔覆层的质量和性能。同时,真空环境减少了对环境的污染,加工表面不产生氧化,特别适合于加工易氧化的金属及合金材料,以及纯度要求极高的半导体材料。

(4) 适应性强 可用于多种材料的熔覆,包括金属、陶瓷及复合材料等,能够满足不同领域对材料表面性能的特殊要求。

除了以上特点外,真空电子束熔覆工艺还具有熔覆效率高、粉末利用率高、热输入小及节能环保等特点,在材料表面改性方面具有显著的优势。

3 真空电子束熔覆的应用领域

3.1 涂层领域

叶宏等^[6]为提高镁合金表面耐蚀性,采用火焰喷涂与高能电子束重熔技术在AZ91D镁合金表面制备了Al涂层,分析了涂层的微观组织结构和各区域的元素分布情况,并检测了涂层硬度与耐蚀性。结果表明,在电子束重熔过程中,Al-Mg元素在涂层与基体间产生了明显的扩散,呈现交错的界面结合特征。涂层主要由熔覆区、合金化区和热影响区

三部分组成,其中合金化层为典型的树枝晶结构。由于涂层中会形成大量金属间化合物如 Mg_2Al_3 、 $Mg_{17}Al_{12}$,使硬度由基体的70~80HV0.05提高到220HV0.05。这些相的存在也显著提高了AZ91D镁合金表面的耐蚀性。

刘海浪等^[7]为了提高Inconel617合金表面的耐磨性,采用高速火焰喷涂与电子束表面改性技术在Inconel617合金表面制备了WC-CoCr陶瓷涂层,并分析了合金层的微观组织结构和元素分布情况,检测了合金层的硬度与耐磨性。结果表明,在电子束熔覆处理过程中,涂层重熔与基体形成冶金结合,使其耐磨性能大大提高。熔覆层硬度相比Inconel617合金硬度高出620HV0.3。

温涛涛等^[8]利用电子束熔覆技术将TiNi记忆合金熔覆在TC4的表面,开展熔覆层耐磨性能研究,以此来改变材料的表面性能,达到实际应用的要求。通过SEM、EDS、维氏显微硬度和摩擦磨损试验等方法与手段,对熔覆层的宏观形貌、显微组织、元素分布、显微硬度及摩擦磨损性能等进行检测分析。制备出的熔覆层表面成形良好,无气孔、裂纹,并且与基体实现了良好的冶金结合。

EVDOKIA等^[9]研究了非晶态硼粉常压电子束熔覆过程中结构转变对奥氏体铬镍钢表面耐磨性的影响。根据松散的磨料颗粒检测了复合层的耐磨性(干砂橡胶/车轮磨损测试)。使用X射线分析,发现改性层几乎完全由硼化物铁组成,涂层的耐磨性是2X3H18T钢的9倍。

LI等^[10]使用电子束熔覆制备高熵合金涂层用来增强Ti-6Al-4V表面的性能,研究表明,由于化合物、细晶粒和高位错密度的存在,该涂层的平均纳米硬度达到 (8.39 ± 0.29) GPa,约为Ti-6Al-4V的1.8倍,包层涂层的磨损率与Ti-6Al-4V相比,减少了65%。

ZHAO等^[11]采用连续扫描电子束在253MA奥氏体不锈钢表面沉积AlCoCrFeNi复合包层,以增强其表面性能。结果表明,在18mA的光束电流和200mm/min的扫描速度下,253MA钢的表面硬度达到最大值520HV。当光束电流为24mA、扫描速度为200mm/min时,堆焊试样的磨损体积和磨损率最小,占原始样品的37.4%,其耐磨性是基体的2.67倍。

综上所述,电子束熔覆技术通过在材料表面添加高熵合金或其他耐磨、耐蚀涂层,显著提高了基体材料的表面硬度、耐磨性和耐蚀性,从而延长了材料的使用寿命并拓宽了其应用范围。

3.2 航空航天领域

飞机承载结构在制造和服役过程中产生的缺欠和伤损,会降低结构的承载能力和服役寿命。因此,对经安全评估后不可接受的缺陷进行修复,是提升结构寿命和减低成本的重要手段和途径之一,近年来得到工业界的广泛重视^[12]。其中,航空修理是指飞机及航空发动机在服役期间的维护及定期修理,以确保航空飞行的安全可靠^[13]。飞机在起降与飞行过程中经受复杂的拉压、弯扭、振动和冲击载荷,承受大气腐蚀、沙尘等环境的侵蚀,因此其金属零件会发生磨损、腐蚀甚至裂纹等损伤。在日常检修和周期性维修过程中,对损伤严重但尚未达到报废要求的金属零件进行可靠、及时和成本可控的修复,对于保障飞机运行的安全性、经济性,以及保障任务执行和出勤率具有重要的作用和意义^[14, 15]。飞机金属零件的修复是航空维修的核心技术,也是各国竞相发展的维修保障技术。随着飞机设计、材料和制造技术的发展,现有的维修技术越来越难以满足先进飞机安全、可靠、经济运行的需求^[16]。因此,发展和掌握飞机起落架、框梁等承力关重件,以及传动器、齿轮箱等复杂零件的修复技术,是提高飞机自主维修能力、保障航空安全运行与军队战斗力的内在要求,也是控制航空运行成本、加快形成国内航空维修产业化能力,以及降低民航国外送修率的客观需求。

电子束熔覆可以提高零部件表面性能与修复受损零部件,比如在航空发动机叶片上进行熔覆处理,可显著提高其高温抗氧化性、耐磨性和抗热疲劳性能,延长叶片的使用寿命,提高发动机的可靠性和性能。对飞机起落架等关键部件进行熔覆,增强其耐蚀性和耐磨性,确保在恶劣的工作环境下安全可靠运行。对于航空发动机中的涡轮盘和叶片等因磨损、腐蚀或疲劳损伤的零部件,采用真空电子束熔覆工艺进行修复,能够恢复其尺寸和性能,降低维修成本,缩短维修周期。

3.3 汽车制造领域

1) 发动机系统:对汽车发动机的气缸套、活

塞环等部件进行熔覆处理,可提高其耐磨性和密封性,降低燃油消耗,减少尾气排放,可提高发动机的动力性能和经济性。早在20世纪中期,美国Chrysler公司利用电子束系统成功解决了离合器凸轮轴淬火变形问题^[17],将电子束技术巧妙地应用到汽车工业中。曾壮基^[18]在可用于汽车部件的6061铝合金表面使用电子束熔覆Ni60+CeO₂涂层,对熔覆层性能进行了对比检测。结果表明,Ni60+4%CeO₂熔覆层的截面硬度最高,是基体的14.4倍;Ni60+4%CeO₂熔覆层的耐磨性相对于铝合金基材、Ni60以及其他CeO₂含量的熔覆层都要高;熔覆层的耐酸碱盐腐蚀性能由大到小顺序为: Ni60+4%CeO₂熔覆层>Ni60熔覆层>6061铝合金。证明了加入适量的CeO₂可以提高熔覆层的性能,硬度与强度都有较大提升。

2) 传动系统:在汽车变速器齿轮^[19]、传动轴等零件表面熔覆高强度、耐磨损的材料,能增强其承载能力和耐磨性,延长传动系统的使用寿命,提高汽车的整体性能和可靠性。

3.4 模具制造领域

1) 提高模具寿命:模具在使用过程中容易受到磨损、腐蚀和热疲劳等因素的影响,导致其使用寿命缩短。通过真空电子束熔覆工艺在模具表面制备耐磨、耐蚀的涂层,可显著提高模具的表面硬度、耐磨性和耐蚀性,延长模具的使用寿命,降低生产成本^[20]。

2) 制造复杂模具:利用真空电子束熔覆工艺可以实现对复杂形状模具的精确加工和表面处理,满足模具制造对精度和表面质量的高要求。例如,在注塑模具的型腔表面熔覆特殊材料,可提高塑料制品的表面质量和成形精度。刘剑等^[21]遵循电子束熔覆工艺特点,以零件结构与功能需求为正向切入点,借助CAD和CAE工具,对光刻机工件台现有精密运动框架进行二次设计。理论计算表明,与原零件相比,3D打印运动框架重量减轻69%,模态基本保持不变。这一结果证明了采用3D打印制造高性能光刻机零件的科学性。

3.5 医疗器械领域

1) 骨科植入物:真空电子束熔覆工艺在骨科植入物中的应用主要体现在提高植入物的骨诱导能力。王彩梅等^[22]探索了电子束熔融快速成形技术用

于骨科植入物时表现出的产品性能、个性化定制能力,尤其是诱导骨长入能力。研究表明,EBM态Ti6Al4V骨科植入物具有良好的产品综合性能;电子束熔融快速成形技术具有优良的个性化定制能力,尤其是生成的3D连通的孔隙结构,可提供诱导骨长入的结构性条件,在骨科植入物方面享有独特的优势,电子束熔融快速成形技术能够制造出具有复杂三维连通孔隙结构的Ti6Al4V骨科植入物,这种结构有利于骨细胞的长入,从而提高了植入物的骨整合能力^[23]。另外,电子束熔融快速成形技术还具有个性化定制的优势,能够根据患者具体情况定制植入物,以提高手术成功率和患者的生活质量。

2) 口腔修复:用于口腔种植牙、烤瓷牙等修复体的表面处理,增强其耐磨性、耐蚀性和生物相容性,提高修复体的使用寿命和美观度^[22]。有学者利用3D打印技术直接制作可摘局部义齿的钴铬合金支架,随访显示患者对其临床效果较为满意^[24]。黄丽娟等^[25]通过3D打印技术制作10件钴铬合金可摘局部义齿支架,并在患者口内试戴,制作完成的修复体外观完整,大部分义齿就位顺利,其中虽有5件义齿就位时稍困难,但局部调磨后顺利就位,义齿就位后无翘动,卡环、牙合支托与基牙密合,金属连接体与软组织贴合度良好。

4 真空电子束熔覆工艺应用实例分析

4.1 航空发动机叶片修复

某型号航空发动机叶片在长期使用过程中出现了磨损和腐蚀损伤,为此采用真空电子束熔覆工艺,选用与叶片基体材料相匹配的高温合金粉末作为熔覆材料,对叶片受损部位进行修复。首先,对叶片进行清洗和预处理,去除表面的油污、氧化物等杂质。然后,将合金粉末均匀涂覆在受损部位,利用电子束进行熔覆处理。通过精确控制电子束参数,确保熔覆层与基体之间形成良好的冶金结合,且熔覆层的厚度和成分均匀。修复后的叶片如图2所示,经过严格的检测和试验,其性能指标达到了新叶片的要求,成功实现了再利用,为航空公司节约了大量的成本和时间。

4.2 模具电子束熔覆及修复

用于易损零件耐磨涂层的制造及缺损熔覆,实现冲压模具的快速修复;针对镶块模具(见图3),

采用电子束熔覆工艺，工作面熔覆高硬度材料（见图4），满足复合材料模具的要求。



图2 修复后的航空发动机叶片



图3 镶块模具



图4 工作面熔覆高硬度材料

4.3 高炉风口电子束熔覆

采用电子束五轴运动控制技术、真空环境同轴送粉技术，以及高激光反射材料电子束熔覆工艺技术，获得的炼铁高炉风口工作面熔覆涂层（见图5、图6），硬度为 (53 ± 2) HRC，具有耐磨损、耐高温的特点，使用寿命提高2倍以上，可大幅减少高炉

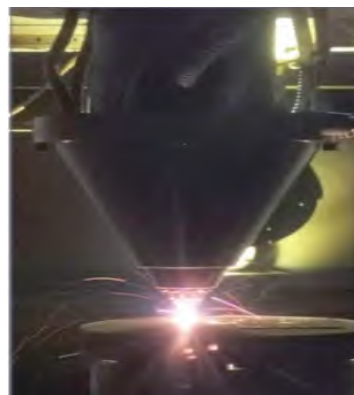


图5 炼铁高炉风口工作面电子束熔覆现场



a) 风口实物

b) 风口工作面

图6 炼铁高炉风口工作面熔覆涂层

的维护时间，提高生产效率。

4.4 矿山机械掘进机截齿齿座电子束熔覆

采用真空环境同轴送粉技术、50%WC + Ni粉末配比及电子束熔覆工艺技术，获得了齿座磨损工作面硬质合金涂层（见图7、图8），涂层硬度为60HRC以上，齿座使用寿命提高1倍以上，大大提高了生产效率。

4.5 轧钢厂高线辊环电子束熔覆

采用真空环境同轴送粉技术，50%WC + Ni粉末配比及电子束熔覆工艺技术，在辊环易磨损工作面熔覆硬质合金涂层（见图9），涂层硬度 ≥ 60 HRC，辊环使用寿命提高1倍以上，大幅减少了维护时间，提高了生产效率。采用碳素钢 + 熔覆WC耐磨涂层技术，代替WC粉末冶金技术，可降低50%以上生产成本。

5 真空电子束熔覆工艺面临的挑战与解决措施

5.1 设备成本高

真空电子束熔覆设备因其高精度和高稳定性的要求，通常需要使用昂贵的真空泵、高能电源和精密的电子束控制系统，这些组件的成本占据了设



图7 齿座

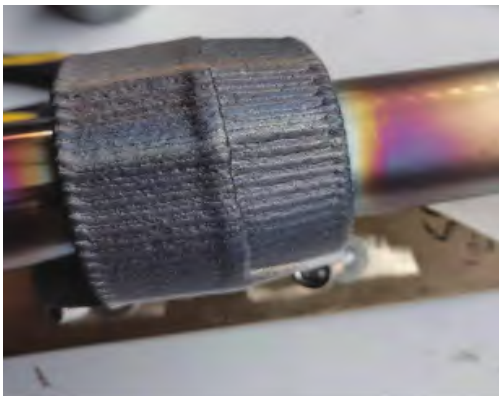


图8 齿座工作面硬质合金涂层



图9 熔覆后的辊环

备总成本的大部分。近年来，中国在电子束熔覆设备方面取得了一定的进展，国内一些企业和研究机构已经能够生产具有自主知识产权的电子束熔覆设备，并在某些应用领域投入使用。例如陕西延长石油（集团）有限责任公司利用自主改进的电子束设备对铜制风口表面进行耐磨涂层的熔覆，解决了风口使用寿命低的难题^[26]。对于一些高端应用，如航空航天领域的精密部件制造，由于技术要求极高，可能仍然依赖于进口设备，特别是那些具有国际领先水平的设备。此外，设备的维护和升级也需要专

业的技术支持，增加了长期的运营成本。

解决措施：①研发低成本的真空泵和电源技术，例如，采用效率更高的真空泵和节能电源。②采用模块化设计，使设备的部分组件可以轻松更换或升级，减少整体更换的成本。③推动设备制造商提供租赁服务，中小企业可以根据生产需求短期租赁设备，降低固定资产投资。④政府和行业协会可以提供补贴和税收优惠，鼓励中小企业采用先进的制造技术。

5.2 工艺参数优化难度大

在真空电子束熔覆过程中，决定熔覆层质量的关键工艺参数包括加速电压、电子束电流、聚焦电流、扫描速度、真空度、工作距离、光斑形状及入射角，这些参数与扫描频率和幅值紧密相关^[27]。同时，电子束功率和束斑直径对熔覆层表面形貌也有显著影响。若获得高质量的熔覆层，关键在于精确控制基体的熔化程度，因此精心选择和优化工艺参数成为制造优质熔覆层的核心任务。其中，确保电子束在扫描过程中能量分布的均匀性是工艺参数设置的重中之重。

解决措施：①建立工艺参数数据库，收集不同材料和零件类型的最优工艺参数，为企业提供参考。②开发工艺参数优化软件，利用计算流体动力学（CFD）和有限元分析（FEA）模拟电子束熔覆过程，预测不同参数对熔覆层质量的影响。③举办工艺参数优化的培训课程，提高工程师对工艺参数影响的理解，提升优化参数的能力。④建立行业联盟，促进企业之间的技术交流和数据共享，共同开发和优化工艺参数。

5.3 熔覆层质量检测与控制

电子束熔覆技术作为一种新型的表面处理技术，在提高一些金属部件的表面耐磨性、耐蚀性等方面有着很好的经济效益。但是，由于熔覆过程中的影响因素较多，除了外部因素，还会发生一些复杂的物理和化学变化，同时又缺乏有效的控制手段，从而导致熔覆层质量较低，阻碍了这一技术的广泛应用^[28]。熔覆层的质量直接关系到产品的使用寿命和可靠性。然而，现有的检测技术可能无法精确识别熔覆层中的微小缺陷，如微孔和裂纹，这些缺陷在产品的使用过程中可能导致失效。此外，缺乏统一的检测标准和质量控制流程，使得不同企业

生产的熔覆层质量参差不齐。

解决措施：①开发高精度的无损检测技术，如相控阵超声波检测^[29]和数字射线成像技术^[30]，这些技术能够提供更高分辨力的内部结构图像，帮助识别微小缺陷。②建立熔覆层质量检测的标准和指南，包括检测方法、检测频率和接受标准，确保质量控制的一致性。③实施全面的质量管理体系，包括熔覆过程的实时监控、熔覆后的质量检测，以及缺陷产品的追踪和分析。④利用大数据和人工智能技术，对熔覆过程和质量数据进行分析，预测和预防潜在的质量风险。

6 结束语

真空电子束熔覆工艺作为一种先进的表面处理技术，在提高材料表面性能、修复零部件以及制备新型材料等方面具有显著的优势和广泛的应用前景。随着航空航天、能源、汽车、模具及医疗器械等领域的不断发展，对材料性能的要求会越来越高，真空电子束熔覆工艺将迎来更加广阔的发展空间。然而，该工艺目前仍面临一些挑战，如设备成本高、工艺参数优化难度大、熔覆层质量检测与控制等问题，需要相关科研人员和企业共同努力，通过技术创新和优化，不断克服这些问题，推动真空电子束熔覆工艺的进一步发展和应用。随着科技的进步和工业的实际需求发展，电子束熔覆技术不能一直停留在目前所取得的成就上，而要进行更深入的研究，主要包括以下几个方面。

1) 技术创新与智能化：随着智能制造技术的发展，未来的真空电子束熔覆工艺有望实现更高的自动化和智能化水平。通过集成先进的传感器技术、大数据分析和人工智能算法，可以实现对熔覆过程的实时监控和自适应控制，从而提高熔覆层的质量和一致性，降低生产成本。

2) 新材料与新工艺的开发：研究和开发适用于电子束熔覆的新型材料，如高性能合金、复合材料和纳米材料，将有助于进一步提升熔覆层的性能。同时，探索新的熔覆工艺，如多束协同熔覆、梯度功能材料的制备等，以满足特定应用的需求。

3) 环境友好与可持续发展：考虑到环保和可持续发展的要求，未来的真空电子束熔覆工艺需要进一步减少能源消耗和废弃物排放。通过优化工艺参

数和改进设备设计，可以实现更加节能环保的生产过程。

4) 跨学科融合：真空电子束熔覆工艺的发展需要材料科学、表面工程、机械工程及自动化控制等多个学科的融合。通过跨学科合作，可以促进新技术、新工艺的创新和应用。

5) 与前沿制造技术相结合：电子束3D打印技术是一种新兴的数字化制造技术，其基于逐层堆积的原理来构建金属零件。目前，尽管电子束熔覆技术存在一些限制，但通过将其与3D打印技术相结合，可以在高功率电子束的作用下逐层熔化金属粉末，进而堆叠形成坚固的金属构件。真空电子束熔覆工艺有望与3D打印、智能制造等前沿制造技术融合，以实现更高效、精确和智能化的生产过程，这将为现代工业的进步带来重大影响。

参考文献：

- [1] 杨扬, 张澳, 李瑶, 等. 金属增材制造工艺、材料及成形机理的研究与应用[J]. 金属加工(热加工), 2024(3): 33-45.
- [2] 吴凡, 林博超, 权银洙, 等. 电子束增材制造设备及应用进展[J]. 真空, 2022, 59(1): 79-85.
- [3] 陈健, 刘海浪, 卢儒学, 等. 电子束熔覆工艺对合金表面改性的研究现状[J]. 热加工工艺, 2021, 50(12): 30-33, 38.
- [4] 胡百聪. 电镀复合电子束熔覆技术原位制备AlCoCrFeNi非等原子比中熵合金涂层[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [5] 刘海浪, 卢儒学, 陈健, 等. 镍基合金电子束熔覆表面改性及高温耐磨性研究[J]. 金属热处理, 2021, 46(4): 161-166.
- [6] 叶宏, 闫忠琳, 薛志芬. 镁合金表面电子束熔覆铝涂层[J]. 铸造技术, 2008(8): 1056-1058.
- [7] 刘海浪, 王波, 李行, 等. Inconel617合金表面电子束熔覆WC-CoCr显微组织和耐磨性研究[J]. 航空制造技术, 2017(21): 102-104, 109.
- [8] 温涛涛, 陈玉华, 孙国栋, 等. TiNi记忆合金电子束熔覆层的组织性能研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 125-131.
- [9] EVDOKIA B, POLINA R, PAVEL G. Boron-doped coatings on stainless steel formed by the electron beam processing[J]. Materials Today: Proceedings, 2019(12): 155-158.

- [10] LI Y L, TANG B, LI Y, et al. Enhancing the surface properties of Ti-6Al-4V with high entropy alloy coating prepared by electron beam cladding[J]. Applied Physics A, 2024, 130 (12) : 865-865.
- [11] ZHAO G H, ZHANG Y, ZHAO H, et al. Study on the process optimization and wear resistance of electron beam cladding AlCoCrFeNi coating on 253MA austenitic stainless steel surface[J]. Materials Characterization, 2023, 205.
- [12] 周希孺, 吴圣川, 郭峰, 等. 现代铁道车辆结构损伤形式与再制造修复技术[J]. 电焊机, 2020, 50 (9) : 147-160.
- [13] 刘继臣. 航空及空军修理系统焊接市场分析[J]. 电焊机, 2000 (7) : 35-37.
- [14] 姜舟, 任斌斌. 3D打印技术在航空维修中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2017 (18) : 42-43.
- [15] 贾婷婷. 航空维修中3D打印技术的有效应用[J]. 粘接, 2019, 40 (8) : 105-107.
- [16] 徐向阳, 陈光南, 刘文今. 先进的激光直接制造技术与现代航空装备维修[J]. 航空维修与工程, 2004 (3) : 28-30.
- [17] 宋仁国, 陈光南, 张坤. 激光和电子束表面强化技术的发展及其应用[J]. 物理, 2000 (7) : 411-415.
- [18] 曾壮基. 6061铝合金电子束熔覆Ni60+CeO₂涂层的熔覆工艺及改性研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- [19] 周明文, 王楠, 李彬, 等. 电子束焊接技术在汽车齿轮及深熔零件焊接中的应用[J]. 电焊机, 2013, 43 (2) : 79-81, 86.
- [20] 张国培, 刘海浪, 黄以平, 等. 基于电子束的材料表面熔覆技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (2) : 27-30.
- [21] 刘剑, 高琼. 光刻机精密运动框架的一体化设计与3D打印制造[J]. 现代制造技术与装备, 2020 (6) : 17-18, 23.
- [22] 王彩梅, 张卫平, 王刚, 等. 电子束熔融快速成型技术在骨科植入物修复过程中的骨诱导能力[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17 (52) : 9055-9061.
- [23] LI X K, ZHANG C X, YAO X, et al. Study on Surface modification of aluminum alloy electron beam for surgical medical devices[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1550 (4) : 042063.
- [24] 凡亚强, 张艳, 李美华. 3D打印技术在口腔临床医学中的诊断及应用研究[J]. 中国试验诊断学, 2018, 22 (2) : 363-365.
- [25] 黄丽娟, 景双林, 聂蓉蓉, 等. 3D打印技术制作可摘局部义齿支架的临床应用[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2016, 36 (10) : 1259-1262.
- [26] 朱晖. 电子束熔覆技术及其应用研究[J]. 石化技术, 2022, 29 (11) : 230-231.
- [27] HE J, WANG S W, ZHANG Y H, et al. Electron beam cladding surface modification technology of niobium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40 (4) : 231-234.
- [28] 翟艳坤, 白雪卫, 张凤宇, 等. 高能束熔覆涂层质量缺陷形成机理及控制方法研究现状[J]. 真空, 2022, 59 (6) : 78-86.
- [29] 刘桂刚. 奥氏体不锈钢小径管焊缝超声波相控阵检测技术应用及分析[J]. 金属加工(热加工), 2024 (6) : 130-136.
- [30] 胡文刚, 陆云鹏, 郭世雄, 等. 基于DR数字射线成像技术的铝合金焊缝缺陷检测[J]. 焊接, 2021 (2) : 46-51, 64.

(收稿日期: 20241219)