https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20240081

# Nb/Cu功能梯度阴极激光增材制备及电弧烧蚀行为研究

关慰勉<sup>1</sup>,刘玲玲<sup>1</sup>,赵梁<sup>1</sup>,梁新增<sup>1</sup>,关峰<sup>1</sup>,金银玲<sup>1</sup>,贾大炜<sup>1</sup>,刘嘉斌<sup>2</sup> (1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司,辽宁 沈阳 110850)

(2. 浙江大学 材料科学与工程学院,浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 功能梯度阴极基于表面强化层实现耐烧蚀性能和传导性能的解耦,能够有效延长阴极服役寿命。本研究围绕Nb/Cu 功能梯度阴极,采取激光增材于Cu基体表面制备出Nb覆层,表征了Nb/Cu梯度阴极的微观组织、成分和物相结构,分析了 硬度和热导率自覆层表面向内的变化规律。进一步地,对Nb/Cu功能梯度阴极的氩气氛围电弧放电和烧蚀行为进行了研究, 高速滤光捕捉下,阴极放电表面出现多个阴极斑点团簇,烧损面形成密集烧蚀坑和溅射颗粒。Nb/Cu阴极氩气电弧烧蚀速率 (1.61 µg/C)相比无氧Cu阴极(2.18 µg/C)降低26.1%,更耐电弧烧蚀。功能梯度阴极具备的优异耐电弧烧蚀性能,与Nb表 层耐烧蚀性和Cu基体高传导性密切相关。Nb/Cu功能梯度阴极具备作为新型阴极应用的潜能。

关键词: 电弧放电; 激光熔覆; 功能梯度阴极; 铌覆层; 烧蚀

中图法分类号: TB331 文献标识码: A 文章编号: 1002-185X(2025)06-1535-08

## 1 引 言

电极烧蚀是电极电弧放电时无法避免的过程<sup>[1-4]</sup>。 与阳极相比,阴极在高速运动的阳离子轰击下,承受更为 严重的电弧烧蚀,服役过程中往往率先失效<sup>[5]</sup>。延长阴 极服役寿命是提升电弧等离子体稳定时长的关键。电弧 烧蚀是制约阴极服役寿命的主导过程。阴极的电弧放 电,本质可视为弧根内数个独立位点,即阴极斑点的爆炸 性电子发射过程<sup>[6-7]</sup>。电弧自持所需电子几乎全部由阴 极斑点提供,相应地,阴极斑点所在位点的电流密度和热 流密度更高,较之无斑点处对阴极烧蚀更剧烈<sup>[8-9]</sup>。基于 此,调控阴极斑点的放电行为,成为改善阴极耐电弧烧蚀 性能的主要手段。

现阶段,调控阴极斑点放电行为的策略分为斑点迁移行为控制<sup>[10-13]</sup>和斑点类型变换<sup>[14-16]</sup>两类,前者主要通过外加低逸出功相<sup>[17-18]</sup>、细化晶粒等<sup>[19]</sup>手段增加阴极斑点的迁移速率,后者则旨在于阴极表面制成改行层<sup>[14]</sup>以构成功能梯度阴极(functionally gradient cathodes, FGC),进而促成迁移速率高、平均电流低的 I 类阴极斑点。Yang等<sup>[20]</sup>发现阴极斑点在纳米晶CuCr5 阴极表面迁移速率(45 m/s)达到微米晶CuCr5 阴极(<15 m/s)的3倍,阴极烧蚀缓和。Cao等<sup>[13]</sup>通过在CuW 阴极中外加低逸出功Fe、Mo元素,分散电弧弧根并加速斑点迁移,阴

极烧损程度显著降低。Long等<sup>[21]</sup>在TiB<sub>2</sub>/Cu电极中引入 碳纳米管得到复合电极,有效降低电弧能量避免集中烧 蚀。功能梯度阴极方面,现有制备技术包含粉末冶金、气 相沉积、放电等离子体烧结、激光熔覆等,自功能梯度阴 极应用以来,随着阴极服役工况对强化厚度和层间结合 强度需求的提升,制备方式由早期的气相沉积发展至以 激光熔覆、净成型为代表的快速一体化制备技术。阴极 表面强化方面,Guan等<sup>[22]</sup>基于激光增材制造Zr基热化学 表层,实现无氧铜阴极的表面强化,Zr/Cu梯度阴极空气 电弧烧蚀速率相比无氧铜阴极降低20%以上。 Momozawa<sup>[14]</sup>通过在错阴极表面放电等离子体制备氧化 锆层和氮化锆层,实现了阴极斑点由II类转换为I类,难 熔陶瓷层保护阴极基体,放电后功能梯度阴极表面轮廓 完整,烧损轻微。

综合当前提升阴极耐烧蚀性研究发现,基于表面强 化制成的功能梯度阴极,能够同时发挥强化层的耐烧蚀 性和基体的高导热导电性,进而实现耐烧蚀性能和传导 性能的解耦<sup>[23]</sup>。激光熔覆技术是制备金属表面强化层的 有效手段,具有高效便捷、强化层成分及厚度高度可控等 优势,且强化层与基体的界面冶金结合有利于保障阴极 长期服役稳定性。金属铌(Nb)具有熔点高(2468℃)、逸 出功低(4.01 eV)、熔体高粘度的特征<sup>[24]</sup>,具备作为阴极 强化层的潜能。低逸出功阴极表面有利于控制阴极服役

收稿日期:2024-06-09

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(92266202)

作者简介:关慰勉,男,1996年生,博士,沈阳飞机工业(集团)有限公司,辽宁 沈阳 110850,E-mail: wmguan88@163.com

温度于较低水平,熔融金属高粘度能够抑制液滴溅射烧 损。无氧紫铜是当前电弧加热器电极、触头电极的常用 材料,主要利用其优异的导电和导热性能,但铜阴极耐电 弧烧蚀性差且放电烧蚀具备非均匀特征<sup>[25]</sup>。

然而,尽管金属铌满足阴极表面强化层性能需求, 但是现阶段铌/铜功能梯度阴极电弧放电及烧蚀行为不 明确;此外,金属铜对红外激光的吸收率不足5%<sup>[22]</sup>,高反 射率导致大量激光能量耗散,为铜表面激光增材制造金 属覆层带来困难,尤其针对与铜基体熔点和热膨胀性差 异巨大的金属铌。为平衡高反射率的不利影响并实现难 熔金属粉末充分熔融,往往需要较高的激光功率,而高激 光热输入不利于维持熔池稳定性和控制热变形。基于 此,高反射铜基体表面难熔铌覆层的增材熔覆制备研究 较少,尚未建立覆层增材制造工艺窗口,因此,有必要进 行铌/铜功能梯度阴极激光熔覆制备及电弧烧蚀性能相 关研究。

本研究围绕Nb/Cu功能梯度阴极,以激光熔覆手段 于Cu表面制备Nb覆层得到Nb/Cu功能梯度阴极,表征 测试层状阴极成形质量和组织结构,明晰阴极由表向内 的热导率和硬度演化行为。进一步地,对Nb/Cu功能梯 度阴极的氩气电弧放电和烧蚀过程进行考核,分析烧损 形貌及烧蚀坑形态结构,并基于光学轮廓重构计算阴极 烧蚀速率作为定量化指标,揭示出低逸出功Nb表层对提 升阴极烧蚀均匀性和缓解电弧烧蚀的贡献。

## 2 实 验

Nb/Cu功能梯度阴极增材熔覆使用商用球形铌粉, 粉末具备高球形度特征,粒径范围40~75 µm,纯度不低 于99.9%,由射频等离子体球化法制得。增材熔覆设备 型号为ZKZM-4500,包含光纤激光器、光纤传输及熔覆 头、刮板式送粉器、六轴机械臂、水冷系统和控制系统。 激光器额定功率4500 W,红外激光波长1080 nm,熔覆头 装夹于六轴机械臂末端,可实现0.05 mm的定位精度。 氩气作为送粉气和保护气,运载铌粉经管路至熔覆头中 心出粉孔。出粉孔外周环绕对称分布有3束激光孔,任 意激光束额定功率1500 W,由独立模块控制。

送粉增材熔覆时,无氧紫铜为基板,熔覆头底端距 离基板上表面距离设置为15.5 mm,略高于激光束焦距 (15 mm),光束与粉末束流空间位置为"光包粉",基板在 激光高能束作用下形成直径约1.5 mm的圆形熔池。熔 覆头依照程序预设轨迹往复移动,激光器和送粉器自初 始直至熔覆结束始终开启。经过工艺探索后,Nb覆层熔 覆增材工艺参数如表1所示,为克服铜基体高红外激光 反射率<sup>[26-27]</sup>的不利因素,制备过程中采取高激光功率 (4.0 kW)和高送粉速率的参数组合。

熔覆增材的Nb/Cu块体以线切割方式制备成68mm×

表1 Nb/Cu功能梯度阴极熔覆增材工艺参数 Table 1 Laser cladding parameters of the Nb/Cu FGC

Parameter	Nb/Cu
Metal powder	Nb
Powder feed rate/g·min <sup>-1</sup>	4.4
Laser power/kW	4.0
Scanning speed/m·s <sup>-1</sup>	0.08
Overlap rate/%	75

18 mm×3 mm的片式阴极样品以测试氩气电弧放电行为。通过机械磨抛方式控制 Nb 覆层表面粗糙度低于 3.2 μm后,作为阴极承载电弧弧根。阴极氩气电弧放电 和烧蚀考核基于前期自主研发的片式阴极烧蚀测试平 台<sup>[25]</sup>完成,氩气放电过程中,尖锥状铜棒作为阳极,对电 极的相对位置保持不变。电弧电流为15 A,燃弧氛围为 高纯氩气,阴极单次持续放电烧蚀时间设定为10 s。

通过光学金相显微镜分析Nb/Cu功能梯度块体的金 相组织,在熔覆块体前、中、后3个部位切取试块观察界 面组织结构以判断覆层-基体之间的结合性,以界面呈波 浪起伏状、无气孔或开裂缺陷作为判定异质金属层间冶 金结合的依据。以扫描电子显微镜和能谱仪明晰覆层和 烧损阴极组织结构和成分信息。利用X射线衍射仪表征 Nb覆层物相结构,使用显微维氏硬度计和电导率仪测试 阴极的硬度和电导率。以配套滤光片的高速相机揭示阴 极的氩气电弧放电行为。使用光学轮廓仪对烧损阴极进 行表面三维轮廓重构,提取烧损区线轮廓和烧损体积信 息,进而计算得到阴极烧蚀速率以定量化反映阴极耐电 弧烧蚀性能,Nb/Cu功能梯度阴极烧蚀速率为5个阴极 烧蚀速率的平均值。

## 3 结果与讨论

## 3.1 Nb/Cu阴极组织结构

图 la 为熔覆增材制备的 Nb/Cu 功能梯度阴极截面 金相组织。Nb 覆层厚约 950 µm,覆层内部无明显气孔或 裂纹缺陷,显示较高的成形质量,沿搭接方向分布多条带 状波纹,系前后道次熔覆增材搭接区反复重熔所致。同 时,异质 Nb-Cu 金属界面呈波浪状,反映覆层-基体间的 强界面冶金结合。选取 Nb 覆层中部典型区域,放大后组 织结构如图 lb 所示,除少量未完全熔化的球状铌颗粒 外,Nb 覆层内部组织均匀,密布交错板条状相。

为明确功能梯度电极物相结构,选取Nb覆层中部进行X射线衍射分析,结果如图2所示。基于熔覆增材制造的Nb覆层可视为单一体心立方(body-centered cubic, bcc)铌相构成,bcc Nb相显示出极高的衍射峰强度,余下少量面心立方(face-centered cubic, fcc)铜相。功能梯度电极表层较高的Nb含量,既有利于提升阴极表面电子发射能力,同时提升阴极表面熔点以抵御电弧弧根烧蚀。



图1 Nb/Cu 阴极截面组织和Nb覆层中部放大图 Fig.1 Cross-sectional microstructure of the Nb/Cu cathode (a) and magnified image of the Nb layer (b)



图 2 Nb 覆层 XRD 图谱 Fig.2 XRD pattern of the Nb cladding

进一步地,选取Nb/Cu局部界面,进行组织结构表征 和成分测试。异质界面无气孔或裂纹缺陷,如图3a所 示,层间呈现紧密冶金结合。沿垂直界面方向(图3a黄 色虚线)进行元素线分布测试,结果如图3b所示,铌含量 在Nb覆层中稳定地保持于较高水平,跨越界面后骤降。 铜元素则被良好地限制于基体层,较少进入Nb覆层。铌 元素和铜元素的面分布(图3c,3d)直观揭示功能梯度阴 极界面元素分布情况,层内元素均匀分布,证实基于激光 增材技术制造的Nb/Cu覆层阴极内部均匀的组织结构。 选取Nb覆层内部典型区域进行成分测试,覆层成分为 Nb 92.6at%、Cu 7.4at%,与图2中XRD谱线Nb为主相的 结果吻合。



图3 Nb/Cu梯度阴极界面组织、元素线分布及元素面分布

Fig.3 Microstructure of partial Nb/Cu interface (a), elemental distribution along the yellow dashed line in Fig. 3a (b), and EDS mappings corresponding to Fig.3a (c-d)

#### 3.2 Nb/Cu 阴极硬度及热导率

电极在服役环境中持续放电时,阴极表面承受电弧 弧根极强的热输入,表面瞬时烧损剧烈。自阴极壁面向 内的热耗散过程,同时受到阴极热导率、壁厚等因素调 控。阴极具备较高的热导率时,能够控制阴极整体温度 于较低水平。因此,热导率是评估阴极综合性能的重要 指标之一。同时,阴极还需具备一定的结构强度,以避免 服役过程出现软化变形。

图 4 为 Nb/Cu 功能梯度阴极自 Nb 层表面向内的热导率和显微维氏硬度测试结果,硬度测试位点间距为 80 μm。图中热导率是通过覆层特定位置的平均电导率 以魏德曼-弗兰兹定律<sup>[28]</sup>(公式1)换算得到,具体如下:

$$\frac{\kappa}{L} = LT \tag{1}$$

式中, $\kappa$ (W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)和 $\sigma$ (S·m<sup>-1</sup>)分别为热导率和电导率,T(K)为温度,L对应洛伦兹常数,为2.44×10<sup>-8</sup>W  $\Omega$ ·K<sup>-2</sup>。

自功能梯度阴极表面向内,热导率随测试位点深入 而升高,硬度自Nb覆层较高水平至Cu基体逐渐降低。 Nb覆层的热导率为102.5 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,约为Cu基体热导率 (397 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)的25.8%。

就硬度而言,Nb覆层靠近表面处硬度最高, 329.6 HV<sub>02</sub>,随后硬度随测试位点深入稳定于相应水平, Nb覆层平均硬度为315.7 HV<sub>02</sub>,硬度在跨越Nb覆层与 Cu基体时发生骤降,由304.6 HV<sub>0.2</sub>降低至59.6 HV<sub>0.2</sub>。

值得注意的是,Nb覆层热导率仅为Cu基体1/4,而 硬度则达到后者5倍以上,在如此大性能差异下实现的 异质界面冶金结合,与覆层界面处成分渐变区发挥的层 间过渡作用紧密相关。

综合而言,Nb/Cu功能梯度阴极内部组织均匀,覆层 与基体结合紧密。高铌含量表层的制备,能够降低阴极 的表面逸出功,有助于提升耐电弧烧蚀性能。

## 3.3 Nb/Cu阴极电弧放电烧蚀行为

为探明Nb/Cu 阴极的电弧烧蚀行为,进行阴极电弧 放电、烧蚀实验,预设阴极-阳极相对位置如图5a所示,针 状阳极位于顶部,Nb/Cu 功能梯度阴极位于底部,以磨抛 后的Nb覆层作为燃弧表面。放电过程中,阴极-阳极及 其邻近空间始终充满氩气以避免氧化影响。15 A 电弧 电流下,进行Nb/Cu 阴极氩气放电,并以高速滤光相机进 行实时捕捉分析,阴极放电片段如图5b所示。电弧在氩 气氛围放电时等离子体呈蓝紫色,Nb/Cu 阴极表面形成 数个团簇状的阴极斑点密集区,如图5b所示,各团簇斑 点相互分离,使电弧弧根力散于阴极表面多个离散区域, 此时Nb/Cu表面电弧弧根直径超过5 mm。斑点亮度明 显高于周围阴极表面,对应位点电流密度和热流密度极 高。同时,每个团簇内的数个阴极斑点呈现高重叠度的 特征,在连续滤光捕捉中集群斑点在阴极表面剧烈跳动。

Nb/Cu阴极氩气氛围显示出的放电行为,本质为裸



图4 Nb/Cu功能梯度阴极自表向内热导率、显微维氏硬度变化 Fig.4 Thermal conductivity and microhardness along the build direction of the prepared Nb/Cu FGC

露金属表面形成的数个高速迁移的阴极斑点<sup>[29]</sup>。Nb较 之Cu(4.65 eV)具备更低的电子逸出功,4.01 eV,相应电 子发射能力更强,易于促成阴极斑点形成和顺滑迁移,由 此减少阴极斑点在单个位点驻留时长并分散电弧弧根, 降低阴极烧蚀速率<sup>[5]</sup>。与前期Cu阴极放电行为滤光捕 捉<sup>[25]</sup>相比,Nb/Cu功能梯度阴极放电表面弧根明显扩展, 阴极电弧烧蚀趋于缓和。

进一步地,针对氩气氛围持续电弧放电10s后的Nb/ Cu功能梯度阴极,观测其烧损表面形貌如图6a所示。电 弧放电后的阴极表面显示出圆形轮廓的烧蚀凹陷区,烧 损区直径7~8mm,与未烧损表面边界清晰。圆形烧损区 内部起伏剧烈,可观察到大量烧蚀坑和溅射颗粒,中心部 位烧蚀坑尺寸和密集程度最高,至边缘部位逐步下降。 选取典型烧蚀坑所在区域放大观察如图6b所示,烧蚀坑 直径8~15 µm,自阴极表面深入阴极内部,多个烧蚀坑显 示出边缘融合的结构特征。

联系功能梯度阴极燃弧放电滤光捕捉片段可知,阴 极表面形成的融合状烧蚀坑,与阴极斑点团簇的附着及 迁移行为直接相关。阴极斑点作为阴极电弧弧根内部的 特征结构<sup>[30]</sup>,放电时倾向成为电子的剧烈发射位点,相应 地,阴极斑点较之余下区域具有更高的电流密度和热流 密度,对阴极造成更为严重的烧蚀,进而导致烧蚀凹坑的 形成。参考 Anders André 提出的斑点放电理论<sup>[31-32]</sup>,金 属 Nb 电子逸出功低于 Cu,一方面易于形成阴极斑点,另 一方面又能以其高熔点抵御阴极斑点的烧蚀,从而缓解 阴极电弧烧蚀以延长寿命。





为明确功能梯度阴极的电弧放电烧蚀机制,对氩气 氛围放电10s后的Nb/Cu阴极进行截面组织结构表征, 如图7a所示。烧损阴极近表面区与内部衬度一致,说明 Nb/Cu阴极放电时金属表面直接作为阴极电弧弧根的载 体。烧损表面呈沟壑状,形成众多深入阴极内部的尖锥 状烧蚀坑。烧蚀坑所在位点烧蚀深度达到10~20 µm,底 部(图7b)可观察到熔融金属液滴迅速凝固形成的花瓣 状结构<sup>[33]</sup>。同时,烧损阴极表面可观察到直径1.5~3 µm 的凹坑结构,如图7c和7d所示,凹坑区域相比余下表面 材料烧损更为剧烈,构成非均匀电弧烧蚀。

烧蚀坑的形成及结构演化,与阴极斑点关系密切,反映Nb/Cu功能梯度阴极的斑点放电行为是其氩气氛围放电烧蚀的本征特性。

使用光学轮廓仪对氩气电弧放电后的Nb/Cu功能梯 度阴极进行表面三维轮廓重构,持续放电10s后阴极烧 损区的3D轮廓如图8a所示,以淡黄色标示未烧损表面 为基准面,蓝色对应烧损凹陷区,以颜色深浅程度显示不 同凹陷深度。由3D轮廓可见,Nb/Cu烧损区与未烧蚀表 面界限分明,凹陷区呈现密集起伏形貌,与图6a和6b所 示烧损形貌吻合。凹陷区/未烧蚀区边界出现圆环状拱 起结构,系中心熔池在阴极斑点迁移作用下向外侧流动 后凝固所致。进一步地,选取阴极最大烧蚀深度所在截 面进行线轮廓提取,如图 8b所示,Nb/Cu功能梯度阴极 氩气放电10s后最大烧蚀深度达到96.2 μm,阴极放电和 烧蚀具有集中于中心区域的特点,即阴极中心区承受阴 极斑点的集中烧蚀,相应烧损最为剧烈。

为定量化考核功能梯度阴极的耐电弧烧蚀性能,以 光学轮廓法对阴极电弧烧蚀速率进行计算,定义未烧损 平面高度为基准值后,光学轮廓仪配套软件自动计算 Nb/Cu阴极烧损区低于该高度的体积作为阴极烧损体 积,继而以公式(2)计算氩气烧蚀速率:

$$c = \frac{m}{Q} = \frac{\rho V}{It} \tag{2}$$

式中,c为阴极烧蚀速率( $\mu g/C$ )。 $m \pi Q$ 分别为阴极烧损 质量( $\mu g$ )和电荷量(C)。 $\rho$ 、V、 $I \pi t$ 依次为阴极密度 ( $\mu g/\mu m^3$ )、烧损体积( $\mu m^3$ )、电弧电流(A)和燃弧时间 (s)。计算得到,氩气氛围Nb/Cu功能梯度阴极电弧烧蚀 速率为1.61 $\mu g/C$ ,与同条件下纯Cu阴极的电弧烧蚀速率 (2.18 $\mu g/C$ )<sup>[25]</sup>相比降低了26.1%,阴极耐电弧烧蚀性能 显著提升,由此证实Nb/Cu覆层阴极有效实现了表面耐



图6 氩气氛围放电10 s 后 Nb/Cu 功能梯度阴极烧损表面形貌 Fig.6 Surface morphology of the ablated Nb/Cu FGC (a) and partial enlargement of the ablated center (b)



图7 烧损Nb/Cu功能梯度阴极截面组织

Fig.7 Cross-sectional microstructure of the ablated Nb/Cu FGC surface (a) and magnified images of the ablated surface (b-d)



图8 烧损 Nb/Cu 功能梯度阴极三维轮廓和基于#A 截面提取的线 轮廓

Fig.8 3D morphology of the ablated Nb/Cu FGC (a) and crosssectional profile extracted from the deepest ablated areas (#A) of the cathode in Fig.8a (b)

电弧烧蚀和基体高导电导热的结合。

Nb/Cu覆层阴极显示出的优异耐电弧烧蚀性能,与 铌覆层促成的阴极斑点顺滑迁移关系密切。低逸出功铌 相易于产生发射电子以形成阴极斑点放电,进而促使放电时众多阴极斑点在其寿命周期内能够迁移至阴极表面更广阔区域<sup>[34-35]</sup>。此外,与Nb覆层紧密冶金结合的Cu基体加速了弧根输入热流在阴极壁面的热传导耗散过程,减少积热控制阴极服役温度稳定于较低水平。在Nb覆层和Cu基体的综合作用下,Nb/Cu功能梯度阴极能够更好地抵御氩气电弧烧蚀。

基于以上研究结果,提出 Nb/Cu 功能梯度阴极氩气 电弧放电和烧损机理,如图 9b 所示。Nb/Cu 层状阴极的 设计思想源于功能梯度化,功能梯度金属通常指由多种 金属材料构成的,内部成分和组织性能连续变化的先进 材料<sup>[36-37]</sup>。除材料种类外,梯度亦可由成分、晶粒尺寸、 增强相含量等沿特定方向的逐层渐变实现。

Nb/Cu功能梯度阴极(图9a)的结构设计由金属阴极 性能需求分析出发,长寿命、耐烧蚀阴极既需要具备足够 的传导性能,也需要能够抵御电弧等离子体的高温烧蚀 作用,同时还须具备一定电子发射能力。

基于激光熔覆增材制备的Nb/Cu功能梯度阴极, 完成了表层和基体差异化性能需求的解耦。Nb覆层 在Nb/Cu功能梯度阴极中负责以更低的逸出功、更高 的熔点抵御电弧等离子体烧蚀,同时促成燃弧区域内 阴极斑点顺滑迁移,相应地,铜基体以较高的导电和 导热能力及时完成电弧弧根输入热量的传导耗散。 得益于Nb覆层耐烧蚀和铜基体高导热的协同作用, 功能梯度阴极氩气氛围电弧烧蚀趋于缓和,显示出较 低的电弧烧蚀速率。

值得注意的是,尽管Nb/Cu功能梯度阴极较之纯Cu



图 9 Nb/Cu功能梯度阴极结构示意图和阴极电弧烧蚀示意图 Fig.9 Schematic diagrams of the prepared Nb/Cu FGC (a) and cathodic arc discharge process (b)

具备更强的耐电弧烧蚀性能,但放电时电弧烧蚀仍集中 于阴极表面较为狭窄的区域,集中放电和烧蚀行为不利 于阴极的长期稳定服役<sup>[38-40]</sup>,如何在实现低烧蚀速率的 同时,促成阴极放电表面均匀烧损,是后续改善阴极服役 性能的工作重点。

## 4 结论

1)增材 Nb覆层厚约950 μm,与Cu基体紧密冶金结 合。覆层内部无明显气孔或裂纹缺陷,成形质量较高。 Nb覆层近乎由单一Nb相构成,Nb含量高达92.6at%,余 下为Cu(7.4at%)。Nb覆层热导率102.5 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,热导 率由表层向内逐渐升高,硬度在Nb覆层中稳定于较高水 平(315.7 HV<sub>02</sub>),跨越Nb/Cu界面时骤降。

2)Nb/Cu层状阴极氩气氛围放电时,表面出现数个 团簇状的阴极斑点密集区,电弧弧根明显分散。烧损 Nb/Cu阴极表面形成密集烧蚀坑和溅射颗粒,中心部位 烧蚀坑尺寸和密集程度最高,至边缘部位逐步下降。与 Cu阴极相比,Nb/Cu层状阴极电弧烧蚀过程相对缓和, 阴极烧蚀速率1.61 μg/C,相比后者降低26.1%,Nb/Cu阴 极兼具表面耐烧蚀和基体高导电导热的优势,具备作为 新型阴极的潜能。

#### 参考文献 References

- [1] Xie Jing(解 静), You Silun(由思伦), Sun Guodong(孙国栋) et al.
  Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J],
  2023, 52(8): 2828
- [2] Chen Haoran(陈昊然), Liu Wei(刘伟), Sun Yanan(孙娅楠) et al.

Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(12): 4429

- [3] Wei Yinhe(韦银河), Yang Jiancan(杨建参), Chen Ran(陈 然) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(10): 3892
- [4] Lin Zulun(林祖伦), Wang Xiaoju(王小菊). Cathode Electronics (阴极电子学)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016
- [5] Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation[M]. New York: Springer New York, 2009
- [6] He Xueliang(何学良), Zhou Zenglin(周增林), Li Yan(李 艳) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(1): 280
- [7] Beilis I I. IEEE Transactions on Plasma Science[J], 2019, 47(8): 3412
- [8] Lu Zhipeng(卢志鹏), Yin Shengyi(阴生毅), Zhang Zhaochuan(张 兆传) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料 与工程)[J], 2022, 51(1): 341
- [9] Wang Qingfeng(王庆丰), Cui Shumao(崔树茂), Zhang Ruili(张锐 丽) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 641
- [10] Duan Wenxin(段文新), Guo Conghui(郭聪慧), Yang Zhimao(杨 志懋) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材 料与工程)[J], 2005, 34(6): 998
- [11] Su Yafeng(苏亚凤), Yang Zhimao(杨志懋), Ding Bingjun(丁秉 钩). Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工 程)[J], 2007, 36(1): 68
- [12] Wang Xingqi(王兴起), Wang Xiaoxia(王小霞), Luo Jirun(罗积 润) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料 与工程)[J], 2022, 51(12): 4658
- [13] Cao Weichan, Liang Shuhua, Gao Zhuangfeng et al. Rare Metal Materials and Engineering[J], 2011, 40(4): 571
- [14] Momozawa A, Taubert S, Nomura S et al. Vacuum[J] 2010, 85(5): 591
- [15] Xie Faqin(谢发勤), He Peng(何 鹏), Wu Xiangqing(吴向清) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工 程)[J], 2022, 51(4): 1514
- [16] Xie Hongbin, Guan Weimian, Lv Hao et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology[J], 2023, 124(1– 2): 397
- [17] Yang Xiaohong(杨晓红), Zhao Yipeng(赵伊鹏), Zou Juntao(邹 军涛) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材 料与工程)[J], 2021, 50(2): 679
- [18] Guo Yinchen, Yang Jiancan, Zhou Shaoxin et al. Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(2): 416
- [19] Jiang Muchi(姜沐池), Cai Yusheng(蔡雨升), Zhao Xiaoyu(赵晓 彧) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料 与工程)[J], 2022, 51(10): 3777
- [20] Yang Zhimao, Zhang Qiuli, Wang Qingfeng et al. Vacuum[J], 2006, 81(4): 545
- [21] Long Fei, Guo Xiuhua, Song Kexing et al. Materials & Design[J], 2019, 183: 108136

- [22] Guan Weimian, Gao Mingyu, Lv Hao et al. Surface and Coatings Technology[J], 2021, 421: 127454
- [23] Qian Gang(钱 刚), Feng Yi(凤 仪), Huang Xiaochen(黄晓晨) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工 程)[J], 2018, 47(6): 1818
- [24] Cao Zhao(曹 招), Tan Dunqiang(谭敦强), Tang Ye(唐 晔) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(5): 1705
- [25] Guan Weimian, Yuan Jie, Wang Yongfeng et al. Science China Technological Sciences[J], 2020, 63(11): 2384
- [26] Chen Hui(陈 慧), Dong Jing(董 静), Zi Xuhui(资旭辉) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(9): 3282
- [27] Onuike B, Bandyopadhyay A. Additive Manufacturing[J], 2019, 27: 576
- [28] Franz R, Wiedemann G. Annalen der Physik[J], 1853, 165(8): 497
- [29] Zhang Qiutao(张秋涛), Liu Shuangyu(刘双宇), Lu Ping(陆萍) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(1): 188
- [30] Golizadeh M, Martin F M, Kolozsvári S et al. Surface and Coatings Technology[J], 2021, 421: 127441
- [31] Anders A, Oks E M, Yushkov G Y et al. IEEE Transactions on Plasma Science[J], 2005, 33(5): 1532

- [32] Anders S, Anders A, Yu K M et al. IEEE Transactions on Plasma Science[J], 1993, 21(5): 440
- [33] Guo Conghui(郭聪慧), Duan Wenxin(段文新), Yang Zhimao(杨 志懋) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材 料与工程)[J], 2005, 34(2): 295
- [34] Mogeritsch JP, Franz R, Golizadeh M et al. Crystals [J], 2022, 12(10): 1486
- [35] Golizadeh M, Anders A, Mendez M F et al. Journal of Applied Physics[J], 2020, 127(11): 113301
- [36] Ji Weiming, Zhou Runhua, Vivegananthan P et al. Progress in Materials Science[J], 2023,140: 101194
- [37] Guan Weimian(关慰勉), Liang Xinzeng(梁新增), Liu Yanmei(刘 艳梅) et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色 金属学报)[J], 2024, 34(7): 2173
- [38] Li Hangyu, Wang Xianhui, Gao Qianwen et al. Rare Metal Materials and Engineering[J], 2022, 51(3): 765
- [39] Wang Lili(汪丽丽), Feng Yi(凤 仪), Cao Mengli(曹梦丽) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(9): 3172
- [40] Liu Yanfeng(刘彦峰), Wang Xianhui(王献辉), He Xuan(何旋) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(4): 1164

# Laser Additive Manufacturing and Arc Ablation Behavior of Nb/Cu Functionally Gradient Cathodes

Guan Weimian<sup>1</sup>, Liu Lingling<sup>1</sup>, Zhao Liang<sup>1</sup>, Liang Xinzeng<sup>1</sup>, Guan Feng<sup>1</sup>, Jin Yinling<sup>1</sup>, Jia Dawei<sup>1</sup>, Liu Jiabin<sup>2</sup> (1. Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd, Shenyang 110850, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Functionally gradient cathodes (FGC) realize the combination of ablation-resistant surface and conductive matrix, which can effectively extend the cathodic service life. Nb/Cu FGC, with Nb layer and Cu as surface and matrix, respectively, was prepared by laser cladding. The microstructure, composition, and the phase information were characterized. The microhardness and thermal conductivity of the FGC were tested. Furthermore, the cathodic discharge and ablation behavior in Ar atmosphere were investigated. Results show that several scattered cathode spots appear and densely distributed ablation craters are observed. The Nb/Cu FGC displays relatively moderate ablation behaviors. The average ablation rate of Nb/Cu FGC (1.61  $\mu$ g/C) is 26.1% lower than that of Cu cathodes (2.18  $\mu$ g/C), as ascribed to the synergy of ablation resistant Nb surface and the highly-conductive Cu matrix. Nb/Cu FGC exhibits the potential in arc plasma applications.

Key words: arc discharge; laser cladding; functionally gradient cathodes; Nb layer; ablation

Corresponding author: Guan Weimian, Ph. D., Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd, Shenyang 110850, P. R. China, E-mail: wmguan88@ 163.com