

文章编号 1004-924X(2025)14-2206-14

316L 不锈钢表面二次电子发射抑制微结构的 激光辅助水射流加工实验

徐相悦^{1,2}, 姚彦如³, 褚东凯^{1,2*}, 刘雪飞^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院先进射流工程技术研究中心, 山东 济南 250061;

2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

3. 山东师范大学附属中学, 山东 济南 250014)

摘要: 为了降低 316L 不锈钢表面二次电子发射率, 设计了可降低不锈钢表面二次电子发射率的沟槽和网格阵列。使用激光辅助水射流技术进行所设计阵列的加工, 并检测表面二次电子发射率。首先使用 CASINO 仿真软件设计了可降低二次电子发射数量的沟槽和网格阵列。接着使用响应面法研究激光辅助水射流工艺参数对沟槽深宽比的影响, 获得沟槽深宽比回归预测模型以得到最大深宽比加工参数组合。最后进行沟槽、网格阵列的激光辅助水射流加工, 并检测表面二次电子发射率。实验结果表明: 沟槽、网格阵列表面二次电子发射率大幅下降, 二次电子发射率峰值分别为 1.48 和 1.25, 较未加工表面二次电子发射率峰值 2.33 分别降低了 36.50% 和 46.35%。沟槽阵列、网格阵列抑制 316L 不锈钢表面二次电子发射率性能良好。

关键词: 激光辅助水射流; 316L 不锈钢; 二次电子发射; 激光微纳加工

中图分类号: TG664 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253314.2206

CSTR: 32169.14.OPE.20253314.2206

Experimental laser assisted water jet machining of secondary electron emission suppression microstructures on 316L stainless steel surface

XU Xiangyue^{1,2}, YAO Yanru³, CHU Dongkai^{1,2*}, LIU Xuefei^{1,2}

(1. Center for Advanced Jet Engineering Technologies (CaJET), School of Mechanical Engineering,
Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of the Ministry of Education,
Jinan 250061, China;

3. High School Attached to Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

* Corresponding author, E-mail: chudongkai@sddu.edu.cn

Abstract: In order to reduce the secondary electron emissivity of the surface of 316L stainless steel, an array of grooves and grids that can reduce the secondary electron emissivity of the surface of stainless steel

收稿日期: 2025-04-11; 修订日期: 2025-05-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFC2413301); 山东省重大科技创新工程项目 (No. 2023CXGC01020
7); 山东省青年科学基金项目 (No. ZR2024QE039)

was designed. The designed arrays were pmachined by laser assisted water jet technology and the surface secondary electron emission rate was detected. First, the grooves and grid arrays were designed to reduce the number of secondary electron emissions using CASINO simulation software. Then the response surface method was used to study the effect of laser assisted water jetting process parameters on the depth-to-width ratio of the grooves, and a regression prediction model of the grooves' depth-to-width ratio was obtained to obtain the combination of maximum depth-to-width ratio processing parameters. Finally, the laser assisted waterjet machining of grooves and grid arrays was carried out, and the secondary electron emissivity of the surface was detected. The experimental results show that the secondary electron emissivity of the groove and lattice array surfaces decreased dramatically, with the peak secondary electron emissivity of 1.48 and 1.25, respectively, which are 36.50 % and 46.35 % lower than that of the unprocessed surface with the peak secondary electron emissivity of 2.33, respectively. The performance of groove array and grid array in suppressing the secondary electron emission rate of 316L stainless steel surface is excellent.

Key words: laser assisted water jet; 316L stainless steel; secondary electron emission; laser micro-nano-fabrication

1 引言

二次电子发射现象是指具有一定能量的电子轰击物体表面所引发的次级电子出射现象^[1-2]。轰击表面的电子称为初级电子或一次电子,出射的电子称为次级电子或二次电子,二次电子发射率为二次电子与一次电子之比。对于大功率空间微波器件,表面二次电子发射所导致的微放电效应会影响其功率提高,制约其发展^[3],对于粒子加速器,真空室内器壁二次电子发射率过高会导致所激发的二次电子汇集成电子云,引发动态气压上升、束流发散及寿命下降、射频功率损失及热负载提高等问题^[4]。电子云同样会影响霍尔推进器器壁性能^[5-7],其产生的低能信号也会干扰高精度光谱分析使之准确性下降^[8]。高能粒子轰击真空室器壁所导致的气体解吸现象会引起超高真空、极高真空腔室真空度降低的问题,因此需选用低放气率材料制作此类器件^[9]。316L不锈钢具有耐腐蚀性高、低温性能稳定、可加工性高、使用寿命长、放气率低等优点,其总放气率数量级在 10^{-12} ,远低于PTEE(10^{-8})、304不锈钢(10^{-11})^[10],是制作大功率微波器件、粒子加速器真空腔室优选材料^[11-12]。虽然316L不锈钢非常适用于制作高真空度要求系统,但仍存在表面二次电子发射率较高的问题。当材料表面二次电子发射率超过1时,入射电子所激发的二次电子数将超过一次电子,导致电子数量呈现指数级增

长。Ji^[13]和刘莉^[14]分别测试了316L不锈钢材料的二次电子发射率,发现未经处理的316L不锈钢表面二次电子发射率高达2.2。为解决上述问题,需要研究如何降低316L不锈钢表面的二次电子发射率。

表面陷阱构造法是通过在材料表面构造微陷阱以捕获二次电子从而达到抑制表面二次电子发射率的方式,且是抑制材料表面二次电子发射最直接且有效的方式^[15]。相比外加电场法,表面陷阱构造法无需额外耗能,且对入射电子束、束斑等不会产生影响;相比较镀膜法,表面陷阱构造法更具经济性,使用场景广泛且同样具有显著的抑制效果,是抑制二次电子发射重要研究领域之一。表面陷阱构造法分为提高表面粗糙度和构造高深宽比结构两种形式,二者均通过改变材料表面形貌达到减少二次电子的目的,前者通过在材料表面形成无序的亚微米级、纳米级颗粒以增加电子碰撞概率从而耗散电子能量,后者则通过规则的高深宽比几何构型以遮挡电子的出射从而捕获电子。Zhang^[16]等学者通过激光刻蚀的方法在无氧铜表面制备出三角形截面的平行线和方格,研究了表面形貌对粗糙度、电阻和二次电子发射率的影响,结果表明较慢的刻蚀速度可以提高深宽比和多孔结构的数量,显著降低结构表面二次电子发射率,且方格的二次电子发射抑制效果优于平行线。Valizadeh^[17]、王一刚^[18]、Wang^[19]等学者使用激光刻蚀法在金属表面制备

具有亚微米级、纳米级微球附着的沟槽,测得覆有亚微米级、纳米级微球的沟槽的二次电子发射抑制能力优于光滑沟槽。张文丽^[20]通过定期检测大气贮存条件下激光刻蚀处理后无氧铜的表面二次电子发射率,发现经激光刻蚀处理后的无氧铜表面二次电子发射率抑制能力随贮存时间的增长而下降,原因是经激光刻蚀处理后的微结构表面会形成水吸附层与炭质污染层。

上述学者通过激光刻蚀方法提高材料表面粗糙度,显著降低了表面二次电子发射率,但所制备的亚微米级、纳米级结构具有很高的比表面积,会导致材料表面电阻和放气率的提高^[20-21],不适合应用在高真空度要求的场合中。微米级结构的比表面积较亚微米级、纳米级结构大幅降低,且放气率较小,为同时满足低二次电子发射率和低放气率,研究高深宽比、低表面粗糙度微米级结构的加工是有必要的。

叶鸣^[22]等通过仿真模拟对比了对不同形貌柱状阵列结构抑制二次电子发射效果,得出的结论是圆柱、方柱、方锥柱、螺纹柱阵列抑制二次电子发射效果优于圆锥柱、截断圆锥柱及沙漏柱阵列。刘莉^[14]通过在不锈钢表面构造井字形结构使其表面二次电子发射率峰值较未加工平面降低 0.5,有效抑制不锈钢表面二次电子发射。Pivi^[15]通过仿真模拟和性能表征实验,研究了无磁场环境下 Al6030 合金表面厘米级尺度的三角形、矩形沟槽对二次电子发射率的影响,并通过电火花法制备了矩形槽结构进行验证,研究结果表明高深宽比矩形沟槽可显著降低表面二次电子发射率。Suetsugu^[23]等学者通过在不锈钢表面加工等腰三角形槽后镀 TiN 膜,显著降低了不锈钢表面二次电子发射率。张娜^[24]通过数值模拟的方法进行了金属表面矩形沟槽和三角形沟槽抑制二次电子发射率的仿真研究,发现结构抑制二次电子发射效果与深宽比成正比,表面结构的遮挡作用是影响二次电子发射特性的主要因素。J. Pieron^[25]等学者通过 Geant 4 软件进行 Ag 表面形貌的二次电子发射效果仿真模拟,制备了深宽比为 1.83 的棋盘形沟槽样品并验证了其具有较好的抑制二次电子发射能力。封国宝^[26]等学者通过掩膜法获得了深宽比为 2.3 和 0.46 的矩形沟槽阵列结构,通过实验测得其表面的二次电子发射

率,结果表明矩形沟槽的抑制效果与其深宽比成正比。胡晶^[27]进行了铜表面不同形状柱体的深宽比、占空比及排列方式对二次电子发射影响的仿真研究,发现提高上述阵列结构的深宽比可显著降低表面二次电子发射率,当占空比为 0.4 时,深宽比提高至 3 后继续增加深宽比则抑制效果提升不显著。

上述研究中,高深宽比结构的加工方法有电火花法、掩膜法等,电火花法的材料适应性广,但加工过程中热损伤和氧化现象会降低抑制二次电子发射效果,且加工效率较低;掩膜法加工精度高,尤其适用于加工高度一致性阵列结构,但存在成本过高、工艺复杂的问题。激光加工的应用成本较低,加工效率高,而激光辅助水射流加工以快速、高效获得高质量表面结构而广泛应用于高质量表面加工中,激光辅助水射流加工所得结构形貌良好,热影响区小,表面氧化程度较激光加工少,在单晶硅、单晶碳化硅、氧化铝陶瓷、氮化硅陶瓷的激光辅助水射流加工研究中^[28-31],发现该加工工艺可以获得热损伤小、深宽比高的微槽^[32]。目前,采用激光刻蚀的研究多侧重于通过提高材料表面粗糙度,而非制备高深宽比结构来抑制二次电子发射。此外,尚无采用激光辅助水射流在 316L 不锈钢表面加工高深宽比结构用于抑制二次电子发射的研究。针对上述问题,本文通过 CASINO 软件进行仿真模拟,利用蒙特卡罗方法研究了不同深宽比、占空比下 316L 不锈钢表面沟槽阵列、网格阵列结构抑制二次电子发射性能,通过激光辅助水射流技术进行 316L 不锈钢表面沟槽阵列、网格阵列的加工,以获得高深宽比沟槽阵列和网格阵列结构,并测量了两种微结构阵列表面二次电子发射情况,研究结果表明沟槽阵列和网格阵列均可有效降低 316L 不锈钢表面二次电子发射数量,且网格阵列抑制性能更优。

2 表面结构抑制二次电子发射的仿真模拟

2.1 结构深宽比对表面二次电子发射率的影响规律

由于阵列规模会影响二次电子发射率,即阵

列尺寸过小时,二次电子可能会从阵列侧方逃逸,因此将电子束入射位置设为阵列中心,以降低二次电子的逃逸概率。

沟槽阵列、网格阵列仿真模型如图1所示,其中 l_1 为沟槽边长, d 为上表面边长, h 为结构高度。

图2展示了电子能量为0.1 keV时,深宽比分别为1:1,2:1,3:1下沟槽阵列、网格阵列表面二次电子发射仿真结果。其中 δ 为结构深宽比,蓝线为发射至结构表面的入射电子束(一次电子),红线和紫线为激发产生的二次电子,绿线为电子在结构内部多次碰撞的轨迹图(彩图见期刊电子版)。

由图2(a)可知,沟槽深宽比为1:1时,电子在结构内部碰撞次数较少,二次电子数量较多,随着沟槽深宽比增大至2:1时,电子在结构内部碰撞数明显提高,且主要发生在沟槽底部,当深宽比提高至3:1时,电子在沟槽侧壁的碰撞次数

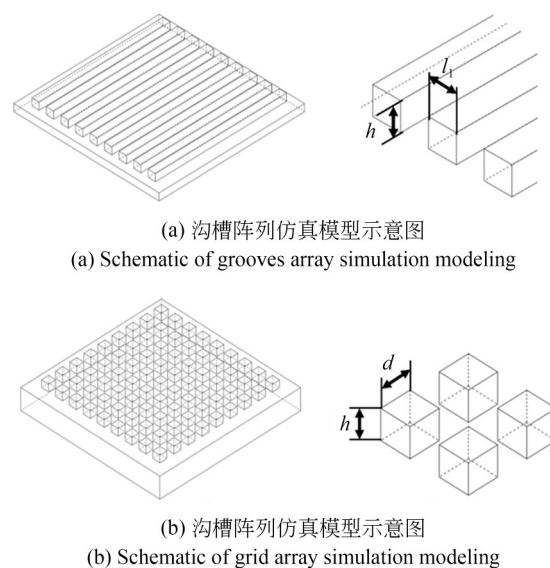
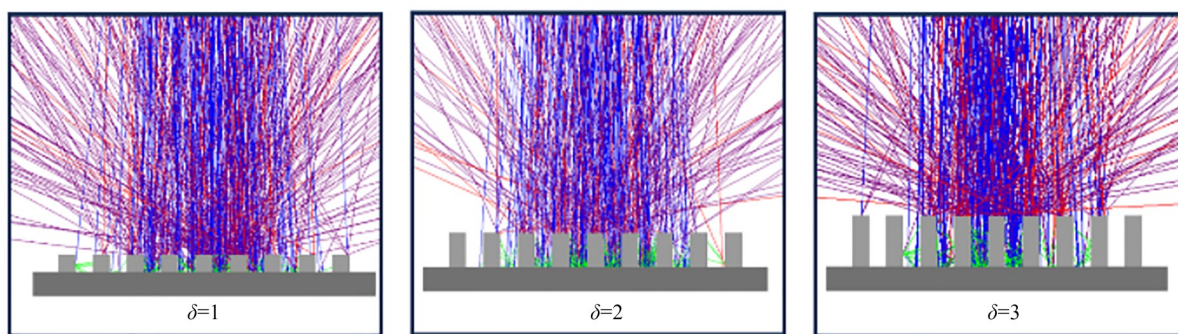
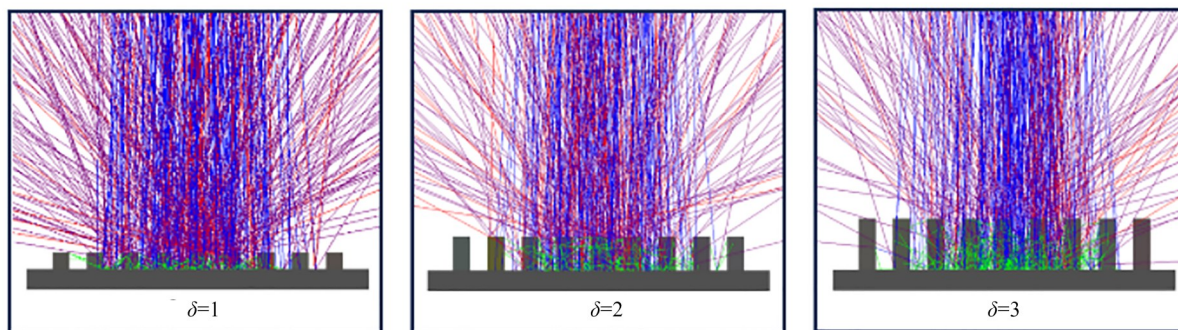


图1 沟槽、网格阵列仿真模型示意图
Fig. 1 Schematic of the simulation model of trench and grid arrays



(a) 0.1 keV下不同深宽比沟槽阵列表面二次电子发射仿真结果
(a) Simulation results of secondary electron emission from the surface of groove arrays with different depth-to-width ratio at 0.1 keV



(b) 0.1 keV下不同深宽比网格阵列表面二次电子发射仿真结果
(b) Simulation results of secondary electron emission from the surface of grid arrays with different depth-to-width ratio at 0.1 keV

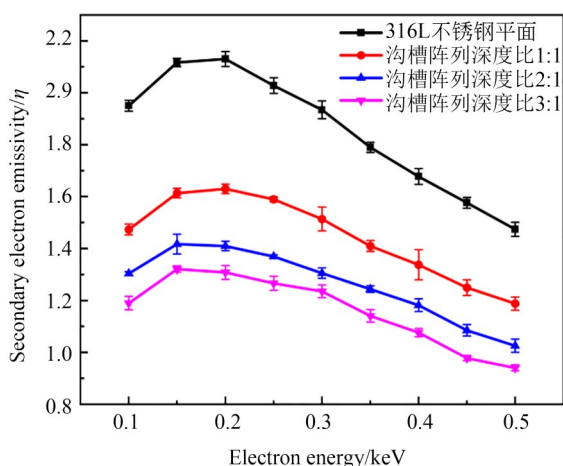
图2 不同深宽比沟槽阵列表面二次电子发射仿真结果(0.1 keV)

Fig. 2 Simulation results of secondary electron emission from the surface of trench arrays with different depth-to-width ratio at 0.1 keV

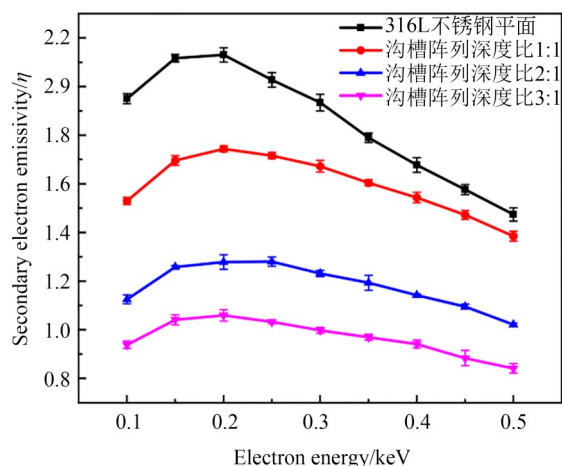
显著提高,说明沟槽深宽比提高时,侧壁的遮挡作用是沟槽抑制二次电子发射能力的重要组成部分,沟槽阵列可有效降低 316L 不锈钢表面二次电子发射率。由图 2(b)可知,深宽比为 1:1 时,网格阵列中心处绿线密度很高,即电子主要碰撞位置为中心处相邻结构底部,随着深宽比的增大,中心处和网格侧壁处电子碰撞数量均增长明显,深宽比为 3:1 时,阵列外部的紫线和红线密度较深宽比 1:1 时显著降低,即二次电子发射数量明显减少,因此提高网格阵列深宽比可显著抑制二次电子逃逸。

图 3 为 0.1~0.5 keV 下深宽比为 1:1, 2:1, 3:1 沟槽阵列、网格阵列表面二次电子发射率曲线图。由图 3(a)可知,沟槽阵列抑制二次电子发射率效果在深宽比达 3:1 时抑制效果接近饱

和,不同深宽比下,二次电子发射率峰值出现位置不同。沟槽阵列深宽比为 3:1 时,二次电子发射率峰值为 1.32,较未加工平面二次电子发射率峰值减少 37.99%,抑制效果良好。由图 3(b)可知,网格阵列存在非常明显的二次电子发射率抑制作用。当网格阵列深宽比为 1:1 时,二次电子发射率峰值较平面峰值有小幅下降,减少了 18.14%;当网格阵列深宽比为 2:1 时,峰值出现在电子能量 0.25 keV 处,较深宽比为 1:1 时降低 26.57%,抑制效果存在非常明显的提升;当网格阵列深宽比为 3:1 时,二次电子发射率抑制效果仍存在较明显的提升。方柱阵列深宽比为 3:1 时,二次电子发射率峰值较未加工平面减少百分比达 45.98%,抑制二次电子发射效果最佳。



(a) 不同深度比下沟槽阵列表面二次电子发射率
(a) Secondary electron emissivity on the surface of grooves array at different depth-to-width ratio



(b) 不同深宽比下网格阵列表面二次电子发射率
(b) Secondary electron emissivity on the surface of grid array at different depth-to-width ratio

图 3 不同深宽比下沟槽阵列、网格阵列平面二次电子发射率曲线图

Fig. 3 Surface secondary electron emissivity curves of grooves arrays and lattice arrays with different depth-to-width ratio

2.2 结构深宽比对表面二次电子发射率的影响规律

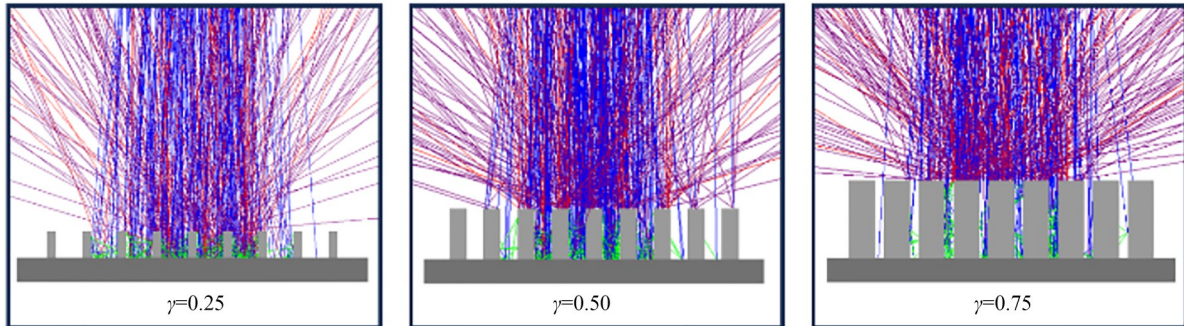
前文讨论了两种阵列结构深宽比对表面二次电子发射率的影响规律,得出了不同阵列结构均在深宽比为 3:1 时抑制二次电子发射效果最好的结论。结构深宽比可以看作是结构捕获二次电子能力的量化体现,而结构占空比则是对二次电子进入结构内部概率的量化体现,即二次电子被结构捕获并吸收的前提是一次电子进入结构

内部,本节进一步开展了结构占空比对表面二次电子发射率的影响研究。结构占空比定义为结构上表面投影面积所占 $l_1 \times l_2$ 正方形区域比例,其中 $l_2 = 100 \mu\text{m}$ 。

图 4 是电子能量为 0.1 keV 时,沟槽阵列、网格阵列占空比为 0.25, 0.50 和 0.75 下表面二次电子发射情况,其中 γ 为结构占空比。由图 4(a)可知,在占空比为 0.25 时,电子在沟槽阵列底部碰撞频繁,占空比为 0.5 时,电子碰撞多发生于槽

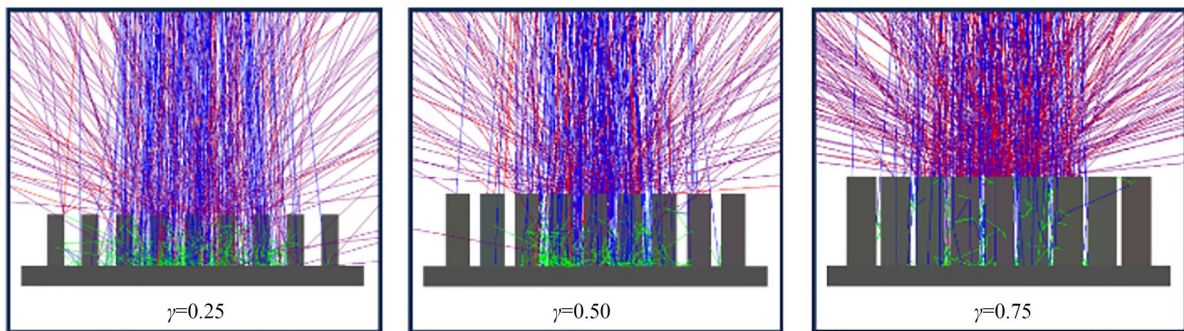
侧壁,占空比为0.75时,由于槽间距减小,电子碰撞次数降低。由图4(b)可见随着结构占空比的提高,进入结构内部的一次电子数量明显下降,结构内部电子碰撞位置从中心和四周均发生碰

撞变为仅在中心处发生碰撞,且电子碰撞次数明显下降,同时表面二次电子发射数量明显增长,说明占空比的提高导致电子进入结构内部并被捕获的概率减小。



(a) 0.1 keV下不同占空比沟槽阵列表面二次电子发射仿真结果

(a) Simulation results of secondary electron emission from the surface of groove arrays with different duty cycles at 0.1 keV



(b) 0.1 keV下不同占空比网格阵列表面二次电子发射仿真结果

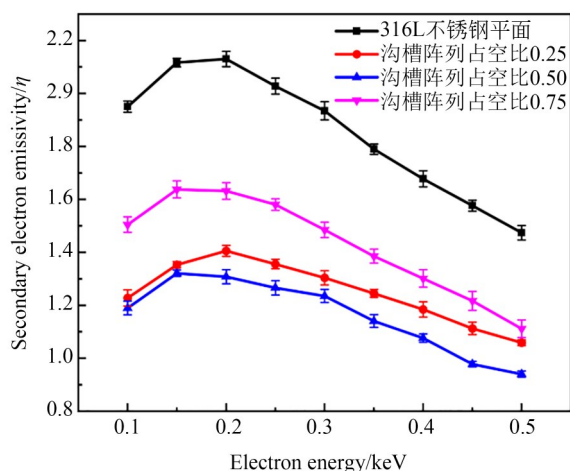
(b) Simulation results of secondary electron emission from the surface of grid arrays with different duty cycles ratio at 0.1 keV

图4 不同占空比下沟槽阵列、网格阵列表面二次电子发射情况(0.1 keV)

Fig. 4 Secondary electron emission from the surface of trench array and lattice array at different duty cycles at 0.1 keV

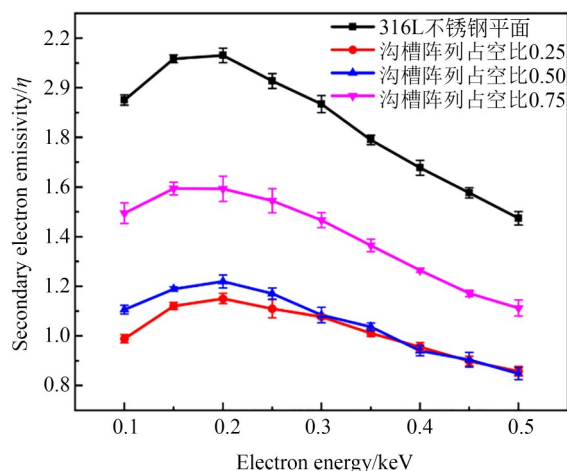
图5为0.1~0.5 keV的电子能量下不同占空比下沟槽阵列、网格阵列表面二次电子发射率变化曲线。由图5(a)可知,沟槽阵列结构占空比0.75时二次电子发射率下降幅度最小,降至0.50时二次电子发射率下降幅度最大,继续降至0.25后二次电子发射率有小幅提升,说明矩形槽结构在占空比为0.75时,电子进入结构内部的概率较小,大多数一次电子碰撞在槽表面并激发出二次电子,因此尽管结构深宽比为3:1,起到的抑制效果仍相当有限,当占空比降低至0.50时,电子进入结构内部的概率大幅提高,且深宽比为3:1的槽结构能够有效阻挡被激发的二次电子逃逸,二次电子发射率降至最低,进一步降低占空比至

0.25时,虽然大多数电子能够进入结构内部,但由于槽间距过大,所能起到的遮挡作用有限,部分二次电子发生逃逸,因此二次电子发射率少量回升。由图5(b)可知,当网格阵列占空比从0.75降至0.50时,二次电子发射率相较未加工平面有显著的下降;当占空比从0.50降至0.25时,网格阵列表面二次电子发射的抑制效果在电子能量低于0.3 keV时存在小幅度提升,而电子能量在高于0.3 keV时与占空比为0.50时接近,即对于方柱结构,结构占空比降至0.5时抑制二次电子发射率效果非常显著,继续降低结构占空比,二次电子抑制效果不会有显著提升。



(a) 不同占空比下沟槽阵列表面二次电子发射率

(a) Secondary electron emissivity on the surface of grooves array at different duty cycles



(b) 不同占空比下网格阵列表面二次电子发射率

(b) Secondary electron emissivity on the surface of grid array at different duty cycles

图 5 不同占空比下沟槽阵列、网格阵列表面二次电子发射率

Fig. 5 Secondary electron emission from the surface of trench array and lattice array at different duty cycles

3 316L 不锈钢的激光辅助水射流加工与抑制二次电子发射性能表征

3.1 激光辅助水射流的加工原理及设备

激光辅助水射流加工是一种通过激光和水的相互作用去除材料的新型激光-水复合加工方式,在激光辅助水射流加工过程中,激光的能量使材料表面局部区域的原子键弱化,水射流强大的冲击力能够精准地将这些被弱化的材料带走,实现材料的去除。加工过程中水射流和激光对工件作用方式如图 6 所示,喷嘴直径为 d_n ,水射流压强为 P_w ,水射流与工件表面形成的夹角为 θ ,水射流在工件表面形成自由射流区、射流冲击区和壁面射流区。射流冲击区处存在 O, S 两点, O 点

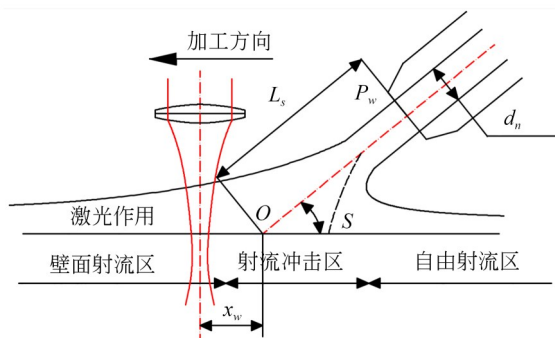


图 6 水射流和激光作用在材料表面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of water jet and laser action on material surface

为流束中心点,即水射流冲击材料表面的中心点, S 点为射流滞点,该点处流速为 0,正压力最大;壁面射流区是一层流动的薄水层,射流在此区域起到去除材料的作用,同时该区域也是激光与水共同作用在工件表面的位置。

本研究所使用的激光辅助水射流加工系统由激光器及光路系统、气液增压系统和控制电脑组成,如图 7 所示。设备中纳秒激光器波长为

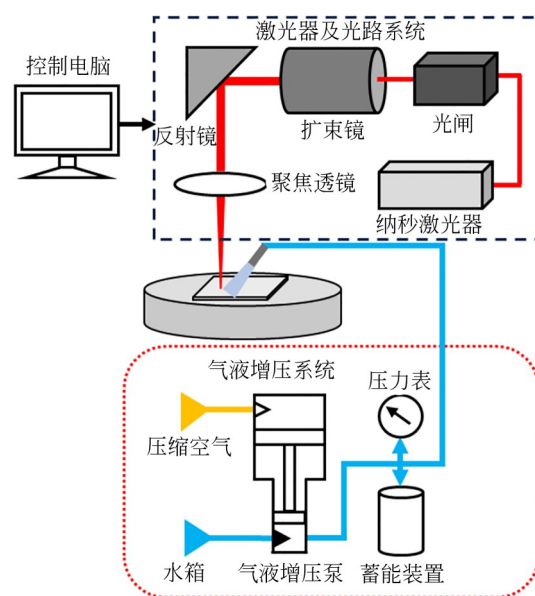


图 7 激光辅助水射流加工设备

Fig. 7 Laser assisted waterjet processing equipment

1 064 nm,脉冲宽度调节范围 10~350 ns,重复频率调节范围 100~1 000 kHz,平均功率输出范围 1~100 W。气液增压系统可稳定输出高压水流,并通过 0.3 mm 微孔喷嘴形成高速射流,最高压强约 40 MPa。

3.2 沟槽阵列、网格阵列的激光辅助水射流加工

激光辅助水射流加工中,关键参数为平均激光功率、水射流压强、水射流倾斜角度和水射流偏置距离,由于研究参数少于五项,且需快速筛选关键因素,因此采用 BBD 响应曲面法进行实验,每项因素设置低、中、高三个水平,表 1 为响应面实验的工艺参数表。

表 1 激光辅助水射流加工响应曲面法试验参数
Tab. 1 Experimental parameters of laser assisted water jet machining response surface method

变量	水平		
	-1	0	1
激光功率 P/W	25	35	45
水射流压强 P_w/MPa	2	6	10
水射流偏置距离 x_w/mm	0.4	0.5	0.6
水射流倾斜角度 $\theta/(\text{^\circ})$	42	45	48

通过 BBD 响应面实验,获得了平均激光功率、水射流压强、水射流倾斜角度和水射流偏置距离四项激光辅助水射流加工关键工艺参数对沟槽深宽比的影响规律,通过深宽比回归预测模型筛选出可获得深宽比 3:1 沟槽的加工参数组合。表 2 为工艺参数对沟槽深宽比回归模型的方差分析。

使用四元二次回归方程进行拟合,沟槽深宽比回归方程如公式(1)所示:

$$\delta = -37.36524 + 0.532389P - 0.600583P_w + 1.45082\theta - 2.39499x_w + 0.002221PP_w - 0.005967P\theta - 0.045783P_wx_w + 0.007700P_w\theta + 0.516023P_wx_w + 0.429525\theta x_w - 0.002721P^2 - 0.008641P_w^2 - 0.016878\theta^2 - 20.36591x_w^2.$$

(1)

其中: P 为激光功率, P_w 为水射流压强, x_w 为水射流偏置距离, θ 为水射流倾斜角度。

各实验参数对深宽比的影响规律如扰动图 8 所示。平均激光功率对深宽比的影响最大,水射流偏置距离对深宽比的影响程度较大,水

表 2 工艺参数对沟槽深宽比回归模型的方差分析
Tab. 2 Analysis of variance of regression model of process parameters on trench depth to width ratio

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	7.34	14	0.524 4	12.55	<0.000 1	***
A	4.89	1	4.89	116.95	<0.000 1	***
B	0.093 0	1	0.093 0	2.23	0.148 8	
C	0.028 0	1	0.028 0	0.671 0	0.420 8	
D	0.450 9	1	0.450 9	10.79	0.003 1	**
AB	0.031 6	1	0.031 6	0.755 7	0.393 3	
AC	0.128 2	1	0.128 2	3.07	0.092 7	
AD	0.008 4	1	0.008 4	0.200 6	0.658 2	
BC	0.034 2	1	0.034 2	0.817 2	0.375 0	
BD	0.170 4	1	0.170 4	4.08	0.054 8	
CD	0.066 4	1	0.066 4	1.59	0.219 5	
A ²	0.612 9	1	0.612 9	14.67	0.000 8	***
B ²	0.158 2	1	0.158 2	3.79	0.063 5	
C ²	0.191 0	1	0.191 0	4.57	0.042 9	*
D ²	0.343 3	1	0.343 3	8.21	0.008 5	**
残差	1.00	24	0.041 8			
失拟项	0.429 1	10	0.042 9	1.05	0.456 4	
纯误差	0.573 9	14	0.041 0			
所有项	8.34	38				

修正决定系数=0.809 7;预测决定系数=0.624 8;
信噪比=13.436 9

注:A 为平均激光功率,B 为水射流压强,C 为水射流倾斜角度,D 为水射流偏置距离;“***”为差异极显著($P<0.001$),“*”为差异显著($P<0.05$),“**”为差异高度显著($P<0.01$)

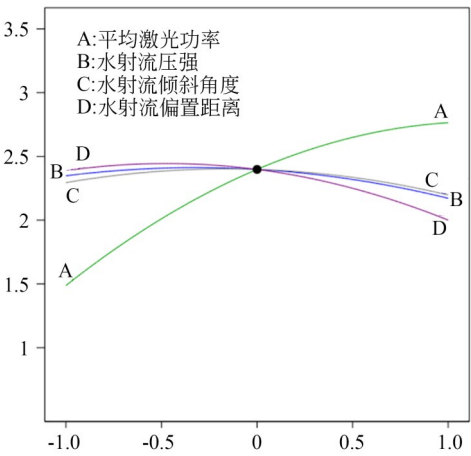


图 8 各试验参数对沟槽深宽比扰动图
Fig. 8 Disturbance diagram of each test parameter on groove depth-width ratio

射流压强和水射流倾斜角度对深宽比没有显著影响。工艺参数对深宽比的交互作用如图 9 所示,可知采用高水平的平均激光功率、中等偏

低水平的水射流偏置距离和水射流倾斜角度以及较低水平的水射流压强可获得高深宽比结构。

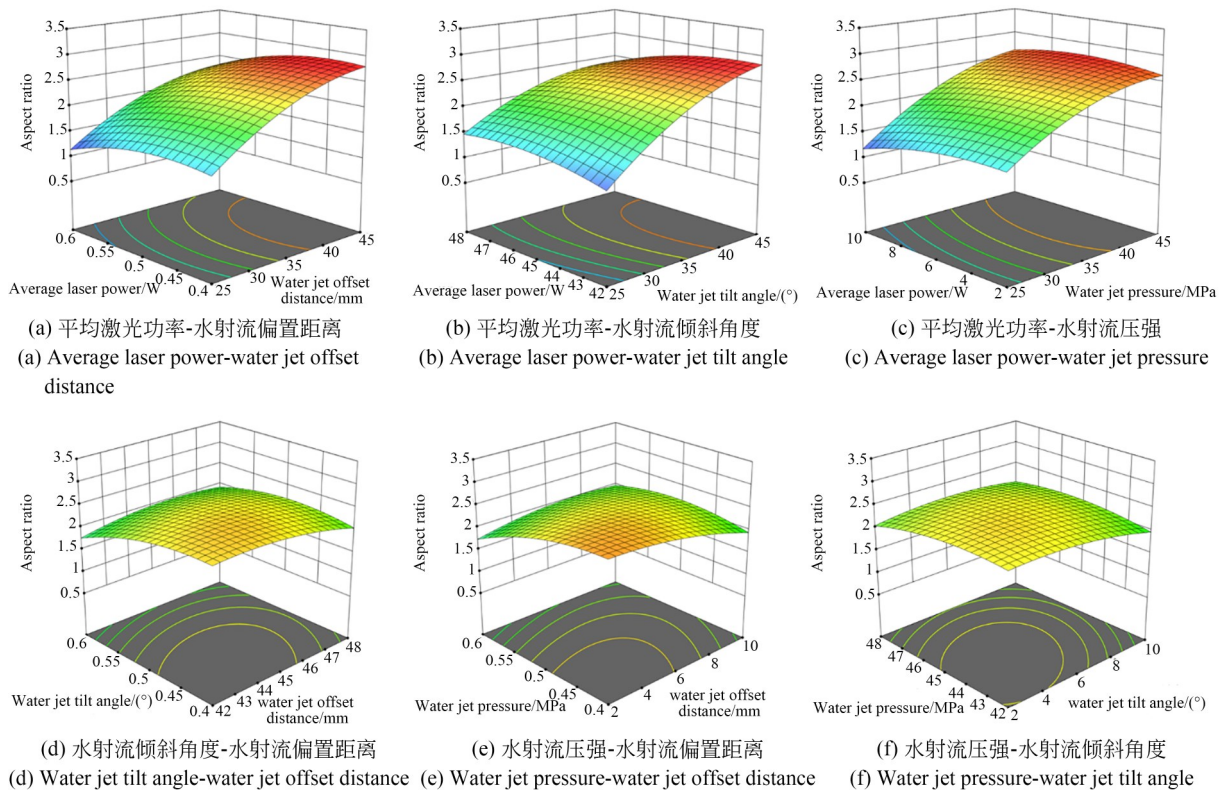


图 9 加工工艺参数对沟槽深宽比的交互作用

Fig. 9 Interaction of processing parameters on groove depth-to-width ratio

通过上述响应曲面结果及所获沟槽深宽比回归预测模型,得到模型范围内优选高深宽比工艺参数组合及预测值如表 3 所示。采用该组参数进行加工,所得沟槽阵列三维形貌通过激光共聚焦显微镜(VK-X200)测得,如图 10 所示,获得了深宽比近 3:1、占空比为 0.5 的沟槽阵列结构。由于网格阵列需加工相互垂直的二组沟槽,在网格阵列(第二组沟槽)的加工过程中,加工面形貌的变化会影响水射流的壁面切应力大小,水射流壁面切应力大小与水射流偏置距离呈反比关系,由图 8 可知,采用较高水平的水射流偏置距离可降低沟槽深宽比,因此网格沟槽(第一组沟槽)和网格沟槽(第二组沟槽)需使用不同参数加工。网格阵列所使用的工艺参数如表 4 所示,图 11 为所加工网格阵列的三维形貌。

表 3 沟槽深宽比优化后工艺参数组合及预测结果

Tab. 3 Combination of process parameters and prediction results after optimization of grooves depth-to-width ratio

工艺参数	优选结果
激光功率/W	45
水射流压强/MPa	6
偏置距离/mm	0.5
水射流倾斜角度/(°)	42
预测结果	
沟槽深度/ μm	153.436
沟槽深宽比	2.840

表 4 深宽比相同网格阵列结构加工参数

Tab. 4 Machining parameters for depth-to-width ratio consistent grid array structures

加工顺序	P/W	P_w/MPa	x_w/mm	$\theta/(^\circ)$
第一组沟槽	45	6	0.5	42
第二组沟槽	45	6	0.65	42

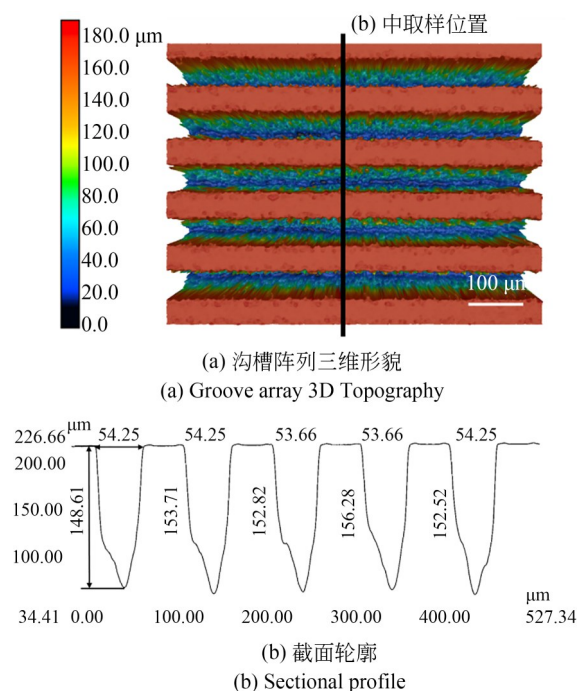


图 10 沟槽阵列三维形貌

Fig. 10 Groove array surface topography

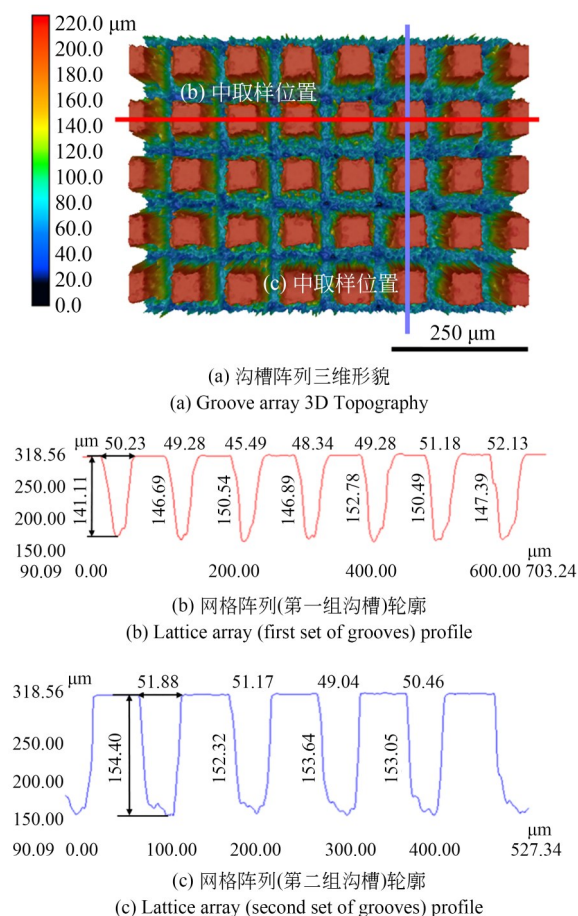


图 11 网格阵列表面形貌

Fig. 11 Lattice array surface topography

3.3 316L 不锈钢表面抑制二次电子发射性能表征

物体表面的二次电子发射率常通过电流法进行检测。电流法测量二次电子发射率的原理基于二次电子发射率的定义,即分别测量样品二次电子电流与一次电子电流,并计算其比值,如公式(2)所示:

$$\delta_{\text{SEY}} = \frac{I_s}{I_p}, \quad (2)$$

其中: I_s 为二次电子电流, I_p 为一次入射电子电流。

检测二次电子发射的实验装置一般分为三个模块,分别是电子枪与偏压系统模块、电流测量装置模块以及收集极模块,如图 12 所示。

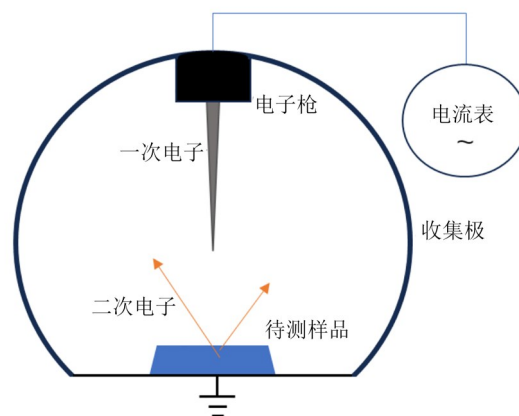


图 12 二次电子发射率测量实验装置

Fig. 12 Schematic diagram of the experimental setup for secondary electron yield measurement

对于导电样品,可通过电子枪发射一定能量的电子束轰击样品表面,产生的二次电子被收集极所捕获,测得收集极电流并通过式(2)计算样品二次电子发射率测量样品表面二次电子发射。

通过电流法进行了 316L 不锈钢表面二次电子发射率的检测,得到沟槽阵列、网格阵列及未加工平面的二次电子发射率结果如图 13 所示。测试所采用的电子能量范围为 50~500 eV,未加工表面的二次电子发射率呈现快速升高后缓慢下降的趋势,峰值出现于电子能量 0.3 keV 时,此时二次电子发射率峰值为 2.33,沟槽阵列的二次电子发射率峰值出现在 0.35 keV 处,在此之前一直呈现上升的趋势,超过后呈现缓慢下降的趋势,网格阵列的二次电子发射率则始终呈现上升

的趋势,在电子能量位于 0.15~0.25 keV 范围内有效抑制了二次电子发射,将其保持在 1.2 左右,并在电子能量大于 0.25 keV 后继续呈现上升趋势。

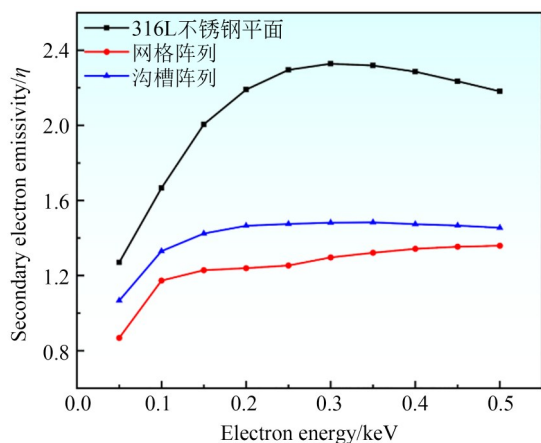


图 13 未加工表面、沟槽阵列和网格阵列表面二次电子发射率

Fig. 13 Secondary electron yield on unmachined surfaces, unidirectional groove arrays, and grid array Surfaces

对沟槽阵列和网格阵列表面二次电子发射率进行分析。对于沟槽阵列,其二次电子发射率峰值为 1.48,出现在电子能量 0.35 keV 时,较未加工平面减少了 36.48%;由于网格阵列结构表面二次电子发射率较低,二次电子发射率在测试范围内均呈现增长的趋势,因此取 0.15~0.25 keV 处二次电子发射率峰值 1.25 进行对比,此范围内二次电子发射率峰值仅为 316L 不锈钢平面的 46.35%。经表面处理后的 316L 不锈钢片,整体二次电子发射率均低于 1.5,即沟槽结构、网格结构均能显著降低 316L 不锈钢表面的二次电子发射,较未加工表面分别降低了 36.5% 和 46.35%,且网格结构抑制二次电子发射效果优于沟槽结构。两种结构形貌均能够显著降低 316L 不锈钢表面二次电子发射数量,其中网格阵

列抑制二次电子发射性能更优。本研究为大功率微波器件、粒子加速器真空腔室表面抑制二次电子发射微结构的设计与加工提供了理论依据与工艺优化方向。

4 结 论

本研究通过 CASINO 软件研究了不同深宽比、占空比下 316L 不锈钢表面沟槽阵列、网格阵列结构抑制二次电子发射性能,通过激光辅助水射流技术进行了 316L 不锈钢表面沟槽阵列、网格阵列的加工,获得了高深宽比沟槽阵列和网格阵列结构,并测量了两种微结构阵列表面二次电子发射情况,主要结论如下:

(1) 仿真模拟结果表明,沟槽阵列、网格阵列在深宽比 3:1 时抑制二次电子发射效果最好,二者抑制性能最优时的占空比分别是 0.50 和 0.25。

(2) 采用响应曲面法获得了平均激光功率、水射流压强、水射流倾斜角度和水射流偏置距离对沟槽深宽比的影响规律,可知平均激光功率和水射流偏置距离对深宽比存在显著影响,通过回归预测模型筛选出可获得高深宽比沟槽的加工参数组合并进行了激光辅助水射流加工实验,获得了高深宽比沟槽阵列、网格阵列结构。

(3) 实验测得 316L 不锈钢表面沟槽阵列、网格阵列二次电子发射率峰值较未加工表面分别降低了 36.5% 和 46.35%,证明两种阵列结构均能有效降低 316L 不锈钢表面二次电子发射数量。

作者贡献声明:

徐相悦:论文构思和撰写;
姚彦如:数据整理和分析;
褚东凯:论文审核与指导;
刘雪飞:测量实验数据验证。

参考文献:

- [1] 金雪莲,吴雪梅,诸葛兰剑,等. 抑制二次电子发射方法的研究[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7176-7182.

JIN X L, WU X M, ZHUGE L J, *et al.* Study on suppression of secondary electron emission[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(7): 7176-7182. (in Chinese)

- [2] 李少林, 李伯林, 张康龙, 等. 基于二次电子发射的Monte Carlo仿真模拟[J]. 装备制造技术, 2023(4): 1-5, 23.
LI S L, LI B L, ZHANG K L, *et al.* Monte Carlo simulation based on secondary electron emission[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2023(4): 1-5, 23. (in Chinese)
- [3] OLANO L, DÁVILA M E, DENNISON J R, *et al.* Dynamic secondary electron emission in rough composite materials[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 13967.
- [4] 方键威, 洪远志, 王思慧, 等. 激光刻蚀铜的低温二次电子发射特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(8): 573-577.
FANG J W, HONG Y Z, WANG S H, *et al.* Secondary electron emission characteristics of laser etched copper at cryogenic temperature[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2022, 42(8): 573-577. (in Chinese)
- [5] 段萍, 覃海娟, 周新维, 等. 霍尔推进器壁面材料二次电子发射及鞘层特性[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 288-294.
DUAN P, QIN H J, ZHOU X W, *et al.* Characteristics of wall materials secondary electron emission and sheath in Hall thruster[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 288-294. (in Chinese)
- [6] ZHANG F K, DING Y J, QING S W, *et al.* Near-wall conductivity effect under a space: charge-saturated sheath in the Hall thruster[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(12): 125201.
- [7] RAITSES Y, SMIRNOV A, STAACK D, *et al.* Measurements of secondary electron emission effects in the Hall thruster discharge[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(1): 014502.
- [8] YATER J E. Secondary electron emission and vacuum electronics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(5): 050901.
- [9] 范永山, 杜畅通, 张化一, 等. Xi PAF重离子同步加速器超高真空系统设计[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(1): 339-346.
FAN Y S, DU C T, ZHANG H Y, *et al.* Design of an ultra-high vacuum system for the XiPAF heavy-ion synchrotron [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(1): 339-346. (in Chinese)
- [10] 罗艳, 王魁波, 吴晓斌, 等. 高精度真空材料放气测试研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(3): 251-257.
LUO Y, WANG K B, WU X B, *et al.* Research on high-precision outgassing test of vacuum materials[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2016, 36(3): 251-257. (in Chinese)
- [11] 卞抱元. 衍射极限储存环真空系统关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
BIAN B Y. *Research on Key Technologies of Vacuum System of Diffraction Limit Storage Ring* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [12] 罗艳, 王魁波, 吴晓斌, 等. 电子致放气测试装置的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2024, 44(3): 196-203.
LUO Y, WANG K B, WU X B, *et al.* Electron induced outgassing test device[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2024, 44(3): 196-203. (in Chinese)
- [13] JI Y C, SPENTZOURIS L, ZWASKA R. Secondary Electron Yield Measurement and Electron Cloud Simulation at Fermilab[C]. *6th International Particle Accelerator Conference, Richmond, VA, USA*, 2017
- [14] LIU L, CHU D K, *et al.* Laser-assisted water jet machining of high quality micro-trap structures on stainless steel surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1476.
- [15] PIVI M, KING F K, KIRBY R E, *et al.* Sharp reduction of the secondary electron emission yield from grooved surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(10): 104904.
- [16] ZHANG W L, WANG Y G, WANG S H, *et al.* Study on the anisotropy of the secondary electron yield and resistance of the laser-etched copper[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 564: 150419.
- [17] VALIZADEH R, MALYSHEV O B, WANG S, *et al.* Reduction of secondary electron yield for E-cloud mitigation by laser ablation surface engineering [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 404: 370-379.
- [18] 王一刚, 裴香涛, 朱邦乐, 等. 激光刻蚀不锈钢材料的二次电子发射特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(6): 510-513.
WANG Y G, PEI X T, ZHU B L, *et al.* Sup-

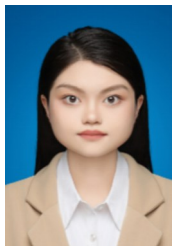
- pression of secondary electron emission from stainless-steel surface by laser etching: an experimental study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(6): 510-513. (in Chinese)
- [19] WANG J, GAO Y, YOU Z M, *et al.* Laser induced nano and micro structures of molybdenum surface applied in multistage depressed collector for secondary electron suppression[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4374.
- [20] 张文丽, 卞抱元, 葛晓琴, 等. 大气贮存对激光刻蚀铜二次电子发射的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2023, 43(11): 954-959.
- ZHANG W L, BIAN B Y, GE X Q, *et al.* Influence of atmospheric storage on secondary electron emission of laser-etched copper[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2023, 43(11): 954-959. (in Chinese)
- [21] KRKOTIĆ P, CALATRONI S, HIMMERLICH M, *et al.* RF characterisation of laser treated copper surfaces for the mitigation of electron cloud in accelerators[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2687(8): 082029.
- [22] 叶鸣, 王丹, 贺永宁. 金属柱状阵列结构二次电子发射系数模拟研究[J]. *空间电子技术*, 2022, 19(4): 79-84.
- YE M, WANG D, HE Y N. Simulation of secondary electron yield of metallic pillar array [J]. *Space Electronic Technology*, 2022, 19(4): 79-84. (in Chinese)
- [23] SUETSUGU Y, FUKUMA H, PIVI M, *et al.* Continuing study on electron-cloud clearing techniques in high-intensity positron ring: Mitigation by using groove surface in vertical magnetic field[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 604(3): 449-456.
- [24] 张娜, 曹猛, 崔万照, 等. 金属规则表面形貌影响二次电子产额的解析模型[J]. *物理学报*, 2015, 64(20): 398-406.
- ZHANG N, CAO M, CUI W Z, *et al.* Analytical model of secondary electron yield from metal surface with regular structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(20): 398-406. (in Chinese)
- [25] PIERRON J, INGUIMBERT C, BELHAJ M, *et al.* Effect of rectangular grooves and checkerboard patterns on the electron emission yield[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(9): 095101.
- [26] 封国宝, 崔万照, 胡天存, 等. 基于表面构型的二次电子发射及微放电特性研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(9): 121-127.
- FENG G B, CUI W Z, HU T C, *et al.* Research on secondary electron emission and multipactor discharge via surface micro-trapped structure [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(9): 121-127. (in Chinese)
- [27] 胡晶, 曹猛, 李永东, 等. 微米量级表面结构形貌特性对二次电子发射抑制的优化[J]. *物理学报*, 2018, 67(17): 284-294.
- HU J, CAO M, LI Y D, *et al.* Optimization of surface morphology with micro meter size for suppressing secondary electron emission [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(17): 284-294. (in Chinese)
- [28] 潘向宁. 激光辅助水射流切割单晶硅的微槽特征模型和工艺参数优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- PAN X N. *Study on Micro-Groove Characteristic Model and Process Parameter Optimization of Laser-Assisted Water Jet Cutting Monocrystalline Silicon* [D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese)
- [29] 冯少川. 单晶碳化硅晶片的激光—水射流复合近无损微细加工机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- FENG S C. *Study on Near-Nondestructive Micro-Machining Mechanism of Single Crystal Silicon Carbide Wafer by Laser-Water Jet Composite* [D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese)
- [30] 张晨旭. 激光辅助水射流切割氧化铝陶瓷的可加工性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- ZHANG C X. *Study on Machinability of Laser-Assisted Water Jet Cutting Alumina Ceramics* [D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese)
- [31] 王良. 激光辅助水射流微细加工氮化硅陶瓷的去除机理与工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- WANG L. *Study on Removal Mechanism and Technology of Silicon Nitride Ceramics by Laser-Assisted Water Jet Micromachining* [D]. Jinan:

Shandong University, 2017. (in Chinese)

- [32] 田龙. 纳秒激光辅助水射流加工氧化镓的加工机理和表面完整性研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.

TIAN L. *Study on Machining Mechanism and Surface Integrity of Gallium Oxide by Nanosecond Laser-Assisted Water Jet Machining* [D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese)

作者简介:



徐相悦(1999—),女,江西丰城人,硕士研究生,2022年于山东建筑大学获得学士学位,主要从事激光微纳加工、激光辅助水射流加工等方面的研究。
E-mail: xxy19321@163.com

通讯作者:



褚东凯(1991—),男,山西吕梁人,博士,助理研究员,硕士生导师,2020年于中南大学获得博士学位,主要从事超快激光微纳制造、仿生吸波功能性表面制备、超精密加工技术方面的研究。E-mail: chudongkai@sdu.edu.cn