

皮秒激光加工钛合金表面微槽及润湿性研究

袁美霞¹, 孙永强¹, 郭玉冰²

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100044; 2. 北京理工大学 医学技术学院, 北京 100081)

摘要:为了探究微沟槽阵列对 TC4 (Ti6Al4V) 钛合金表面润湿性的影响规律, 使用皮秒激光在钛合金表面进行微槽加工。设计正交试验并进行回归分析研究激光参数与沟槽尺寸形貌之间的关系。通过单因素实验, 分别改变槽宽、槽深以及槽间距, 研究沟槽形貌尺寸的变化对钛合金表面水接触角的影响。结果发现在一定范围内, 更大的槽宽和槽深、更小的间距会增强钛合金表面的疏水性能。

关键词: TC4 (Ti6Al4V) 钛合金; 皮秒激光; 润湿性; 微沟槽

中图分类号: TN249; TG665 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.005

Research on surface microgrooves and wettability of titanium alloy processed by picosecond laser

YUAN Mei-xia¹, SUN Yong-qiang¹, GUO Yu-bing²

(1. School of Mechanical-electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Medical Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to investigate the influence of micro groove arrays on the wettability of TC4 (Ti6Al4V) titanium alloy surface, microgroove machining is carried out on the surface of titanium alloy using picosecond laser. Orthogonal experiments are designed and regression analysis is performed to study the relationship between laser parameters and groove size and morphology. Through single factor experiments, the effects of changes in groove width, groove depth, and groove spacing on the water contact angle of titanium alloy surfaces are studied. It is found that within a certain range, larger groove width and depth, and smaller spacing can enhance the hydrophobicity of the titanium alloy surface.

Keywords: TC4 (Ti6Al4V) titanium alloy; picosecond laser; wettability; microgroove

1 引言

钛合金作为一种具有高强度、低密度、耐腐蚀及良好的生物相容性的材料, 在航空航天^[1]、船舶^[2]和生物医疗^[3]方面有着广泛地应用。而钛合金在不同的应用场景下也对其表面的润湿性提出了不同的要求。例如在作为生物材料时, 为了提高钛合金

的生物相容性, 通常需要对其做亲水处理^[4]; 而在航空航天和海洋工程等领域, 由于具有抑冰、防腐减阻、自清洁等优点, 疏水表面则更具优势。

相较于传统的加工方式, 如化学刻蚀^[5]、等离子体溅射^[6]、机械加工^[7]、自组装^[8]、喷涂法^[9]等, 激光加工在制备钛合金疏水表面上具有清洁、高效、

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2020YFC2406000) 资助。

作者简介: 袁美霞 (1979 -), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进制造。

通讯作者: 孙永强 (2000 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向机械制造及自动化。E-mail: 2606506431@qq.com

收稿日期: 2024-04-07; 修订日期: 2024-05-31

灵活、精确等优势。针对激光加工对钛合金表面润湿性的影响,国内外学者展开了大量的研究。崔静等^[10]发现通过对钛合金表面进行激光织构加工后,材料表面由于激光加工形成大量的羟基,表现出明显的亲水性;而暴露在空气中一段时间后,表面微纳结构会吸收空气中的有机化合物,从而转变为疏水性。而 Yang 等^[11]发现在激光处理后对样品进行低温退火热处理,能显著加快表面润湿性转变,最终得到了最大接触角为 144.58° 的超疏水表面。曾俊彦等^[12]利用飞秒激光加工出不同粗糙度的微纳米结构,发现更高粗糙度的结构可以将空气截留在基体与液体之间并形成空气膜,阻挡液体与基体接触,从而具有更高的疏水性,提高的钛合金的耐腐蚀性能。张明鲲等^[13]使用低温热处理,将钛合金表面的润湿性,由激光加工后的超亲水性,转变为超疏水性,从而提高了钛合金材料的抗腐蚀性能。He 等^[14]通过调整激光参数,首次实现了表面结构由微槽向微凸起的转变,实验发现,微凸起阵列比微槽阵列具有更好的亲水性,而且高扫描间隔的微凸体阵列即使在 90 天后仍能比微槽阵列保持更好的亲水性。

以往的研究主要聚焦于激光参数对材料表面润湿性的影响,缺乏对激光加工后微结构尺寸的定量分析,而微结构能够直接影响材料的润湿性能。所以本文以微槽结构的尺寸作为主要参数,研究不同的沟槽宽度、深度与间距对钛合金表面润湿性的影响规律,探究微结构形貌对表面润湿性的影响机制,从而根据实际的润湿性需求设计材料表面的微结构,提高钛合金的应用范围。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料及仪器

本文以 TC4 钛合金为试验材料,其组成成分如表 1 所示,利用线切割工艺将其切割成尺寸为 15 mm × 2 mm 的圆形样品。利用金相研磨机分别使用 600#、1200#、2000#、3000# 金相砂纸对其表面进行机械抛光,然后使用抛光膏抛光得到近光滑镜面。依次放入丙酮、乙醇中超声清洗 30 min,以去除合金表面的油污和杂质等,最后将其自然晾干备用。

试验使用皮秒激光加工系统在钛合金表面进行烧蚀去除材料形成沟槽结构。皮秒激光加工系统主要由皮秒激光器、冷却系统、三轴运动平台和控制

系统组成,如图 1 所示。激光器为英诺激光生产的 AMT-1064-20-100-W 型皮秒激光器,波长 1064 nm,平均功率 > 20 W,指定频率 100 kHz,激光脉宽 < 12 ps,脉冲能量 > 200 μJ。在正式进行实验之前,需要通过调整运动平台使得激光焦点刚好落在材料表面,确保激光能量聚集在一点。利用上述激光器在室温空气环境中进行实验,激光加工完成之后,将钛合金依次放入丙酮、无水酒精中超声清洗 30min,去除表面加工后的残屑。

表 1 Ti6Al4V 钛合金化学成分

Tab. 1 Ti6Al4V titanium alloy chemical composition

元素	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
重量比/%	6.08	4.03	0.21	0.05	0.018	0.001	0.12	Bal

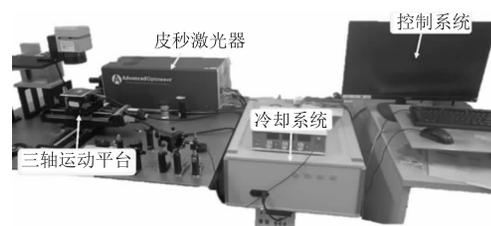


图 1 皮秒激光加工系统

Fig. 1 Picosecond laser processing system

使用形状测量激光显微镜(基恩士 VK-X200)测量样品的截面轮廓尺寸,观察加工后微结构的三维形貌;使用接触角测量仪(OCA25, Dataphysics, 德国)测量加工后钛合金的表面接触角,测量时使用的液滴大小为 4 μL,每个位置测量 2 次。

2.2 实验方法

沟槽的尺寸受到激光功率、频率、扫描速度和次数等因素的影响,当改变激光参数中的某一项时,沟槽的宽度和深度会同时受到影响。因此在单因素实验之前,采用正交实验完成回归分析,拟合沟槽尺寸与激光参数之间的关系,并根据回归模型预测单因素试验所需的参数。

采用 Box-Behnken(BBD)进行 4 因素 3 水平的试验方案设计,以激光功率(A)、激光频率(B)、扫描速度(C)、扫描次数(D)四个因素为自变量,以宽度为和深度为响应进行试验设计,经过试验分析得到关于沟槽宽度和深度的回归方程。每个因素下选取等间距的三个水平:低(-1)、中(0)、高(1)组合设计。根据以往的研究和单因素试验,以加工表面形貌较好、沟槽尺寸合理为目标,选则合适的激光参数范围,选取的因素水平表 2 所示。

表2 因素水平表
Tab.2 Factor levels table

因素	因素水平		
	低值(-1)	中值(0)	高值(1)
激光功率 A/W	200	250	300
激光频率 B/kHz	100	150	200
扫描速度 C/mm·s ⁻¹	30	60	90
扫描次数 D/n	50	100	150

为了探究沟槽宽度、深度与间距分别对表面润湿性的影响,在正交试验得到的预测模型基础上,依次改变沟槽的宽度(18、22、26、30 μm)、深度(7、14、

21、28 μm)和间距(40、80、120、160 μm),并分析在不同沟槽尺寸下 TC4 钛合金表面结构特征和水接触角的变化,探究通过皮秒激光制备的沟槽尺寸参数对钛合金表面润湿性的影响。

3 结果与分析

3.1 正交试验结果

利用 Design expert 软件进行 BBD 设计,共需进行 29 组试验,采用激光共聚焦显微镜对加工后的表面形貌进行测量,每组实验结果选取三个不同位置进行测量并取平均值,实验加工方案及测量结果如表 3 所示。

表3 正交试验方案及结果
Tab.3 Scheme and results of orthogonal test

实验组	激光功率 A/W	激光频率 B/kHz	扫描速度 C/mms ⁻¹	扫描次数 D/n	宽度 Y ₁ /μm	深度 Y ₂ /μm
1	250	100	90	100	17.35	17.55
2	300	150	60	50	28.1	18.72
3	250	100	30	100	24.09	18.95
4	300	150	60	150	20.54	23.1
5	300	150	90	100	29.42	25.88
6	200	200	60	100	28.7	8.43
7	250	150	60	100	25.55	17.46
8	300	100	60	100	26.94	32.11
9	250	150	60	100	32.26	6.21
10	200	150	60	150	30.14	10.46
11	250	150	60	100	32.62	16.32
12	300	200	60	100	32.26	10.51
13	250	150	90	150	16.26	18.41
14	250	200	30	100	40.09	12.99
15	200	150	30	100	40.18	8.34
16	250	200	60	150	25.7	15.73
17	250	100	60	150	22.31	20.24
18	250	100	60	50	28.18	17.08
19	250	150	90	50	19.82	6.13
20	250	150	60	100	31.45	16.15
21	250	150	30	50	30.85	17.81
22	250	200	60	50	13.77	9.93
23	200	100	60	100	30.49	12.26
24	200	150	60	50	26.58	11.95
25	250	200	90	100	20.18	15.22
26	250	150	30	150	30.85	7.69
27	250	150	60	100	29.06	7.11
28	300	150	30	100	18.75	24.76
29	200	150	90	100	16.6	9.31

使用 Design-Expert 软件对测量结果进行二次项拟合,建立了激光功率(A)、频率(B)、扫描速度(C)、扫描次数(D)之间的二次多项式回归模型与微槽宽度(Y_1)、深度(Y_2)交互作用的二次多项式回归模型:

$$Y_1 = 30.34 - 1.39A + 0.95B - 5.43C - 0.13D + 1.78AB + 8.56AC - 2.78AD - 3.29BC + 4.45BD - 2.14B^2 - 2.84C^2 - 4.26D^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 12.82 + 6.19A - 3.78B + 0.16C + 1.17D - 4.44AB + 1.47AD + 0.91BC + 0.66BD + 5.6CD + 2.54A^2 + 1.93B^2 + 0.94C^2 \quad (2)$$

进一步对回归模型的可靠性进行检测,分析回归模型的方差如表 4。发现两模型的 P 值分别为 0.0008 和 0.0009,均小于 0.05,表明两模型的方差较为显著。对模型的失拟项进行分析,两模型的失

拟项分别为 0.2754 和 0.9636,均大于 0.05,失拟项不显著,表明该模型的可信度高、准确性较高,具有研究意义。故该两模型可以用来对实验结果进行预测。

利用 Design-Expert 软件对激光参数进行预测优化。以制造宽度在 20 ~ 25 μm 范围内、深度为 15 μm 的微槽为例,预测得到的激光加工参数为:激光功率为 252 W,频率为 149 kHz,扫描速度 83 mm/s,扫描次数为 111 次,预测的槽宽为 24.5 μm ,槽深为 15 μm 。为验证预测结果的可靠性,利用预测的激光参数进行 3 次重复试验,测量沟槽的参数并取平均值,实际加工出沟槽的宽度和深度分别为 25.6 μm 和 15.72 μm ,预测结果与实际结果的误差为 4.49 % 和 4.8 %,均小于 5 %,表明所构建的模型能够很好的预测实验结果,可以在后续实验中使用。

表 4 二次多项式模型的方差分析

Tab. 4 ANOVA for quadratic polynomial models

		来源	平方和	自由度	均方差	F	P
宽度	模型 1	1011.27	12	84.27	5.74	0.0008	显著
	残差	235.08	16	14.69	/	/	/
	失拟项	200.49	12	16.71	1.93	0.2754	不显著
	纯误差	34.58	4	8.65	/	/	/
	总离差	1246.35	28	/	/	/	/
深度	模型 2	927.00	12	77.25	5.60	0.0009	显著
	残差	220.68	16	13.79	/	/	/
	失拟项	99.66	12	8.31	0.2745	0.9636	不显著
	纯误差	121.02	4	30.26	/	/	/
	总离差	1056.40	28	/	/	/	/

3.2 微结构形貌及润湿性分析

为了获得符合预期的沟槽参数,在公式(1)和(2)的基础上,利用 Design-Expert 软件的优化功能,设定沟槽的宽的和深度,进一步求出皮秒激光的参数。设计单因素实验,加工槽深为 7 μm 、间距 80 μm ,宽度分别为 18、22、26、30 μm 的微槽,加工后的微结构形貌如图 2(a) ~ (d);加工槽宽为 26 μm 、间距 80 μm ,槽深分别为 7、14、21、28 μm 的微槽,加工后的微结构形貌如图 2(e) ~ (h);加工宽度为 26 μm 、深度 7 μm ,间距分别为 40、80、120、160 μm 的微槽,加工后的微结构形貌如图 2(i) ~ (l)。并使用皮秒激光加工出对应的沟槽阵列,使用激光显微镜对加工后的微结构形貌进行测量分析。

3.2.1 表面结构形貌表征

图 3 为单因素试验下钛合金的表面 3D 形貌,微槽的截面呈“V”形,表面整体较为光滑,无明显缺陷。由于本实验使用的皮秒激光的能量密度为高斯分布,所以沟槽的截面形貌大致为“V”形。在使用皮秒激光去除材料时,由于马兰戈尼效应、表面张力和反冲压力的作用,烧蚀中心的融化的材料快速地移动到烧蚀边缘并在冷却后形成火山口状的沉积^[15],通过表面 3D 形貌可以观察到沟槽两侧产生的微米级凸起,增大了表面的粗糙度。所以在使用激光显微镜分析皮秒激光实际烧蚀出的沟槽时,应将“V”形槽截面与基板未加工上表面的相交线作为该微槽的实际宽度,将沟槽底部到未加工表面的垂

直距离作为沟槽的实际深度,相邻两条扫描路径的垂直距离为扫描间距,测量方式如图3所示。

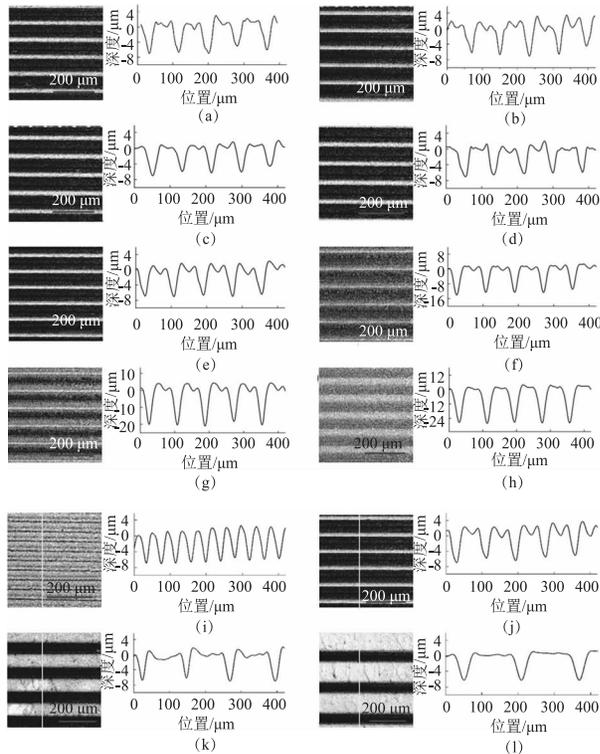


图2 钛合金表面微沟槽截面轮廓
Fig. 2 Cross section profile of micro grooves on the surface of titanium alloy

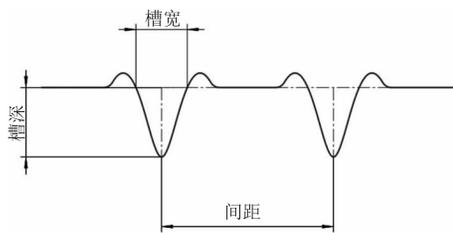


图3 微槽尺寸测量示意图
Fig. 3 Schematic diagram of micro groove size measurement

3.2.2 微结构形貌对润湿性的影响

研究表明材料在激光扫描后的位区域具有较高的表面能,使其呈现亲水性,当暴露在空气中一段时间后吸收空气中的有机物等,表面能降低,亲水性趋于稳定^[16]。为了获得稳定时的接触角,选择在激光加工后36 d再使用接触角测量仪对加工后的表面进行测量。

考虑到材料表面通常具有一定的粗糙度,液滴与固体间的接触模型主要分为三类:Wenzel模型中液体完全浸入到固体表面的粗糙结构中,如图4(a),此时,液滴与材料表面的实际接触面积大于

液滴在材料上的投影面积,粗糙的微结构可以增强材料的本征浸润性;当液滴与粗糙结构的凹陷中存在空气隔绝时,液滴完全无法浸润到粗糙结构当中,此时为Cassie模型,如图4(b)所示,此时空气的阻隔减小了液滴与材料表面的实际接触面积,降低了液滴在材料表面的粘滞性;当粗糙结构中凹槽的间隙过大,液滴能够部分浸入到凹槽结构中时,材料表面的润湿性为Wenzel-Cassie过渡模型,如图4(c)所示。

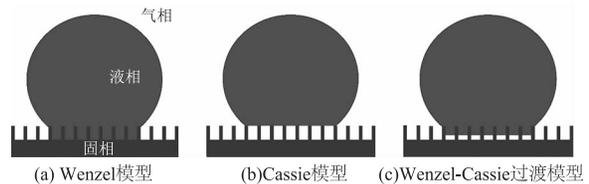


图4 液滴与固体表面间的接触模型
Fig. 4 Contact models of droplets with solid surface

从图5中可以看出,随着槽宽由18 μm增加到30 μm,TC4钛合金表面的接触角从86°增加到125°。这是因为随着槽宽的增加,激光扫描范围扩大,单个沟槽所占据的区域更大,但单位面积内沟槽的数量并未发生改变,导致粗糙结构的占比增加。表面的粗糙结构会增强材料原本的润湿性能,即使亲水的材料更加亲水,疏水的材料更加疏水。由于激光加工后钛合金表面吸收空气中的有机物使其转变为疏水状态,而粗糙结构又增强其表面的疏水性能,随着槽宽的增加,钛合金表面整体的粗糙区域的占比也在增加,使得材料表面的疏水性能增强,接触角变大。

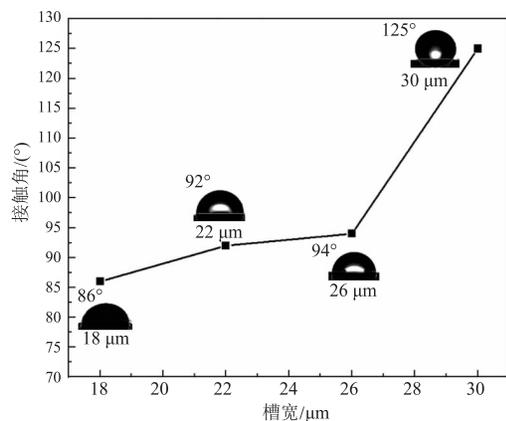


图5 接触角与微槽宽度的关系
Fig. 5 The relationship between contact angle and microgroove width

图6显示当槽宽为26 μm、间距为80 μm时,接触角随着槽深的变化关系。随着槽深由7 μm增加到

28 μm , TC4 钛合金表面的接触角由 118° 增加到了 144°, 接近超疏水表面。观察发现当槽深从 7 μm 增加到 14 μm 时, 接触角由 118° 突增到 140°, 这是由于在槽深较小时, 液滴可以完全浸入到沟槽的底部, 此时液滴与材料表面的接触符合 Wenzel 模型, 随着沟槽深度的增加, 液滴与粗糙结构的凹陷部分之间存在一层空气膜阻碍液滴的浸润, 使得液滴与材料的实际接触面积减少。此时液滴的浸润行为由 Wenzel 氏模型转为 Wenzel-Cassie 过渡模型。而当槽深从 14 μm 增加到 28 μm 时, 接触角却只变大了 4°, 这是因为当槽深为 14 μm 时, 液滴已经无法完全浸润整个沟槽, 此时更大的槽深已无法明显提升液滴与 TC4 钛合金表面的接触面积, 接触角的增加达到阈值。

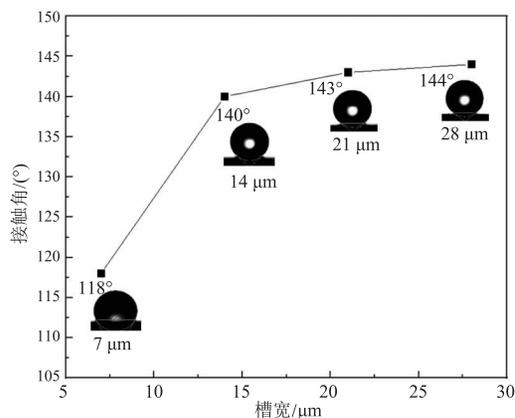


图 6 接触角与微槽深度的关系

Fig. 6 The relationship between contact angle and micro groove depth

图 7 显示了相邻沟槽之间的距离由 40 μm 增加到 160 μm , 接触角的变化。随着沟槽间距的增加, 接触角呈近似线性的减小, 由 135° 降低到 98°。这是由于相邻微槽间的距离增大, 而微槽的宽度和深度都未发生改变, 导致单位面积内沟槽的数量减小, 粗糙区域的占比也随之下降, 使得微结构增强材料表面疏水性的能力降低, 接触角整体呈现下降的趋势。随着间距的进一步增大, 液滴在钛合金表面的接触角会逐渐接近其本征接触角。

固体材料表面的润湿性主要受到材料的化学成分和微观形貌的影响^[17]。使用皮秒激光对 TC4 钛合金表面进行加工, 可以在不改变 TC4 钛合金表面主要成分的前提下, 通过设计激光参数加工出合适尺寸的微槽阵列, 影响 TC4 表面的润湿性, 通过进一步的设计, 甚至可以达到超疏水性。根据接触角随着微槽尺寸的变化规律, 想要获得较为疏水的表

面, 需要在一定范围内使沟槽的槽宽和槽深更大, 间距更小。在本实验设计的参数下, 推测钛合金表面接触角最大的微槽阵列结构的尺寸应为槽宽 30 μm , 槽深 26 μm , 间距 40 μm 。如果想要获得更大的接触角, 后续应该进一步优化参数范围, 设置更小的参数间隔, 更大的参数范围, 找到最合适的沟槽尺寸组合。

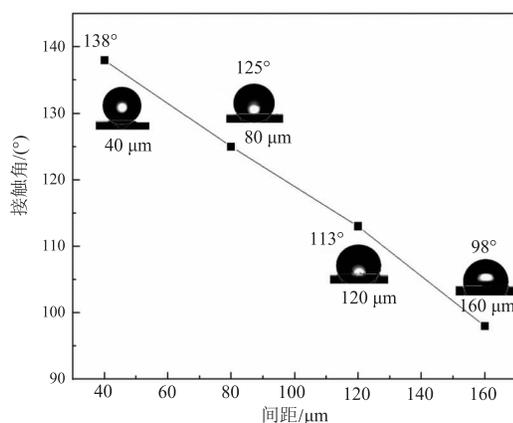


图 7 接触角与微槽间距的关系

Fig. 7 The relationship between contact angle and microgroove spacing

4 结论

表面微结构的形貌尺寸及排列方式对材料的润湿性均具有不同程度的影响, 以往的研究在使用激光加工制造微结构时, 通常以激光参数作为单因素实验的自变量, 难以线性的调控微结构的尺寸, 自然无法定量分析微结构对表面润湿性的影响。以沟槽尺寸为作为单因素实验的分析对象, 需先设计正交试验, 研究激光参数与微结构尺寸之间的关系, 并根据单因素试验的沟槽参数选择对应的激光参数。因此本文使用皮秒激光在 TC4 钛合金表面加工微槽阵列结构, 结合正交实验和单因素实验, 通过改变激光参数进一步影响微槽尺寸, 研究了槽宽、槽深和间距三个因素对 TC4 钛合金表面润湿性的影响, 得出以下结论:

(1) 在其他参数不变的前提下, TC4 钛合金表面的接触角随着沟槽间距的增加而变小, 而随着沟槽宽度和深度的增加而变大, 最大可达到 144°。

(2) 当沟槽深度达到一定程度时, 接触角的上升达到阈值, 继续增加槽深, 接触角不再明显增大。如果想要进一步提高钛合金表面的接触角, 应从沟槽的宽度和间距或者其他方面改善, 继续增加沟槽深度对接触角的提高没有明显作用, 且对加工条件的要求更加苛刻。

参考文献:

- [1] Wang Xin, Luo Xuekun, Yu Bo, et al. Research progress on surface engineering technology of aerospace titanium alloys[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(4):14-24. (in Chinese)
王欣, 罗学昆, 宇波, 等. 航空航天用钛合金表面工程技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(4):14-24.
- [2] Wu Jianxin. Application of titanium alloy materials in ship materials[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2020, (8):5-6. (in Chinese)
吴建新. 钛合金材料在船舶材料上的应用[J]. *船舶物资与市场*, 2020, (8):5-6.
- [3] Yu Zhentao, Yu Sen, Cheng Jun, et al. Development and application of novel biomedical titanium alloy materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(10):1238-1264. (in Chinese)
于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. *金属学报*, 2017, 53(10):1238-1264.
- [4] Li Huiying, Wu Feng, Shao Qian, et al. Superhydrophilic surface modification of medical near β -type titanium alloy TLM[J]. *Titanium Industry Progress*, 2011, 28(5):23-26. (in Chinese)
李慧颖, 吴锋, 邵茜, 等. 医用近 β 型 TLM 合金的超亲水表面改性[J]. *钛工业进展*, 2011, 28(5):23-26.
- [5] Zhang Y, Chen G, Wang Y, et al. A superhydrophobic coating on titanium alloys by simple chemical etching[J]. *Surface Review and Letters*, 2021, 28(5):2150027.
- [6] Moon B S, Kim S, Kim H E, et al. Hierarchical micro-nano structured Ti6Al4V surface topography via two-step etching process for enhanced hydrophilicity and osteoblastic responses[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 73:90-98.
- [7] Acar M T. Investigation of surface wettability, corrosion and tribocorrosion behavior of machined, etched, blasted and anodized Cp-Ti samples[J]. *MRS Communications*, 2023, 13(4):587-593.
- [8] Xu C L, Wang Y Z. Self-assembly of stearic acid into nano flowers induces the tunable surface wettability of polyimide film [J]. *Materials & Design*, 2018, 138:30-38.
- [9] Wang B, Gui L, Cai R, et al. Cost-effective superhydrophobic ZnO films with adjustable wetting behaviors deposited via solution precursor plasma spray process[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 478:130454.
- [10] Cui Jing, Zhang Yongwei, Wang Chengxuan, et al. Research on nanosecond laser of textured titanium alloy surface and its wettability [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(5):658-662. (in Chinese)
崔静, 张勇为, 王宸轩, 等. 纳秒激光织构钛合金表面及其润湿性研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(5):658-662.
- [11] Yang Z, Zhu C, Zheng N, et al. Superhydrophobic surface preparation and wettability transition of titanium alloy with micro/nano hierarchical texture [J]. *Materials*, 2018, 11(11):2210.
- [12] Zeng Junyan, Zhuang Yuan, Yang Tao, et al. Micro-nano-structure preparation on surface of titanium alloy based on femtosecond laser and its corrosion behavior[J]. *Welding & Joining*, 2023(8):37-43. (in Chinese)
曾俊彦, 庄园, 杨涛, 等. 基于飞秒激光的钛合金表面微米结构制备及腐蚀行为[J]. *焊接*, 2023(8):37-43.
- [13] Zhang Mingkun, Wang Xinhui, Liang Zhiguo, et al. Study on wettability and corrosion resistance of laser texturing surface of superwetting titanium alloy[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2023, 38(5):111-117, 126. (in Chinese)
张明鲲, 王新辉, 梁治国, 等. TC4 钛合金激光织构表面的润湿性和耐腐蚀性研究[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2023, 38(5):111-117, 126.
- [14] He W, Yao P, Chu D, et al. Controllable hydrophilic titanium surface with micro-protrusion or micro-groove processed by femtosecond laser direct writing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152:108082.
- [15] Leitz K H, Redlingshöfer B, Reg Y, et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12:230-238.
- [16] Yang Z, Liu X, Tian Y. Insights into the wettability transition of nanosecond laser ablated surface under ambient air exposure[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 533:268-277.
- [17] Yong Jiale, Wu Dong. Bioinspired controlling the surface wettability of materials by femtosecond laser: current progress and challenges(Invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(1):169-249. (in Chinese)
雍佳乐, 吴东. 飞秒激光仿生调控材料表面浸润性: 当前进展与挑战(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(1):169-249.