文章编号:1001-5078(2021)05-0600-07

· 激光应用技术 ·

光纤激光加工对 Ti6Al4V 粘接强度影响的研究

张 冲1,王 冠1,刘赞丰2,张雅文2

(1. 广东工业大学机电工程学院,广东广州 510006;2. 广东四会实力连杆有限公司,广东 四会 526200)

摘 要:为了在 Ti6Al4V 表面加工不同的微结构,改变其表面形貌,从而提高其粘接接头的强度,采用纳秒光纤脉冲激光对 Ti6Al4V 表面进行了微加工,研究了脉冲能量和扫描间距对线阵 及网格 2 种微结构的表面形貌及粘接接头强度的影响。结果表明:当脉冲能量和扫描间距相 同时,网格结构比线阵结构能获得更大的粗糙度及表面积;激光加工能有效提高 Ti6Al4V 粘接 接头的强度,线阵结构和网格结构分别在 $\lambda = 50 \%$ 、 $\psi = 100 \%$, $\lambda = 0 \%$ 、 $\psi = 100 \%$ 时,接头有 最大剪切强度,分别为 25.2 MPa、27.2 MPa,与未经激光处理的粘接接头相比,其强度分别提高 50.5 %,62.5 %;当脉冲能量和扫描间距相同时,网格结构相比线阵结构更有利于提高接 头的强度。该研究对改善 Ti6Al4V 粘接接头强度具有一定参考意义。

关键词:激光技术;表面形貌;粘接强度;Ti6Al4V

中图分类号:TN249 文献标识码:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.05.009

The effects of fiber laser processing on Ti6Al4V bonding strength

ZHANG Chong¹, WANG Guan¹, LIU Zan-feng², ZHANG Ya-wen²

(1. Guangdong University of Technology, School of Electromechanical and Engineering, Guangzhou 510006, China;2. Guangdong Sihui Shili Connecting Rod Co. , Ltd , Sihui 526200, China)

Abstract: In order to process different microstructures on the surface of Ti6Al4V and change its surface morphology, thereby improving the strength of its bonded joints, the surface of Ti6Al4V was micromachined by nanosecond fiber pulse laser, the pulse energy and scanning interval of the laser were studied on the linear array and the influence of the surface morphology of the two microstructures of the grid and the strength of the bonded joint. The results show that when the pulse energy and the scanning interval are the same, the grid structure can obtain greater roughness and surface area than the linear array structure; laser processing can effectively improve the strength of the Ti6Al4V bonded joint; the linear array structure and the grid structure are respectively $\lambda = 50 \%$, $\psi = 100 \%$, $\lambda = 0 \%$, $\psi = 100 \%$, the joint has the maximum shear strength, respectively 25. 2 MPa,27. 2 MPa, compared with the non-laser bonded joint, its strength increased by 50. 5 % and 62. 5 % respectively; when the pulse energy and the scanning interval are the same, the grid structure is more conducive to improving the strength of the joint than the linear array structure. This study has certain reference significance for improving the strength of Ti6Al4V adhesive joints. **Keywords**; laser technology; surface morphology; bond strength; Ti6Al4V

1 引 言

钛合金因其比强度高、抗腐蚀性好等优异的特

性,已被广泛应用于轻质结构中,尤其是在航空航天 工业^[1]及汽车工业^[2]。轻质结构制造在多数情况

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFB1107703);肇庆市科技计划资助项目(No. 2019K023);四会市科技计 划资助项目(No. 2018020103)资助。

作者简介:张 冲(1991 –),男,博士研究生,现主要从事激光微细加工与检测的研究。E-mail:1848882282@ qq. com **通讯作者:**王 冠(1979 –),男,博士,副教授,表面腐蚀与防护及电化学微细加工。E-mail:wangguan@ gdut. edu. cn 收稿日期:2020-07-12

下不是一体成型,而是通过部件与部件之间相互连接而成。如今在轻质结构的连接中,常采用胶接代替螺栓连接、铆接或焊接,因为胶接不仅可以减轻结构重量,节省成本,而且可以减小结构的电偶腐蚀及应力集中^[3-4]。

通常要实现金属之间的可靠胶接,必须对粘接 表面进行预处理,以获得清洁、均匀、稳定,且具有一 定粗糙度和润湿性的粘接面。目前常用的金属表面 处理工艺可分为两类,一类是机械加工,例如:研 磨^[5]、喷砂^[6]、微滚压^[7]等,另一类是化学加工,例 如:阳极氧化^[8-9]、化学蚀刻^[10-11]、新型等离子体喷 涂^[12]等。然而这些方法产生的化学废物或研磨废 物会对环境产生一定影响,而激光加工因环保性好、 稳定性高,已成为上述工艺的有效替代方案^[13-14]。

本研究首先研究激光工艺参数对加工后 Ti6Al4V基板表面形貌的影响,然后通过单塔接拉 伸实验测试粘接接头的剪接强度,从而更好地揭示 激光工艺参数与Ti6Al4V粘接接头强度之间的 关系。

2 实验条件与方法

实验设备采用脉冲光纤激光加工装备,其主要 参数见表 1。由于激光器的脉冲能量与脉宽、频率 及平均功率百分比有关。实验中为了方便调节脉冲 能量且保持其他条件不变,故保持脉宽 γ 为 100 ns, 脉冲频率 f 为 10 kHz,通过改变平均功率百分比 ψ 来调节脉冲能量。通过激光功率仪对所选参数的平 均功率 P_{ave} 进行了测量,并通过公式 1 对激光功率 密度 Φ 进行了计算,其结果见表 2。如图 2 所示,先 对 Ti6Al4V 基板进行线扫描加工预实验,并对单槽的 形貌进行测量,然后根据槽宽 W,选取不同的扫描间 距 H,在 Ti6Al4V 基板上加工线阵及网格 2 种微结 构,扫描速度 v 为 100 mm/s。

Tab. 1 Main parameters of laser equipment

Process parameter	Value				
Laser medium	Yb-fiber				
Laser beam mode	TEMOO				
Focal spot diameter d∕µm	35				
Laser radiation wavelength γ /nm	1064				
Laser nominal average power Pave/W	1 ~ 20				
Pulse duration time t/ns	4 ~ 200				
Pulse repetition frequency f/kHz	0 ~ 1000				
Beam scanning speed $v/(\text{ mm } \cdot \text{ s}^{-1})$	0 ~ 2000				



图 1 激光加工示意图 Fig. 1 Schematic of laser processing

	表 2	个同平均	1功举白分	ナ比卜的	能重领	首度
Tab. 2	Energy	density at	different	average	power	percentages

$\psi/\%$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pave/W	0. 626	0.8	1. 24	1. 67	2.08	2. 54	2. 99	3.45	3.91	4.33
$\Phi/(\mathrm{mJ}\cdot\mathrm{mm}^{-2})$	69	88.2	136.7	184	229. 2	279.9	329.5	380. 2	430. 9	477.2

实验材料为宝鸡钛业股份有限公司生产的 Ti6Al4V 钛合金,其化学成分列于表 3 中。

由于轧制工艺制成的钛合金板表面粗糙度差 异较大,基板在进行激光微加工前,采用 3000 目 砂纸对其表面进行了抛光处理,以避免原表面差 异性对实验结果的影响。使用双组分室温固化环 氧胶 3M DP460 粘接基板,粘接剂的机械性能列于 表4中。

表 3 Ti6Al4V 元素含量

Tab. 3 Ti6Al4V element content

Element	Al	V	Fe	С	Ν	Н	0	Other	Ti
Ti6Al4V	5.6~6.5	3.5~4.5	0.3	0.08	0. 05	0.015	0.2	0.1	Balance

表4 完全固化的3M DP460 粘合剂的机械性能

Tab. 4 Mechanical properties of fully cured 3M DP460 adhesive

Adhesive	Elastic modulus/GPa	Poisson ratio/%	Tensile strength/MPa	Shear strength/MPa
3M DP460	2.7	4	37	32

在激光处理前,所有样品均在乙醇溶液中采用 超声清洗5 min。单塔接拉伸试样几何尺寸如图2 (a) 所示。其制备方法如下: ①用乙醇清洗待粘接 面(激光烧蚀区域);②将基板放置在定位装置上; ③通过手持式注射枪将粘合剂涂在两个基板的待粘 接区;④为保持粘合层厚度一致,将少许玻璃球(直 径 0.25 mm) 散布在粘合剂中,并通过夹具施加压力 (如图 2b); ⑤去除粘合区域外的多余粘合剂, 以形 成直边;⑥根据供应商推荐的胶水固化参数(即在 40 ℃下固化 24 h) 在烘箱中进行固化; ⑦将垫片粘 接到基板的两端,重复步骤⑥。根据 ASTM D1002 -10标准,在电子万能试验机(AGS-X-50KND) 上进行准静态测试(如图2(c)),以1 mm/min 的速 率对单塔接试样加载直至断裂,获取位移-载荷曲 线,每个试样以实验条件下最大载荷除以粘合面的 重叠面积作为搭接剪切强度,每组参数重复3次。



图 2 拉伸试样 Fig. 2 Tensile specimen

3 结果与讨论

3.1 脉冲能量对单槽形貌的影响使用激光共聚焦电子显微镜(OLYMPUS)

OLS4000)对激光加工后基板表面的单槽的深度 D、 宽度 W 及边沿高度 A 进行了测量。如图 3 所示,槽 中央部位为表面材料发生熔化、汽化、熔化物对流及 重新凝固后形成的凹槽,边沿为熔化物重新凝固形 成的凸起,槽呈现出中部深边缘浅的形状,这是由于 激光束的光斑能量大致呈高斯分布,光斑的能量密 度从中心到边缘逐渐减弱,从而会在基板上烧蚀出 中央深边缘浅的槽。



图 3 ψ=10%时槽的形貌及截面轮廓图



如图 4 所示,在脉冲能量较小时,槽的深度 D、 宽度 W 及边沿高度 A 随着脉冲能量的增加大致呈 线性增加,因为较高的脉冲能量会产生更大的熔池。 当脉冲能量增加到一定值时,D、W 及 A 的增加速度 就会逐渐减慢,特别是在脉冲能量相对较高时,D、W 及 A 大小会逐渐呈饱和趋势。





为了更方便地描述扫描间距,现引入重叠率 λ 这一新参数,其具体表达见公式 2。 后续,选取 $\lambda = -50 \%$ 、-25 %、0 %、50 %, $\psi = 10 \%$ 、30 %、60 %、100 %,在基板上加工线阵 及网格 2 种不同类型的微结构,以研究激光加工参 数对表面形貌的影响。

$$\lambda = \left(1 - \frac{H}{d}\right) \times 100 \% \tag{2}$$

3.2 脉冲能量和扫描间距对表面形貌的影响

从图 5(d)、(h)、(l)、(p),(c)、(g)、(k)、(o) 各分图可知,当 $\lambda = -50$ %、-25%时基板表面均 存在未被激光烧蚀的区域,且未被烧蚀区域的面积 随 λ 的增加而减小;从图 5(b)、(f)、(j)、(n)可看 出,当 $\lambda = 0$ %时基板表面均被激光全完烧蚀;从图 5(a)、(e)、(i)、(m)可看出,当 $\lambda = 50$ %时基板部 分区域被激光重复烧蚀多次。

为了进一步对激光加工后的表面形貌进行分析,采用激光共聚焦电子显微镜在加工表面随机选取5个位置,根据 ISO 25178 - 2标准,对其表面算术平均高度 *S*_a 及表面积增加比 *S*_{dr}进行了计算,*S*_a、 *S*_{dr}的具体含义见表5。



图 5 激光加工后基板表面的 SEM 图 Fig. 5 SEM image of the substrate surface after laser processing

表5 表面特征参数

Tab. 5 Surface characteristic parameters

表面特征参数	描述
$S_a = \frac{1}{A} \iint_A Z \in x, y \supset dx dy$	定义区域(A)内高度 绝对值的算术平均值
$\overline{S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_{A} \left(\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^{2} \right]} - 1 \right) lxdy \right]}$	定义区域(A)内表面积 增量与面积的比值

图 6 绘制出了 S_a 和 S_{dr} 与 λ 和 ψ 的关系。由图 6(a)和6(b)可知,对于线阵或网格结构,当ψ取值 一定时, S_{α} 都在 $\lambda = 0$ % 处有最大值; 当 λ 取值一定 时, S_a 随 ψ 的增大而增大, ψ = 100 % 时 S_a 有最大 值,综合二者可知其 S_a 都在 $\lambda = 0 \% \sqrt{\psi} = 100 \%$ 处 有最大值,其值分别为 5.108 μm、6.766 μm。由图 6(c)可知,对于线阵结构,当 ψ 取值一定时, S_{dr} 随 λ 的增大而增大, $\lambda = 50$ %时 SS_d有最大值;当 λ 取值 一定时, S_{dr} 随 ψ 的增大而增大, ψ = 100% 时 S_{dr} 有最 大值,因此其 S_a 在 $\lambda = 50\%$ 、 $\psi = 100\%$ 处有最大 值,其值为2.675。对比图6(a)和6(c)可知,S_a与 S_{tr} 的变化趋势并非完全一致,这表明对于线阵结构 其粗糙度最大时,其表面积不一定最大。由图6(d) 可知,对于网格结构,当 ψ =10%时, S_{dr} 随 λ 的增大 而增大, S_{dr} 都在 $\lambda = 50$ % 处有最大值;当 $\psi = 30$ %、 60 %、100 % 时, S_d都在 λ = 0 % 处有最大值; 当 λ 取值一定时, S_a 都在 ψ =100%处有最大值,其最大 值为 3.349。对比图 6(b) 和 6(d) 可知,除 ψ = 10 % 外, S, 与 S, 的变化趋势基本一致, 这表明对于 网格结构其粗糙度最大时,其表面积也最大。综上 可知:当 λ 和 ψ 取相同值时,网格结构比线阵结构 能得到更大的粗糙度及表面积。

由于在不同 ψ 下,表面形貌随 λ 的变化趋势基本一致,为了减少实验次数,后续仅选取 $\lambda = -50\%$ 、-25%、0%、50%, $\psi = 10\%$ 、100%,研究线阵及网格对粘接强度的影响。







通过拉伸测试验证激光烧蚀的表面形貌对 Ti6Al4V 粘合接头强度的影响。接头的强度 σ 由拉 伸试验的最大载荷通过下式计算得到:

$$\sigma = \frac{F_{\text{max}}}{S} \tag{3}$$

其中, F_{max} 是拉伸试验的最大载荷; S 是两个基板之间的粘合面积(12.7 mm × 25.4 mm)。

如图7所示,通过拉伸载荷-位移曲线可知接

头都是在弹性阶段达到断裂强度后直接断裂,因此 在拉伸-剪切力的作用下,本类型粘接接头的失效 形式为准脆性断裂。



如图 8 所示,当 λ 取值一定时,对于线阵结构 和网格结构, ψ = 100 % 都比 ψ = 10 % 更有助于提 升接头的强度;当 ψ 取值一定时,对于线阵结构, 接头强度随 λ 的增大而增大,在 λ = 50 % 处接头 强度最大,而对于网格结构,在 λ = 0 % 处接头强 度最大;线阵结构在 λ = 50 %、 ψ = 100 % 时,接头 有最大剪切强度 25.2 MPa,相比未经激光处理的 粘接接头,其强度可提高 50.5 %;网格结构在 λ = 0 %、 ψ = 100 % 时,接头有最大剪切强度 27.2 MPa,相比未经激光处理的粘接接头,其强度可提 高 62.5 %。综上可知:当 λ 和 ψ 的取值相同时, 网格结构相比线阵结构更有利于提高接头的强 度,这是由于网格结构可以得到更大的表面粗糙 度及表面积,为粘接面提供更多的互锁结构。



Fig. 8 The relationship between shear strength and λ and ψ

4 结 论

本文通过光纤脉冲激光对 Ti6Al4V 表面进行微加工,研究了脉冲能量和扫描间距对线阵及网格结构表面形貌及粘接强度的关系,研究表明激光能有效改善粘接接头的强度。

(1)在脉冲能量较低时,单个槽的宽度、深度及 边沿高度随着脉冲能量的增加而大致呈线性增加, 在脉冲能量相对较高时,其增加会逐渐呈现饱和 趋势。

(2)对于线阵及网格结构,当 ψ 取值一定时, S_a 都在 $\lambda = 0$ %处有最大值,当 λ 取值一定时, S_a 在 ψ 的增大而增大;对于线阵结构, S_{dr} 随 λ 或 ψ 的增大 而增大;对于网格结构,当 $\psi = 10$ %时, S_{dr} 随 λ 的增 大而增大,当 $\psi = 30$ %、60%、100%时, S_{dr} 在 $\lambda =$ 0%处有最大值,当 λ 取值一定时, S_a 都在 $\psi =$ 100%处有最大值;当 λ 和 ψ 取相同值时,网格结构 比线阵结构能得到更大的粗糙度及表面积。

(3)线阵结构和网格结构分别在 $\lambda = 50 \%, \psi =$ 100 %, $\lambda = 0 \%, \psi = 100 \%$ 时,接头有最大剪切强度,分别为25.2 MPa、27.2 MPa,与未经激光处理的 粘接接头相比,其强度分别提高 50.5 %,62.5 %; 当 λ 和 ψ 取相同值时,网格结构比线阵结构能得到 更大的粗糙度及表面积。

参考文献:

- [1] Zhanghong H, Henglei Q U, Chao D, et al. Development and application of aerial titanium and its alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1):102 - 107. (in Chinese) 黄张洪,曲恒磊,邓超,等. 航空用钛及钛合金的发展 及应用[J]. 材料导报,2011,25(1):102 - 107.
- [2] Yansheng Z. Application of titanium and titanium alloy in motorcar industry[J]. Titanium Industry Progress, 2004, (1):16-18. (in Chinese)
 张延生. 钛及钛合金在汽车工业中的应用[J]. 钛工业 进展,2004,(1):16-18.
- [3] Wan H, Lin J, Min J. Effect of laser ablation treatment on corrosion resistance of adhesive-bonded Al alloy joints
 [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 345: 13-21.
- [4] Joao Custó dio. Structural adhesives [M]. Materials for Construction and Civil Engineering. Springer International Publishing, 2015.
- [5] Spaggiari A, Dragoni E. Effect of mechanical surface treat-

ment on the static strength of adhesive lap joints [J]. Journal of Adhesion, 2013, 89(9):677-696.

- [6] Harris A F, Beevers A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion [J]. 1999, 19(6):445-452.
- [7] Enhancement of adhesion strength by micro-rolling-based surface texturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12):1427-1435.
- [8] Kurtovic A, Brandl E, Mertens T, et al. Laser induced surface nano-structuring of Ti-6Al-4V for adhesive bonding
 [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013,45:112-117.
- [9] Correia S, Anes V, Reis L. Effect of surface treatment on adhesively bonded aluminium-aluminium joints regarding aeronautical structures[J]. Engineering Failure Analysis, 2018,84:34-45.
- [10] Zain N M, Ahmad S H, Ali E S. Effect of surface treatments on the durability of green polyurethane adhesive bonded aluminium alloy[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014, 55:43 - 55.

- [11] Molitor P, Barron V, Young T. Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review
 [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2001,21(2):129-136.
- [12] N Saleema, D Gallant. Atmospheric pressure plasma oxidation of AA6061-T6 aluminum alloy surface for strong and durable adhesive bonding applications [J]. Applied Surface Science, 2013, 282:98 - 104.
- [13] Chen S, Usta A D, Eriten M. Microstructure and wear resistance of Ti6Al4V surfaces processed by pulsed laser
 [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 315 (Complete):220 231.
- [14] Chong Z, Guan W, Zhi-Gang Y, et al. Study on fracture splitting groove of 36MnVS4 connecting rod fabricated by pulse fiber laser [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(3): 286-290. (in Chinese)
 张冲, 王冠, 杨志刚, 等. 脉冲光纤激光加工 36MnVS4 连杆裂解槽的研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(3):

连杆袋 牌 間 的 286 - 290.