

GH4099蜂窝芯飞秒激光抛光 试验研究*

陈峰¹, 刘巧沐², 杜鹏², 胡增荣³

(1. 南京航空航天大学航空学院机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;

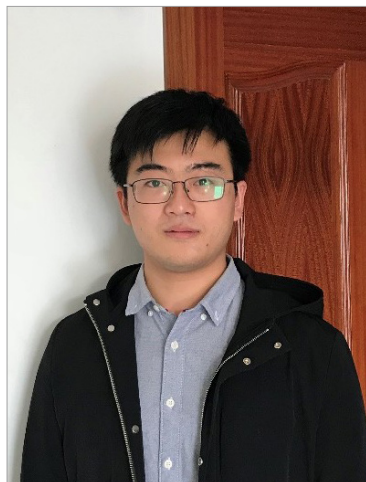
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500;

3. 苏州大学轨道交通学院, 苏州 215131)

[摘要] 为了实现低刚性薄壁结构无损抛光的目,提出了无保护气氛下金属薄壁结构飞秒激光冷抛光工艺,采用滑动水平试验方法对抛光工艺参数进行了优化,确定了GH4099板材的工艺窗口预测模型。综合考虑面粗糙度及抛光效率, GH4099蜂窝芯飞秒激光冷抛光最优工艺参数确定为:离焦量0.2mm、激光功率0.3W、扫描间距10 μ m、扫描速度2.3m/s。在此工艺参数下, GH4099蜂窝芯试样的面粗糙度降幅为65%,抛光效率为1.2h/(210mm \times 210mm)。

关键词: 蜂窝芯; 飞秒激光; 抛光; 高温合金; 滑动水平试验

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.23/24.046



陈峰

博士,博士后,研究方向为轻量化结构制备及性能。

随着航空航天、高铁、汽车等技术的持续发展,对结构提出了轻量化、一体化的迫切需求。金属蜂窝夹层板具备轻质量、高强度等优势^[1-2];同时作为功能结构材料,通过合适的设计还兼具隔音隔热、导热导电、缓冲吸能等作用^[3]。因此金属蜂窝夹层板除了作为金属热防护结构的重要组成部分,在国防及民用领域也展现出巨大的应用前景。其中镍基高温合金蜂窝夹层板由于其优异的高温力学性能、抗高温氧化性能被广泛应用于航空航天等领域^[4]。

在蜂窝芯制备完成后,需要对其进行切片、分层以达到设计厚度,在此过程中由于机械加工会造成蜂窝芯的表面破坏;如采用线切割对蜂窝芯进行分层会造成试样粗糙度的增加,同时产生异质层,给后续真空钎焊工艺带来困难,因此需要对蜂

窝芯表面进行精密抛光处理。由于蜂窝芯薄壁结构刚性较差,采用激光对其进行非接触式抛光是一种行之有效的方。考虑到大量飞秒激光抛光应用的研究^[5-9],如已被应用于航空航天、汽车、模具、生物医疗等行业,飞秒激光抛光可以被认为是激光加工技术的一个重要发展分支。金属飞秒激光抛光按照材料去除方式,可分为热抛光和冷抛光^[10-11],其中热抛光的主要机理为微重熔,熔融的金属在表面张力作用下,向周围区域流动再凝固,从而降低试样表面粗糙度;冷抛光是材料去除机理为静电剥离,材料直接发生离子化脱离工件,从而降低了材料表面波动。

事实上关于镍基高温合金激光抛光的研究已经取得许多研究成果, Perry等^[12-13]利用有限元模拟了激光热抛光镍基合金的过程,分析了激

* 基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

光脉宽、扫描速度对烧蚀深度的影响,验证了激光抛光镍基材料的可行性,指出激光热抛光镍基材料的主要机理为表面材料重熔。Kumstel等^[14]在氩气保护下进行了镍基合金的激光热抛光试验研究,分析了抛光工艺参数对抛光质量的影响;结果表明光束直径、扫描速度、扫描间距、激光功率对抛光效果有着重要影响。Bordatchev等^[15]对Inconel 718进行了飞秒激光热抛光试验,通过工艺参数调整,试样的粗糙度 R_a 降低幅度超过了80%。Lambarri等^[16]进行了镍基高温合金(NA-1、NA-2)的激光热抛光试验研究,其粗糙度 R_a 降幅达到了75%~80%。此外,研究结果表明当扫描速度过大时,熔融材料流动不充分,抛光效果较差;当扫描速度过小时,试样表面氧化严重。因此,选择合适的扫描速度对抛光质量影响较大。Ma等^[17]在氩气保护下对Ni-Ti合金进行了激光热抛光试验,结果表明在 $6.01 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 激光功率、500mm/s扫描速度、67%的重叠率下,抛光效果达到最优。在此工艺下,重复扫描3次完成了对试样表面 $10 \mu\text{m}$ 厚氧化层的去除,再重复2次实现了试样抛光。

目前,关于镍基高温合金激光抛光的研究虽然已经取得许多重要成果,但绝大多数集中在激光热抛光研究^[18]。采用激光热抛光工艺会改变抛光区域的化学成分、微观组织和力学性能,且激光热抛光需要在惰性气体保护下进行,增加了工艺的复杂性。针对蜂窝芯等薄壁结构,采用传统机械抛光方法需要填充材料以提高整体结构刚性^[19],但填充材料可能无法完全去除影响后续真空钎焊过程^[20]。因此,飞秒激光冷抛光工艺可能是实现薄壁结构精密无损伤抛光的有效途径,开展飞秒激光冷抛光工艺研究以验证其可行性十分必要。

试验与方法

1 材料及设备

飞秒激光抛光试验在自行搭建的平台上进行,其主要由Tangor飞秒激光器、NPAQ-A3200五轴平台、SCANLAB振镜(intelliSCAN III 10)、THORLABS-MVL12X CCD摄像机构成。抛光试验选用厚度为0.5mm的GH4099高温合金板材及高温合金蜂窝芯,原材料化学成分如表1所示。抛光试验前,采用200#金相砂纸预打磨GH4099高温合金板材表面,使其初始粗糙度达到 $2.0 \mu\text{m}$,以模拟蜂窝芯试样原始粗糙度(图1)。试样经丙酮超声波清洗以去除表面油污、杂质。采用激光三维显微镜(KEYENCE VHX-1000)测试试样表面的粗糙度,选取抛光区域两条对角线上 R_a 的平均值作为最终表面粗糙度;用扫描电镜(FEI Nova Nano SEM 450)进行能谱分析。

2 飞秒激光抛光试验设计

如前文所述,在激光热抛光中,

表1 GH4099化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of GH4099 %

C	Si	Mn	S	P
0.055	0.25	0.19	0.005	0.007
Fe	Ni	Cr	Al	Ti
0.59	余量	18.86	2.05	1.12
Co	Mo	W	Ce	B
6.95	4.01	6.11	0.01	0.002

材料将会发生明显的熔化、再凝固过程,从而改变了抛光区域的化学成分、微观组织和力学性能,且激光热抛光需要在惰性气体保护下进行,增加了工艺的复杂性。为了避免抛光工艺的二次损伤,本文研究主要集中在GH4099飞秒激光冷抛光范围,其烧蚀阈值为 $0.413 \sim 12.9 \text{ J/cm}^2$ 。在此激光能量密度范围内,材料去除以静电剥离为主;飞秒激光对试样的热影响有限,因而并不改变材料的原有元素成分^[11]。

通常激光能量密度是决定激光烧蚀模式及抛光效果的最主要因素。同时其他工艺参数在相互影响后又决定了作用于试样表面的实际激光能量密度,对于单一工艺参数而言,很难预先确定合适的工艺参数范围,需要在具体试验中加以调整,滑动水平试验方法特别适合于过程变量相互依赖的试验设计^[21]。因此本文采用滑动水平试验方法进行试验设计,通过对工艺参数窗口及抛光后试样表面粗糙度 R_a 进行研究,以确定最优工艺参数,详细试验步骤如文献[21]所示。

在本次试验中,选取扫描速度为滑动因子,其取值随着其他工艺参数的变化而变化。激光功率、离焦量及扫描间距被确定为非滑动因子。首先,根据非滑动因子的参数组合来确定飞秒激光的工艺窗口,并在工艺窗口中得到滑动因子的取值范围,如图2所示。其中,热抛光定义为材料发生熔化;无抛光效果定义为抛光后试样表面粗糙度 R_a 超过原始试样,

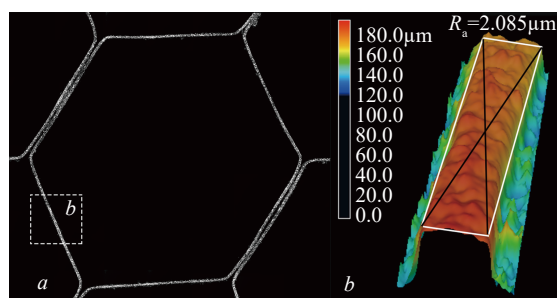


图1 GH4099蜂窝芯原始粗糙度测量结果

Fig.1 GH4099 honeycomb core roughness result

即 $R_a > 2\mu\text{m}$ 。

随后,采用滑动因子和非滑动因子的组合参数来进行相关试验,确定各工艺参数及其交互效应对抛光效果的影响。在之前的试验中发现,在工艺窗口边界处的抛光工艺参数下,试样的抛光效果并不稳定。因此,扫描速度的测试范围 $[V_L, V_H]$ 被设置为工艺窗口边界左右各内移 10% 的位置,同时扫描速度的中间值 V_M 取为 V_L 、 V_H 的平均值,如图 2 所示。因此在每组非滑动因子参数组合下,都可以确定 3 个滑动因子水平。分别在 3 个滑动因子水平下进行抛光试验,可以有效地得到最优工艺参数组合。每组试验重复 5 次,分别测量试样表面粗糙度 R_a ,取其平均值作为最终试验结果。抛光试验参数如表 2 所示。

结果与讨论

1 扫描速度范围及抛光后试样面粗糙度的回归模型

如前文所述,激光抛光工艺参数直接决定试样的抛光质量,抛光后试样表面粗糙度 R_a 如表 2 所示。然而对于固定的激光系统而言,相比于其他工艺参数,扫描速度更易于实现更宽泛范围内的精确调节;且扫描速度的调节成本更低,方式也更简单。另一方面,当其他工艺参数的设置范围有所限制时,可以通过对扫描速度进行适当调节,以实现较好的抛光效果。为了提高激光冷抛光工艺的适用性,有必要对不同工艺参数下扫描速度的范围进行研究,以得到最合适的工艺窗口。通过定义 V_c 、 V_{len} 来表征扫描速度范围,其中 V_c 为扫描速度范围的中间值, V_{len} 为扫描速度范围的区间长度,其计算公式如下:

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{max} + V_{min})$$

$$V_{len} = \frac{1}{2}(V_{max} - V_{min}) \quad (1)$$

V_c 表明了当非滑动因子设定后,扫描速度的平均值。 V_{len} 表明了非滑

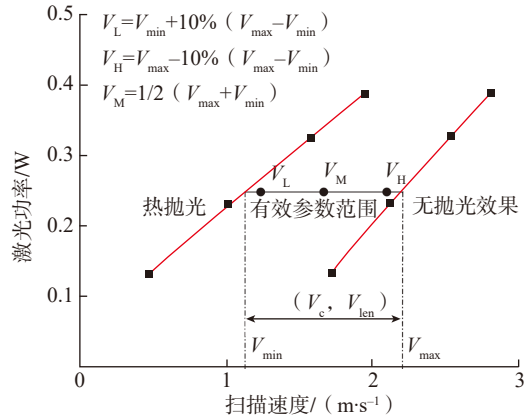


图2 飞秒激光抛光工艺窗口

Fig.2 Femtosecond laser polishing process window

表2 滑动水平试验设计及结果

Table 2 Sliding-level experiment design and results

非滑动因子			扫描速度范围		滑动因子 $R_a/\mu\text{m}$		
$\Delta Z/\text{mm}$	P/W	$d/\mu\text{m}$	$V_{min}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	V_L	V_M	V_H
0	0.131	1	1	1.6	1.861	1.581	1.473
0	0.231	4	0.9	2.2	1.655	1.285	0.952
0	0.327	7	1.1	2.55	1.692	1.360	1.101
0	0.386	10	0.94	3.2	1.318	1.096	0.877
0.15	0.131	4	1.2	1.8	1.517	1.364	1.217
0.15	0.231	1	1.9	2.2	1.983	1.643	1.582
0.15	0.327	10	0.7	2.6	0.909	0.816	0.706
0.15	0.386	7	1.55	3.25	1.348	1.059	0.910
0.3	0.131	7	0.3	2.8	1.338	1.403	1.598
0.3	0.231	10	1	3	1.232	1.448	1.627
0.3	0.327	1	2.4	2.55	1.661	1.694	1.957
0.3	0.386	4	2.25	3.05	1.694	1.734	1.789
0.45	0.131	10	0.6	2.4	1.471	1.556	1.588
0.45	0.231	7	1.4	3	1.414	1.522	1.556
0.45	0.327	4	1.35	2.75	1.464	1.567	1.761
0.45	0.386	1	2.7	2.8	1.844	2.033	2.180

动因子组合下,扫描速度的可接受范围。

在回归模型建立过程中,假定 3 个工艺参数的一次、二次效应及其二阶交互效应均对 V_c 存在重要影响,将 ΔZ 、 P 、 d 、 ΔZ^2 、 P^2 、 d^2 、 $\Delta Z \times P$ 、 $\Delta Z \times d$ 、 $P \times d$ 选为影响参数组,得

到 V_c 的回归模型。其中相关系数 $R^2=0.89$,均方差根为 0.23。如式(2)所示。

$$V_c = 0.809 + 3.34\Delta Z + 4.03P - 0.069d - 2.86\Delta Z^2 - 5.26\Delta Z \times P + 0.071\Delta Z \times d - 0.017P \times d \quad (2)$$

类似地,式(3)为 V_{len} 的回归模

型,其相关系数 $R^2=0.86$,均方差根为 0.23。可以发现扫描间距对其影响较大,随着扫描间距的增大,扫描速度的区间长度也增加。过小的扫描间距导致扫描速度的适用范围急剧减小。

$$V_{len}=0.235+0.40\Delta Z-1.38P+0.153d+0.78\Delta Z^2-0.04P^2-0.008d^2-0.73\Delta Z\times P-0.072\Delta Z\times d+0.164P\times d \quad (3)$$

最后,采用类似的方法可以得到抛光后试样面粗糙度 R_a 的回归模型,以便于下文讨论工艺参数对抛光效果的影响。可以发现采用较大的扫描间距、扫描速度、激光功率及较小的离焦量,得到的抛光试样的面粗糙度较小。最终 R_a 的回归模型如式(4)所示。

$$R_a=-7.517-17.431\Delta Z+115.365P+6.407d+30\Delta Z^2-198P^2-0.609d^2+1.401\Delta Z^2\times d-27.963\Delta Z\times P^2-0.085\Delta Z\times d^2-66.403P\times d+123.76P^2\times d+6.031P\times d^2-11.397P^2\times d^2-3.468V+0.775V^2+1.038d\times V+0.383\Delta Z\times V^2-0.276d\times V^2-0.073d^2\times V+0.02d^2\times V^2 \quad (4)$$

其中,相关系数 $R^2=0.93$,均方差根为 0.11。

2 工艺窗口、抛光效果预测及讨论

当上述的回归模型建立后,可以通过工艺参数窗口及 R_a 的预测值来分析工艺参数对抛光效果的影响。图3为激光脉冲频率 $f=66\text{kHz}$ 、波长 $\lambda=1064\text{nm}$ 、离焦量 $\Delta Z=0.1\text{mm}$ 时,其工艺窗口预测图。可以发现随着扫描间距的减小,工艺窗口逐渐向右移动且窗口范围变窄。

这表明当激光功率给定时,更小的扫描间距下可以采用更高的扫描速度,这可能有利于提高抛光工艺的效率。然而,更小的扫描间距同时带来了更窄的工艺窗口,扫描速度的调节范围变小;另一方面,随着扫描间距的减小,可选用的最大激光功率也随之降低,激光功率选择范围也变

小。因此,采用过小的扫描间距会使得抛光工艺过程变得不稳定。从图3中还可以发现,在几种扫描间距下,随着扫描速度的降低,合适的激光功率中间值也随之降低。这是因为扫描速度、扫描间距决定了激光光斑的重叠率,随着重叠率的提高,单位面积内的激光脉冲数实际上也增多,进而导致了烧蚀阈值的降低。因此,在较高的重叠率下,即较小的扫描速度、扫描间距下,需要采用较低的激光功率以满足较好的抛光效果。由此,可以根据设备实际情况,利用工艺窗口预测模型来确定合适的工艺参数范围,为工程应用提供快速解决方案。

为了进一步分析工艺参数对实际抛光效果的影响,通过抛光后试样面粗糙度 R_a 的预测模型,可以得到

各工艺参数对 R_a 预测值的影响。其中试样面粗糙度与激光功率及离焦量关系如图4所示。

由图4可知,随着激光功率、离焦量的增加,抛光后的试样面粗糙度先降低;而当激光功率、离焦量增加至一定值后,面粗糙度发生增大。在测试参数水平范围内,激光功率及离焦量对试样面粗糙度的影响类似,即均存在一个临界值(图4中分别为 0.22W 、 0.23mm 左右)使得抛光效果达到最优。这是因为当入射激光功率密度低于激光烧蚀阈值时,材料不发生去除导致没有抛光效果;随着激光功率密度的增加,材料的去除量增多,抛光效果随之增强;但是当激光功率密度过大时,会使工件表面的材料去除量过多,降低了抛光效果,甚至可能会使试样表面粗糙化。因

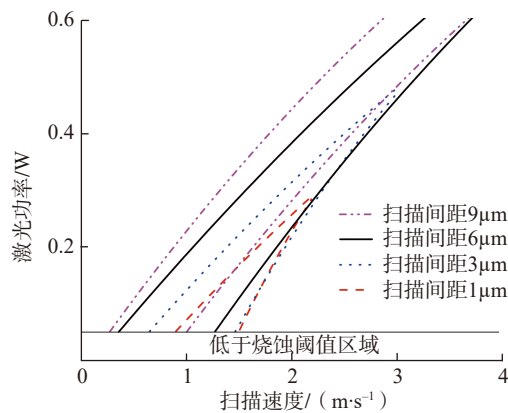
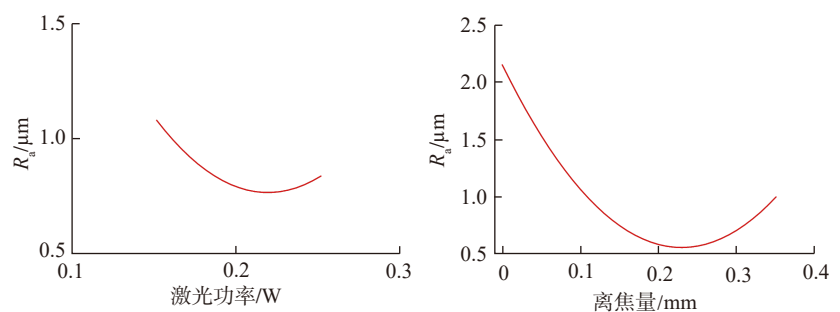


图3 不同激光参数下工艺窗口预测图

Fig.3 Processing window prediction graph under different laser parameters



(a) 离焦量 0.1mm; 扫描间距 3μm; 扫描速度 1.5m/s

(b) 激光功率 0.15W; 扫描间距 3μm; 扫描速度 1.5m/s

图4 试样面粗糙度与激光功率及离焦量关系图

Fig.4 Relationship between surface roughness and laser power and defocus distance

此试样面粗糙度随着激光功率密度的增加而呈现出先降低后增大的趋势。而激光功率密度又主要取决于激光功率及激光光斑大小。随着激光功率的增加,激光功率密度随之增大;而随着离焦量的增加,激光光斑增大,导致激光功率密度降低。所以通过调整激光功率及离焦量均可获得激光功率密度临界值,使得抛光效果达到最优。

3 蜂窝芯飞秒激光抛光试验

为了验证所提出的激光冷抛光工艺及滑动水平试验方法工程应用的可行性,开展了210mm×210mm×40mm的GH4099蜂窝芯的抛光试验,如图5所示,其原始试样表面粗糙度为2.1μm。

选定两组非滑动试验参数,分别为离焦量ΔZ=0.2mm、激光功率P=0.2W、扫描间距d=7μm及离焦量ΔZ=0.2mm、激光功率P=0.3W、扫描间距d=10μm。根据式(2)、(3),首先计算出合适的扫描速度区间,分别为[1.20m/s,2.06m/s]、[1.35m/s,2.33m/s];然后分别在最大、最小扫描速度下进行抛光试验。最终抛光

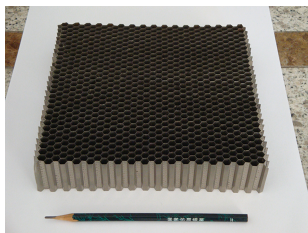


图5 蜂窝芯飞秒激光冷抛光试样实物图
Fig.5 Honeycomb core sample of femtosecond laser polishing

表3 蜂窝芯飞秒激光抛光试验结果

Table 3 Honeycomb core femtosecond laser polishing experiment results

ΔZ/ mm	P/ W	D/ μm	V/ (m·s ⁻¹)	R _a / μm	耗时/ h
0.2	0.2	7	1.2	0.95	3.8
0.2	0.2	7	2.0	0.67	2.3
0.2	0.3	10	1.4	0.94	2.7
0.2	0.3	10	2.3	0.70	1.2

后试样面粗糙度R_a及所需时间如表3所示。

因此,当ΔZ=0.2mm、P=0.2W、d=7μm及V=2.0m/s时,蜂窝芯抛光效果达到最优。然而,在ΔZ=0.2mm、P=0.3W、d=10μm及V=2.3m/s下,抛光效果略有降低但其抛光效率明显提高。两组工艺参数下,抛光后试样面粗糙度的下降率分别为67%、65%,但第2组工艺参数下,所需时间大幅降低。

如前文所述,当入射激光功率密度低于激光烧蚀阈值时,材料不发生去除导致没有抛光效果。当激光功率密度过大时,会使工件表面的材料去除量过多,降低了抛光效果。存在一个激光功率范围使得试样抛光效果达到最优。由于激光焦点处光斑中心的功率密度过高,当采用一定的离焦量(如最优参数0.2mm时),激光功率分布相对均匀,更有利于得到合适的激光功率范围。而当采用0.3W的激光功率时,激光能量密度在激光冷抛光阈值附近,保证了材料去除的同时避免了等离子体热效应。当扫描速度过慢、扫描间距过小时,激光在工件表面的辐照时间过长,单位面积内耦合的光子数量增多,试样材料去除量过多,会导致抛光效果不佳。因此蜂窝芯的抛光试验符合前文GH4099板材飞秒激光冷抛光试验的讨论结果。

综合考虑抛光效果及抛光效率,采用ΔZ=0.2mm、P=0.3W、d=10μm、V=2.3m/s进行GH4099蜂窝芯的飞秒激光抛光试验。

结论

本文在自行搭建的飞秒激光试验平台上,进行了飞秒激光冷抛光试验,实现了无气氛保护下GH4099板材及蜂窝芯的精密抛光。采用滑动水平试验设计方法,建立了工艺窗口预测模型,并分析了离焦量、激光功率、光斑重叠率对试样抛光效果的影

响。主要结论如下:

(1)更小的扫描间距可以采用更高的扫描速度,这可能有利于提高抛光效率。然而,更小的扫描间距同时带来了更窄的工艺窗口,扫描速度、激光功率的调节范围变小,使得抛光工艺过程变得不稳定。

(2)离焦量、激光功率与抛光后试样面粗糙度R_a之间并不是简单的一次线性关系,其均存在最优取值区间使得抛光效果达到最佳。

(3)综合考虑抛光效果及抛光效率,最终采用的飞秒激光抛光试验工艺参数为离焦量0.2mm、激光功率0.3W、扫描间距10μm、扫描速度2.3m/s。GH4099蜂窝芯试样的面粗糙度改善率为65%,其抛光效率为1.2h/(210mm×210mm)。

(4)采用飞秒激光进行GH4099高温合金抛光是一种切实可行的方法,可实现金属薄壁结构无保护气氛、无填充、无损精密抛光。

参考文献

[1] EŞME U. Application of Taguchi method for the optimization of resistance spot welding process[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2009, 34(2): 519-528.

[2] 杨凯,刘立武,于开平,等.带有典型缺陷的金属蜂窝夹层结构的剩余强度研究[J].固体火箭技术,2011,34(5): 652-654.

YANG Kai, LIU Liwu, YU Kaiping, et al. Study on the residual strength of metal honeycomb sandwich structure with typical defects[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(5): 652-654.

[3] 王栋.军车装甲用蜂窝夹层板的抗弹性研究及优化[D].大连:大连理工大学,2013.

WANG Dong. Analysis and optimization for the ballistic performance of a military armored sandwich panel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[4] 刘艳辉,童国权,王辉,等.GH99高温合金蜂窝板的制备及力学性能[J].机械工程材料,2013,37(2): 82-85.

LIU Yanhui, TONG Guoquan, WANG Hui, et al. Preparation and mechanical properties of GH99 high temperature alloy honeycomb plates[J]. Journal of Mechanical Engineering Materials, 2013, 37(2): 82-85.

- [5] BURZIC B, HOFELE M, MÜRDTER S, et al. Laser polishing of ground aluminum surfaces with high energy continuous wave laser[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(1): 011701.
- [6] DE GIORGI C, FURLAN V, DEMIR A G, et al. Laser micro-polishing of stainless steel for antibacterial surface applications[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 49: 88–93.
- [7] M A R I M U T H U S , TRIANTAPHYLLOU A, ANTAR M, et al. Laser polishing of selective laser melted components[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 95: 97–104.
- [8] KAYAHAN E. A post-processing study on aluminum surface by fiber laser: Removing face milling patterns[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 101: 440–445.
- [9] DE GIORGI C, FURLAN V, DEMIR A G, et al. Laser micropolishing of AISI 304 stainless steel surfaces for cleanability and bacteria removal capability[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 406: 199–211.
- [10] 那冉, 陈涛. 38CrMoAl 表面 YAG 激光抛光技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 143–149.
- NA Ran, CHEN Tao. Research of YAG laser polishing of 38CrMoAl surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 143–149.
- [11] HARILAL S S, FREEMAN J R, DIWAKAR P K, et al. Femtosecond laser ablation: fundamentals and applications[M]// *Laser induced breakdown spectroscopy, theory and applications*. Heidelberg: Springer Verlag, 2014.
- [12] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, LI X, et al. The effect of laser pulse duration and feed rate on pulsed laser polishing of microfabricated nickel samples[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(3): 031002.
- [13] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, DUFFIE N A, et al. Examination of selective pulsed laser micropolishing on microfabricated nickel samples using spatial frequency analysis[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(2): 021002.
- [14] KUMSTEL J, KIRSCH B. Polishing titanium-and nickel-based alloys using cw-laser radiation[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 362–371.
- [15] BORDATCHEV E V, HAFIZ A M, TUTUNEA-FATAN O R. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(1–4): 35–52.
- [16] LAMBARRI J, LEUNDA J, SORIANO C, et al. Laser surface smoothing of nickel-based superalloys[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 255–265.
- [17] MA C, GUAN Y, ZHOU W. Laser surface processing of hot rolled Ni–45.0 at.% Ti shape memory alloy[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2017, 12(1): 6–9.
- [18] 戴伟, 郑志镇, 李建军, 等. 金属材料表面的激光抛光研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 1–14.
- DAI Wei, ZHENG Zhizhen, LI Jianjun, et al. Research progress of laser polishing on the metal surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 1–14.
- [19] 汪鹏, 罗锐. 钛合金蜂窝芯航空构件数控加工工艺研究 [J]. *航空制造技术*, 2016, 59(23/24): 48–51.
- WANG Peng, LUO Rui. CNC machining process of titanium alloy honeycomb for aviation component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(23/24): 48–51.
- [20] 韩变枝, 邱坤贤, 安庆龙. 蜂窝材料冰结加工技术试验研究 [J]. *工具技术*, 2017(12): 14–18.
- HAN Bianzhi, QIU Kunxian, AN Qinglong, et al. Experimental research on processing honeycomb material technology with ice fixation[J]. *Tool Engineering*, 2017(12): 14–18.
- [21] WEI L, CHENG S, HU S J, et al. Statistical investigation on resistance spot welding quality using a two-state, sliding-level experiment[J]. *Mechanisms of Development*, 2001, 123(3): 29–38.

通讯作者: 陈峰, E-mail: fchen0526@nuaa.edu.cn.

Experimental Research on Femtosecond Laser Polishing of GH4099 Honeycomb Core

CHEN Feng¹, LIU Qiaomu², DU Peng², HU Zengrong³

- (1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. AVIC Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China;
3. School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, China)

[ABSTRACT] The femtosecond laser “cooling” polishing method was proposed for processing of metallic honeycomb core under air atmosphere. The polishing process parameters were optimized by the two sliding-level method, and process window prediction model of GH4099 sheet was determined firstly. The set of optimal process parameters for least surface roughness combined with processing efficiency is an off-focus distance of 0.2mm, a laser powder of 0.3W, a scanning space of 10 μ m, and a scanning speed of 2.3m/s. Under this condition, the surface roughness of GH4099 honeycomb core specimen decreased by 65%, and the polishing efficiency is 1.2h/(210mm \times 210mm).

Keywords: Honeycomb core; Femtosecond laser; Polishing; Superalloy; Sliding-level method

(责编 阳光)