

# 激光快速成形 TA15 钛合金 切削加工性能研究

Research on Cutting Process Performance of Laser Rapid Forming  
TA15 Titanium Alloy

海军驻沈阳地区航空军事代表室 王华明

与整体锻造等钛合金传统制造技术相比,钛合金构件激光快速成形技术具有组织细小均匀、综合力学性能优异,无需锻造加工及锻造模具,材料利用率高、机械加工余量小、数控加工时间短、柔性高效等突出优点。通过近 10 年的攻关,我国已率先实现激光快速成形大型钛合金主承力构件的装机应用。

钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀等突出优点,广泛应用于航空航天及其发动机结构中,钛合金结构件用量的高低已成为衡量现代飞机、高推重比航空发动机技术先进性的重要标志之一<sup>[1-8]</sup>。

钛合金构件激光快速成形技术,以钛合金粉末为原料,通过激光熔化逐层沉积(“生长制造”),直接由零件 CAD 模型一步完成高性能钛合金构件的“近净成形”,是一种变革性的短周期、低成本、无模、数字化、先进的制造技术。与整体锻造等钛合金传统制造技术相比,钛合金构件激光快速成形技术具有组织细小均匀、综

合力学性能优异,无需锻造加工及锻造模具,材料利用率高、机械加工余量小、数控加工时间短、柔性高效等突出优点。通过近 10 年的攻关,我国已率先实现激光快速成形大型钛合金主承力构件的装机应用<sup>[6-7]</sup>。

激光快速成形钛合金零件的表面形貌特征、显微组织、力学性能以及尺寸余量等与传统铸造和锻造钛合金存在明显差异,其机切削工艺也与传统锻造钛合金存在差异。目前尚无有关激光快速成形钛合金的切削加工工艺的研究报道。本课题分析了激光快速成形 TA15 钛合金制件的表面形貌特征和硬度分布均匀

性,重点研究了激光快速成形 TA15 钛合金构件的铣削、镗削、钻孔等切削工艺性能,切削加工刀具材料选择和铣削工艺参数优化。

## 试验方法

选择北京航空航天大学激光快速成形的 TA15 钛合金飞机构件作为典型试验件。TA15 钛合金飞机构件激光快速成形后按照  $(750 \pm 20)^\circ\text{C} / (2\sim 3)\text{h}$ , AC 热处理制度进行去应力退火。采用 BX51M 型光学金相显微镜(OM)和 JSM25800 型扫描电子显微镜(SEM)观察分析激光快速成形 TA15 钛合金材料的显微组织,在

MH-6型半自动显微硬度计上测试了材料的显微硬度。

在中国航天三院159厂采用XH718/1型三轴立式数控加工中心、意大利JOBS公司J243型五轴数控龙门铣床、德国TCX110型四轴数控镗铣床和昆明机床厂TK6913A型四轴数控镗铣床等进行了激光快速成形TA15钛合金材料的铣削、镗削和钻孔等切削加工工艺研究,并选用锻造TA15钛合金材料进行了加工工艺性能对比研究。

### 激光快速成形TA15钛合金构件表面形貌特征

TA15钛合金构件激光快速成形后获得“近终形”钛合金零件毛坯,其表面形貌状态将影响铣削粗加工刀具材料和铣削参数的选择。本课题首先分析总结了激光快速成形TA15钛合金材料的表面形貌特征,

为铣削加工工艺优化提供指导。

如图1所示,激光快速成形逐道搭接扫描、逐层熔化沉积的工艺特点和液态金属凝固过程中表面张力共同作用下,TA15钛合金构件激光快速成形后的表面呈现一种规则的波纹起伏“鱼鳞纹”状形貌,与锻件和铸件较为平整的表面形貌明显不同。研究同时表明,通过控制激光功率、光束直径、送粉量和扫描速度等激光成形关键工艺参数,可以实现对工件表面质量的控制,特别是粉末流的汇聚性和光-粉的耦合作用效果,对成形工件表面质量的影响十分明显。当粉末流发散度较大时,未被捕获入熔池的粉末较多,在洒落过程中极易被半熔化或烧结粘附于工件侧壁表面(经后续热处理过程成为一系列孤立凸起的氧化物硬质颗粒)(图2)。

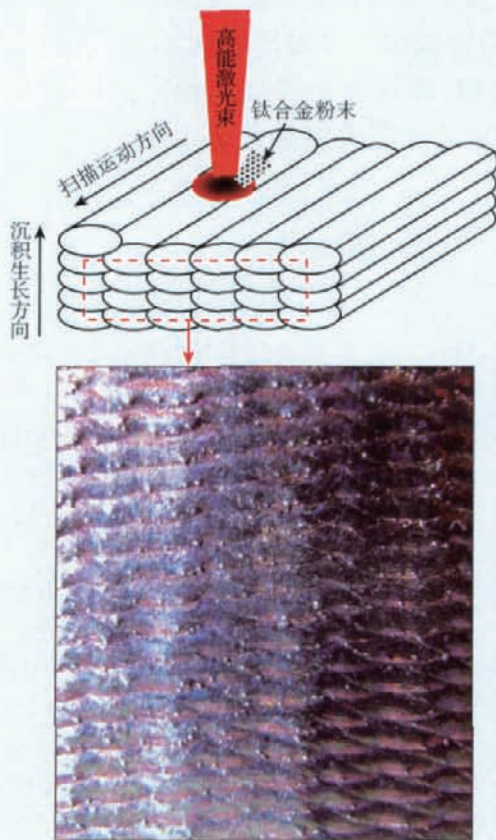


图1 激光快速成形钛合金零件表面形貌实物照片及其形成示意图



图2 激光快速成形钛合金零件表面粘附粉末形貌实物照片

步的高倍显微组织分析表明(图4),激光快速成形TA15钛合金具有超细“网篮状”特殊显微组织,其 $\alpha$ 片层细小、片层集束取向随机多样,具有快速凝固组织特征,这是激光快速成形钛合金具有优异综合力学性能的凝固组织基础。

材料硬度是影响其切削加工工艺的重要因素之一,激光快速成形TA15钛合金材料横截面和纵截面显微硬度分布如图5所示。可以

激光快速成形钛合金零件这一特殊的表面形貌特征,对其粗加工有较大影响。对激光快速成形TA15钛合金飞机构件的粗加工工艺研究表明,当粗加工首次切削深度小于激光成形制件表面粗糙度时,由于刀刃直接接触波纹起伏层(相对硬的氧化物层)或表面粘结氧化物颗粒,刀具磨损较快,崩刃现象频繁发生,加工过程噪声和振动较大。

### 激光快速成形TA15钛合金硬度均匀性

材料的组织结构是影响机械加工的重要因素之一。图3为激光快速成形TA15钛合金沿沉积生长方向的纵截面宏观形貌,从图中清晰可见与表面“鱼鳞纹”状形貌相对应的逐层熔化沉积痕迹。进一

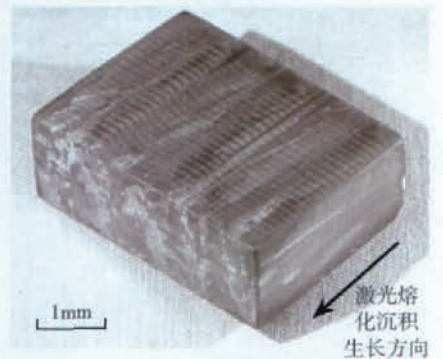


图3 激光快速成形TA15钛合金宏观组织照片

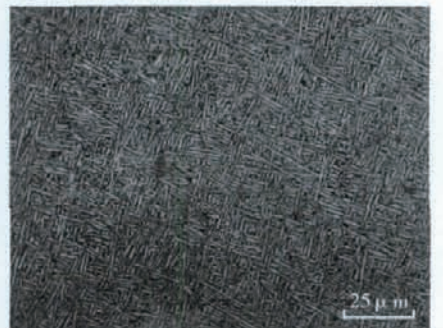


图4 激光快速成形TA15钛合金典型显微组织OM照片

看出,显微硬度值分布均匀稳定,为HV350~HV400。

研究同时表明,不同厚度试块及沿不同方向,显微硬度值均无较大波动,宏观硬度测试结果同样较为均匀稳定,为HRC40~HRC44。激光快速

耐磨性高、导热性能好且与钛合金亲和性差的刀具材料。

本课题以激光快速成形TA15钛合金工字梁飞机典型结构为对象,对比研究了不同刀具的切削效果。结果表明,激光快速成形钛合金切削加工的刀具材料和刀具几何参数的选择基本可沿用锻件的选择情况,但由于激光快速成形钛合金零件的特殊表面形貌,在铣削表面氧化层过程中,可选用高钴高速钢(如W2Mo9Cr4V4Co8)或铝高速钢(如W6Mo5Cr4V2A1)等刀具材料以降低成本。

在激光快速成形TA15钛合金飞机构件的铣削加工研究中发现,可以根据磨损和排屑等情况对铣刀进行修磨,改变铣刀的几何参数,改善切削加工性能。采用可转位刀具和硬质合金单刀铣削,粗加工时要求刀具前角、后角要小些,精加工时要求刀具前角、后角、螺旋角要偏大些或刀齿密些,并尽可能缩短切

削刃长。加工激光快速成形TA15钛合金飞机构件的刀具结构参数见表1。

## 2 切削参数的选择

激光快速成形TA15钛合金材料切削参数的选择与锻件基本相同,一般原则是高的切削速度、中等的每齿进给量 $f_z$ 、较小的轴向切深 $a_p$ 和适当大的径向切深 $a_e$ 。但是,在铣削表面层时要求大的切深,以避免表面波纹起伏、粘结硬质氧化物颗粒及表面渗氧硬质层对刀具的急剧磨损和“打刀”崩刃。

激光快速成形TA15钛合金飞机短梁构件在加工表面层和正常粗加工时的铣削参数如表2所示(刀具材料均为Y330A)。

## 3 切削工艺性能

对激光快速成形TA15钛合金工字梁、接头、框等不同形状尺寸的飞机构件的铣削、镗削、钻削和攻丝等切削加工研究表明,激光快速成形钛合金的切削工艺性能与锻造钛合金相当,同时表现出良好的切削工艺稳定性。这与激光快速成形钛合金组织性能对零件形状、尺寸、壁厚等的不敏感性有关。

研究发现,激光快速成形钛合金构件切削加工中存在以下2方面的特殊性,在制定切削工艺时必须注

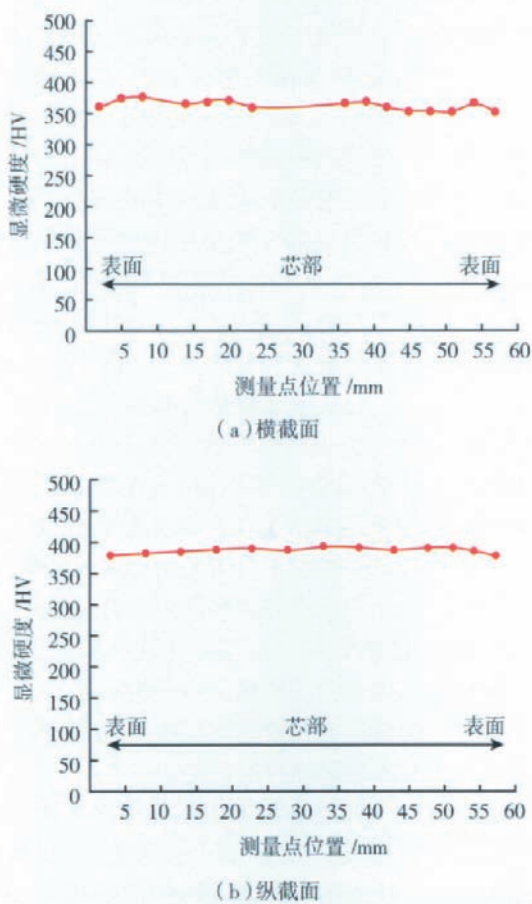


图5 激光快速成形TA15钛合金材料显微硬度分布

成形钛合金材料显微硬度对壁厚、形状等的不敏感性与材料内部硬度分布的均匀性,为后续切削加工提供了稳定的有利条件。

## 激光快速成形TA15钛合金切削工艺性能

### 1 刀具材料和刀具几何参数选择

由于钛合金热导率低、塑性低、金属粘着倾向大等特性,对刀具寿命影响很大,刀具材料选用主要从降低切削温度和减少粘性2方面出发。通常应选择红硬性好、抗弯强度高、

表1 激光快速成形TA15钛合金铣削加工铣刀几何参数

工序	前角/(°)	后角/(°)	螺旋角/(°)	刀尖圆弧半径/mm
粗铣	0	10	30	0.5~1.0
精铣	3	10~12	30~40	0.5

表2 激光快速成形TA15钛合金飞机短梁切削参数

工序	刀具规格	切削速度/(m·min <sup>-1</sup> )	进给量 $f_z$ /(mm·z <sup>-1</sup> )	轴向切深/mm	径向切深/mm
铣表面层	D40	22.60	0.10	5	40
	D16	12.56	0.08	5	40
正常粗加工	D40	22.60	0.10	2~3	15~25
	D16	12.56	0.08	2~3	15~25

意。

(1) 激光快速成形钛合金构件在粗加工之前必须对毛坯进行细致的划线和定位,必要时进行试走刀。因为激光快速成形所获得的是已具有一定尺寸精度的“近终形”毛坯,加工余量相比锻件少得多,同时各部位之间已形成了尺寸关联,因此,要求加工前对外廓和关键部位均进行全面细致划线,确定 X、Y、Z 三维方向上的基准,从而确保精加工后零件上所有表面层(包括波纹起伏的原始表面和热处理过程中形成的表面渗氧层)均能被加工去除。

例如,在激光快速成形 TA15 钛合金某大型飞机复杂构件(存在大量纵横交错筋条结构)的加工过程中,首件粗加工仅以外廓尺寸进行定位,结果导致个别筋条一侧加工余量很大,而另一侧的波纹起伏表面尚未加工平整;经增加钳工划线和试走刀工序后,优化调整了加工基准,使各部位均有一定的加工余量。

(2) 对激光快速成形钛合金构件进行粗加工时,首次进刀应采取相对大切削深度策略,即避免刀刃直接切削波纹起伏层、表面粘结氧

化物颗粒和热处理渗氧层。初期研究工作中,若首次进刀切深量较小,粗加工时噪声尖锐、颤动明显,且经常发生崩刃现象,刀具磨损较快(图 6(a));后加大切深量,刀刃切入表面氧化层以内,切削效果明显改善(图 6(b))。

#### 4 激光快速成形 TA15 钛合金飞机大型构件切削加工

##### 4.1 铣削粗加工

粗加工前在钳工平台上对激光成形“近终形”毛坯进行了划线,综合该零件腹板下方各筋条、缘条的相对位置,以及与腹板上方 2 个接头的位置关联关系,确定了加工基准,并进行试走刀,保证了加工余量的均匀性。

由于粗加工阶段以快速去除加工余量、控制零件整体变形为主要目标,同时兼顾粗加工后的超声波检测要求(如表面粗糙度达到  $R_a3.2$ 、单侧加工余量  $\geq 1.5\text{mm}$  等),所以采取的工艺方案是高切削速度、高进给率和小切削量的组合,切入和切出尽量采用连续的螺旋和圆弧轨迹进行切向进刀,以保证恒定的切削条件。

应用螺旋等高速加工方式对激光快速成形 TA15 钛合金工字梁进行粗加工,获得了较好的切削效率与表面质量的匹配,粗加工后实物照片如图 7 所示。

研究还表明,在高速粗加工过程中,要着重考虑以下几方面。

(1) 采用顺铣(爬升切削)方式,以保持切削条件恒定,获得较好的表

面质量;

(2) 保持金属去除率恒定和选择合理的走刀方式;

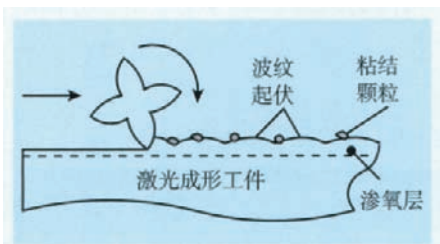
(3) 尽量减少刀具的切入次数,可选择回路或单一路径切削模式来进行顺铣。

##### 4.2 铣削精加工

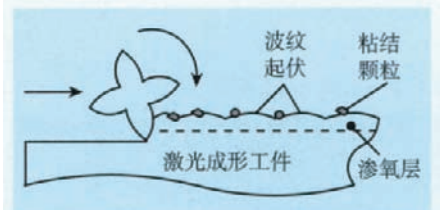
精加工的基本要求是获得很高的精度、光滑的零件表面,实现精细区域的加工,如小的圆角、沟槽等。三维螺旋策略综合了螺旋加工和等高加工策略的优点,可避免平行策略和偏置精加工策略中出现的频繁方向改变,从而提高了加工速度,减少了刀具磨损,还可以在很少抬刀的情况下生成连续光滑的刀具路径。

针对激光快速成形某大型 TA15 钛合金飞机构件切削加工中存在大量 R 圆角的实际情况,在精加工中应采用笔式加工。首先找到先前大尺寸刀具加工后留下的拐角和凹槽,然后自动沿着这些拐角走刀,允许采用越来越小的刀具,直到刀具半径与三维拐角或凹槽的半径相一致,从而降低了拐角处的切削难度,也降低了让刀量和噪声的产生。

采用该精加工编程策略对激光快速成形 TA15 钛合金某大型“腹板+筋条结构”飞机构件进行机械加工,获得了较好的效果,精加工后的局部如图 8 所示。



(a) 小切削深度



(b) 大切削深度

图6 激光快速成形钛合金构件表面层粗加工示意图

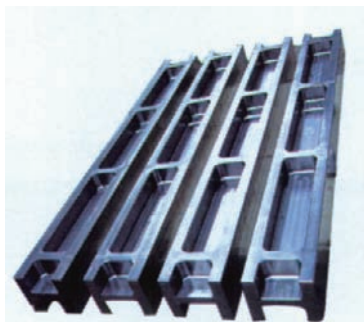


图7 激光快速成形TA15钛合金工字梁粗加工状态



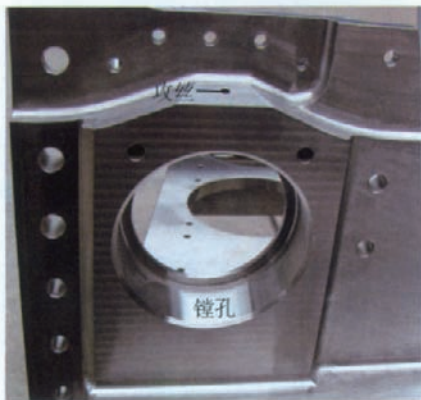
图8 激光快速成形TA15钛合金工件精加工状态实物图

### 4.3 镗孔、钻孔与攻丝

精加工后直接在数控加工中心上对工件上不同孔径、不同方向的百余个孔进行钻削(图9(a));然后在卧式数控镗铣床上对左右2个对称的轴承孔进行镗削(图9(b));最后采用配模手工钻制个别孔,并对轴承孔上的注油孔内螺纹进行手动攻丝,工艺参数基本参照BT20钛合金锻件的加工工艺。



(a) 钻孔



(b) 镗孔

图9 激光快速成形TA15钛合金构件镗削、钻削和攻丝等加工后实物照片

检测结果表明,加工后获得了精确的孔径、孔位和良好的孔表面质量。实际加工过程中同时发现,镗削和钻削的稳定性较好,刀具的磨损程度与锻件相当,基本未发生断钻现象。

### 4.4 切削变形控制

针对激光快速成形尺寸达1730mm×380mm×275mm的飞机某大型钛合金构件铣削等加工过程中不可避免的残余应力及由此带来

的加工变形,本课题从切削工艺、装夹和冷却等多方面研究了变形控制方法。

激光快速成形钛合金薄壁/细长零件与锻造钛合金的对比试切工艺试验表明,激光快速成形钛合金零件的加工回弹量相对较小,但由于所研究零件具有大平面腹板+单侧不等厚/渐变厚度筋条的不对称结构,且零件腹板平面度要求很高,这给切削变形控制带来了较大难度。

首先,对切削工艺进行了优化研究。针对该激光成形钛合金零件提出了多次翻转、单次少量加工的加工策略,在未进行加工过程中的任何去应力退火工艺条件下实现了对平面度的良好控制,但多次装夹和重新定位耗用一定工时,并且研究过程发现精加工零件经长时间放置后存在轻微变形(应力释放)的现象。据此,研究增加了半精加工和其后的去应力退火工序,通过半精加工使最终精加工量尽量小(单侧加工余量由原粗加工后的2.0~2.5mm减少至0.5~1.0mm)。随后,将半精加工件紧固于具有基准平面的装夹平台上进行去应力退火,结果表明,增加半精加工和其后的去应力退火工序后,最终精加工后零件的平面度控制效果更佳,长时间放置后重新测量零件平面度时未发现明显变形,表明经优化工序后的切削工艺大大降低了零件中的残余应力水平,有利于变形控制。

其次,对装夹方式进行了优化。研究表明,夹具要有足够的刚性,工件在安装时夹紧力不宜过大,以减少加工时零件的振动或变形。

此外,钛合金导热系数小,切削钛合金过程中产生的切削热积于切削刃附近不易散发,造成刀具磨损严重、加工表面粗糙度低甚至严重导致零件过烧,因此切削过程中必须对加工零件充分浇注切削液。激光快速成形钛合金零件的切削冷却没有特

殊性,选用HGS-113切削液对该大型钛合金构件进行切削加工时效果良好。

## 结 论

(1) 激光快速成形TA15钛合金“近终形”工件表面具有规则波纹起伏“鱼鳞纹”状形貌特征,这种特殊的表面形貌要求粗加工表面层时采用适当大的切深量。

(2) 激光快速成形钛合金零件粗加工前要求进行细致的划线定位,必要时试走刀,以保证各部位均留有合适的加工余量。由于激光快速成形工件已具有一定尺寸精度,各部位之间形成了较强的尺寸关联关系。

(3) 激光快速成形TA15钛合金的铣削、镗削、钻削和攻丝等切削工艺性能与锻件无显著差异,其加工刀具材料和刀具几何参数的选择、切削工艺、冷却与装夹等除上述2方面特殊性外基本可参照锻件。

(4) 采用优化的切削工艺对激光快速成形某大型TA15钛合金飞机构件进行了铣削粗加工和精加工、镗孔、钻孔和攻丝,获得了良好的尺寸精度和表面质量。

## 参 考 文 献

- [1] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况. 航空科学技术, 2005, 4: 3-6.
- [2] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用. 稀有金属快报, 2006, 25(1): 17-21.
- [3] 杨健. 钛合金在飞机上的应用. 航空制造技术, 2006(11): 41-43.
- [4] 朱知寿, 王新南, 童路, 等. 中国航空结构用新型钛合金研究. 钛工业进展, 2007, 24(6): 28-32.
- [5] 李树侠, 朴松花. 钛合金材料的机械加工工艺综述. 飞航导弹, 2007, 7: 57-61.
- [6] 王华明, 张述泉, 汤海波, 等. 大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展. 航空精密制造技术, 2008, 44(6): 28-30.
- [7] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文). 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [8] 孙杰, 李剑峰. 钛合金整体结构件加工关键技术研究. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(3): 81-88. (责编 良辰)