

激光快速成型 TC4 钛合金的力学性能

高士友^{1,2,*}, 张永忠¹, 石力开¹, 王殿武¹

(1. 北京有色金属研究总院复合材料工程技术研究中心, 北京 100088; 2. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 金属零件的激光快速成型是结合 CAD/CAM、高功率激光熔覆和快速原型制造的先进技术。研究了用激光快速成型技术制造 TC4 钛合金的力学性能, 分析了低温退火和热等静压处理对力学性能的影响, 并且测量了成型后试件的含氧量, 观察了拉伸试件的断口形貌。研究结果表明激光快速成型制造的 TC4 钛合金的力学性能高于铸造组织的力学性能, 达到了锻造组织的力学性能。

关键词: 金属零件; 激光快速成型; TC4 钛合金; 力学性能

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7076(2004)01-0029-05

金属零件的激光快速成型是采用快速成型 (RP-Rapid Prototyping) 和激光熔覆, 直接制造金属零件的先进制造技术。该技术已经引起了国内外学者的广泛关注, 在成型系统、成型材料的组织和性能、温度场的模拟和残余应力的测定、钛合金航空零件制造和模具及破损零件修复等方面, 取得了重要的研究成果^[1~5], 并且逐步走向应用。目前, 已经开发出的几种金属粉末激光快速成型技术, 都对钛合金 (特别是 TC4, 即 Ti-6Al-4V) 的激光快速成型进行了重点研究^[6~9]。研究结果表明, 钛合金零件的激光快速成型技术是一个具有减少制造成本, 缩短加工周期潜力的先进制造技术。

由于钛合金具有优秀的比重与力学性能的组合, 其应用已由航空、航天工业扩展到化工、冶金、电力、船艇和日常生活领域, 而应用最广泛的钛合金是 TC4 钛合金, 所以人们对各种制备方法制造的 TC4 钛合金, 及其在各种热处理规范和使用条件下的力学性能进行了细致的研究^[10~14], 为 TC4 钛合金的广泛应用奠定了基础。近期, 一些国外文献报道了, 用激光快速成型制备的 TC4 钛合金的力学性能^[6~9]。本文在已经开发了钛合金零件激光快速成型技术的基础上, 研究了激光快速成型 TC4 钛合金的力学性能及其成型条件和后处理的影响。

1 实验材料和过程

本文使用的成型材料是气雾化预合金 TC4 钛合金粉末, 基板材料是具有等轴相的热轧 TC4 钛合金板材。粉末尺寸为 $-140+200$ 目, 其化学成分为 (% , 质量分数): 5.5~6.5 Al, 3.5~4.5 V, 0.20 O, 0.015 H, 0.05 N, 0.08 C, 0.30 Fe, 0.04 Si, 其余 Ti; 热轧板的厚度为 5 mm, 其化学成分为 (% , 质量分数): 5.5~6.8 Al, 3.5~4.5 V, 0.20 O, 0.015 H, 0.05 N, 0.10 C, 0.30 Fe, 其余 Ti。实验系统由成型控制软件、激光器 (5 kW 横流 CO₂ 激光器)、四轴数控系统和保护气氛箱组成。为了研究成型条件对力学性能的影响, 实验分别在两个保护气氛箱内进行, 一个密闭, 另一个没有密闭。我们称在密闭的保护气氛箱内成型时, 为密闭成型条件; 在没有密闭的保护气氛箱内成型时, 为开放成型条件。在实验时, 保护气氛箱内始终通有一定流量的氩气 (2 m³ h⁻¹)。

为了得到力学性能拉伸试样, 在尺寸为 100 mm × 50 mm × 5 mm 的基板上, 使用不同的激光功率和扫描速度, 进行直壁试件的成型试验。在试验过程中调解送粉速率、粉末载气流量、保护气流量等工艺参数, 以便获得最佳的成型工艺参数。两种成型条件下的直壁试件成型试验后, 沿激光束扫

收稿日期: 2003-10-20; 修订日期: 2003-11-15

基金项目: 国家“863”项目 (2001AA337020-1) 和国家“973”项目 (G2000067205) 资助项目

作者简介: 高士友 (1958-), 男, 吉林省长春市人, 博士后, 教授; 研究方向: 金属零件激光快速成型技术

* 通讯联系人 (E-mail: Gao58@Sina.com)

描方向,从试件上切取拉伸试样(见图1,厚度为2 mm),在AG25TA力学性能试验机上进行力学性能拉伸试验。从拉伸试样的未变形部分切取显微组织观察试样,在光学显微镜下观察显微组织。对在开放成型条件下成型的部分拉伸试样进行退火处理(参数:温度600,时间1/2 h,随炉冷却)和热等静压处理(参数:氩气压力100~140 MPa,温度 920 ± 10 ,时间2~2.5 h,随炉冷却到300),然后对这部分试样进行力学性能试验并观察其显微组织。而且为了分析成型条件的影响和说明力学性能拉伸试验结果,用气体含量测定仪,测量两种成型条件下直壁试件和原始粉末的含氧量;用JSM-840型扫描电镜观察拉伸试样的断口形貌。

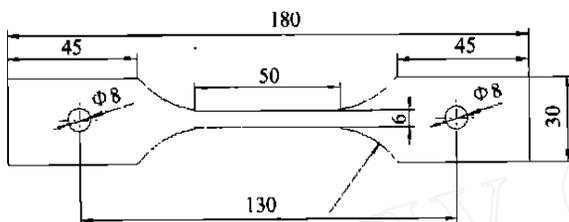


图1 拉伸试样

Fig.1 Tensile sample

2 实验结果

2.1 力学性能

表1是在开放成型条件下,激光快速成形TC4钛合金的力学性能实验数据。从表1中可以看出,激光功率分别为2.0和2.5 kW时,抗拉强度的差别不大,只是在2.0 kW时,平均抗拉强度和平均延伸率稍高。而且,表1的数据显示,(低温)退火对抗拉强度和延伸率几乎没有影响,热等静压处理使抗拉强度和延伸率的数值提高。

表2给出了在密闭成型条件下,激光快速成形TC4钛合金的力学性能。从表2的数据中可以看出,其强度和延伸率指标明显高于表1给出的强度和延伸率指标,特别是延伸率高于表1中原始状态和退火状态的延伸率近6倍(激光功率2.0 kW),高于热等静压状态的延伸率近4倍。而且在此成型条件下实验数据的分散度明显低于开放成型条件下的实验数据。

2.2 显微组织

激光快速成型TC4钛合金的显微组织是片状

表1 开放成型条件下激光快速成型TC4钛合金力学性能
Table 1 Mechanical properties for laser direct deposited TC4 Titanium alloy under the condition using non-closed protective box

激光功率/ kW	抗拉强度 σ/MPa	延伸率 s/%	备注
2.5	770	0.7	原始组织
	650	2.0	
	690	1.2	
2.0	770	2.6	原始组织
	620	1.7	
	670	1.1	
	875	2.2	真空退火(真空度 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa): 600, 0.5 h, 随炉冷却
	766	1.5	
	768	1.3	
	1070	3.2	
	895	3.0	
1020	1.3	热等静压(氩气压力100~140 MPa): 920 ± 10 , 2~2.5 h, 随炉冷至300 出炉	

表2 密闭成型条件下激光直接成型TC4钛合金力学性能
Table 2 Mechanical properties for laser direct deposited TC4 Titanium alloy under the condition using closed protective box

激光功率/ kW	抗拉强度 σ/MPa	屈服强度 σ _{0.2} /MPa	延伸率 /%	断面收缩 率/%	备注
2.0	1050	960	11	12	原始组织
	1040	950	8	12	
	1030	940	8.5	15	
2.5	1050	945	11.5	13	原始组织
	1050	940	9.0	14	
	1040	945	7.5	12	
	1030	930	7.5	15	

相加晶间相,晶粒沿平行于熔覆层高度方向生长,形成轴向为平行于熔覆层高度方向的柱状晶粒(见图2(a))。这说明其热流方向垂直于基板,具有较高的温度梯度。从图2中还可以看到,在熔覆层内部,存在各种形状的细小孔洞(见图2(b)),这些孔洞是气体孔洞(Gas porosity^[12]),而欠熔化孔洞(Lack-of-fusion porosity^[12])存在于熔覆层的边缘(见图2(c))。因此,欠熔化孔洞可以由后续机加工去除,细小气体孔洞可以通过热等静压处理消除。

图3是在各种工艺条件下,显微组织的变化情况。图3(a, b, c)是在开放成型条件下,激光快速成型TC4钛合金的显微组织,其中图3(b)是经过

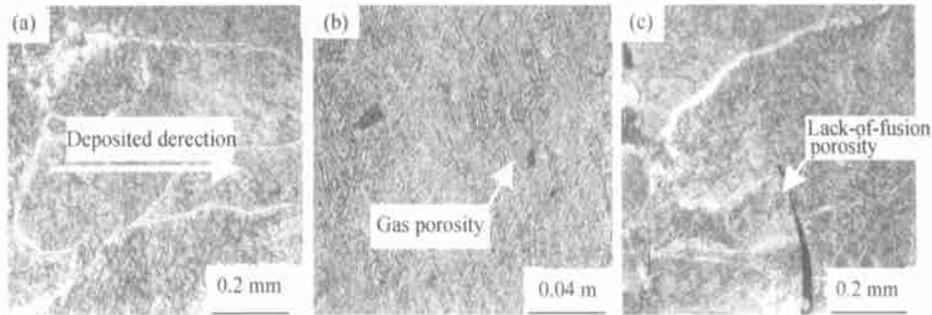


图 2 在密闭成型条件下激光快速成型 TC4 钛合金的显微组织

(a) 显微组织; (b) 气体孔洞; (c) 欠熔化孔洞

Fig. 2 Microstructure of TC4 alloy by laser direct deposition under the condition using closed protective box

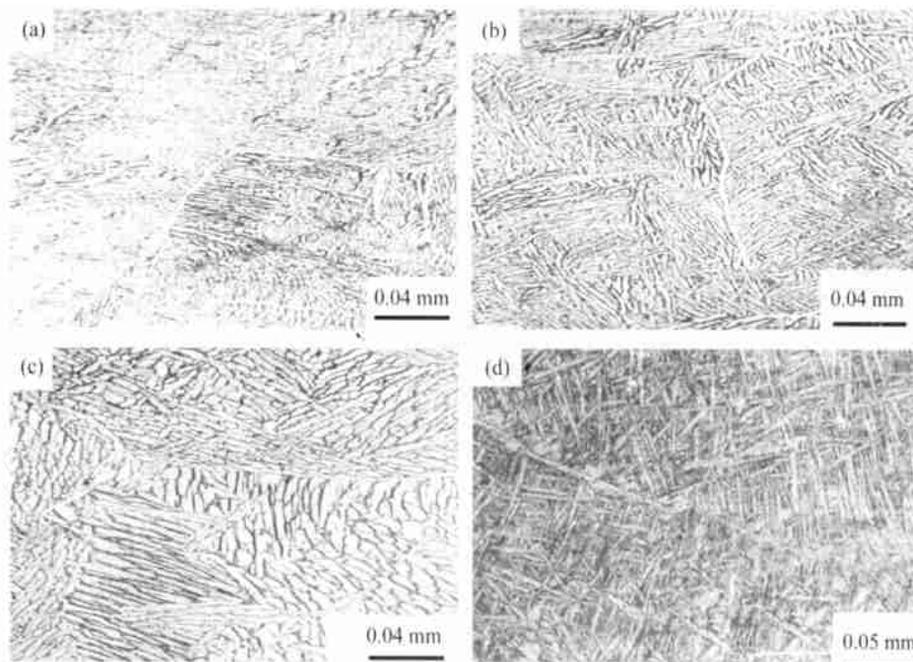


图 3 在开放成型条件下 (a, b, c) 激光快速成型 TC4 钛合金及经 600 °C / 0.5 h 真空退火 (d) 后的显微组织

Fig. 3 Microstructure of TC4 alloy by laser direct deposition under the condition using non-closed protective box

600 °C, 0.5 h 真空退火(真空度: $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa) 后的显微组织, 图 3(c) 是经过 900 ± 10 °C, 2 ~ 2.5 h 热等静压(氩气压力: 100 ~ 140 MPa) 后的显微组织。比较 3 种条件下的显微组织, 可以看出真空退火后的显微组织明显比原始组织(即激光快速成型后的组织)均匀, 而且晶界清晰, 但是相片状晶变化不明显; 与图 3(a, b) 相比较, 热等静压后相片状晶变化比较大, 其长度变短, 片厚增加, 晶界变窄, 且组织均匀性提高。

图 3(d) 是在密闭成型条件下, 激光快速成型 TC4 钛合金的显微组织。与图 3(a) 相比较, 图 3(d) 的组织均匀分布, 相更接近于针状, 其片状相的厚度和晶界宽度小于图 3(b) 和图 3(c)。

3 分析与讨论

铸造钛合金不能通过热处理细化晶粒, 破坏原始晶界, 但可以改变晶内组织, 从而影响性能。其常规热处理中的退火是为了消除应力或再结晶, 稳定组织, 保证一定的力学性能, 而热等静压处理(HIP) 广泛用于钛合金铸件的处理, 尤其是航空钛合金精密铸件的处理, 用以改善铸件内部的冶金缺陷, 提高与稳定铸件力学性能。表 3 给出了激光快速成形 TC4 钛合金的力学性能和常规制造方法, 以及国外激光快速成形 TC4 钛合金的力学性能。一般来说, 激光快速成形 TC4 钛合金的金相组织与铸造组织相似, 但其晶粒要细小, 特别是相晶

表3 各种工艺方法制造的 TC4 钛合金的力学性能

Table 3 Mechanical properties of TC4 alloy fabricated by various processing manner

制造工艺	状态	b/	0.2/	s/	/	备注
		MPa	MPa	%	%	
变形	退火	895	825	10	25	GB/ T2965-1996
	退火	930	860	10	25	GB493-1988
铸造	原始状态	895	825	6		GB/ T6614-1994
LASFORM	退火	965	862	10	20	参考文献[6]
本实验数据	原始状态	1040	950	9	13	密闭成型条件
	原始状态	687		1.3		开放成型条件
	退火	803		1.7		
	热等静压	995		2.5		

粒细小。因此其力学性能要高于铸造钛合金的力学性能。从表3中可以看出,本文给出的力学性能确实高于铸造组织的力学性能,达到了锻造组织的力学性能,并且高于国外文献给出的激光快速成形 TC4 钛合金的力学性能^[6]。

实际上在激光快速成型钛合金时,除了保证成型工艺参数外,成型条件的一个重要作用是防止成型过程中的氧化和控制成型件中的氧含量。这是因为在熔化过程中钛合金将发生剧烈的氧化(甚至可能发生燃烧)现象,而且如果钛合金中的氧含量增加,将使塑性指标急剧下降,当氧含量超过0.4%后,钛合金将失去工程应用价值。因此,标准规定工程用 TC4 钛合金的氧含量在0.08%~0.4%^[15]范围内。

本实验使用的钛合金粉末的含氧量<0.20%,为了进一步说明成型条件和后处理工艺对力学性能的影响,对在不同成型条件和后处理工艺下的

表4 在不同成型条件和后处理工艺下成型试件的氧含量

Table 4 Oxygen content of test piece fabricated by laser direct deposited under the different condition

激光功率/ kW	氧含量/ %	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	成型条件
2.0	1.00	687	1.3	开放成型条件,原始组织
2.0	1.16	803	1.7	开放成型条件,真空退火:真空度 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa,温度600,时间0.5 h,随炉冷却
2.0	0.69	995	2.5	开放成型条件,热等静压:氩气压力100~140 MPa,温度 900 ± 10 ,时间2~2.5 h,随炉冷却至300 空冷
2.0	0.18	1040	9.0	密闭成型条件,原始组织

成型试件进行了氧含量测定(见表4)。从表4中可以看出,开放成型条件下成型试件的氧含量已经达到1.00%,经真空退火后其氧含量没有降低,这时其强度和塑性指标都很低;而经热等静压处理后,氧含量明显下降,其强度和塑性指标有所提高。在密闭成型条件下,其氧含量(为0.15%)与原始粉末的氧含量(为0.18%)相比没有增加,强度和塑性指标超过了铸造组织的指标,达到了锻造组织的指标。

为了进一步说明上述力学性能的实验结果,用扫描电镜观察了拉伸试样的断口形貌(图4)。图4(a)是开放成型条件下的拉伸断口形貌,图4(b)是密闭成型条件下的拉伸断口形貌。从图4(b)中可以看出,整个拉伸断口具有明显的韧性断裂特征;而图4(a)只是局部(约占断口面积的30%)具有韧性断裂特征。

4 结论

1. 在开放成型条件下,激光快速成型 TC4 钛合金的力学性能,不能达到工程应用要求的指标;经热等静压后强度和塑性指标显著提高,如能将氧含量降至要求的范围,则具有实际应用价值。

2. 在密闭成型条件下,激光快速成型 TC4 钛合金的力学性能,高于铸态组织的力学性能,达到了锻态组织的力学性能,具有重要的工程应用价值。

3. 在密闭成型条件下,激光快速成型 TC4 合金的含氧量小于原始粉末的氧含量;在开放成型条件下,氧含量急剧增加,热等静压可以使其氧含量下降。

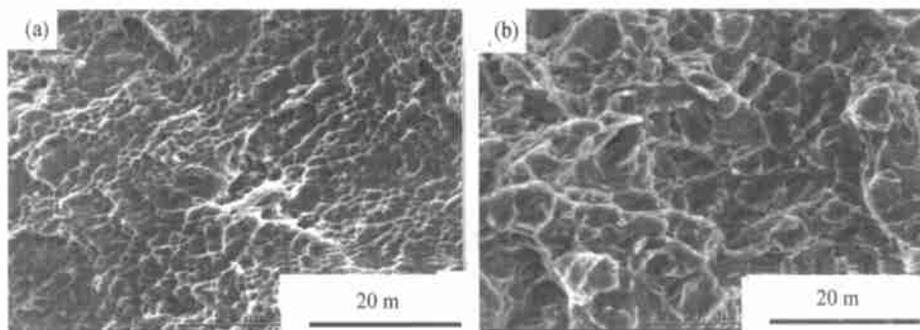


图 4 激光快速成型 TC4 钛合金的断口形貌

(a) 开放成型条件下; (b) 密封成型条件下

Fig. 4 Tensile fracture surface of TC4 alloy fabricated by laser direct deposition

参考文献:

- [1] Robert Irving. Taking a power: laser processing [J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 2000, 36: 69.
- [2] Jouni Hanninen. Direct metal laser sintering [J]. Advanced Materials & Processes, 2000, (2): 33.
- [3] William Hofmeister. Investigating solidification with the laser-engineered net shaping (LENS[TM]) process [J]. TOM, 1999, 51: 46.
- [4] Hu Y P, Chen C W, Mukherjee K. Measurement of temperature distributions during laser cladding process [J]. Journal of Laser Applications, 2000, 12: 126.
- [5] Grum J, Sturm R. Residual stresses on flat specimens of different kind of grey and nodular irons after laser surface remelting [J]. Materials Science and Technology, 2001, 17: 419.
- [6] Sam Froes. Laser forming titanium components from powder [J]. Mat. Tech. & Adv. Perf. Mat., 2000, 15: 6.
- [7] Koryn P A, Moore E H, Semiatin S L. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. Scripta Mater., 2000, 43: 299.
- [8] Koryn P A, Moore E H, Semiatin S L. Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135: 330.
- [9] Neil J Calder. The place for rapid manufacturing in military [J]. Airframe Production. Mat. Tech. & Adv. Perf. Mat., 2000, 15: 34.
- [10] Charles S C Lei, Andrew Davis, Eui W Lee. Effect of BSTOA and mill anneal on the mechanical properties of Ti-6Al-4V casting [J]. Advanced Materials & Processes, 2000, (2): 75.
- [11] James D Cotton, Larry P Clark, Henry R Phelps. Titanium alloys on the F-22 fighter airframe [J]. Advanced Materials & Processes, 2002, (2): 25.
- [12] Stewart Veeck, David Lee, Thomas Tom. Titanium investment casting [J]. Advanced Materials & Processes, 2002, (1): 59.
- [13] 耿洪滨, 何世禹, 雷廷权. 热循环对 TC4 钛合金组织和机械性能的影响 [J]. 金属学报, 1996, 32(1): 51.
- [14] 丁宏升, 郭景杰, 贾均, 等. 真空感应凝壳熔炼 TC4 合金的显微组织和力学性能 [J]. 材料科学与工艺. 1999, (增刊): 12.
- [15] Ivasishin O M, Savvakina D G, Moxson V S, et al. Titanium powder metallurgy for automotive components [J]. Mat. Tech. & Adv. Perf., 2002, 17(1): 18.

Mechanical Properties of TC4 Alloy Fabricated by Laser Direct Deposition

Gao Shiyu^{1, 2 *}, Zhang Yongzhong¹, Shi Likai¹, Wang Dianwu¹ (1. General Research Institute for Non ferrous Metals, Beijing 100088, China; 2. Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China)

Abstract: Laser direct deposition of metallic components is a combining technology of CAD/CAM, high power laser, and rapid prototyping. The mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser direct deposition were studied, the effect of low-temperature anneal and hot isopressing on the mechanical properties were ana-

Key words: metal component; laser direct deposition; Ti-6Al-4V alloy; microstructure and mechanical properties

lyzed, the oxygen content of as-deposited test pieces was measured, and the appearance of tensile fracture surface was observed. The results indicate that the mechanical properties of as-deposited test pieces are higher than that of casting ones, and equivalent to that of wrought anneal ones.