

文章编号: 0258-7025(2004)04-0482-05

激光快速直接制造 W/Ni 合金 太空望远镜准直器

钟敏霖, 杨 林, 刘文今, 张红军, 孙鸿卿

(清华大学机械工程系激光加工与快速成型研究中心, 北京 100084)

摘要 激光直接制造技术(LDM)是基于快速成形和激光熔覆技术而发展起来的直接快速柔性制造先进技术,尤其适用于传统方法难以制造的特种材料或特殊形状金属零件。基于太空望远镜准直器特定的形状和材料要求,运用层叠激光熔覆直接制造方法,研究了 W 和 W/Ni 合金的多道熔覆特性、微观组织和激光直接制造过程的稳定性。研究表明,W 和 W90Ni10 多层激光熔覆时后续熔覆层的宽度会越来越窄,最终形成三角形截面;而 W60Ni40 和 W45Ni55 合金具有良好的成形效果。采用激光功率 2000 W,光束直径 3 mm,扫描速度 0.3 m/min,送粉速度 8 g/min 的优化工艺参数,直接制造出高度为 307 mm,直径为 191 mm,壁厚为 3 mm,平行度不低于 2/1000 的圆柱状 W60Ni40 准直器,未出现裂纹和明显的气孔。结果表明激光直接制造技术可以制造出高质量的传统方法难以制造的特殊材料和形状的金属零件。

关键词 激光技术;激光直接制造;W/Ni 合金;准直器

中图分类号 TG 665 **文献标识码** A

Laser Direct Manufacturing W/Ni Telescope Collimation Component

ZHONG Min-lin, YANG Lin, LIU Wen-jin, ZHANG Hong-jun, SUN Hong-qing

(Laser Processing and Rapid Prototyping Center, Mechanical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Laser direct manufacturing (LDM) is intensively developed in recent years to directly and flexibly manufacture metallic components with full metal density, functions and properties, especially for some specific materials or geometry. This paper presents a project work on laser direct manufacturing a novel designed collimation component for out-space hard X-ray modulation telescope. The research work contained the characteristics study of overlap multi-pass laser cladding of tungsten or tungsten nickel alloys, the microstructure analyses and the processing stability of laser direct manufacturing. The research indicated that a triangle shape clad appeared when vertically overlap W and W90Ni10 alloy. The W60Ni40 and W45Ni55 alloys showed good forming capability for manufacturing. With optimized parameters; laser power of 2000 W, beam diameter of 3 mm, scanning speed of 0.3 m/min and powder feed rate of 8 g/min, the cylinder shaped W60Ni40 collimation component was successfully manufactured with diameter of 191 mm, height of 307 mm, thickness of 3 mm. No cracks and obvious porosities occurred. The results proved that laser direct manufacturing could be well used to manufacture specific material and geometry component with good quality, which are very difficult or even impossible by conventional manufacturing methods.

Key words laser technique; laser direct manufacturing; W/Ni alloy; collimation component

收稿日期:2002-11-06;收到修改稿日期:2003-03-11

基金项目:清华大学机械学院 985 重点项目和基础研究基金资助课题。

作者简介:钟敏霖(1961—),男,清华大学机械系副教授,博士,法国博士后,主要从事激光材料加工和激光快速直接制造研究。E-mail:zhml@tsinghua.edu.cn

1 引言

快速成型技术(RP)是一种无需任何附加模具、直接利用计算机 CAD 模型制造复杂原型的制造方法。激光直接制造技术(LDM)是快速成型技术的进一步发展,它将金属的特性和功能注入到常规快速成型技术制造的原型中,能够快速柔性地制造出全密度、全功能的金属零件,尤其适用于传统方法难以制造的梯度功能材料、超硬材料、复合材料、金属间化合物材料等特殊材料或形状特殊的金属零件,是目前国际上的研究热点之一。近几年世界各国的许多研究机构对直接制造进行了许多的研究,取得了实质性重要进展,并各自发展了基于激光熔覆的不同名称的快速制造技术^[1~9]。

激光直接制造技术可很好地用于制造小批量特殊材料、特殊性能和特殊几何形状的贵重金属零件,这些零件用传统方法是很难加工或加工成本非常昂贵的。本文在原研究基础上,研究用激光直接制造技术制造一种新型的太空硬 X 射线调制望远镜的准直器零件。准直器主要用于吸收倾斜入射于望远镜接收口中的硬 X 射线辐射,只让垂直入射的 X 射线被望远镜接收探测到,其基本物理性能要求为有效吸收倾斜入射的太空硬 X 射线,该准直器采用高熔点、高密度的钨或钨合金来制造。准直器是一直径 191 mm,高度 300 mm,厚度 3 mm 的薄壁圆筒型零件,内有 5 条主筋,要求主筋间的平行度不低于 2/1000,尺寸精度无严格要求,横截面如图 1 所示。由于该准直器特殊的材料和较复杂的形状要求,传统方法诸如铸造、焊接等难以加工,用电火花切割又极其昂贵,激光直接制造技术则提供了一种快速低成本先进加工方法。

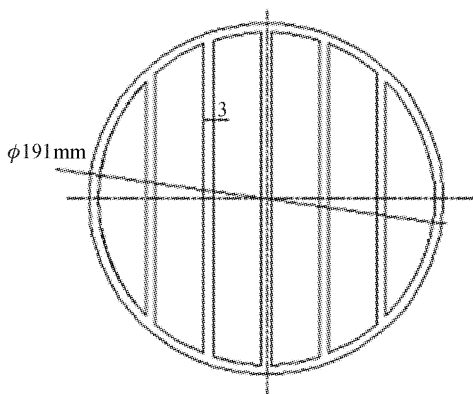


图 1 准直器横截面图

Fig. 1 Section pattern of the collimation component

2 实验方法

实验和制造设备包括 PRC3000 型 3 kW 快轴流 CO₂ 激光器,CNC 数控工作平台,清华大学研制的 THPF-1 型自动送粉器和 THCN-3 型同轴送粉喷嘴。用一台 Marathon-MR1S 双波长红外测温探头来监测制造过程中的熔池温度。

激光制造所用材料为 150 目的纯钨和纯镍,按不同配比配制成 W/Ni 混合粉末,用同轴送粉激光熔覆的方法制备出 W/Ni 合金。基板为中碳钢,在零件制造完成后被切除。

用 JSM-630IF 扫描电子显微镜分析所制得金属零件样品的显微组织,由电镜能谱成分分析仪(EDX)测量成分。

准直器的制造轨迹为:先熔覆堆积外圆,断光移到平行筋处熔覆筋,断光移至下一根筋的另一端点启动激光熔覆第二根筋,直到完成 5 根筋后断光回到外圆的起点完成一个截面循环,激光熔覆头提升 0.2 mm,启动下一个循环直至完成整个准直器。外圆和筋之间有一定重叠,确保良好的冶金结合。

3 结果及讨论

3.1 钨和钨合金的激光熔覆特性

激光直接制造技术是一种基于多道激光熔覆的添加式制造技术,因此需要首先研究钨和钨合金的多道搭接激光熔覆的特性。多道搭接激光熔覆的参数见表 1,混合粉末的成分比如表 2,粉末选择的依据是准直器的物理性能要求(W 含量越高越好,对 X 射线的吸收率越高)和该粉末的可熔覆堆积性。

表 1 激光熔覆参数

Table 1 Laser cladding parameters

Laser power	Beam mode	Beam diameter	Scanning speed	Powder feed rate
1300 W, 2000 W	01*	3 mm	0.3 m/min	8 g/min

表 2 钨和钨-镍粉末配比 (wt.-%)

Table 2 W and W-Ni powder mixtures (wt.-%)

Pure W	W90Ni10	W60Ni40	W45Ni55

实验表明垂直多道搭接激光熔覆纯钨和 W90Ni10 合金会出现一种特殊现象即三角形熔覆截面:虽然保持相同的光束直径和功率密度,在激光熔覆逐层堆积过程中,后熔覆的熔覆道不能保持与

前面熔覆道相同的宽度,因此在熔覆过程中逐渐收缩,经 4~5 层熔覆后熔覆道纵截面就变为三角形,如图 2 所示。这种三角形截面堆积对于激光直接制造来说是完全不能接受的。多层堆积熔覆 W60Ni40 和 W45Ni55 合金时能得到上下一致的熔覆结果。

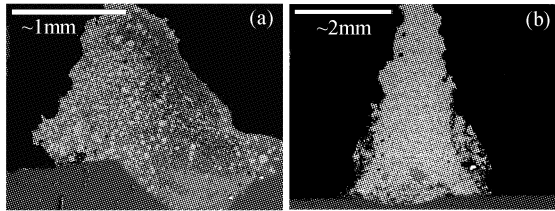


图 2 多道熔覆 W 后的三角形纵截面(a)和多道熔覆 W90Ni10 合金后的三角形纵截面(b)

Fig. 2 Triangle shaped multi-pass laser clad of W (a) and W90Ni10 alloy (b)

3.2 激光直接制造 W 和 W/Ni 合金样品的微观组织分析

图 3((a),(b))表示激光熔覆 W 实际上是一种典型的激光烧结过程。由于 W 的高熔点和激光熔覆的快速加热和快速冷却特点,经送粉加入的纯 W 颗粒在熔池中极少熔化,而中碳钢的基材却熔化很多,导致严重的稀释,基材熔化的 Fe 上浮到熔覆层中形成烧结体的粘结相并与 W 反应生产 Fe-W 化合物。激光烧结层的微观组织包括未熔的 W 颗粒、颗粒间基体和枝晶,其化学成分(EDX 测量)如表 3。当多道垂直堆积时,从基体熔化而来的粘接相 Fe 越来越少,烧结层宽度无法保持,导致三角形烧结层。出现三角形烧结体后,后续堆积过程难以进行也无法改变其形状。

激光熔覆 W90Ni10 是一种典型的均匀烧结过程(图 3(c)所示)。从 W-Ni 合金相图(图 4所示)看

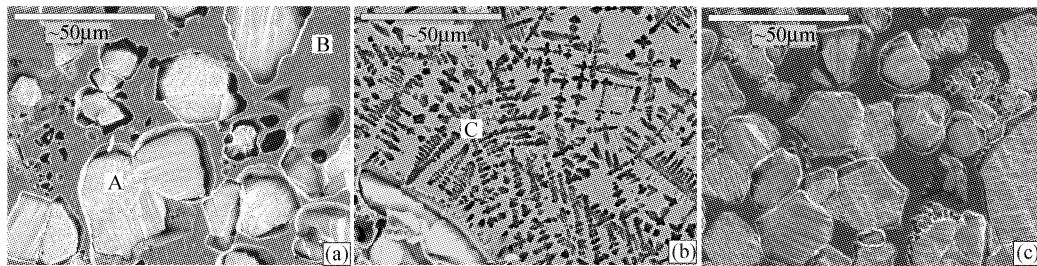


图 3 激光熔覆 W((a),(b))和 W90/Ni10(c)的微观组织

Fig. 3 Microstructure of laser clad W ((a), (b)) and W90/Ni10 (c)

表 3 EDX 测量所得的钨激光烧结层不同区域的化学成分

Table 3 Chemical composition of different areas in laser sintered tungsten layer by EDX

Label	Position	Composition (weight percentage)	
		Fe	W
A	Grey particles		99.3
B	Inter-particle matrix	58.0	39.1
C	Dendrite	61.8	35.0

出,钨和镍的熔点分别为 3422 °C 和 1455 °C。W-Ni 合金的熔点根据不同的成分在 3422 °C 和 1455 °C 之间变化。由红外非接触双色测温探头测得激光熔覆熔池的温度为 2000 °C 左右,因此激光能量能够熔化 Ni 颗粒但不足以融化 W 颗粒,所以激光处理 W90Ni10 合金实际上是烧结过程而非激光熔覆。90%的钨颗粒密集分布在烧结层中,只有颗粒外部有部分溶解。10%的 Ni 完全熔化成为粘接相,并与

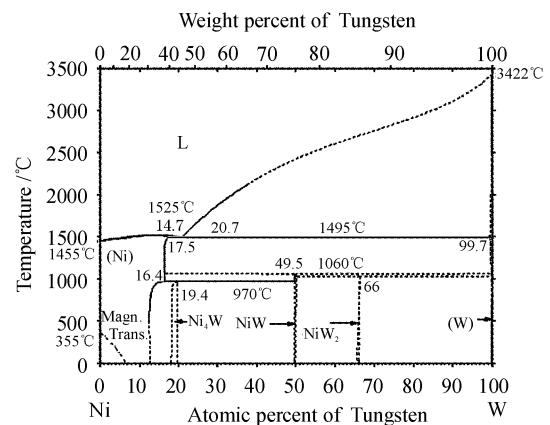


图 4 W-Ni 合金相图

Fig. 4 Phase diagram of W-Ni alloy

部分溶解的 W 形成 W-Ni 化合物,EDX 测得其成分为 38.2 wt.-%的 W 和 61.3 wt.-%的 Ni。由于粘接相 Ni 的体积百分比很低,垂直多层叠加后的烧结层宽度不能保持与开始层一致,结果仍出现三角形

截面。进一步激光烧结也很难有效堆积并改变其截面形状。

激光熔覆 W60Ni40 和 W45Ni55 合金是一种烧结与熔覆的混合过程(图 5(a), (b))。由于粘接相 Ni 的进一步增加和 W 颗粒的进一步溶解, 弥散的 W 颗粒不象 W90Ni10 中那样密布, 重新凝固的 W/Ni 基体成为主导组织。这两种合金在多层垂直叠加过程中能保持其宽度的一致性, 具有良好的激光制造成型特性。虽然 W 的比重比 Ni 高, 但由于激光熔覆的快速凝固特性和每层约 0.2 mm 的层厚, 熔覆层中没有出现 W 颗粒的沉降现象, 未熔 W 颗粒基本均匀地分布于熔覆层中。

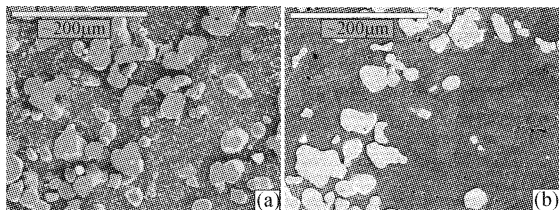


图 5 激光熔覆 W60Ni40(a) 和 W45Ni55(b) 的微观组织

Fig. 5 Microstructure of laser clad W60Ni40 (a) and W45Ni55 (b)

在 W60Ni40 激光熔覆层中, 微观组织包括部分熔化的 W 颗粒、基体(成分: 45.6 wt.-% W 和 54.4 wt.-% Ni) 和一些分布在基体中的花状枝晶组织(成分: 75 wt.-% W 和 25 wt.-% Ni), 对照相图, 这两种组织分别对应 Ni_4W 和 NiW_2 。

W45Ni55 合金为近共晶成分, 具有良好的液态流动性, 其微观组织包含未完全溶解的 W 颗粒和基体, 基体成分为 36.3 wt.-% W 和 63.7 wt.-% Ni, 应该是 Ni 和 Ni_4W 化合物的混合物。由于它极好的液态流动性, 垂直叠加的 W45Ni55 激光熔覆层可以保持前面熔覆道宽度和形状。

根据由上述实验结果和太空硬 X 射线调制望远镜准直器零件的物理性能要求, 鉴于 W60Ni40 合金的物理特性较好并具有良好的熔覆成型能力, 决定选用 W60Ni40 为激光直接制造的材料。

3.3 激光直接制造 W/Ni 合金金属零件的工艺稳定性

虽然准直器零件的横截面形状并不十分复杂, 它的薄壁结构, 300 mm 高度和主筋的平行度要求使它具有很大的挑战性。为了满足零件的要求, 激光熔覆和制造工艺的稳定性是至关重要的。激光熔覆/制造是一个多参数过程, 主要参数包括激光功

率、光束直径、扫描速度和送粉速率等。制造零件的质量不仅与单个参数的稳定性有关, 而且与整个制造过程多个参数的稳定性有关, 如熔池温度的稳定性、熔池几何形状的稳定、喷嘴与工件距离的稳定性等。本项研究采用开环控制方式, 激光输出功率的稳定性为 $\pm 0.5\%$, 送粉速率稳定性为 $\pm 2\%$, 实际测量的熔池温度如图 6 所示, 这些指标应能满足制造要求。

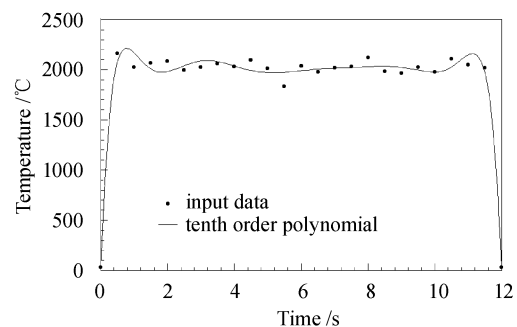


图 6 测量的熔池温度

Fig. 6 Temperature stability in the melt pool

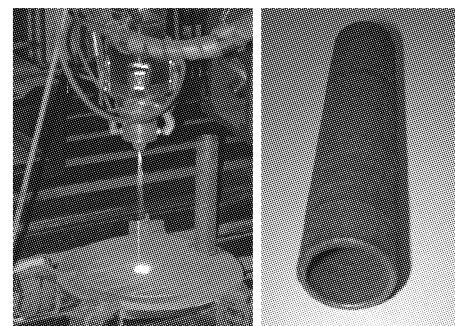


图 7 W60Ni40 圆柱模拟件的激光制造

Fig. 7 Simulation manufacturing of W60Ni40 cylinder sample

表 4 激光直接制造技术制造的模型零件尺寸

Table 4 Dimension comparison of the LDM simulation sample

		Diameter/mm	Thickness/mm
Designed		33.0	3.0
Actual sample top	Maximum	32.9	3.3
	Minimum	32.7	3.0
Actual sample bottom	Maximum	32.8	3.0
	Minimum	32.6	3.1

Sample length: 185 mm.

在上述实验条件下经特殊 CNC 编程, 首先制造出壁厚 3.0 mm, 直径 30 mm, 高度为 185 mm 的圆柱模拟件来验证制造工艺和系统的稳定性(图 7), 工艺参数如下: 激光功率 2000 W, 光束直径 3

mm,扫描速度 0.3 m/min,送粉速度 8 g/min,所得模拟件的尺寸如表 4 所示,表明现有的激光快速制造系统和工艺能够满足制造实际金属零件的要求。

3.4 激光直接制造 W/Ni 准直器

W60Ni40 准直器的制造工艺参数为:激光功率 2000 W,光束直径 3 mm,扫描速度 0.3 m/min,送粉速度 8 g/min。耗时 60 h 制造出高度为 307 mm 的如图 8 所示的准直器零件,未出现裂纹和明显的气孔。零件壁厚为 3 ± 0.3 mm,平行度不低于 2/1000。

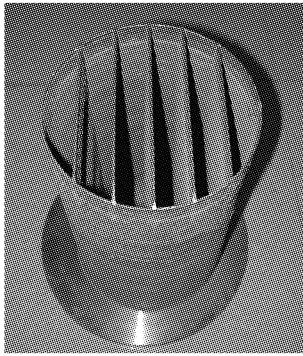


图 8 激光直接制造出的 W/Ni 零件

Fig. 8 Laser manufactured W/Ni component

4 结 论

1) 基于激光熔覆技术的激光直接制造成功用于直接制造硬 X 射线太空望远镜上的筒形 W/Ni 合金准直器零件;

2) 研究了钨和钨镍合金的激光熔覆特性。W 和 W90Ni10 多层激光熔覆时后续熔覆层的宽度会越来越窄,最终形成三角形截面。而 W60Ni40 和 W45Ni55 合金具有良好的激光直接制造成形效果。

参 考 文 献

- 1 J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition; art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**:397~414
- 2 X. Wu, R. Sharman, J. Mei *et al.*. Direct laser fabrication and microstructure of a burn-resistant Ti alloy [J]. *Materials and Design*, 2002, **23**:239~247
- 3 K. G. Watkins. Achieving the potential of direct fabrication with lasers [C]. *Proceeding of 3rd International Conference on Laser Assisted Net Shaping (LANE 2001)*, Erlangen, August, 2001. 25~38
- 4 D. S. Choi, S. H. Lee, B. S. Shin *et al.*. Development of a direct metal freeform fabrication technique using CO₂ laser welding and milling technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **113**:273~279
- 5 S. Das, T. P. Fuesting, G. Danyo *et al.*. Direct laser fabricating of superalloy cermet abrasive turbine blade tips [J]. *Materials and Design*, 2000, **21**:63~73
- 6 G. K. Lewis, E. Schlienger. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition [J]. *Materials and Design*, 2000, **21**:417~423
- 7 Weiping Liu, J. N. DuPont. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping [J]. *Scripta Materialia*, 2003, **48**:1337~1342
- 8 G. Thomson, M. Pridham. Material property changes associated with laser forming of mild steel components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **118**:40~44
- 9 Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin *et al.*. Fundamental aspects on laser rapid & flexible manufacturing of metallic components [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(Suppl.):II30~II33