

# 激光快速成型致密金属零件的研究

席明哲<sup>1)</sup> 张永忠<sup>2)</sup> 石力开<sup>2)</sup> 程晶<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 北京有色金属研究总院, 北京 100088

**摘要** 采用激光快速成型技术制备出316L不锈钢薄壁矩形管和663锡青铜扭曲薄壁方管。所成型金属零件的组织均匀、致密,没有缺陷。沿金属薄壁零件高度方向的化学成分分析表明,零件中的化学成分分布均匀,且与金属粉末的化学成分相同,未发生成分偏析。同时,激光快速成型的金属薄壁零件的力学性能与常规加工方法制造出的零件相当。使用表明激光快速成型的金属零件可以满足直接使用要求。

**关键词** 激光快速成型; 316L 不锈钢; 663 锡青铜

**分类号** TH 16; TG 24; TP 13

快速成型技术(RP——Rapid Prototyping)是在80年代后期起源于美国的一种先进制造技术,是机械工程、计算机辅助设计(CAD)、数控技术及材料科学等技术的集成,它能将已具电子模型的设计,迅速、自动地物化为具有一定结构和功能的原型或零件。随着高功率激光器的发展,快速成型技术的最新发展方向是能够制造出具有使用性能的致密金属零件,它已引起人们的广泛关注。

美国的Sandia国家实验室(SNL)、斯坦福大学已开发出LENS<sup>[1]</sup>(Laser-engineered Net Shaping)技术,美国Los Alamos国家实验室也开发出DLF<sup>[2]</sup>(Directed Light Fabrication)的金属零件快速成型技术。这两种技术都是采用金属粉末作为原料,以大功率激光器作为熔化金属粉末的能源,可直接由CAD固体模型制造出致密金属零件。所研究的材料包括316、304不锈钢,625、690、718镍基高温合金,工具钢,铍、铌、钽、钨等难熔金属,钛合金等,零件致密度接近100%,性能较常规方法略有提高。

在国家“863”计划支持下,北京有色金属研究总院建成了金属零件激光快速成型的专用系统,系统由成型软件、激光器(2 kW 横流CO<sub>2</sub>)、4轴数控系统及工作台、同轴粉末输送及保护气氛装置等组成。

## 1 实验方法

实验材料为316L不锈钢粉末,化学成分(质量分数,%): Ni为12~14, Cr为16~18, Mo为2~3, Fe为余量; 663锡青铜化学成分(质量分数,%): Sn为6.2, Zn为5.8, Pb为2.5, Cu为余量; 粉末粒度~200目。采用45#钢加工成100 mm×50 mm×10 mm的长方形块作为基板。为提高基板对激光束的吸收率,在基板表面涂覆增强激光吸收率涂层。实验采用2 kW 横流CO<sub>2</sub>激光器,焦点光斑直径为 $\phi$ 1.0 mm。成型金属零件时,激光头静止不动,在计算机的控制下,数控机床按照所要成型金属零件的要求分层,进行各层几何信息运动,运动线速度为3 mm/s。金属粉末通过与激光头同轴的送粉器送入激光熔池,粉末载气(Ar)流量0.3 m<sup>3</sup>/h。成型不锈钢金属零件采用激光输出功率400 W,送粉速率5 g/min,扫描速度3 mm/s。成型铜合金零件采用激光输出功率600 W,送粉速率3.5 g/min,扫描速度为3 mm/s。为研究成型零件的力学性能,采用相同工艺参数制备不锈钢、锡青铜薄壁管,经线切割加工和表面磨光制成片状拉伸试样,在AG-50KNE拉伸试验机上进行拉伸试验,加载速率为2 mm/s,用JSM-840扫描电镜对拉伸断口进行观察,同时分析了薄壁管中主要元素沿高度方向的分布情况。金相观察面为薄壁垂直于基板的Y-Z横断面及平行于基板的X-Z截面。在如图1所示的薄壁上用线切割切取垂直基板的Y方向及平行于基板的X方向的力学性能试样,化学成分分析

收稿日期 2001-06-15 席明哲 男,32岁,博士生

\* 国家“863”计划资助项目(2001AA337020-1)

国家“973”计划资助项目(No.G200067205-1)

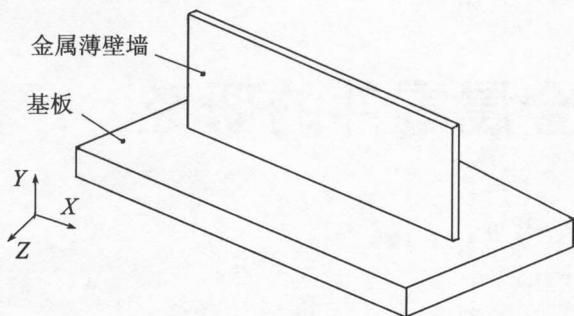


图1 成型金属薄壁墙金相观察及力学、成分取样部位示意图

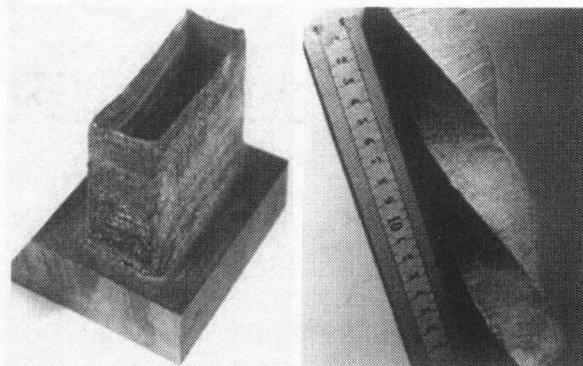
Fig.1 Schematic of the thin wall of metal and the location of mechanics sample cut

沿金属薄壁管的Y方向。

## 2 实验结果与分析

图2(a)为采用激光快速成型技术制造的矩形薄壁管,零件尺寸为45 mm×15 mm×25 mm,壁厚为1 mm.图2(b)为663锡青铜薄壁扭曲方管,薄壁扭曲方管横断面尺寸为30 mm×30 mm,高为180 mm,壁厚1.2 mm,零件按沿高度方向每升高1 mm扭转1°设计.如图所示,成型的薄壁金属管形状正确、规整,未发生扭曲变形.同时,成型的管件尺寸与设计尺寸完全一致,表明激光快速成型技术可以制造出形状、尺寸正确,并具有复杂形状的金属零件.

图3(a)为316L不锈钢薄壁墙垂直于基板Y-Z截面的金相组织.可以看出,金相组织由枝晶组织组成,且组织致密.形成的枝晶组织方向与基板垂直并且相互平行,同时组织均匀.该金



(a)316L不锈钢薄壁矩形管 (b)663锡青铜薄壁扭曲方管

图2 激光快速成型技术制造的金属薄壁管

Fig.2 The thin wall tube of metal fabricated by laser rapid prototyping

相组织的形成是由于基板的冷却作用,热量沿着垂直于基板的Y的相反方向上迅速散失,因此温度梯度在垂直于基板的Y方向最大,而在平行于基板的X方向上,则温度梯度很小.因此液态金属在冷却凝固过程中具有方向性,由此原因在金属零件中形成枝晶组织.

图3(b)为316L不锈钢薄壁墙平行于基板X-Z截面的金相组织.该组织呈现出蜂窝状结构,该结构是枝晶组织的横断面的形貌.从图中可以看出,该蜂窝状组织均匀而致密,无缺陷.

图3(c)为663锡青铜薄壁墙平行于基板X-Z截面的金相组织.该金相组织均匀细小的铸态组织,基体组织为α-铜相,黑色小颗粒为铅相,并可看出该组织致密、没有缺陷.

图4(a),(b)为316L不锈钢和663锡青铜薄壁件在垂直于基板的高度方向上的化学成分分

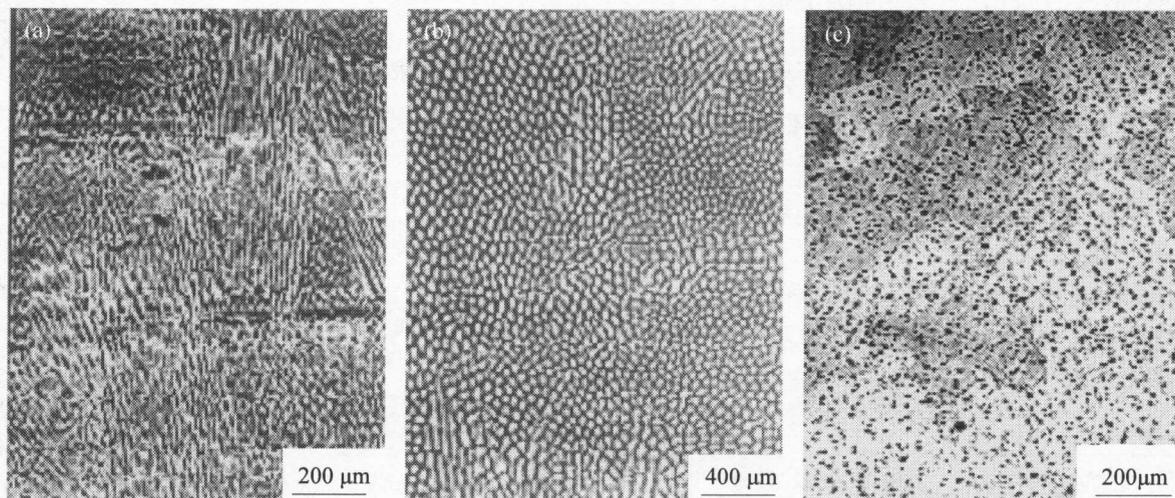


图3 (a),(b)316L不锈钢垂直于基板Y-Z截面、平行于基板X-Z截面的组织,(c)663锡青铜平行于基板X-Z截面的组织

Fig.3 Microstructure of Y-Z section (a), X-Z section (b) of 316L SS and X-Z section of 663 copper alloy (c)

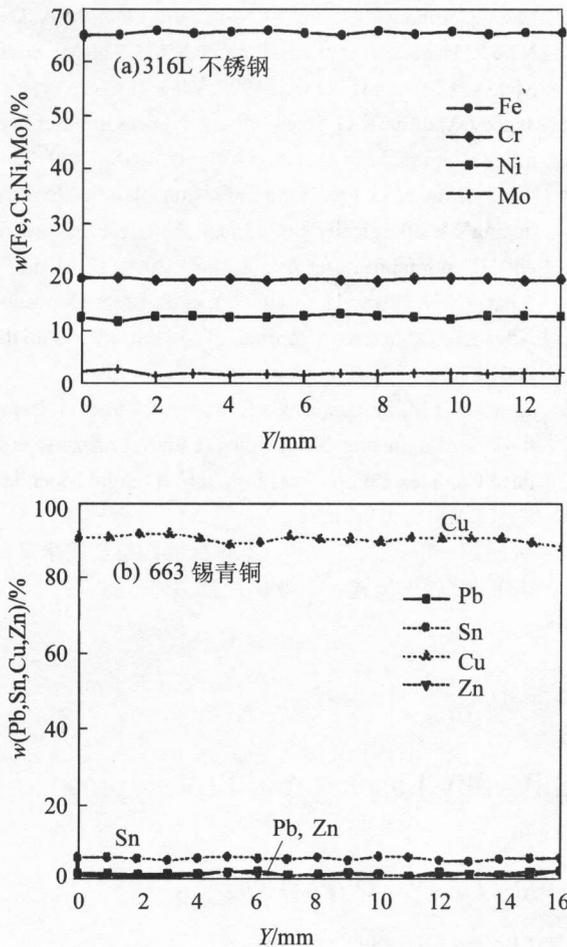


图4 化学成分沿Y方向分布

Fig. 4 Composition distribution along height direction

布.从图中可以看出,激光成型的金属薄壁件的化学成分分布均匀,并且未发生成分偏析,薄壁件的化学成分和金属粉的化学成分一致.

表1为由薄壁件制成的拉伸试样与常规加工方法制成的零件力学性能的对比.从表中可以看出,激光快速成型的金属件的力学性能和由常规方法制成的零件的力学性能相当,表明激光快速成型制成的金属零件可满足实际使用要求.图5为拉伸断口的SEM照片,其韧窝特征表明,所成型金属零件具有很好的韧性.

影响激光快速成型金属零件的主要工艺参数有:激光功率 $P, W$ ;扫描速度 $V, \text{mm/s}$ ;光斑直径 $D, \text{mm}$ ;送粉速率 $G, \text{g/min}$ 及成型前基板的表面处理和预热.在基板表面涂覆增强激光吸收率涂层和采用高功率激光束对基板进行预热对成型金属零件的质量是很关键的.其目的在于,使所成型金属零件的最初几层与基板形成牢固的冶金结合,热量的散失沿垂直向着基板方向,从而使得成型过程中的激光熔池尺寸稳定,同

表1 激光快速成型零件与常规方法制造零件的性能对比  
Table 1 Tensile properties of metal part by laser rapid prototyping compared to that of conventionally processed

材料	材料状态	$\sigma_b / \text{MPa}$	$\varepsilon / \%$
316L 不锈钢	激光快速成型态		
	垂直基板 Y 方向	626	43
	平行基板 X 方向	694	40
316 不锈钢	锻造退火态 <sup>[5]</sup>	572	63
	熔模铸造 <sup>[5]</sup>	517	39
663 锡青铜	激光快速成型态	260	26
	金属模 <sup>[6]</sup>	180	4
	砂模 <sup>[6]</sup>	150	6

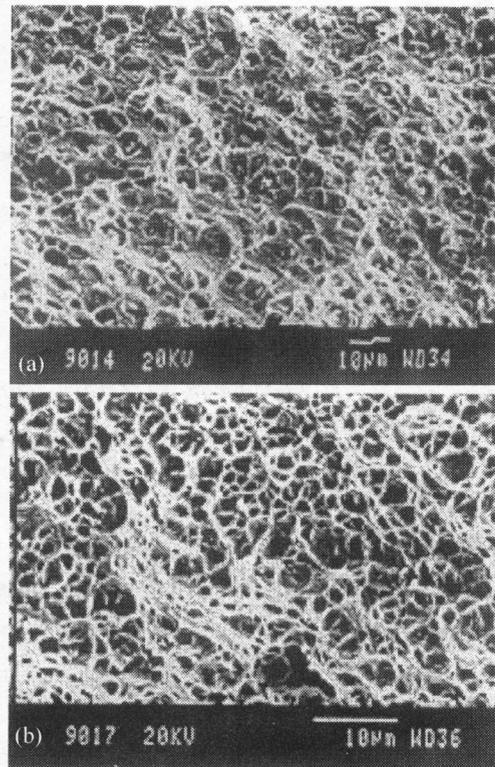


图5 激光快速成型金属零件的拉伸断口 SEM 照片, (a) 663 锡青铜, (b)316L 不锈钢

Fig.5 SEM morphology of tensile fracture surface for 663 copper alloy (a) and 316L SS(b)

时保持金属零件中的温度分布均匀.若处理不当,则会出现金属零件与基板不能完全形成冶金结合,从而使热量散失不均,造成金属零件中温度分布不均,产生热应力使金属零件扭曲变形,由此造成成型失败.事实上,对不同的材料体系,只要材料在单位时间内单位面积上吸收的能量超过 $E=4 \cdot P / (\pi \cdot D^2 \cdot V)$ ,就可以形成熔池,进行金属零件的成型.在光斑直径 $D$ 确定条件下,激光功率 $P$ 与扫描速度 $V$ 成正比,因此在成型对性能要求不高的金属模具时,可采用高功率、

高速度,减少制造时间.在制备功能型金属零件时,则需进行试验,寻找最佳 $P$ 与 $V$ 的搭配,以获得高性能的金属零件.此外,送粉速率 $G$ 及均匀送粉也是影响金属零件成型非常重要的因素.

### 3 结论

(1)采用激光快速成型先进技术可制备出组织致密、化学成分均匀的金属零件.

(2)激光快速成型的金属件的力学性能和由常规方法制成的零件的力学性能相当,表明激光快速成型制成的金属零件可满足实际使用要求.

#### 参 考 文 献

1 Schlienger E, Dimos D. Near Net Shape Production of

Metal Components Using LENS[C]. In: Imam M A, DeNale R, Hanada S, et al eds. Proc PRICM3. The Minerals, Metals & Materials Society, 1998. 1581

2 Magee J, Watkins K G, Steen W M. Advances in Laser Forming[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 235

3 Xue L, Islam M U, Free-form Laser Consolidation for Producing Metallurgically Sound and Functional Components[J]. Journal of Laser Applications, 2000, 12(4): 160

4 Zhang X D, Zhang H, Grylls R J, et al. Laser-Deposited Advanced Materials. Journal of Advanced Materials, 2001, 33(1), 17

5 Keicher D M, Smugeresky J E, Romero J A, et al. Using the Laser Engineered Net Shaping (LENS) Process to Produce Complex Components from a CAD Solid Model[J]. SPIE, 1999, 299(3): 91

6 孙毓超,刘一波,王秦生. 金刚石工具与金属学基础[M]. 北京:中国建材工业出版社,1999

## Investigation on the Fully Dense Metal Part by Laser Rapid Prototyping

*XI Mingzhe<sup>1)</sup>, ZHANG Yongzhong<sup>2)</sup>, SHI Likai<sup>2)</sup>, CHENG Jing<sup>2)</sup>*

1) Material Science and Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China

2) General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China

**ABSTRACT** The rectangle thin wall tube of 316 stainless steel and the contortion thin wall tube of 663 copper alloy are fabricated by Laser Rapid Prototyping. The fabricated metal parts are identical with blue print. The as-formed metal parts are fully dense, homogenous and free of defects. Chemical composition analysis show that the chemical composition distribution of metal parts is uniform and the chemical composition of metal parts is same as that of metal powder. The mechanical properties of the metal parts by Laser Rapid Prototyping are equal to that of the materials by conventionally processed method.

**KEY WORDS** Laser Rapid Prototyping; 316L stainless steel; 663 copper alloy