

文章编号:1000-582X(2002)02-0001-03

# 分层实体制造中金属分层板结合的新方法<sup>\*</sup>

易树平<sup>1</sup>,哈津<sup>1</sup>,林利红<sup>1</sup>,张津<sup>2</sup>

(重庆大学机械工程学院,重庆 400044;2.重庆工学院材料工程系 400050)

**摘要:**针对金属造型材料分层快速制造方法中存在的问题,提出用真空固态压力热扩散焊连接金属分层板的新方法。实验研究表明:焊接后堆积成形方向上零件尺寸变化较小,且为系统误差,其数值仅为1%;结合区域原子发生了明显的扩散,新的晶粒组织已经形成;焊缝结合强度在100Mpa以上,显微硬度与母材一致。研究结果表明真空固态压力热扩散焊是比较理想的金属分层板连接工艺。

**关键词:**分层实体制造;金属造型材料;真空固态压力热扩散焊

**中图分类号:**TG 439.6

**文献标识码:**A

功能零件的快速制造目前是快速原型与制造技术的研究热点之一<sup>[1]</sup>。村上将热塑性树脂、导电材料和金属陶瓷粉末混和在一起,利用SDM方法快速制造高强度可导电的复合树脂模型<sup>[2]</sup>,X.C. Li在FDM造型中埋入传感器制造特定功能零件<sup>[3]</sup>,S.Kang用FDM方法制造陶瓷微型涡轮机零件<sup>[4]</sup>,J.R. Stephen尝试用FPM方法制造金属基陶瓷功能零件<sup>[5]</sup>,G.Link通过激光堆积快速制造碳钢零件<sup>[6]</sup>。

利用金属板材作造型材料的分层实体制造(LOM)是实现功能零件快速制造的方法之一<sup>[7,8]</sup>。带川用0.2mm厚的两面涂覆低熔点合金的薄钢板,通过LOM方法快速制造金属零件<sup>[9,10]</sup>。山崎则直接用0.5mm的薄钢板作造型材料,采用LOM方法和电弧焊工艺分层快速制造汽车车体模具<sup>[11]</sup>。

现阶段用金属板材作造型材料的LOM在技术上尚存在许多应解决的难题,其一是分层材料的堆积成形精度问题。显然,分层板厚度越薄,成形精度越高。现有商品化的LOM技术,一般以纸张、树脂板等做造型材料,其分层板厚度仅为0.05~0.1mm<sup>[12]</sup>。若采用如此薄的金属板做造型材料,则造型时间长,造型强度也得不到保证。

另一个需要解决的问题是金属板材的连接问题。现有低熔点合金粘接法<sup>[9,10]</sup>、螺栓紧固加电弧焊焊接法等<sup>[11]</sup>,但在以金属薄板作造型材料的分层实体制造中,上述金属板材的连接工艺均未获得满意的效果。

作者在文献[13-16]中提出以1.0mm数量级的金属板材作造型材料,采用新LOM方法,分层快速制

造金属零件,通过精度分析,表明该技术方案与0.1mm数量级厚的造型材料比较原理误差相同或更低。论文提出以真空固态压力热扩散焊(以下简称热扩散焊)工艺连接金属分层板,并进行了相关的实验研究,在此报告实验结果。

## 1 金属薄钢板热扩散焊实验

### 1.1 热扩散焊原理及设备

热扩散焊是一种使两个被焊零件的结合表面在高温和加压的条件下局部发生塑性变形引起聚结和原子间相互扩散的固态连接方法。其接头连接区域由于扩散再结晶等过程形成固态冶金结合。它有几个特点:1)接头质量稳定,同时能保持材料原有的主要机械和物理化学性能;2)焊件变形小;3)可焊接其他焊接方法难以焊接的材料;4)工艺过程无害且主要参数易程序化,易实现焊接过程的自动化。

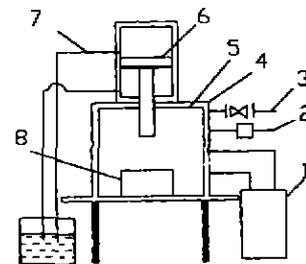


图1 真空热扩散焊机组成原理

• 收稿日期:2001-12-10

基金项目:国家自然科学基金(59875088)和重庆市应用基础研究(2000-6062)资助项目

作者简介:易树平(1960-),男,四川省富顺人,重庆大学教授,博士。从事先进制造技术与制造业的管理信息系统领域研究。

实验采用 KR-1 型真空固态压力热扩散焊接机,其构成原理如图 1。焊接时,焊件置于焊接炉 4 内的工作台 8 上,为防止高温氧化,要用抽真空装置 1 使炉内保持真空。工作台正上方的液压装置 7 控制的压力头 6 对焊件加压。炉温由炉壁加热系统 5 及控制系统 2 控制。3 为循环水冷却系统。

## 1.2 实验规划

### 1.2.1 薄金属板的热扩散焊基础实验

实验材料为 1 mm 的 JIS 标准 SPCC 钢板,制成三种面积的矩形薄板。各取 10 片一组沿厚度方向重叠堆积焊接成试件 1-1~1-7。各试件面积见表 1。另用高温有机胶把 10 片薄板粘接成试件 1-8。

实验的目的是考查热扩散焊后薄板在堆积成形方向上的尺寸变化、焊缝的显微硬度和结合面上的原子扩散结合情况。

### 1.2.2 热扩散焊焊缝强度实验

在上述实验基础上,选用 35 钢制成两 60 mm 宽矩形单接头搭接拉伸剪切试样,将试样搭接焊接,试样尺寸及焊接示意图如图 2 所示。将焊毕的焊接切割成为 20 mm 宽的三个试件,编号 2-1~2-3,各试件接头面积如表 3。

在 300kN 数显式液压万能实验机上对三个试样进行剪切强度试验。试验条件为:室温;应力增加速度约  $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ;屈服后,活动夹头在负荷下的移动速度不大于  $67.5 \text{ mm/min}$ 。试样受力图亦如图 2 示。

本实验目的是考查热扩散焊焊缝结合强度。

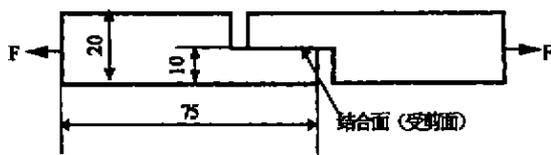


图 2 剪切实验焊接、受力示意图

## 2 实验结果及分析

### 2.1 热扩散区域的金相组织

对试件 1-4,1-6 的结合区进行金相组织观察,分别见图 3、图 4、图 5。

如图 3,试件结合区域的显微组织中已没有明显的分界面,说明高温高压下两薄板接触面之间原子发生相互扩散而形成了新的晶粒,从而使两金属薄板之间发生冶金结合成为一体;组织分布较均匀,晶粒大小基本一致,说明扩散较充分;

结合区域晶粒比基体处的晶粒要致密,表明在焊接过程中晶粒相互扩散、重组,在交界处发生再结晶,新的晶粒长大受到一定限制。

如图 4、5,同一倍数(200 倍)的试件 1-4、1-6 结

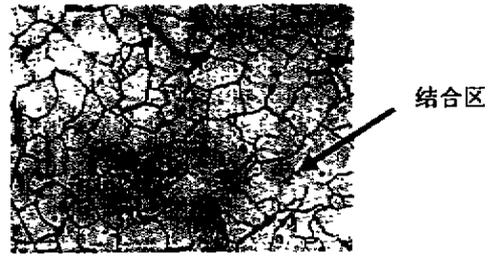


图 3 试件 1-6 结合区显微组织 400x

合区域晶粒大小  $d_{1-4} > d_{1-6}$ ,而两试件所受的压力  $F_{1-4} < F_{1-6}$ ,如表 1,说明压力对金属薄板的扩散焊结合是有影响的,压力越大,结合区域晶粒就越致密,结合就更紧密。



图 4 试件 1-4 结合区显微组织 200x

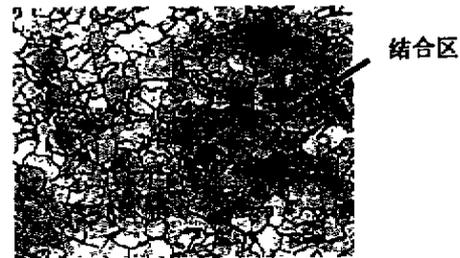


图 5 试件 1-6 结合区显微组织 200x

### 2.2 焊接前后堆积成形方向尺寸变化

测量 1.2.1 实验中试件焊前、焊后堆积成形方向的尺寸,对比如表 1。

表 1 金属薄板焊接前后尺寸对比

试样尺寸 (mm <sup>2</sup> )	焊接压力 (MPa)	试件号	收缩量	收缩比 (%)
2000	0.5	1-1	0.083	0.85
		1-2	0.083	0.85
		1-3	0.070	0.72
1600	0.625	1-4	0.080	0.82
		1-5	0.083	0.85
1350	0.74	1-6	0.113	1.16
		1-7	0.110	1.13

上表可以看出,热扩散焊后,堆积成形方向上尺寸发生了有规律的收缩,但收缩值较小,平均收缩 1%。可以通过工艺实验,掌握误差变化规律,再采用误差补

偿来保证堆积成形方向上的精度。

### 2.3 焊接扩散区域显微硬度

在结合区的剖面上,用 HV-1000 型显微硬度计测定试件 1-1、1-4、1-6、1-8 的维氏显微硬度,如表 2。

如前所述,各试件所受压力并不同,但由表 2 看出硬度基本一致,说明压力对硬度影响不大;结合面与基体硬度一致,说明焊接接头硬度达到基体硬度;焊接试件硬度与有机胶粘结试件相比略有降低,原因是热扩散焊相当于通常的高温退火工艺过程。

表 2 试件维氏显微硬度对比

试样号	结合面	基体	总体
1-1	108.1	107.9	108.0
1-4	99.9	106.7	103.3
1-6	113.3	110.4	110.4
1-8	有机胶粘结		142.8

### 2.4 热扩散焊面的剪切强度

按 1.2.2 实验测得每个试件的剪切强度如表 3。

表 3 剪切试件接头尺寸及强度

试件号	2-1	2-2	2-3
面积(mm <sup>2</sup> )	311.0	313.0	305.0
$F_0$	41.4	33.7	25.0
$\sigma$	133.0	108.0	82.0

注:1.  $F_0$ : 破断载荷 单位:KN

2.  $\sigma$ : 剪切强度 单位:MPa

分析表 3,可知:

1) 接头平均剪切强度 108 MPa。

2) 同一焊接实验条件下,剪切面积也基本相同,但三个试样剪切强度不同。因为在焊接过程中,理想状态下压力应均匀分布,而实际上对焊件施加的压力在宽度方向上呈梯形分布,压力越大,结合越紧密,故剪切强度也越大。

## 3 结论

1) 热扩散后堆积成形方向上的尺寸变化仅为 1%,且为系统误差。通过工艺实验可以确定该误差规律,再经误差补偿保证堆积成形方向的造型精度。

2) 从显微结构观察,结合区域原子发生了明显的扩散,新的晶粒组织已经形成,焊接区与基体由于再结晶形成了可靠的冶金结合面成为一个整体。

3) 热扩散焊结合面的剪切强度在 100MPa 以上,显微硬度与母材一致。

综上所述,真空固态压力热扩散焊工艺是一种比较理想的金属分层板连接工艺。

### 参考文献:

- [1] KRUTH J P, LEU M C, NAKAGAWA T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping[J]. Annals of the CIRP, 1997,47(2):525-540.
- [2] 村上存. 機能性材料を用いたラピッドプロトタイプング[A]. 日本機械學會第 75 期通常總會講演會講演論文集[C]. 東京:1998.457-458.
- [3] LI X C, GOLNAS A, PRINZ F B. Shape Deposition Manufacturing of Smart Metallic Structures with Embedded Sensors[A]. 7<sup>th</sup> International Symposium on Smart Structures and Materials[C]. 2000. Newport Beach.
- [4] KANG S. Application of the Mold SDM Process to the Fabrication of Ceramic Parts for a Micro Gas Turbine Engine. Proceedings Ceramic Materials and Components for Engines[C]. Germany, 2000.
- [5] STEPHEN J R, CHARLES R G. A New SFF Process for Functional Part Rapid Prototyping and Manufacturing: Freeform Powder Molding[A]. Proceedings of 6<sup>th</sup> SFF Symposium[C]. Austin of Texas, USA: 1995.
- [6] LINK G. Layered Manufacturing of Laser Deposited Carbon Steels. Ph.D. Thesis[C]. Stanford University, 1999.
- [7] NAKAGAWA T, ANZAI M. Rapid Prototyping for Direct Manufacturing of Metallic Parts[J]. Optronics, 1998,18(4):671-680.
- [8] 中川威雄, 安齊正博. 金屬製品のラピッドプロトタイプング[J]. Optronics, 1996,16(4):114-118.
- [9] OBIKAWA T. Rapid Manufacturing System by Sheet Steel Lamination [A]. Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference on Computer Aided Production Engineering[C]. Tokyo, Sep. 1998, 265-270.
- [10] 帶川利之. 薄鋼板を用いた Rapid Manufacturing 法の開發(第 2 報)[A]. 日本機械學會第 76 期通常總會講演會講演論文集[C]. 仙臺:1998. 295-296.
- [11] 山崎久男. 積層金型の大物自動車部品への適用[J]. 型技術, 2000,15(7): 36-45
- [12] CHILGS T H C, JUSTIER N P. Linear and Geometric Accuracy from Layer Manufacturing[J]. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 163-166
- [13] 易树平, 张根保. 提高分层制造精度方法的研究[A]. 全国快速成形与模具快速制造会议[C]. 西安:1998.4.
- [14] YI SHUPING, T. Accuracy Study on Laminated Object Manufacturing for the Metallic Functional Parts with Complex Surface [A]. Proceedings of 10<sup>th</sup> SFF Symposium[C]. Austin of Texas, USA: 1999, 711-718.
- [15] 易树平. 复杂形面最终用途零件分层实体快速制造的精度分析[J]. 重庆大学学报, 2000,23(1):12-16.
- [16] YI SHUPING. Study on Key Technology of Laminated Object Manufacturing for the Metallic Functional Parts with Complex Surface [A]. Proceedings of AMSMA' 2000 International Conference[C]. Guangzhou, P.R. China: 2000, 603-606.

(下转第 7 页)

- [13] 刘斌. 快速原型制造中若干软件关键问题的研究[D]. 武汉: 华中理工大学, 1997.
- [14] 刘爱林. 快速原型制造中实体信息描述与容错切片[J]. 中国机械工程, 2000, 11(4): 427-429.

## Slicing Algorithm Based on the New Laminated Object Manufacturing Process

YI Shu-ping, LIN Li-hong, FAN Bing, ZHOU Liu-gang, AI Hua  
(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To solve some key problems existing in the manufacturing of metallic functional part via Laminated Object Manufacturing (LOM), the new LOM process is presented. The requirements of the slicing data adapting new LOM process have been put forward, the corresponding calculating expressions have been deduced and the slicing processes of CAD model have been implemented.

**Key words:** laminated object manufacturing; metallic modeling materials; functional part; slicing

(责任编辑 成孝义)

(上接第 3 页)

## Connect Technique of Laminated Object Manufacturing Using Metallic Materials as Modeling Materials

YI Shu-ping<sup>1</sup>, HA Jin<sup>1</sup>, LIN Li-hong<sup>1</sup>, ZHANG Jin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Department of Materials Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

**Abstract:** To solve some key problems existed in the manufacturing of metallic functional part via Laminated Object Manufacturing (LOM), a new technique using vacuum solid-state pressure diffusion weld technique to connect the metallic slice sheets is presented in this paper. The following conclusions can be draw from the experiments introduced specially: the size in the stack direction shrink at the rate of less than 1% and the shrinking is owed to regularly error, the atom-diffusion between two combined interface occurred clearly and new crystallites shaped meanwhile, shearing intension of well connected diffusion section is more than 100 MPa and micro hardness of well-knit portion is the same to matrix's. It can be proved from the result above that the vacuum solid-state pressure diffusion technique weld is a perfect technique for connecting metallic slice sheets used in the manufacturing of metallic functional part via LOM.

**Key words:** laminated object manufacturing; metallic modeling materials; vacuum solid-state pressure diffusion weld technique

(责任编辑 成孝义)