

钛蜂窝体制备及压缩性能研究

王宏伟^{1,2} 李庆芬¹ 朱兆军² 魏尊杰²

(1 哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

文 摘 采用熔融沉积快速成形法制备钛金属蜂窝结构材料,对粉浆制备、钛金属蜂窝结构蜡坯固化、脱蜡等工艺以及所制备的钛蜂窝体的压缩性能进行了研究。结果表明,采用熔融沉积快速成形可以制备钛金属蜂窝结构,工艺简单、尺寸可控,钛蜂窝结构的相对密度在 9% ~ 12.6% 范围内,屈服强度和弹性模量的增加不大;相对密度超过 12.6% 后,屈服强度显著增加,但弹性模量增加的幅度不大。通过改变蜂窝体正六边形的边长或改变蜂窝体的壁厚均达到相同的相对密度条件下,蜂窝体的压缩强度差别不大,但对蜂窝体的弹性模量却有显著影响。

关键词 快速成形,熔融沉积,金属蜂窝,压缩性能

Fabrication and Compression Properties of Ti Honeycomb

Wang Hongwei^{1,2} Li Qingfen¹ Zhu Zhaojun² Wei Zunjie²

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(2 School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Ti metal honeycomb structure materials are fabricated by using Fused Deposition Modelling rapid prototype manufacturing. The techniques of fabricating powder slurry, solidifying Ti metal honeycomb wax and dewaxing cast wax are investigated. Also, the compression properties of fabricated Ti metal honeycomb are studied. The results indicate that Ti metal honeycomb structure can be fabricated by using Fused Deposition Modelling technique and the processes are simple and the size of honeycomb is controllable. When the relative density of Ti honeycomb structure is between 9% and 12.6%, the yield strength and elastic modulus of Ti honeycomb structure have a few increasing. When the relative density of Ti honeycomb structure is over 12.6%, the yield strength of Ti honeycomb structures increases significantly, however, the elastic modulus of Ti honeycomb structure has a little increase. Furthermore, by changing edge length or wall thickness of hexagon, the same relative density of Ti honeycomb structure can be obtained. On the condition of the same relative density by changing edge length and wall thickness of hexagon, the yield strength of Ti honeycomb structure is similar, but the elastic modulus has significant difference.

Key words Rapid prototype, Fused deposition modelling, Metal honeycomb, Compression properties

1 前言

金属蜂窝结构材料具有良好的比强度和比刚度,在航空、航天等领域得到了大量的应用^[1~3]。金属蜂窝结构材料通常有两种使用形式:一种是根据其结构特点直接使用;另一种是用蜂窝作为夹芯来制作蜂窝夹层结构,也称为三明治结构。特别是三明治结构,由上下两层金属面板和中间的金属蜂窝结构组成,该结构具有高的比刚度和比强度、隔热性能好^[4~5]。

制造金属蜂窝结构的方法主要有成型法和拉伸法,成型法是先材料压成波纹状,然后将波纹状材料叠合胶接或焊接而成,一般用于厚度大或刚性大的材料,或特殊的非正六边形的蜂窝结构;拉伸法是先材料上涂胶条,然后将材料叠合胶接起来,最后再将叠合胶接起来材料拉伸成蜂窝,一般铝合金蜂窝的正六边形采用该方法制造^[6~7]。

快速成形是由 CAD 模型直接驱动的快速制造任

收稿日期:2006-11-03

基金项目:黑龙江省博士后基金资助

作者简介:王宏伟,1968 出生,博士,主要从事金属热防护、铝合金低差压铸造的研究

意复杂形状的三维实体的技术^[8]。快速成形制造工艺有多种,其中熔融沉积快速成形制造技术,采用铸造石蜡作为原材料,成本低、制造周期短,成形金属蜂窝结构的孔径和壁厚尺寸精度高,因而对制品孔隙率和制品最终的力学性能方面具有很好的可控性和预测性。

本文采用熔融沉积快速成形法制备钛金属蜂窝结构,研究熔融沉积快速成形制备金属蜂窝结构材料的成形性、制备工艺,初步研究熔融沉积快速成形法制备钛金属蜂窝结构的压缩性能。

2 实验

2.1 材料

选用的金属粉末为钛金属粉末,不规则形状的多面体,粒度 53~73 μm,纯度为 99.62%。

为实现先固化后烧结的实验工艺,实验选用的黏结剂为聚乙烯醇,醇解度为 99%。在氧气中的分解温度为 200~220,在真空中的分解温度为 220,高于本实验中的脱蜡温度,从而有利于蜂窝体先固化后烧结,并且在 200~400 内分解速度缓慢,可以保证在烧结过程中分解的气体缓慢析出,不致于蜂窝体开裂,同时聚乙烯醇分解后的残留物少。

实验中选用海藻酸钠作为分散剂,选用的海藻酸钠的质量为所用黏结剂质量的 0.5%。使用的消泡剂为正辛醇,其使用量为所用黏结剂质量的 0.5%。

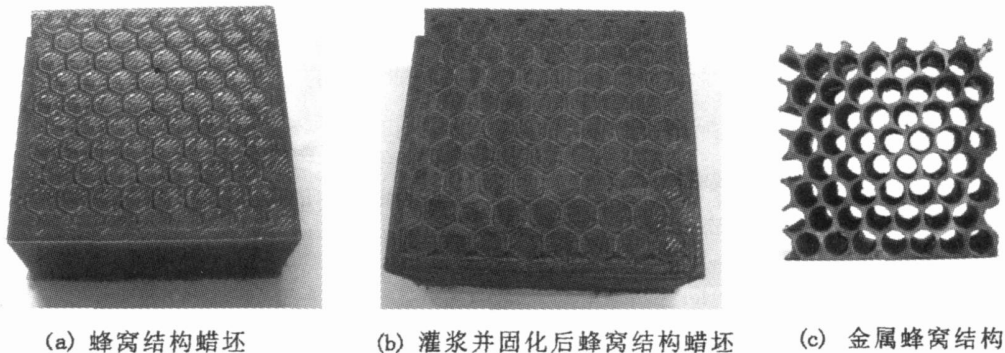


图 2 熔融沉积快速成形制备钛蜂窝体实体图

Fig 2 Photographs of fabricated Ti metal honeycomb by using fused deposition modelling

本实验采用熔融沉积快速成形制备了边长为 3、4、5 mm,壁厚为 0.3、0.5、0.7、1.0 mm 的蜂窝结构蜡坯。

3.2 钛蜂窝体素坯制备

实验中配制了浓度为 1%、2%、3%和 4%的四种聚乙烯醇。分别采用不同浓度的黏结剂配制钛金属粉浆进行灌注实验。实验结果表明,随着黏结剂浓度的增加,粉浆的流动性下降显著,但灌注后粉浆下降高度降低,粉浆中金属粉末所占质量分数越少,粉末相互的接触面减小,对材料烧结时的密实化不利。在

2.2 设备

本文采用 ZRY45A 型多功能真空热处理炉,真空度为 2.0 Pa;压缩试样的制备按照国标设计,压缩实验在 Inston 电子万能实验机上完成,压缩速率为 0.5 mm/m in。

3 钛蜂窝体制备

3.1 钛蜂窝体制备工艺流程

图 1 给出熔融沉积快速成形制备钛蜂窝体工艺流程。

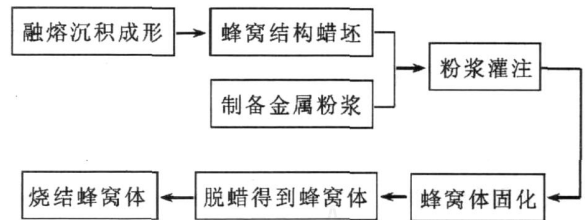


图 1 熔融沉积快速成形制备钛蜂窝金属材料工艺流程

Fig 1 Processes of fabrication of Ti metal honeycomb by using fused deposition modelling

首先采用熔融沉积快速成形法制备具有蜂窝结构的蜡坯 [图 2(a)],然后将制备的金属粉浆灌入蜂窝结构蜡坯 [图 2(b)],最后对已灌浆的蜂窝结构蜡坯固化、脱蜡、烧结,从而形成钛蜂窝体 [图 2(c)].

相同的液固比的情况下,黏结剂浓度越低,其所含的水分越多,从而在固化工艺中粉浆高度下降越大,固化后的素坯在脱蜡过程中垮塌的可能性增加。结合灌浆实验和理论分析,本实验选择的聚乙烯醇浓度为 2%。

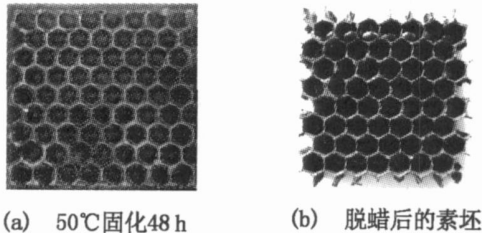
实验中配制了液固比分别为 35%、40%、45%和 50%的粉浆,当粉浆液固比为 40%时,粉浆的流动性好,有利于灌满蜡模;其分层程度较轻,因此不会造成素坯各部分性能不一;其所含的金属粉末多,材料更加密实,理论上力学性能会更好。

粉浆的制备方法是:首先根据液固比对金属粉末和黏结剂进行精确称重,在黏结剂中加入占黏结剂质量 0.5%的分散剂海藻酸钠和 0.5%的消泡剂正辛醇,搅拌均匀成混浊状,然后一边搅拌黏结剂一边加入金属粉末,在所称量的金属粉末全部加入后,继续搅拌 20 min,使得金属粉末在黏结剂中充分均匀。

将配制好的粉浆慢慢向蜡模中灌注,并轻微震动蜡模底部以使粉浆能够灌注密实,直到轻微震动蜡模底部时蜡模中的粉浆高度不再下降,表示蜡模已经灌注密实。

钛蜂窝体固化温度的确定:固化温度太高会使石蜡发生软化甚至熔掉,从而失去支撑蜂窝体的作用;固化温度太低,固化速度变慢,金属粉末分层会加重,影响素坯烧结后的性能。由于铸造石蜡的熔点为 73,实验研究表明其软化温度在 60 附近,考虑到炉温波动,选定的固化温度为 50。在选定的固化温度的基础上,分别固化 24、36、40和 48 h,随着固化时间的增加,钛蜂窝体固化体积分数增加,但在 40 h 以前,粉浆仍然没有完全变为固态,脱蜡时造成钛蜂窝体变形甚至局部出现塌陷;固化 48 h 后钛蜂窝体完整。

图 3 为在 50 固化 48 h [图 3 (a)] 脱蜡后的素坯照片 [图 3 (b)]。



(a) 50℃固化48 h (b) 脱蜡后的素坯

图 3 蜂窝体在 50 固化 48 h 脱蜡后的照片

Fig 3 Photos of honeycomb after solidifying at 50 and dewaxing for 48 h

3.3 钛蜂窝体烧结工艺确定

实验通过研究烧结过程中真空度的变化获得聚乙烯醇真空条件下的分解温度,结果如图 4 所示,可以看出在 120 ~ 190 这个温度区间内,烧结炉内的真空度下降,表明聚乙烯醇的分解主要发生在这一温度范围。由此确定去除黏结剂聚乙烯醇的温度为 300。多孔材料的理想烧结条件为 0.5 $T_{熔}$ 下长时间的烧结,但低温下的烧结直接导致力学性能的下降。如果把材料的力学性能(强度、硬度、韧性、延展性)与孔隙率联系起来分析,尤其希望金属材料拥有相当优良的力学性能,烧结温度就必须超过 (0.6 ~ 0.8) $T_{熔}$ 。本实验中所用的纯钛金属的熔点为 1668,因此本实验的烧结温度定为 1300。具体的烧结工艺

如图 5 所示。首先由室温以 5 /min 的升温速度升至 300 保温 40 min,脱掉残留的铸造石蜡和聚乙烯醇;然后以 10 /min 的升温速度升至 1300 烧结保温 120 min。

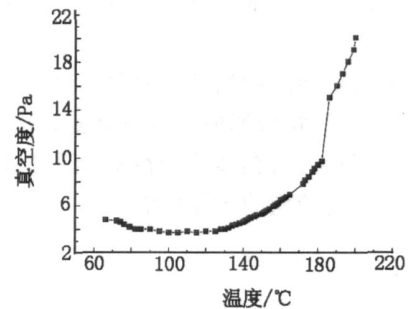


图 4 聚乙烯醇分解温度确定

Fig 4 Determination of poly vinyl alcohol decomposing temperature

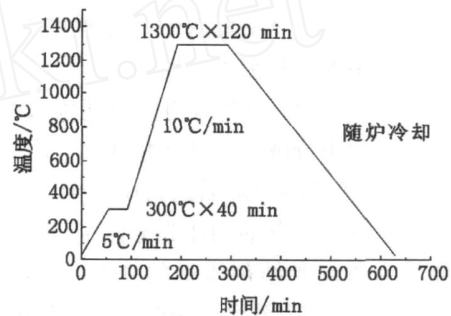


图 5 钛蜂窝体烧结工艺

Fig 5 Sintering process of Ti honeycomb

4 钛蜂窝体的压缩性能

当合金材质、结构等确定时,蜂窝材料的力学性能主要与相对密度有关,对于相对密度的测定,采用压缩试样的质量除以体积得到试样的实际密度,相对密度按下式计算:

$$\rho_0 = \frac{m}{V}$$

式中, V 表示压缩试样的体积(包含外部孔隙), m 表示压缩试样的质量, ρ_0 表示钛蜂窝材料的相对密度,表示实体纯钛材料的密度。

表 1 为钛蜂窝体烧结后,不同正六边形边长和壁厚条件下钛蜂窝体的相对密度。

表 1 制备的蜂窝体的相对密度

Tab 1 Relative density of fabricated honeycomb

边长 /mm	不同壁厚的相对密度 / %			
	0.3 mm	0.5 mm	0.7 mm	1 mm
3	10.0	20.0	22.7	39.4
4	9.8	12.2	12.6	30.5
5	9.0	10.7	12.3	24.0

结果表明,当蜂窝体壁厚小到一定程度后,增大蜂窝体六边形的边长,蜂窝体的相对密度减小幅度不大;同样,当蜂窝体六边形边长增大到一定值后,随着六边形边长的进一步增加,蜂窝体的相对密度减小幅度值变化不大。从表 1 还可以看出,为了得到某一相对密度值,既可以固定蜂窝体正六边形边长,改变蜂窝体壁厚;也可以固定蜂窝体的壁厚,改变蜂窝体正六边形的边长。

表 2 为实验测得的钛金属蜂窝结构材料的相对密度与屈服强度、弹性模量的关系。

表 2 相对密度与屈服强度和弹性模量的关系
Tab 2 Relationship between relative density with yield strength and elastic modulus

相对密度 /%	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa
39.4	205.5	3.1
30.5	150	2.1
24.0	120	1.5
22.7	111	1.21
20.0	110	1.2
12.6	20	0.85
12.3	19.7	0.4
12.2	19.5	0.8
10.7	15.4	0.5
10.0	15	0.82
9.8	9	0.7
9.0	7	0.4

从表 2 可见,随相对密度的增大,屈服强度和弹性模量总体呈上升趋势。相对密度在 9%~12.6% 范围内,屈服强度和弹性模量的变化相差不大,屈服强度由 7 MPa 增加到 20 MPa,弹性模量在 0.4 GPa 和 0.85 GPa 范围内变化。相对密度超过 12.6% 后,屈服强度显著增加,在相对密度为 20% 时,屈服强度就增加到 110 MPa;但弹性模量增加的幅度不大,在相对密度为 20% 时,弹性模量只有 1.22 GPa。一个显著的特点是:通过改变蜂窝体正六边形的边长或改变蜂窝体的壁厚均达到相同的相对密度条件下,蜂窝体的压缩强度差别不大。但对蜂窝体的弹性模量却

有显著影响,在相同相对密度条件下,蜂窝体壁厚大、边长长的情况下,弹性模量大;蜂窝体壁厚小、边长短的情况下,弹性模量小。

5 结论

(1) 采用熔融沉积快速成形可以制备钛金属蜂窝结构,钛金属蜂窝体制作工艺为:采用 2% 的聚乙烯醇为黏结剂,浆料液固比为 40%;蜡模中灌浆料后在 50 °C 下保温 48 h 固化,在 120 °C 下脱蜡 75 min。

(2) 钛蜂窝材料具有好的压缩性能,随着相对密度的减小其屈服强度和弹性模量也相应减小,当相对密度从 39.4% 减至 9% 时,其屈服强度从 205.5 MPa 降至 7 MPa;其弹性模量从 3.1 GPa 减至 0.4 GPa。钛蜂窝结构的相对密度在 9%~12.6% 范围内,屈服强度和弹性模量变化的相差不大;相对密度超过 12.6% 后,屈服强度显著增加,但弹性模量增加的幅度不大。

(3) 通过改变蜂窝体正六边形的边长或改变蜂窝体的壁厚均达到相同的相对密度条件下,蜂窝体的压缩强度差别不大,但对蜂窝体的弹性模量却有显著影响。

参考文献

- 1 陈勇军,左孝青,史庆南. 金属蜂窝的开发、发展及应用. 材料导报, 2003; 17(12): 32~35
- 2 曹斌升. 航空发动机蜂窝结构的修理. 焊接, 1995; (9): 14~16
- 3 Jongman Kim, Stephen R Swanson. Design of sandwich structures for concentrated loading. Composite Structures, 2001; 52(3~4): 365~373
- 4 Gu S, Lu T J, Evans A G. On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity. Progress in Energy and Combustion Science, 2004; 30(6): 545~672
- 5 Lu T J. Heat transfer efficiency of metal honeycombs. International Journal of Heat Transfer, 1998; 42(11): 2031~2040
- 6 Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. Composites Science and Technology, 2003; 63(16): 2331~2343
- 7 董希勤. 铝蜂窝结构件制造工艺与铝箔强度. 宇航材料工艺, 1994; 24(4): 30~33
- 8 陈衍祥,张海鸥,王桂兰等. 快速成形及其在快速制模中的应用. 机电工程, 1999; (5): 152~155

(编辑 任涛)