

TC4 钛合金仿莲房特征芯体热蠕变成形工艺研究

王文森, 李晓红, 邓云华, 岳喜山

(中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

摘要: 提出了一种新的夹层芯体——仿莲房特征芯体结构。以 TC4 钛合金为对象, 采用真空热蠕变成形方法探索了仿莲房特征芯体制备的可行性, 并分析了主要工艺参数对仿莲房特征芯体成形高度、显微组织和力学性能的影响。结果表明: 采用真空热蠕变成形方法制备仿莲房特征芯体可行, 真空热蠕变成形过程中 TC4 钛合金材料通过发生位错运动和晶界滑移实现芯体孔柱的热成形。真空热蠕变变形后, 显微组织由原始细小等轴组织完全转变为再结晶等轴组织。随成形压力和保温时间的增加, 芯体高度、平压强度和比平压强度逐渐增加。

关键词: 仿莲房特征芯体; 真空热蠕变成形; 芯体高度; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)09-3244-07

由上、下面板和中间蜂窝芯体通过钎焊方法制备的钛合金蜂窝夹层结构具有质量轻、比强度和比刚度高、消音、隔热以及减震、吸能等优良性能, 广泛应用于飞行器机身、舵翼面、发动机舱门、发动机短舱消音声衬等部位^[1-4]。目前, 钛合金蜂窝芯体主要采用逐层点焊方法, 首先将钛合金板材轧制成厚度为 0.05~0.1 mm 箔材, 然后将箔材成形至所需尺寸规格的半六边芯格波纹带, 最后将半六边芯格波纹带逐层点焊拼焊制备蜂窝芯体, 工艺复杂, 生产周期长^[5,6]。

由于当前钛合金蜂窝芯体制备工艺存在以上不足, 受自然界莲蓬中莲房结构特征的启发, 提出了一种具有莲房结构特征的夹层芯体构想。如图 1a 所示, 莲蓬中莲房相互独立, 仅通过莲面相连接, 呈现典型的空心结构特征。参照莲房结构特征, 采用真空热蠕变成形的方法在平板表面一侧成形制备如图 1b 所示仿莲房特征的孔柱。同时, 为了进一步降低芯体密度, 采用真空热蠕变成形的方法在平板表面两侧成形制备仿莲房特征的孔柱, 形成图 1c 所示的双面仿莲房特征芯体。与钛合金蜂窝芯体制备过程相比, 仿莲房特征芯体制备时可直接使用板材, 且可通过真空热蠕变成形工艺一步整体制备芯体, 极大简化了夹层结构芯体制备工艺。

针对仿莲房特征芯体构想, 以 TC4 钛合金为对象, 开展了仿莲房特征芯体真空热蠕变成形工艺实验研究。在实现钛合金仿莲房夹层芯体制备的基础上, 采用光学显微镜(OM)和电子背散射衍射(EBSD)对仿莲

房特征芯体的显微组织进行观察, 采用力学性能测试设备对芯体结构平压强度力学性能进行测试, 并分析主要真空热蠕变成形工艺参数对芯体高度、显微组织和力学性能的影响。

1 实验

实验材料采用厚度为 0.8 mm 的 TC4 钛合金平板, 平板尺寸为 235 mm×180 mm。真空热蠕变成形工装示意图如图 2 所示, 工装上模和下模带有交叉布置的成形孔柱。实验中, 将 TC4 平板放置于上、下模之间, 如图 3 所示, 装配完成后放置于真空炉中进行真空热蠕变成形。仿莲房特征芯体孔柱成形时, 平板沿板厚方向的变形量较大, 在成形过程中需要借助于材料的超塑性, TC4 钛合金的最佳超塑性成形温度为 925 °C 附近^[7,8], 因此实验中选择真空热蠕变成形温度为 920 °C; 成形压力由不锈钢压块自重施加, 分别为 0.1, 0.2, 0.3 MPa; 保温时间分别为 60, 120, 180, 240 min; 真空度低于 1×10^{-2} Pa。



图 1 莲房及单双面仿莲房特征芯体结构示意图

Fig.1 Lotus seedpod (a), schematic diagrams of single-side (b), and double-side (c) lotus seedpod-like core

收稿日期: 2019-09-19

基金项目: 航空科学基金(2017ZE25006)

作者简介: 王文森, 男, 1995 年生, 硕士生, 中国航空制造技术研究院航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024, E-mail: vinson723@foxmail.com

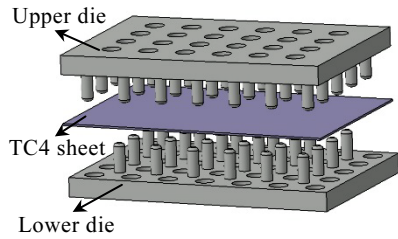


图 2 真空热蠕变工装示意图

Fig.2 Schematic diagram of vacuum high temperature creep forming mould

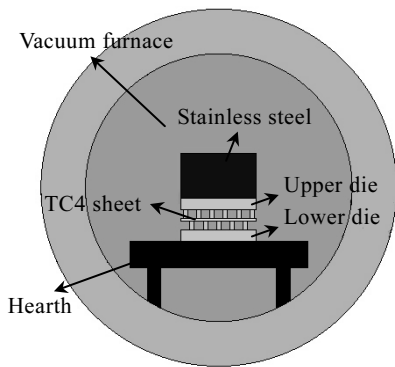


图 3 真空热蠕变装配示意图

Fig.3 Schematic diagram of vacuum high temperature creep forming assembly

芯体成形后采用线切割方法，沿芯体孔柱横截面切取不同工艺参数下制备的芯体，将其打磨、抛光后使用柯氏试剂腐蚀，制备为金相试样。采用光学显微镜和扫描电子显微镜对芯体的截面尺寸和微观组织进行观察，并对母材与成形后芯体进行 EBSD 分析。沿芯体孔柱切取尺寸为 60 mm×60 mm 平压性能试样，采用电子万能试验机对其进行平压强度测试，根据标准 GJB130.5-86 芯体平压强度为芯体达到承载极限时芯体受力与面积的比值。

2 结果与讨论

2.1 仿莲房特征芯体成形结果分析

2.1.1 真空热蠕变成形结果

成形压力 0.3 MPa，保温时间 240 min 时，经真空热蠕变成形后的仿莲房特征芯体如图 4 所示。由图可见仿莲房特征芯体由周期排布的孔柱组成，相邻孔柱相互连通，且柱面在同一水平面上，与预期构想结构特征相符，表明采用真空热蠕变成形方法进行仿莲房特征可行。

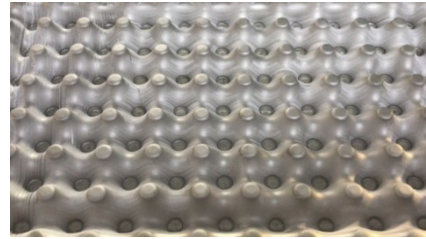


图 4 真空热蠕变后的仿莲房特征芯体

Fig.4 Lotus seedpod-like core after vacuum high temperature creep forming

成形压力 0.3 MPa，保温时间 240 min 时，经真空热蠕变成形后的仿莲房特征芯体孔柱截面如图 5 所示。由图可见芯体各个区域厚度相比 TC4 板材原始厚度都有所减薄，但不同区域减薄程度不同，厚度减薄程度最大的区域为孔柱圆角过渡区 (Region B)，减薄程度最小的区域为孔柱壁面 (Region C)。这是因为圆角过渡区为工装柱体与板材接触的边缘，变形时此区域产生应力集中，导致该区域变形量较大。

2.1.2 显微组织

观察经成形压力 0.3 MPa，保温时间 240 min 时真空热蠕变成形后的仿莲房特征芯体不同区域微观组织，观察位置如图 6 所示，发现圆角过渡区 (Region A) 与孔柱底面 (Region B) 区域微观组织形态相同。TC4 钛合金原始板材和圆角过渡区的微观组织如图 7 所示，由图可以看出经真空热蠕变成形后，因热成形温度超过了 TC4 钛合金再结晶温度，原始纤维取向特征的晶粒组织发生回复与再结晶，转变为等轴组织，并且由于热成形时高温阶段保温时间较长，再结晶等轴晶粒长大，导致晶粒尺寸增加^[9]。

另外，测量图 6 中孔柱底面与圆角过渡区的晶粒尺寸，圆角过渡区 (Region A) 晶粒尺寸为 8.33 μm，小于孔柱底面 (Region B) 晶粒尺寸 (9.26 μm)，说明变形量越大，晶粒尺寸越小，这是由于变形过程中晶粒的长大是通过动态再结晶实现的，变形量越大，变形速率越快，提供给晶粒长大的时间越少^[10]。

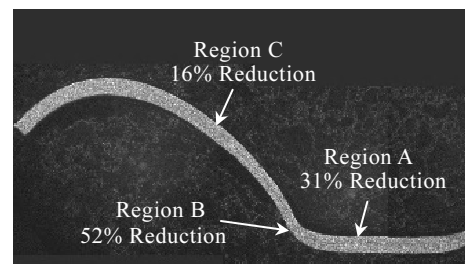


图 5 仿莲房特征芯体横截面

Fig.5 Cross section of the lotus seedpod-like core

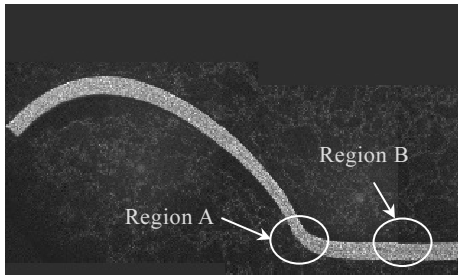


图 6 微观组织观察位置
Fig.6 Regions of microstructure observation

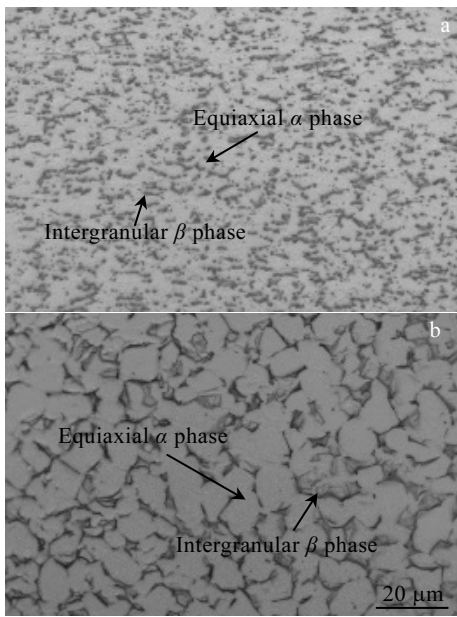


图 7 母材及芯体微观组织
Fig.7 Microstructure of base metal (a) and core (b)

图 8 为母材和芯体晶界角度的统计图，由图可见经过真空热蠕变成形，小角度晶界的含量明显上升，说明在成形过程中产生了大量位错^[11]，根据位错蠕变机制，位错的增殖和运动导致蠕变变形。此外，在扩散蠕变机制^[12]中，受应力作用，原子定向扩散引起晶粒伸长，导致蠕变变形，本文中变形前后晶粒均为等轴晶，说明原子的扩散对蠕变变形贡献很小，主要起到协调晶界滑移的作用。

综上所述，真空热蠕变成形过程的变形机理为位错运动和晶界滑移，并在变形过程中发生再结晶。

2.1.3 平压性能分析

对成形压力 0.3 MPa，保温时间 240 min 时，经真空热蠕变成形后的仿莲房特征芯体进行平压强度测试，其平压强度为 13.27 MPa，平压测试过程中的位移-载荷曲线如图 9 所示。由图可见平压过程分为线弹性变形阶段（I）、压缩失稳阶段（II）以及压实阶段

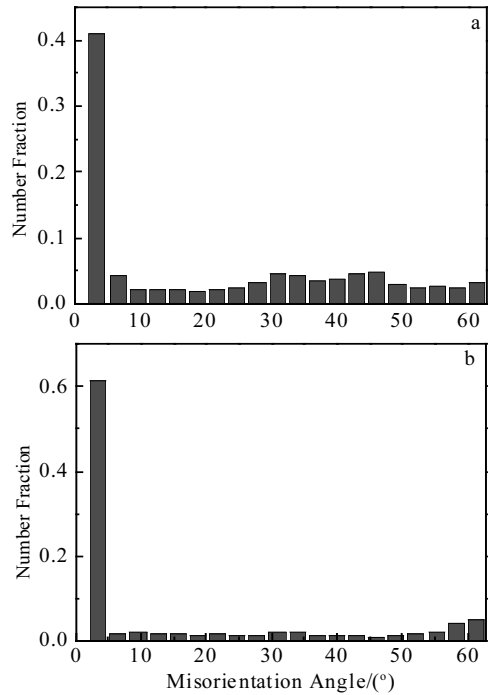


图 8 母材与芯体晶界角度统计图
Fig.8 Bar graph of misorientation angle of base metal (a) and core (b)

(III)，这一规律与蜂窝结构的平压特性类似^[13]。其中，线弹性变形阶段位移与载荷近似线性关系，该阶段结束时达到芯体承载极限；压缩失稳阶段中随着载荷增大，芯体达到承载极限后，应力降低而形变增大，进入这一阶段时芯体就已经被破坏；压实阶段中仿莲房特征芯体被压实，承载能力上升，随位移的增加，载荷随之增加。

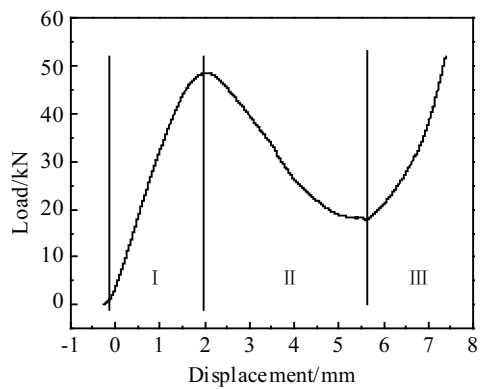


图 9 平压测试位移载荷曲线
Fig.9 Curves of displacement-loading of compressive experiment

2.2 工艺参数对仿莲房特征芯体的影响

2.2.1 工艺参数对芯体高度的影响

仿莲房特征芯体高度与成形压力间的关系如图 10 所示。由图可见成形后芯体的高度与成形压力正相关，保温时间较短时，芯体高度与成形压力近似呈指数相关，保温时间较长时，芯体高度与压力近似呈线性相关。因为成形过程中变形机制为位错运动和晶界滑移，对于这 2 种变形机制，提高成形压力均能提高其驱动力，促进蠕变变形。并且保温时间较短时，总体变形量较小，位错和晶界滑移的阻力相对较小，驱动力增大对变形的增加效果更显著。

仿莲房特征芯体高度与保温时间之间的关系如图 11 所示。由图可见芯体高度与保温时间正相关，压力不同时，芯体高度随保温时间变化的规律有所不同，但总体近似线性相关。因为蠕变变形过程中，蠕变第 1 阶段持续时间很短，变形很快进入蠕变第 2 阶段并持续至变形结束，在蠕变第 2 阶段中，材料加工硬化与回复达到动态平衡，应变速率为一定值^[14]，所以随着保温时间的延长，芯体高度近似线性增加。

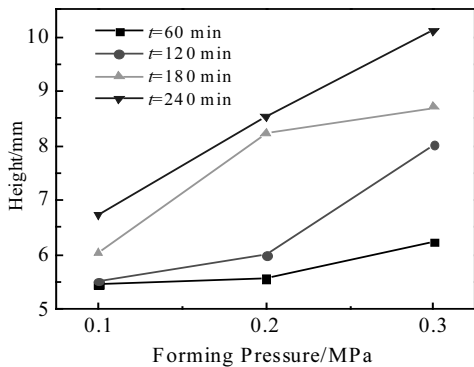


图 10 芯体高度与成形压力之间的关系

Fig.10 Relationship between core height and forming pressure

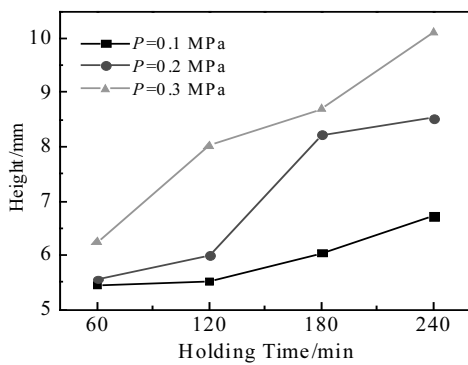


图 11 芯体高度与保温时间之间的关系

Fig.11 Relationship between core height and holding time

对于恒温恒压条件下的蠕变行为，经常采用经典全量形式的 Bailey-Norton 本构模型^[15]进行描述，模型如下所示：

$$\epsilon = A\sigma^n t^m \tag{1}$$

其中， ϵ 为蠕变应变， σ 为应力， t 为时间， A ， n ， m 为与材料和温度有关的常数。芯体高度 h 与应变具有线性关系，成形压力 p 也与应力具有线性关系，所以芯体高度与成形工艺参数具有以下关系：

$$h = Ap^n t^m \tag{2}$$

其中， h 为成形高度， p 为成形压力， t 为保温时间， A ， n ， m 为与材料和温度有关的常数。使用数学软件 Origin 对实验数据进行拟合，得到在本文实验条件下芯体高度与工艺参数之间的关系式为：

$$h = 3.62p^{0.33} \cdot t^{0.25} \tag{3}$$

拟合关系式与实际数据关系如图 12 所示。由图可以看出得到的关系式能够较好地描述芯体高度与工艺参数之间的关系。

2.2.2 工艺参数对微观组织的影响

原始母材及不同工艺参数下芯体孔柱底面(图 6 中 Region B)微观组织如图 13 和图 14 所示。由图可见不同工艺参数下芯体微观组织形貌相同，均由等轴 α 相和晶间 β 相组成，但晶粒尺寸有细小的差异。利用截线法测量原始母材和成形后芯体孔柱底面(图 7b)的晶粒尺寸，测量结果表示：原始母材晶粒尺寸为 $3.48 \mu\text{m}$ (图 13)。不同工艺参数下晶粒尺寸如图 15 所示。由图可见，随成形压力减小和保温时间的延长，晶粒尺寸略有增加。这是由于成形压力越大，材料变形程度越大，对晶粒长大的抑制效果更明显；保温时间越长，晶粒长大越充分，晶粒尺寸越大，但晶粒尺寸越大，其长大的阻力越大，所以晶粒尺寸的长大速率逐渐降低。

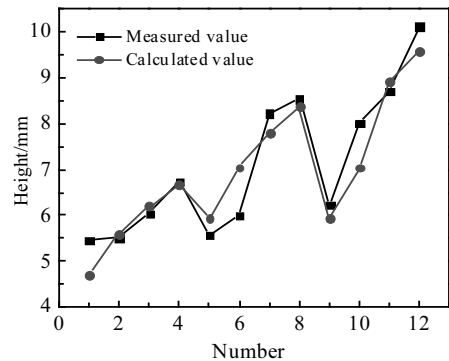


图 12 实测值与计算值之间的关系

Fig.12 Relationship between measured value and calculated value

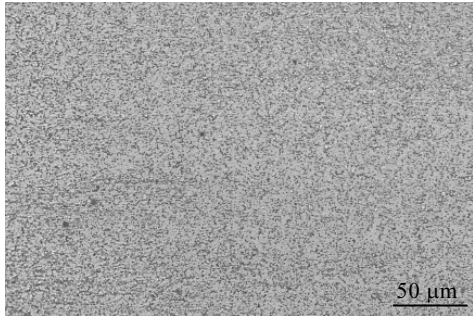


图 13 原始母材微观组织

Fig.13 Microstructure of base metal

2.2.3 工艺参数对平压性能的影响

芯体平压强度与工艺参数的关系如图 16 所示。从图中可以观察到，平压强度随着成形压力和保温时间的增加而增加。

对于夹层结构芯体而言，比强度（强度/密度）是考核其承载能力的重要指标，仿莲房特征芯体比平压强度：

$$R_{\text{平压}} = \frac{S_{\text{平压}}}{\rho_{\text{芯体}}} = \frac{S_{\text{平压}} h}{\delta} \quad (4)$$

其中： $R_{\text{平压}}$ 为比平压强度， $S_{\text{平压}}$ 为平压强度， $\rho_{\text{芯体}}$ 为芯体密度， δ 为板厚， h 为芯体高度。说明板厚一定时，

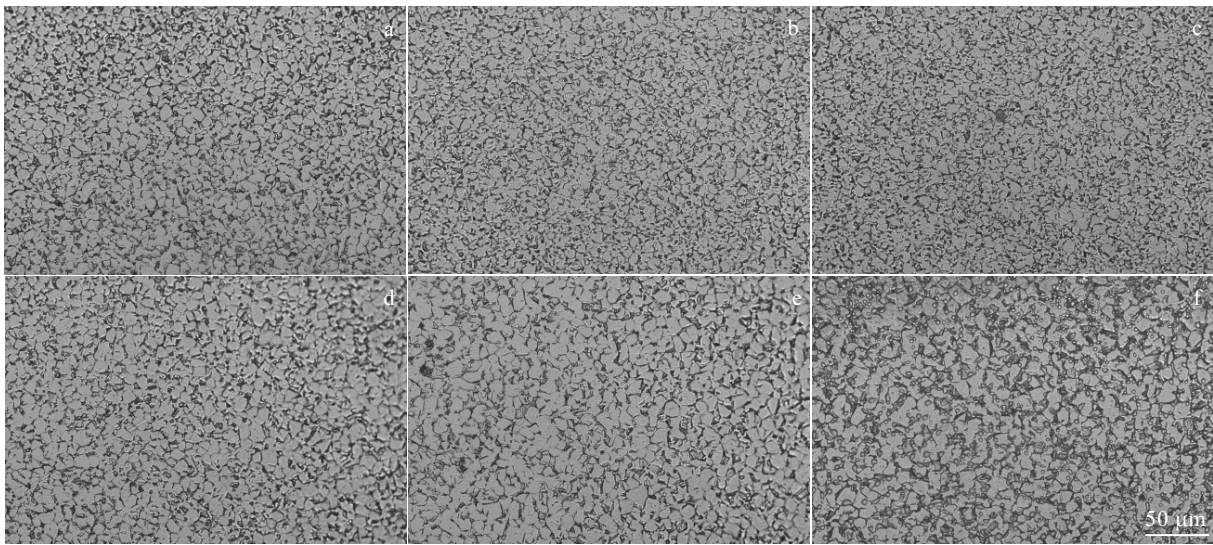


图 14 不同工艺参数微观组织

Fig.14 Microstructures of of base metal with different parameters: (a) 0.1 MPa, 60 min; (b) 0.2 MPa, 60 min; (c) 0.3 MPa, 60 min; (d) 0.3 MPa, 120 min; (e) 0.3 MPa, 180 min; (f) 0.3 MPa, 240 min

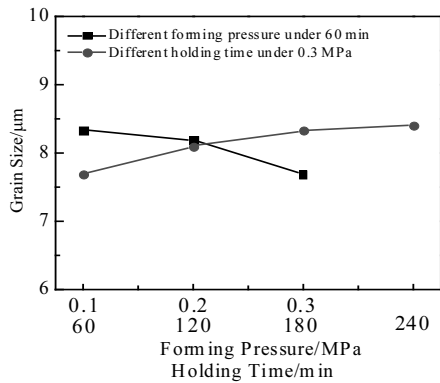


图 15 晶粒尺寸与工艺参数之间的关系

Fig.15 Relationship between grain size and parameters

比平压强度和平压强度比值为芯体高度的函数。芯体比平压强度与工艺参数的关系如图 17 所示。由图可见比平压强度与成形压力和保温时间正相关。

图 18 为不同工艺参数下芯体平压破坏后的样品照片。由图可见芯体破坏形式与芯体高度密切相关，随着高度的增加，芯体受压出现的褶皱面积也逐渐增大，当高度继续增加时，除褶皱外还会出现破裂。因为孔柱壁面有一定的倾斜角度，平压测试孔柱壁面受剪切分力作用发生变形产生褶皱。芯体高度越高，圆角过渡区厚度减薄越多，平压测试时应力集中越明显，越容易出现裂纹，出现裂纹后裂纹扩展合并，形成如图 18c 所示端点位于圆角过渡区的破裂。芯体出现破裂之前经过了较大的变形，说明破裂为韧性破裂，所以其表面 SEM 照片（图 19）中存在很多较深的韧窝。

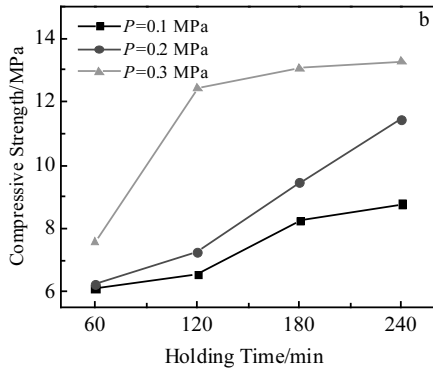
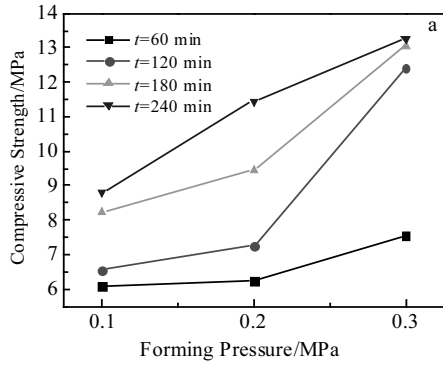


图 16 平压强度与成形压力和保温时间的关系

Fig.16 Relationship of compressive strength with forming pressure (a) and holding time (b)

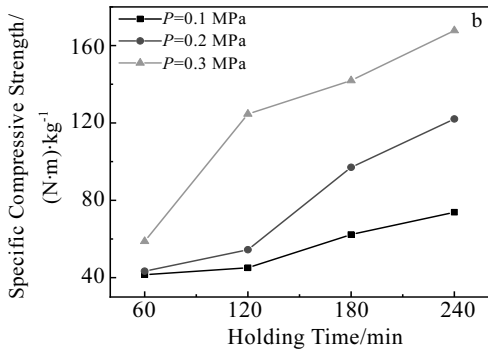
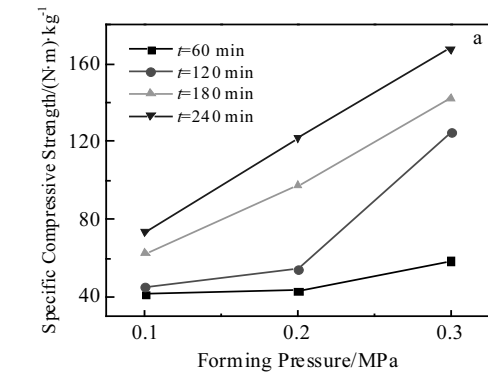


图 17 比平压强度与成形压力和保温时间的关系

Fig.17 Relationship of specific compressive strength with forming pressure (a) and holding time (b)

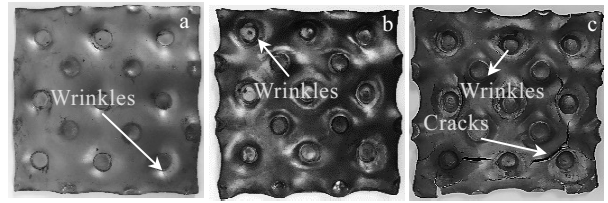


图 18 芯体破坏照片

Fig.18 Fractured cores under $p=0.1$ MPa, $t=60$ min (a); $p=0.2$ MPa, $t=180$ min (b); $p=0.3$ MPa, $t=240$ min (c)

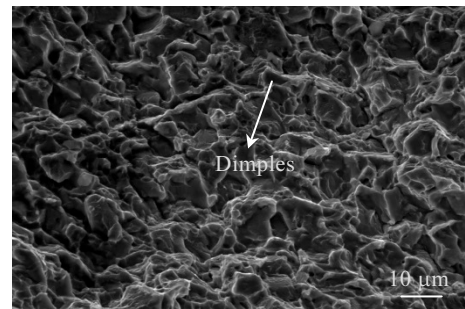


图 19 断口表面形貌

Fig.19 Morphology of fractured surface

3 结论

1) 提出了一种新的夹层芯体结构-仿莲房特征芯体结构，采用真空热蠕变成形方法实现了 TC4 钛合金材料仿莲房特征芯体的制备。

2) 仿莲房特征芯体真空热蠕变成形的变形机理为位错运动和晶界滑移，变形的同时发生动态再结晶，由原始细小等轴组织转变为再结晶等轴 α 相和晶间 β 相组织。

3) 成形温度 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，芯体高度 h 与成形压力 p 和保温时间 t 的关系为 $h=3.62p^{0.33}\cdot t^{0.25}$

4) 在成形温度 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，成形压力 $0.1\sim 0.3$ MPa，保温时间 $60\sim 240$ min 范围内，随着成形压力和保温时间的增加，芯体的平压强度和比平压强度增加。

参考文献 References

[1] Zhang Qiancheng, Yang Xiaohu, Peng Li *et al.* *Progress in Materials Science*[J], 2015, 74: 332

[2] Wang Zhonggang. *Composites Part B: Engineering*[J], 2019, 166: 731

[3] Yue Xishan(岳喜山), Ouyang Xiaolong(欧阳小龙), Hou Jinbao(侯金保) *et al.* *Aeronautical Manufacturing Technology (航空制造技术)*[J], 2009(10): 96

- [4] Cheng Wenli(程文礼), Yuan Chao(袁超), Qiu Qiyan(邱启艳) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2015(7): 94
- [5] Jia Xupeng(贾旭鹏). *Research to the Forming Mechanism of Aluminum Half Honeycomb Profile Strip*(半蜂窝结构铝板成形机理研究)[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007
- [6] Tsuchihashi Toshifumi, Nishida Toshiyuki. *US Patent*, 5980675 [P], 1999
- [7] Wang Jun, Xu Yingjie, Zhang Weihong *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 787: 1336
- [8] Alabort E, Putman D, Reed R C. *Acta Materialia*[J], 2015, 95: 428
- [9] Zhang Zhu(张翥), Wang Qunjiao(王群骄), Mo Wei(莫畏). *Metallography and Heat Treatment of Titanium*(钛的金属学与热处理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 231
- [10] Luo Jiao(罗皎), Gao Jun(高峻), Li Miaquan(李淼泉). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(6): 1716
- [11] Guo Miaomiao(郭苗苗), Liu Xinbao(刘新宝), Zhu Lin(朱麟) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2018, 32(10): 174
- [12] Marc Meyers, Krishan Chawla. *Mechanical Behavior of Materials, Second Edition*(材料力学行为, 第二版)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2017: 696
- [13] Shang Lei(商磊), Xue Qichao(薛启超), Yang Dachun(杨大春) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(2): 567
- [14] Jones David R H, Ashby Michael F. *Engineering Materials 1, Fifth Edition*[J], 2019(1): 351
- [15] Tang Luhua(唐露华). *Finite Element Analysis of Creep Age Forming for Aluminum Alloy 2124*(2124 铝合金蠕变时效成形有限元分析)[D]. Changsha: Central South University, 2013

High Temperature Creep Forming Process of TC4 Titanium Lotus Seedpod-like Core

Wang Wensen, Li Xiaohong, Deng Yunhua, Yue Xishan

(Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: A new sandwich core called lotus seedpod-like core was proposed in this paper. High temperature creep forming experiment was conducted on TC4 titanium plate to prove the feasibility of lotus seedpod-like core. Moreover, effects of major forming parameters on the height, microstructure, mechanical properties of the lotus seedpod-like core were studied. The results show that it is feasible to prepare lotus seedpod-like core by high temperature creep forming. During creep forming, TC4 titanium sheet transforms to lotus seedpod-like core by dislocation motion and grain boundary sliding. After high temperature creep, the fine equiaxed structure completely transforms into the recrystallized equiaxed structure. The height, compressive strength and specific compressive strength of core are increased with the increase of forming pressure and holding time.

Key words: lotus seedpod-like core; vacuum high temperature creep; height of core; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Wang Wensen, Candidate for Master, Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, P. R. China, E-mail: vinson723@foxmail.com