

文章编号:1673-9981(2010)01-0023-04

Ti6Al4V 合金超塑性的研究进展及应用现状

黄晓辉, 左秀荣, 刘凤芹, 王齐伟, 李 勇

(郑州大学物理工程学院材料物理教育部重点实验室, 河南 郑州 450052)

摘 要:对影响 Ti6Al4V 合金超塑成形的因素,如晶粒尺寸、变形温度、应变、相变、微量元素添加以及合金超塑成形的研究应用现状进行了综述.介绍了 Ti6Al4V 合金超塑性的实际应用,如等温锻造、超塑性扩散连接、气压成形、超塑胀形及轴向加载复合成形以及超塑成形今后的发展趋势等.

关键词:Ti6Al4V 合金; 超塑性; 应变; 温度; 变形加工

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A

Ti6Al4V(也称为 TC4)合金具有良好的超塑性,其用量已占到钛合金总用量的 50%以上.利用 Ti6Al4V 合金超塑成形技术(SPF)可制造发动机风扇、壳体、压气机盘和叶片,用它所制造的飞机中的梁、接头和隔框等重要承力航空构件既能提高构件的抗疲劳和抗腐蚀性,又能缩短制造周期.近年来,各国对 Ti6Al4V 合金超塑性的研究较多,主要包括机理、成形条件、模具材料和加工方法等.本文主要从 Ti6Al4V 合金超塑变形的获得方法、研究及应用现状和发展趋势等方面对 Ti6Al4V 合金进行综述.

1 Ti6Al4V 合金的超塑性及影响因素

超塑性是指金属在一定的温度范围内或一定的组织条件下,以很低的应变速率进行变形时而不发生宏观颈缩,表现出抗力小和应变大的特性.超塑变形是由晶界滑动、晶内位错运动及扩散运动等多种机制组合共同实现的.影响合金超塑性的主要因素是合金的原始组织状态、形变温度和形变速度^[1].近年来,如何提高 Ti6Al4V 合金超塑变形过程的应变速率和降低变形温度,一直是研究超塑性处理工艺的热点.实现 Ti6Al4V 合金超塑成形的方法有很多,如:铸造法、粉末冶金法、超塑变形加工法等.

1.1 晶粒尺寸对合金超塑性的影响

材料的晶粒尺寸对合金超塑性的影响较大,减小晶粒尺寸可使材料在获得最佳超塑性时的应变速率提高或变形温度降低. Ti6Al4V 合金获得超塑性所需的微细等轴晶粒的粒径一般为 10~12 μm ,合金的晶粒尺寸小于 7 μm 时能获得较优异的超塑性性能,且具有低的超塑性温度.赵文娟等人^[2]的研究发现,对于细晶粒材料(2.6 μm 和 6.5 μm),位错运动协调的界面滑动是其变形的主要机制,而对于晶粒较粗的材料(16.2 μm),超塑变形的主要机制是晶界滑动与晶内位错运动的共同作用.随着晶粒尺寸的增大,变形方式由以晶界滑动为主逐渐转向以晶内位错运动为主.

Patankar S N 等人^[3]将 300 nm 的超细粒 Ti6Al4V 合金与平均晶粒尺寸为 3 μm 的 Ti6Al4V 合金相比,研究结果表明,1 μm 的晶粒尺寸能最佳降低蠕变温度.

合金材料在超塑变形时由于剧烈的加工塑性变形,粗大的晶粒被破碎、细化,获得块状超细晶材料,使合金的力学性能特别是抗拉强度有所提高.这些超塑性变形方法有高压扭曲变形法(HPT)、多次锻压法(MF)、等通道转角挤压法(ECAP)、累积叠轧法(ARM)等^[4].美国加州大学 Davis 分校采用 HPT 法制备出了超细晶 Ti6Al4V 合金.经过超细晶化处

收稿日期:2009-02-23

作者简介:黄晓辉(1980--),男,陕西宝鸡人,硕士研究生.

理后的 Ti6Al4V 合金,其强度可达 1350 MPa,并且在 650 °C 和 725 °C 下, Ti6Al4V 合金的延伸率超过 500%。Ko Y G 等人^[5]用 ECAP 法,在 700 °C, $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 应变速率下,发现 Ti6Al4V 合金的延伸率大幅度提高,这主要是由于合金内部产生了位错滑移和晶界滑移。

1.2 变形温度对超塑性的影响

一般情况下合金实现超塑变形的温度需达到其熔化温度的一半左右,低温超塑性的主要机制为低应变速率下的晶粒晶界滑移和高应变速率下的位错滑移^[6]。细晶 Ti6Al4V 合金在高温和较低的应变速率下,应力-应变曲线显示出应变硬化效应,而在较低温度和较高的应变速率下则显示应变软化效应。赵文娟等人^[7]用热模拟试验机,在 860~950 °C,应变速率为 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的条件下,对 Ti6Al4V 合金进行超塑性等温压缩变形试验,结果表明,随着温度的升高或应变速率的降低,材料的流变应力显著降低,动态再结晶是其主要的软化机制。

1.3 应变速率敏感指数 m 对超塑性的影响

原子扩散蠕变成形需要足够的时间,所以超塑变形应变速率要慢,与扩散蠕变成形时间最好保持一致。对超塑性材料,应变速率敏感指数 m 一般在 0.3~0.8,某些情况下接近于 1,即使是同一合金, m 也会由于温度、应变速率和晶粒不同而变化^[8]。Wang 等人^[6]对 Ti6Al4V 合金的研究结果表明,应变速率敏感指数 m 是超塑性的关键参量, m 值越高,超塑性能力越强。通过测量 m 值并动态控制变形应变速率,在超塑变形时使 m 值始终处于极大值,与传统的超塑性变形时 m 值始终保持恒定不变相比,合金的最大延伸率可从 421% 提高到 523%。

1.4 相变对超塑性的影响

Ti6Al4V 合金属 $\alpha + \beta$ 型两相合金,晶粒细小,在超塑变形过程中两相相互制约,晶粒难以长大,能获得高的延伸率。Ti6Al4V 合金在 β 相变温度 (995 ± 15) °C 以下的某一温度范围内反复冷热循环,能获得超过 100% 以上的延伸率。Park C H 等人^[9]对 Ti6Al4V 合金进行研究时发现,在应变 0.6~1.4, 700~950 °C,应变速率 $10^{-3} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 时,出现马氏体组织,属于相变诱发超塑性,延伸率可提高到 1000% 左右。

1.5 添加微量元素对超塑性的影响

添加微量元素能改变 Ti6Al4V 合金的塑性和

相变,并获得最佳组织结构和改善材料的加工性能。如添加适量氢,合金的超塑性温度会有所降低,应变速率有所提高,在合适的保温时间下,可使 Ti6Al4V 合金组织发生动态再结晶并得以细化,有利于置氢 Ti6Al4V 合金的超塑变形。张宗尧等人^[10]发现,置氢 Ti6Al4V 合金的超塑变形的最佳工艺参数为:温度 840 °C、保温时间 25 min、应变速率 10^{-3} s^{-1} 、 $w(\text{H}_2) = 0.3\%$ 。

2 计算机模拟超塑成形

近年来,计算机模拟超塑成形过程的研究取得了突破性进展,利用材料的本构模型可在大应变速率范围内预测与时间有关的材料行为,是联系材料塑性变形过程中流动应力和变形工艺参数的桥梁^[11]。程建霞等人^[12]用二维刚粘塑性有限元模型对 Ti6Al4V 合金叶片的变形过程进行了数值模拟,发现不同部位的等效应变相对差别达 50% 以上,应变差别和应变速率的差别对成形叶片的显微组织和力学性能有影响。Giuliano G^[13]对 Ti6Al4V 合金通过有限元模拟超塑恒压自由成形试验,验证了流变应力的大小主要取决于应变速率和应变值。曲杰等人^[14]运用超塑变形本构模型研究 Ti6Al4V 合金的超塑性时发现,在变形过程中,随应变、应变速率、晶粒度的增加,位错滑移对超塑变形的贡献逐渐增大,而扩散蠕变对超塑性的影响不大。

3 Ti6Al4V 合金超塑性的应用

3.1 等温锻造

由于 Ti6Al4V 合金的变形温度范围窄,而在进行塑性热加工时的温度高,变形抗力大,大工件的冶金质量和显微组织及性能难以控制,采用等温锻造可解决上述问题。等温锻造能使模具与坯料在成形过程中始终保持相同的温度,是在一定温度下超塑成形性的一种加工方法。庞克昌等人^[15]利用等温模锻生产的空心 Ti6Al4V 合金高压前轴颈精密锻件的表面光洁,比普通锻件减重 60%,而化学成分、力学性能和显微组织全部达到技术条件要求。

3.2 超塑成形与扩散连接 (SPF/DB)

超塑成形与扩散连接是利用材料的超塑性和在同一热规范内的扩散过程中产生局部连接的特性,

可在一个循环内实现既成形又连接,实现制品的一体化,属超塑成形无余量工艺。Han Wenbo 等人^[16]在研究 Ti6Al4V 合金的超塑成形扩散连接时发现,成形的最佳温度为 930 ℃,当成形压力为 0.6 MPa,成形时间 60 min 时,可在界面处形成致密、良好的连接,制作出具有复杂夹层结构的制品。Lee H S 等人^[17]发现,与 Ti6Al4V 合金相比,Ti6Al4V ELI 合金在超塑成形和扩散连接时可在更低的温度实现界面的结合。

3.3 气压成形

气压成形是最能体现超塑成形全部特点的一种新工艺,适用于用板材加工制造复杂形状的空心零件。在温度高且流变应力低时,用氩气等保护气体将钛板吹塑成形。王荣华等人^[18]采用气压胀形法用 Ti6Al4V 合金进行超塑成形,制备出了特殊盒形结构件,成形温度为 850 ℃,最大进气压力为 1.5 MPa,成形时间为 40 min,成形后最佳取件温度为 500 ℃。零件的减薄率最大处可达 53.7%,结构件的微观组织变化不大。

3.4 超塑胀形和轴向加载复合成形

王刚等人^[19]利用氩气进行压力超塑胀形和轴向加载的复合超塑性成形技术,制造了双波 Ti6Al4V 合金波纹管。超塑成形采用多层模结构,用模具来控制波形,加载过程分为胀形、合模和定型三个阶段。研究表明,采用超塑胀形和轴向加载复合超塑性成形工艺所制备的波纹管波峰壁厚减薄率较大。

4 Ti6Al4V 合金超塑成形的发展趋势

Ti6Al4V 合金的超塑性便于对形状特殊和复杂的零件成形。制品的尺寸稳定、精确,组织均匀,表面光洁度高,而且使用性能优异。但目前对 Ti6Al4V 合金超塑变形的协调机制还未达成共识,Ti6Al4V 合金的显微组织复杂,难以充分描述。实现超塑成形时,过高的变形温度会影响合金的拉伸塑性和疲劳强度。Ti6Al4V 合金的应力和应变速率的控制和测量都比较困难。所以,对 Ti6Al4V 合金超塑性的主要研究对象是应变速率、晶粒度和变形温度。今后的发展趋势是:(1)通过减小晶粒尺寸、低温高应变以及相变、添加微量元素等措施,从改变材料的内部组织结构来优化 Ti6Al4V 合金的超塑性行为。深入研

究 Ti6Al4V 合金的成形机理,拓展 Ti6Al4V 合金的应用范围;(2)借助计算机辅助模拟成形技术,进一步摸索 Ti6Al4V 合金超塑变形加工的规律,对加工方法和工艺设备进行研究和改进,提高产品质量和生产效率。

参考文献:

- [1] 李梁,孙建科,孟祥军. 钛合金超塑性研究及应用现状[J]. 材料开发与应用, 2004,19(6):34-38.
- [2] 赵文娟,丁桦,曹富荣,等. Ti-6Al-4V 合金超塑性变形中的组织演变及变形机制[J]. 中国有色金属学报, 2007,17(12):1973-1980.
- [3] PATANKAR S N, ESCOBEDO J P, FIELD D P, et al. Superior superplastic behavior in fine-grained Ti-6Al-4V sheet[J]. Journal of alloys and compounds, 2002, 345(1-2): 221-227.
- [4] SALISHCHEV G A, GALEYEV R M, VALIAKHMETOV O R, et al. Development of Ti-6Al-4V sheet with low temperature superplastic properties[J]. Materials Processing Technology, 2001, 116(2-3): 265-268.
- [5] KO Y G, KIM W G, LEE C S. Microstructural influence on low-temperature superplasticity of ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 410-411(25):156-159.
- [6] WANG G C, FU M W. Maximum m superplasticity deformation for Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192-193 (1): 555-560.
- [7] 赵文娟,张亚玲,丁桦,等. 线性回归法建立 Ti6Al4V 合金超塑变形本构关系[J]. 材料与冶金学报, 2008,7(3): 201-205.
- [8] VANDERHASTEN M, RABET L, VERLINDEN B. Ti-6Al-4V: Deformation map and modelisation of tensile behaviour [J]. Materials and Design, 2008, 29 (6): 1090-1098.
- [9] PARK C H, KO Y G, PARK J W, et al. Enhanced superplasticity utilizing dynamic globularization of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 496(1-2):150-158.
- [10] 张宗尧,任学平,王耀奇,等. 保温时间对氩氢钛合金超塑变形组织的影响[J]. 塑性工程学报, 2008,15(1): 84-87.
- [11] 王刚,王进,陈军,等. 基于稳健设计的钛合金波纹管超塑成形工艺[J]. 中国有色金属学报, 2006,16(2): 247-251.
- [12] 程建霞,张立斌,蔡伟. TC4 叶片超塑成形有限元模拟

- 及其变形分析[J]. 锻压技术, 2005(2):56-59.
- [13] GIULIANO G. Constitutive equation for superplastic Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials & Design, 2008, 29(7): 1330-1333.
- [14] 曲杰, 金泉林, 徐秉业. 超塑性本构模型材料参数识别方法研究[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 17-21.
- [15] 庞克昌, 王晓英. 等温锻造优质 TC4 钛合金高压前轴颈锻件研究[J]. 金属学报, 2002(9): 364-368.
- [16] HAN Wenbo, ZHANG Kaifeng, WANG Guofeng. Superplastic forming and diffusion bonding for honeycomb structure of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183(2-3): 450-454.
- [17] LEE H S, YOON J H, PARK C H, et al. A study on diffusion bonding of superplastic Ti-6Al-4V ELI grade [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188(12): 526-529.
- [18] 王荣华, 陈明和, 陈国亮, 等. TC4 钛合金盒形件超塑成形工艺[J]. 热加工工艺, 2008, 37(11): 46-48.
- [19] 王刚, 张凯锋, 陈军, 等. 超塑成形的钛合金波纹管壁厚分布规律研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(1): 95-98.

Research progress and application of superplasticity in Ti6Al4V alloy

HUANG Xiao-hui, ZUO Xiu-rong, LIU Feng-qin, WANG Qi-wei, LI Yong

(School of Physics and Engineering, Zhengzhou University; Laboratory of Material Physics, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The paper mainly reviewed the research progress of Ti6Al4V including the effect of grain size, deformation temperature, strain, phase transition, elements addition. An application of superplasticity in Ti6Al4V alloy including isothermal forging, diffusion bonding, pneumatic forming, and compressive axial load bonding was also introduced. Finally the further research trend of superplasticity in Ti6Al4V alloy was proposed.

Key words: Ti6Al4V alloy; superplasticity; strain; temperature; plastic processing