文章编号：1004-0609(2007)01-0053-06

热变形条件对 Ti60 合金微观组织的影响

罗 皎[1]，李淼泉[1]，潘洪泗[1]，苏少博[2]

(1. 西北工业大学 材料学院，西安 710072;
2. 西安航空发动机(集团)公司，西安 710021)

摘 要：研究变形工艺参数对 Ti60 合金微观组织(初生 α 相尺寸和体积分数)的影响。实验时选取的变形温度为 900、930、960 和 980 ℃，应变速率为 0.001、0.01、0.1、1.0 和 10.0 s^{-1}，变形程度为 50%、60%和 70%。结果表明：变形温度对 Ti60 合金微观组织有着显著影响。在(α+β)两相区，随着变形温度的升高，初生 α 相含量减少，而 α 相尺寸呈先增大后减小的趋势；应变速率对 Ti60 合金变形组织中初生 α 相的形态有较大影响。随着应变速率的增加，晶粒尺寸呈先减小后略有增大的趋势，初生 α 相含量呈逐渐减小的趋势；变形程度存在一临界值，超过这一临界值后，变形程度的增加有利于晶粒的细化；初生 α 相含量随着变形程度的增加呈先增大后减小的趋势。

关键词：Ti60 合金；高温变形；微观组织；初生 α 相尺寸
中图分类号：TG 146 **文献标识码**：A

Effects of deformation parameters on microstructure of Ti60 titanium alloy

LUO Jiao[1], LI Miao-quan[1], PAN Hong-si[1], SU Shao-bo[2]

(1. College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Xi'an Aeroengine Company (Group) Ltd, Xi'an 710021, China)

Abstract: Effects of the deformation parameters on the microstructure of the Ti60 titanium alloy, including grain size and volume fraction of α phase were investigated using compression tests. Experiments were conducted on the material with (α+β) phases at deformation temperatures of 900, 930, 960 and 980 ℃, strain rates of 0.001, 0.01, 0.1, 1 and 10 s^{-1}, and height direction reductions of 50%, 60% and 70%. The results show that the deformation temperature has significant influence on microstructure of Ti60 titanium alloy. In two phases region, the volume fraction of α phase decreases with increase of deformation temperature, but the grain size increases first and then decreases with deformation temperature. The strain rate affects the morphology of α phase of Ti60 titanium alloy. With increase of strain rate, the grain size decreases first and then slightly increases, and the volume fraction of α phase decreases with increase of strain rate. The suitable height reduction makes grain size fine when it overtakes the threshold, and with increase of height direction reduction, the volume fraction of α phase increases first and then decreases.

Key words: Ti60 titanium alloy; high temperature deformation; microstructure; grain size of α phase

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属，同其它结构金属相比，具有强度高、耐热和抗腐蚀性好等优点，因而在航空、舰艇、化工等领域得到日益广泛的应用[1]。Ti60 合金是一种近 α 型高温钛合金，具有较高的使用温度、低密度、高强度、良好的热强性和热稳定性等优点，它的应用可以大大提高

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50475144)
收稿日期：2006-05-23；**修订日期**：2006-11-09
通讯作者：李淼泉，教授；电话: 029-88491478; E-mail: honeymli@nwpu.edu.cn

发动机的推重比和飞机的机动性能，是航空发动机重要部件的候选材料之一[2]。

塑性成形构件的微观组织状态将决定其使用性能的高低[3−4]。高新技术装备对塑性成形构件的使用性能要求越来越高，因而对变形后构件的微观组织也提出了更高的要求。材料在热态塑性成形过程中，由于高温和变形的同时作用，材料的微观组织会发生变化，因而对于材料在热加工过程中组织演变的研究引起了各国学者极大的兴趣[5−9]。本文作者在热模拟实验和金相实验的基础上，定量研究变形工艺参数对 Ti60 合金微观组织的影响，为 Ti60 合金微观组织的精确控制和优化热变形工艺奠定基础。

1 实验

1.1 材料

实验材料为直径 18.0 mm 的 Ti60 合金棒材，其主要化学成分列于表 1，其原始微观组织如图 1 所示。由图 1 可知，Ti60 合金经过热处理后的微观组织主要由 α 相和少量 β 相组成，α 相多数呈等轴态颗粒，尺寸比较小。为了消除棒材内应力和使微观组织均匀分布，在热模拟实验前对棒材进行双重退火热处理，其工艺为加热到 990 ℃，保温 2 h，空冷，再加热到 700 ℃，保温 2 h，空冷[10]。

表 1 Ti60 合金的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti60 titanium alloy (mass fraction in %)

Al	Sn	Zr	Mo	Si	Nd	Ti
6.62	5.14	1.82	0.54	0.36	0.44	Bal.

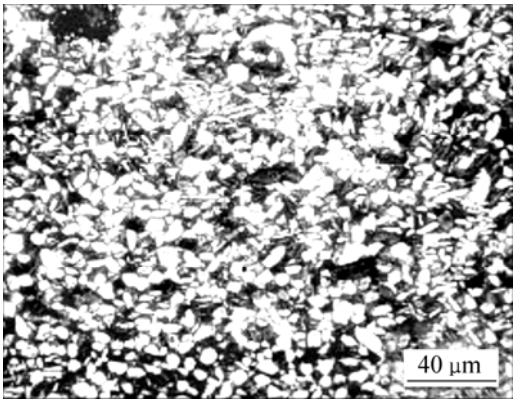

图 1 Ti60 合金的原始微观组织

Fig.1 Microstructure of received Ti60 alloy

1.2 实验方法

热模拟压缩实验在 Thermecmaster-Z 型热模拟试验机上进行。试样尺寸为 d 8 mm×12 mm，试样两端加工有贮存高温润滑剂的浅槽, 选用玻璃润滑剂进行润滑。高温压缩变形后冷却方式为空冷，将变形后试样沿压缩试样的轴线进行线切割，取试样的一半作为金相研究对象。金相实验在 OLYMPUS PMG3 型卧式显微镜上完成，利用 SISC IAS V8.0 金相图像分析软件完成定量金相实验。测量过程中，先在试样的不同变形区域(大变形区、小变形和难变形区)选取 4 个测量点。再在每个测量点随机选取 2 个视场，最后将 8 个视场的平均测量值作为该变形工艺参数条件下微观组织的特征参数值。

2 结果与分析

2.1 变形温度的影响

在(α+β)两相区内，变形温度对 Ti60 合金微观组织有着显著影响。图 2(a)~(c)所示为在应变速率为 10.0 s^{-1} 和变形程度为 60%的条件下，Ti60 合金在不同温度压缩变形后的微观组织形貌。微观组织参数的测量结果如图 3 所示。从图 3(b)中可以看出，变形温度从 900 ℃上升到 930 ℃时，初生 α 相含量逐步减少，这是由于随着变形温度的升高，Ti60 合金发生了 $\alpha\rightarrow\beta$ 的相转变，初生 α 相含量减少，又由于较高的变形温度提供了更多的能量，使得 α 相的相界扩散能力增强，有机会吞并附近较细的 α 相，从而使得 α 相数量减少[11]，α 相尺寸有所增大。变形温度升到 960 ℃时，初生 α 相含量继续减少，且晶粒尺寸有减小的趋势。变形温度升到 980℃时，剩余的 α 相与变形温度 960 ℃时的情况相比更少。从整体上来看，随着变形温度的升高，初生 α 相含量逐步减少，而 α 相晶粒尺寸呈现出先增大后减小的趋势。

由以上分析可见，在(α+β)两相区锻造时，锻前加热温度的高低将直接影响锻件锻后初生 α 相的含量。变形温度低于 β 转变温度越多，初生 α 相所占的比例就越大。由于锻件中初生 α 相所占的比例将直接影响锻件的室温性能和高温性能[12]，因而在对 Ti60 合金进行锻造时，要严格控制变形温度(特别是终锻温度)，从而保证初生 α 相的含量处于合适的范围。

2.2 应变速率的影响

图 4 所示为在变形温度 980 ℃、变形程度 60%的条件下，应变速率对 Ti60 合金微观组织的影响。从

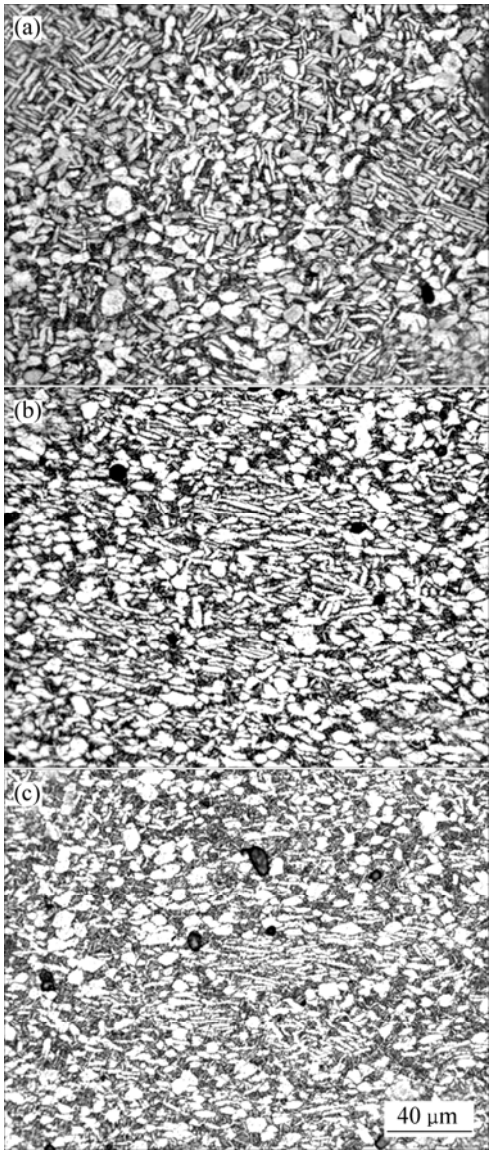

图 2　Ti60 合金在不同温度压缩变形后的微观组织

Fig.2　Microstructures of Ti60 titanium alloy at different deformation temperatures: (a) t=900 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =10.0 s^{-1}; (b) t=960 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =10.0 s^{-1}; (c) t=980 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =10.0 s^{-1}

图 4(a)和(b)中可以看出，Ti60 合金在中速变形(10.0~1.0 s^{-1})时，微观组织形貌基本一致，其中初生 α 相主要以两种形态分布：一种是呈等轴状的初生 α 相，尺寸大小不一，但分布均匀，这是由于在该变形条件下发生了部分动态再结晶所致；另一种是呈长条状的初生 α 相，在沿着与变形方向垂直的方向上被压扁，这是一种典型的动态回复组织[13]，由于长条状的初生 α 相会使锻件内部组织呈现出明显的方向性，所以可以通过适当地增大变形程度以破碎长条状组织。当应变速率从 10.0 s^{-1} 下降到 1.0 s^{-1} 时，初生 α 相含量和尺寸都有变小的趋势。应变速率为 10^{-2} s^{-1} 时，部分晶粒接近于等轴状；在应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时，由于较低的应变速率导致整个变形过程时间变长，初生 α 相在一定程度上发生了球化，而且均匀分布，晶粒尺寸也增大了，所以变形后的微观组织更接近于等轴状。微观组织参数的测量结果如图 5 所示。可以看出，随着应变速率的增加，晶粒尺寸呈先减小后略有增大的趋势，初生 α 相含量呈逐渐减小的趋势。

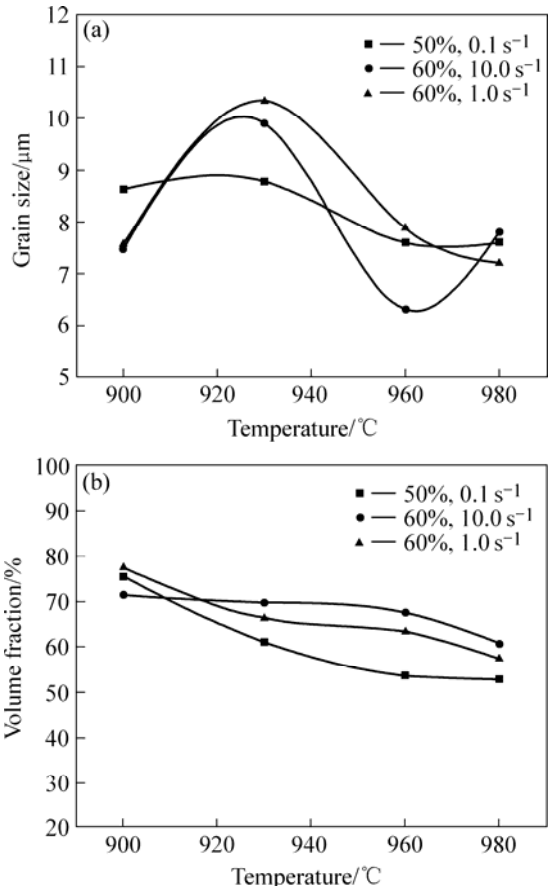

图 3　变形温度对微观组织参数的影响

Fig.3　Effects of deformation temperatures on microstructures: (a) Grain size of α phase; (b) Volume fraction of α phase

2.3　变形程度的影响

图 6 所示为变形程度对 Ti60 合金微观组织的影响。在变形温度为 960 ℃，应变速率为 10.0 s^{-1} 的变形条件下，50%和 60%的压缩变形程度使 α 相呈现出明显的变形特征，发生动态回复的晶粒具有相同的晶粒取向，形态和尺寸相差不大，如图 6(a)和(b)所示。但从图 6(c)可以看出，当变形程度为 70%时，初生 α 相接近于等轴状且明显粗化，这可能是在该变形条件下发生了完全动态再结晶并且晶粒发生了长大所造成

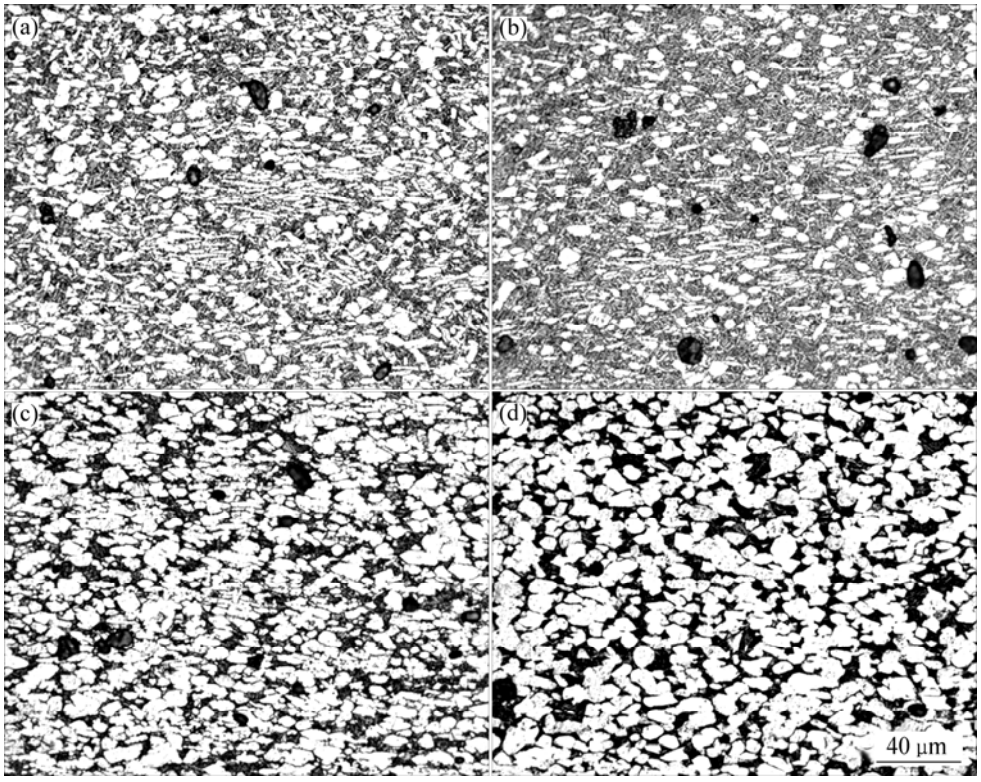

图 4 Ti60 合金在不同应变速率下压缩变形后的微观组织

Fig.4 Microstructures of Ti60 titanium alloy at different strain rates: (a) t=980 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =10.0 s^{-1}; (b) t=980 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =1.0 s^{-1}; (c) t=980 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =0.01 s^{-1}; (d) t=980 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =0.001 s^{-1}

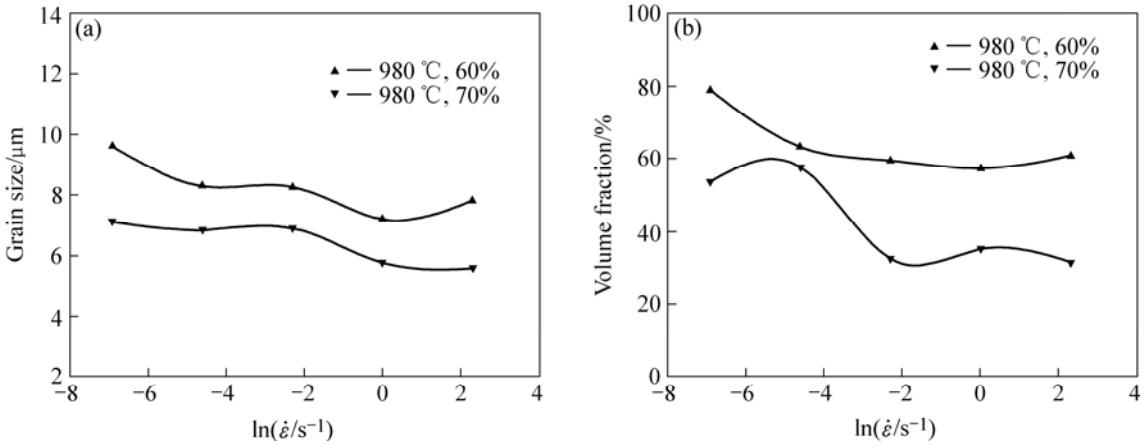

图 5 应变速率对微观组织参数的影响

Fig.5 Effects of strain rates on microstructures: (a) Grain size of α phase; (b) Volume fraction of α phase

的。微观组织参数的测量结果如图 7 所示。从图 7(a)可以看出，当变形程度从 50%上升到 60%时，α 相尺寸略有减小；而变形程度上升到 70%时，α 相尺寸从 6.31 μm 增加到 11.7 μm，也就是说，在 50%~60%之间存在细化的临界变形程度，在这个临界变形程度左右进行等温压缩变形，晶粒能得到细化[14]。在变形温度为 980 ℃的变形条件下出现类似的情况，但细化的临界变形程度位于 60%~70%之间，如图 7(c)所示。在一定的应变速率条件下，随着变形程度的增加，初生 α 相含量从整体上呈先增大后减小的趋势，如图 7(b)和 7(d)所示。比较图 7(a)和 7(c)可知，晶粒细化临界变形程度随变形温度和应变速率的变化而变化。由上可知，为了避免锻造过程中晶粒变得异常粗大，恶化 Ti60 合金锻件组织，应该严格控制变形量[15]。

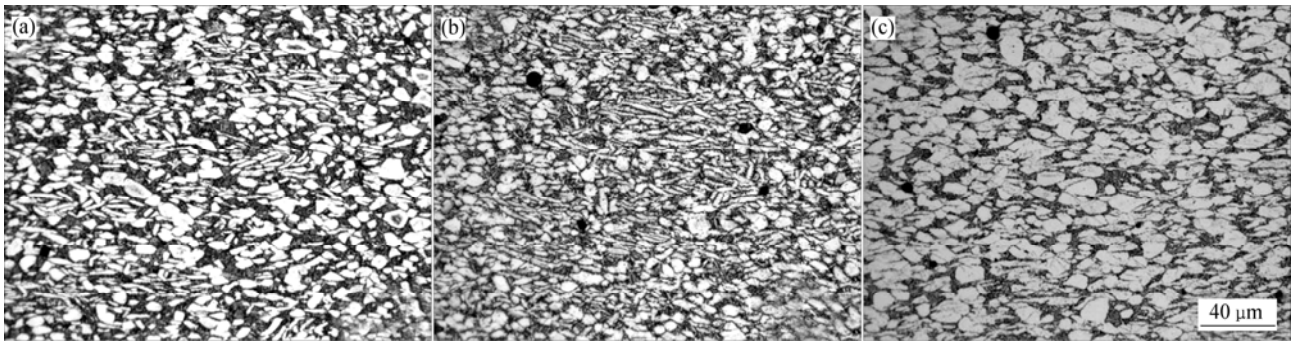

图 6　Ti60 合金在不同变形程度压缩变形后的微观组织

Fig.6　Microstructures of Ti60 titanium alloy at different height reductions: (a) t=960 ℃, ε=50%, $\dot{\varepsilon}$ =10.0 s^{-1}; (b) t=960 ℃, ε=60%, $\dot{\varepsilon}$ =10.0 s^{-1}; (c) t=960 ℃, ε=70%, $\dot{\varepsilon}$ =10.0 s^{-1}

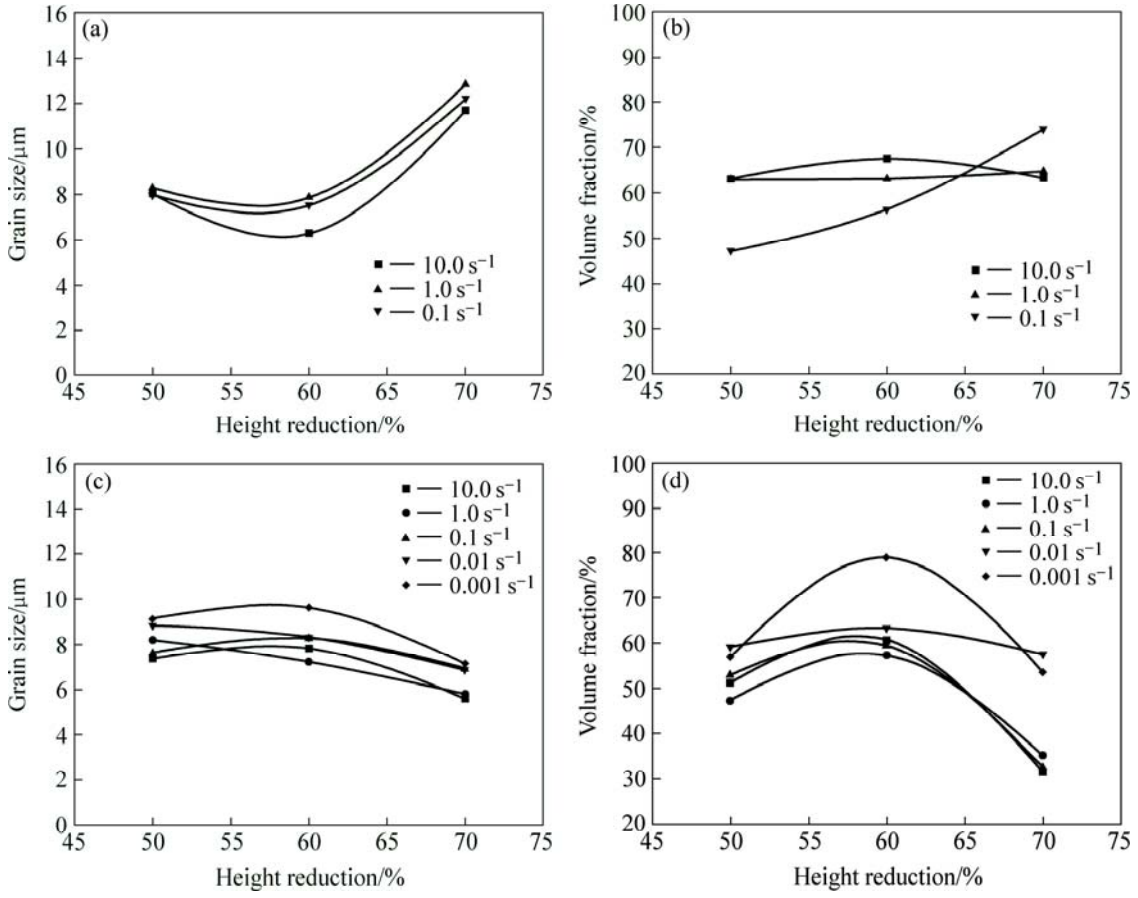

图 7　变形程度对微观组织参数的影响

Fig.7　Effects of height direction reductions on microstructure variables: (a) t=960 ℃, grain size of α phase; (b) t=960 ℃, volume fraction of α phase; (c) t=980 ℃, grain size of α phase; (d) t=980 ℃, volume fraction of α phase

3　结论

1) 变形温度对 Ti60 合金微观组织有着显著影响。在(α+β)两相区，变形温度从 900 ℃上升到 930 ℃时，初生 α 相含量减少，而 α 相尺寸呈增大的趋势；变形温度升到 960 ℃时，初生 α 相含量继续减少，且晶粒尺寸有减小的趋势；变形温度升到 980 ℃时，剩余的 α 相与变形温度 960 ℃时的情况相比更少。

2) 中等速率变形(10.0~1.0 s^{-1})时，Ti60 合金的初生 α 相主要以两种形态分布：一种是呈等轴状，另一种是呈长条状；较低速率变形(0.01~0.001 s^{-1})时，随着应变速率的减小，合金微观组织形貌更加接近于等轴状。从整体上讲，随着应变速率的增大，晶粒尺寸呈先减小后略有增大的趋势，初生 α 相含量呈逐渐减小的趋势。

3) 当变形温度为 960 ℃时，在 50%~60%之间存在细化的临界变形程度；当变形温度为 980 ℃时，细化的临界变形程度位于 60%~70%之间，超过这一临界值后，变形程度的增加有利于晶粒细化，而这一临界值又随变形温度和应变速率的变化而变化。随着变形程度的增加，初生 α 相含量在整体上呈先增大后减小的趋势。

REFERENCES

[1] 熊爱明, 薛善坤, 李淼泉. TC4钛合金高温变形时微观组织变化的计算[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(1): 14−16.
XIONG Ai-ming, XUE Shan-kun, LI Miao-quan. Microstructure evolution and modeling during isothermal deformation of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9(1): 14−16.

[2] 蔡伯成, 刘培英, 陶 冶, 等. Ti60 合金高温连续氧化行为研究[J]. 材料工程, 2000, 8: 34−36.
CAI Bo-cheng, LIU Pei-ying, TAO Ye, et al. The isothermal oxidation behavior of Ti60 alloy at elevated temperature[J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 8: 34−36.

[3] 熊爱明, 黄维超, 陈胜晖, 等. 高温变形参数对 TC6 钛合金微观组织的影响研究[J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 11−15.
XIONG Ai-ming, HUANG Wei-chao, CHEN Sheng-hui, et al. Effects of hot forming parameters on microstructure of TC6 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(1): 11−15.

[4] 李晓丽, 李淼泉, 李 锋, 等. TC6 合金等温锻造过程中晶粒尺寸的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1332−1337.
LI Xiao-li, LI Miao-quan, LI Feng, et al. Numerical simulation of grain size during isothermal forging of TC6 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1332−1337.

[5] Hu Z M, Brooks J W, Dean T A. Experimental and theoretical analysis of deformation and microstructural evolution in the hot-die forging of titanium alloy aerofoil sections[J]. J Mater Proc Tech, 1999, 88: 251−265.

[6] Seshacharyulu T, Medeiros S C. Hot working of commercial Ti-6Al-4V with an equiaxed α-β microstructure: materials modeling considerations[J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 284: 184−194.

[7] Guo Z X, Baker T N. On the microstructure and thermomechanical processing of titanium alloy IMI685[J]. Materials Science & Engineering A, 1992, 156: 63−76.

[8] Wang F, Zhu Q, Lin J, et al. Prediction of microstructural evolution in hot rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 530−533.

[9] MA Feng-cang, LU Wei-jie, QIN Ji-ning, et al. Microstructure evolution of near-α titanium alloys during thermomechanical processing[J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 416: 59−65.

[10] 潘洪泗. Ti60 合金的塑性变形机理及热处理工艺研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
PAN Hong-si. Study on the Heat Treatment and Mechanism of Plastic Deformation of Ti60 Titanium Alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.

[11] 熊爱明, 陈胜晖, 黄维超, 等. TC6 钛合金的高温变形行为及组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(6): 447−450.
XIONG Ai-ming, CHEN Sheng-hui, HUANG Wei-chao, et al. Thermal deformation behavior and microstructure evolution for TC6 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(6): 447−450.

[12] 吕 炎. 锻件组织性能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
LÜ Yan. Microstructure and Property Control of Forging[M]. Beijing: Nation Defence Industry Press, 1988.

[13] LI Xiao-li, LI Miao-quan. Microstructure evolution model based on deformation mechanism of a titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(4): 749−753.

[14] LI Miao-quan, XIONG Ai-ming, CHENG Sheng-hui, et al. Effects of process parameters on the microstructure during the hot compression of a TC6 titanium alloy[J]. Rare Metals, 2004, 23(3): 263−268.

[15] Lin J, Dean T A. Modelling of microstructure evolution in hot forming using unified constitutive equations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 354−362.

(编辑 陈爱华)