

TC4-DT 合金的超塑性变形及其本构方程

Superplastic Deformation and Constitutive Equations of TC4-DT Alloy

郑漫庆,王高潮,徐雪峰,喻森真

(南昌航空大学 航空制造工程学院,南昌 330063)

ZHENG Man-qing, WANG Gao-chao, XU Xue-feng, YU Miao-zhen

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

摘要: 采用 CMT4104 电子万能拉伸试验机分别进行温度为 870°C , 应变速率为 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的恒应变速率和温度为 $850 \sim 890^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $3.3 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率循环法超塑性拉伸实验。结果表明:在变形过程中存在动态回复与动态再结晶现象,并采用 Avrami 方程描述了动态再结晶动力学行为;基于应变速率循环法获得了 TC4-DT 合金的本构模型,再通过 1stopt 软件加以回归拟合,得到较为精确的 TC4-DT 合金超塑性变形本构方程。

关键词: TC4-DT 合金;动态再结晶;超塑性变形

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.09.011

中图分类号: TG146.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)09-0063-05

Abstract: Superplastic deformation tests of TC4-DT alloy were performed with a superplastic tensile testing machine CMT4104. The constant strain rate method and the strain rate circulation method were used. In the constant strain rate test, the strain rate was fixed at $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ and the temperature was fixed at 870°C ; in the strain rate circulation test, the strain rates were tuned from $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and the temperature was from 850°C to 890°C respectively. The results show that dynamic recovery and dynamic recrystallization occur during the superplastic deformation and the dynamic recrystallization kinetics behavior can be described by Avrami equation. The experimental results of the strain rate circulation method were used to establish the constitutive relationship of the TC4-DT alloy. Regression analysis was carried out with the 1stopt software and a precise constitutive equation for superplastic deformation of the TC4-DT alloy is obtained.

Key words: TC4-DT alloy; dynamic recrystallization; superplastic deformation

国际航空结构材料的设计概念正由单纯静强度设计向现代的损伤容限设计准则转变^[1],要求钛合金在具有一定强度水平条件下,同时具有高的断裂韧性和低的裂纹扩展速率^[2,3],这对钛合金提出了更高的要求,从而影响了钛合金的热加工工艺方向^[4,5]。作为一种新型的损伤容限型钛合金,TC4-DT 合金因其优异的综合力学性能主要应用于飞机承力构件上。研究 TC4-DT 合金的超塑性变形过程中的动态再结晶行为以及本构关系,可以准确描述 TC4-DT 合金的流变行为,为该合金超塑成形工艺过程设计和数值模拟分析提供基础数据。

本工作采用恒应变速率拉伸方法对 TC4-DT 合金的动态再结晶进行研究,这是因为金属材料热变形时所发生的组织演变决定其成形后的性能,其中,一种重要的组织演变机制是动态再结晶。随着计算

机技术的发展,可通过有限元模拟技术模拟材料在热变形过程中的微观组织演变,以达到预测与控制材料组织的目的^[6]。采用有限元软件模拟材料热变形组织演变的必要条件之一是建立动态再结晶动力学模型,从而为科学地制定 TC4-DT 合金热加工工艺提供理论依据。材料本构关系不仅可以通过经典数学模型来建立^[7,8],也可以通过回归软件来直接建立,如著名的 Origin, SPSS, Matlab 及国产的 1stopt 软件,但无论是通过经典数学模型还是直接利用回归软件建立本构关系,都存在精度问题,而要对变形过程做到精确控制,就必须要求所建立的本构模型具有足够的精度,而精度问题在构建本构方程时不是一次就能保证的,往往需要通过若干次的修正来保证,因此本工作在建立本构方程的基础上对其进行了修正。

1 实验材料与方法

实验用材料为 TC4-DT 钛合金,对其进行能谱测试,精确测定其成分(原子分数)为:Ti 90.09%,Al 5.56%,V 4.34%。合金原始晶粒尺寸约为 15μm,组织为初生 α 相和转变 β 相且分布较为均匀^[9,10]。

本实验使用 CMT4104 电子万能拉伸试验机进行超塑性拉伸实验。将 TC4-DT 合金棒材加工成如图 1 所示的拉伸试样,变形区域应无裂纹、划痕等可能影响实验结果的缺陷。

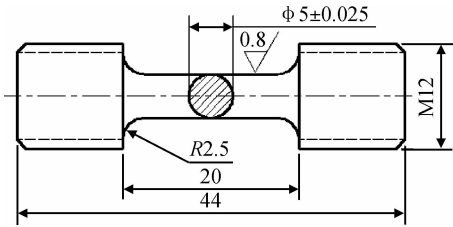


图 1 TC4-DT 合金超塑性拉伸试样尺寸
Fig. 1 The superplastic tensile sample dimension of TC4-DT alloy

恒应变速率超塑性拉伸实验:在 870℃ 下,应变速率为 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

应变速率循环超塑性拉伸实验:在 850~890℃ 下,应变速率循环范围为 $3.3 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

2 动态再结晶动力学模型

恒应变速率法的应力-应变曲线如图 2 所示,表现为三个阶段:初始阶段为加工硬化阶段;当应变超过临界应变时,材料开始出现动态再结晶,硬化率下降;当动态再结晶造成的软化与应变硬化达到动态平衡时,进入稳定再结晶阶段,流变应力趋于恒定^[11,12]。

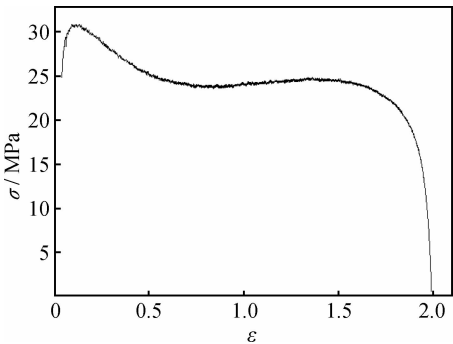


图 2 恒应变速率法的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of the constant strain rate method

本工作采用经典的 Avrami 方程来描述 TC4-DT 合金的动态再结晶动力学模型^[13],动态再结晶的体积分数 X_d 与应变 ϵ 之间的关系可以表示为:

$$X_d = 1 - \exp \left[-\beta_d \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_p} \right)^{k_d} \right] \quad (1)$$

$$\epsilon_c = 0.8 \epsilon_p \quad (2)$$

式中: ϵ_c 为发生再结晶的临界应变; ϵ_p 为发生再结晶的峰值应变; β_d , k_d 均为与材料有关的系数。

根据应力-应变曲线来确定 X_d :

$$X_d = \frac{\sigma^{de} - \sigma^{dx}}{\sigma_s^{de} - \sigma_s^{dx}} \quad (3)$$

式中: σ^{de} 为动态回复过程中的瞬态应力; σ_s^{de} 为动态回复过程中的稳态应力; σ^{dx} 为动态再结晶过程中的瞬态应力; σ_s^{dx} 为动态再结晶过程中的稳态应力。

采用峰值应力近似地代替 σ^{de} 和 σ_s^{de} ,则式(3)可表示为:

$$X_d = \frac{\sigma_m - \sigma^{dx}}{\sigma_m - \sigma_s^{dx}} \quad (4)$$

由式(1)推导可得:

$$\ln[-\ln(1 - X_d)] = k_d \ln \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_p} \right) + \ln \beta_d \quad (5)$$

通过绘制 $\ln[-\ln(1 - X_d)]$ 与 $\ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p]$ 的曲线,并利用 Origin 软件进行拟合,便可求得 k_d 与 $\ln \beta_d$ 的值,如图 3 所示。

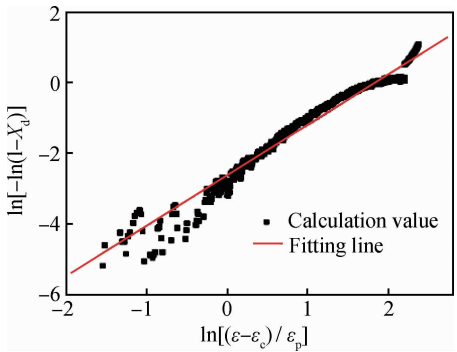


图 3 $\ln[-\ln(1 - X_d)]$ 与 $\ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p]$ 的关系曲线

Fig. 3 The curve of $\ln[-\ln(1 - X_d)]$ and $\ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p]$

由图 3 拟合出的公式为: $Y = A + BX$, 其中: $A = -2.60208$, $B = 1.42114$, 该公式的精度 $R = 0.98137$ 。计算得: $k_d = 1.42114$, $\beta_d = \exp(-2.60208) = 0.07412$ 。

所以该动态再结晶动力学方程为:

$$X_d = 1 - \exp \left[-0.0741 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_p} \right)^{1.4211} \right] \quad (6)$$

3 本构模型的建立与修正

3.1 Arrhenius 型方程的建立与检验

反映材料动态特性的本构关系可能因为材料的不同而存在较大的差异,即使是同一种材料,也可能因为不同的目的不同的需求而建立不同形式的本构关系。常用 Arrhenius 型方程一般有三种形式:

$$\dot{\epsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)=A_1\exp(\beta\sigma)\tag{7}$$

$$\dot{\epsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)=A_2\sigma^{n_1}\tag{8}$$

$$\dot{\epsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)=A_3\sinh(\alpha\sigma)^n\tag{9}$$

根据 Arrhenius 型方程中流动应力的表现形式,式(7)~(9)分别称为指数方程、幂函数方程与双曲正弦方程。其中:Q 为变形激活能(J/mol);R 为气体常数(J/(mol·K));T 为绝对温度(K);A₁, A₂, A₃ 和 α 为常数;β, n₁, n 为与应变速率敏感性因子有关的参数。

由式(7)~(9)两边取自然对数,然后整理可得统一形式:

$$f(\sigma)=A+B\ln\dot{\epsilon}+\frac{C}{T}\tag{10}$$

式中: f(σ) 可分别表示 σ, ln(σ) 和 ln[sinh(ασ)]。通过对实验数据的计算^[14,15] 可最后求得不同温度下的 β 与 n₁ 及计算所得的 α 值如表 1 所示。

表 1 不同温度下的 β, n₁ 与 α 值

Table 1 The values of β, n₁ and α at different temperatures

T/℃	β	n ₁	α /MPa ⁻¹	α _{ave} /MPa ⁻¹
850	0.02715	1.58373	0.017143	
870	0.02790	1.45858	0.019128	0.019570
890	0.03311	1.47550	0.022440	

由表 1 数据可得 α 的平均值为 0.019570MPa⁻¹。应用双曲正弦型 Arrhenius 方程对 TC4-DT 合金进行适用性分析时,均采用 α 的平均值进行计算。由 Arrhenius 双曲正弦型方程可推导出变形激活能的表达式为:

$$Q=R\left[\frac{\partial\ln\dot{\epsilon}}{\partial\ln(\sinh(\alpha\sigma))}\right]_T\left[\frac{\partial\ln(\sinh(\alpha\sigma))}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)}\right]_{\dot{\epsilon}}\tag{11}$$

其中 $n=\frac{\partial\ln\dot{\epsilon}}{\partial\ln(\sinh(\alpha\sigma))}$, 令 $k=\frac{\partial\ln(\sinh(\alpha\sigma))}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)}$ 则有:

$$Q=Rnk\tag{12}$$

通过计算可求得各温度下的 n, k 值及 lnA 值如表 2 所示。由表 2 计算激活能 Q = Rnk = 171.9kJ/mol。由式(9)可得:

$$\dot{\epsilon}=A\sinh(\alpha\sigma)^n\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\tag{13}$$

表 2 各温度下的 n, k 值及计算所得的 lnA 值
Table 2 The values of n, k and lnA at different temperatures

T/℃	n	Intercept	k	lnA
850	1.10	-8.170		-8.150
870	1.07	-7.987	1.86	-7.965
890	1.16	-7.810		-7.790
Average	1.11	-		-7.970

代入表 2 相关的值可得 TC4-DT 合金在两相区超塑性拉伸的本构方程为:

$$\dot{\epsilon}=e^{-7.97}[\sinh(0.0196\sigma)]^{1.11}\exp(-171.9/RT)\tag{14}$$

由于 Arrhenius 型方程的三种形式又可表示为 σ = f(ε̇, T), 则可表示为:

$$\sigma=\operatorname{arsinh}\left[\left(\dot{\epsilon}\exp(171.9/RT+7.97)\right)^{1/1.11}\right]/0.0196\tag{15}$$

通过计算,在用于构建本构方程的实验数据点中,误差小于 15% 的实验数据点占总数据点的 74%,误差小于 10% 的实验数据点占总数据点的 51%。图 4 为所构建本构方程的误差精度效果图,图 4 中两条直线组成的楔形带为满足相对误差小于和等于 15% 的误差带,中间一条直线上的点是实验值与计算值相等的点。从图 4 可以看出,相当一部分点落在 15% 的误差带外。

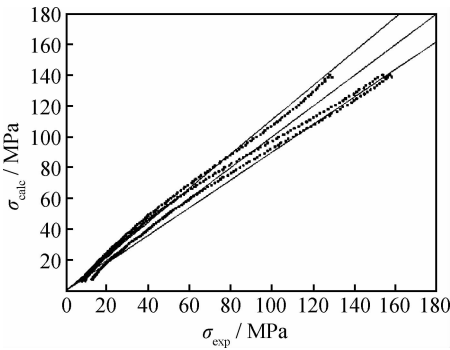


图 4 计算应力与实验应力分散图
Fig. 4 The scatter diagram of calculated stress and experimental stress

以上分析表明,所构建本构方程的精度不足,需对现有的本构方程加以修正。

3.2 本构模型的修正与检验

以上述本构方程求得的 σ_{calc} 及温度 T 为自变量, 以 σ_{exp} 为因变量, 可借助国产 1stopt 软件进行二元非线性回归, 获得的数据拟合结果如图 5 所示。

图 5(a)为利用 1stopt 软件进行二元非线性回归拟合后的 X-Y 散点图, 各点与对角线的垂直距离表示

修正后的误差, 即 σ_{cor} 与 σ_{exp} 的偏差, 落在对角线上的点表示 σ_{cor} 与 σ_{exp} 相等的点。图 5(b)为利用 1stopt 软件进行二元非线性回归拟合后的双线图, 其中, 蓝色曲线表示 σ_{exp} 曲线, 红色曲线表示 σ_{cor} 曲线, 红色曲线与蓝色曲线的偏差即表示 σ_{cor} 与 σ_{exp} 的偏差。

拟合出的方程如式(16)所示, 精度 $R^2=0.9990$ 。

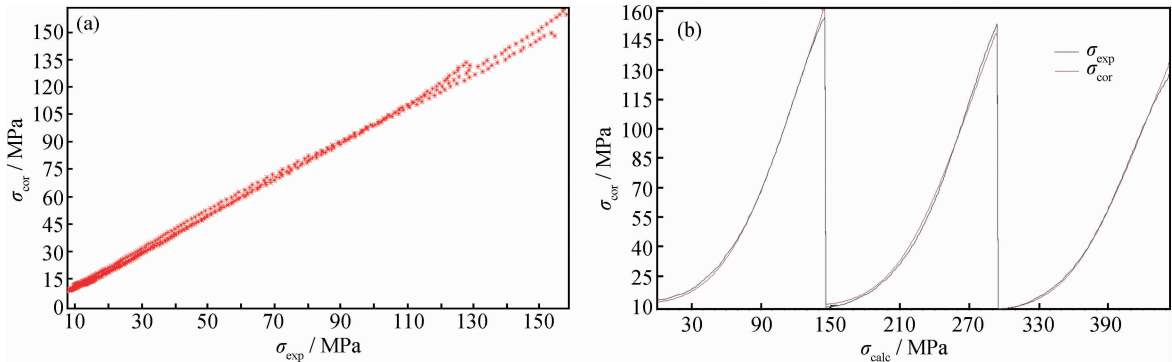


图 5 应变速率循环实验数据的拟合图形 (a)X-Y 散点图;(b)双线图
Fig. 5 The experimental data fitting graphs (a)X-Y scatter plot;(b)double figure

$$\sigma_{\text{cor}} = P_1 + P_2 \times (0.5 + \arctan((\sigma_{\text{calc}} - P_3)/P_4)/\pi) + P_5 \times (0.5 + \arctan((T - P_6)/P_7)/\pi) + P_8 \times (0.5 + \arctan((\sigma_{\text{calc}} - P_3)/P_4)/\pi) \times (0.5 + \arctan((T - P_6)/P_7)/\pi)$$

(16)

其中: $\sigma_{\text{calc}} = \text{arsinh}[(\dot{\epsilon} \exp(171.9/RT + 7.97))^{1/1.11}]/0.0196$ 。

所得的回归系数见表 3。

表 3 修正后方程的回归系数

Table 3 The regression coefficient of corrected equation							
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
-2280	2924	95.4	-95.4	2637	1208	-5.67	-3389

通过计算, 在用于构建本构方程的实验数据点中, 误差小于 15% 的实验数据点占总数据点的 99.8%, 误差小于 10% 的实验数据点占总数据点的 95.5%。图 6 为修正本构方程后的误差精度效果图, 图中两条直线组成的楔形带为满足相对误差小于和等于 15% 的误差带, 中间一条直线上的点是实验值与计算值相等的点。从图 6 可以看出, 几乎所有点落在 15% 的误差带内。以上检验表明, 所构建的本构方程的精度较高。

图 7 为不同温度下所构建的本构方程求出的流动应力计算值与实验值的比较图。可以看出根据所构建的本构方程计算所得的流动应力值与实验数据吻合程度较好。

以上的误差分析表明, 构建的 TC4-DT 合金的本构方程有较高的精度, 且具有普遍适用性, 可用于实际

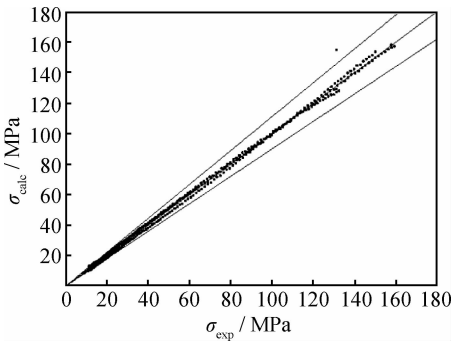


图 6 修正后计算应力与实验应力散点图
Fig. 6 The scatter diagram of calculated stress and the experimental stress after correction

热加工过程的变形抗力计算, 也可作为有限元模拟的本构方程。

4 结论

(1)在超塑性变形过程中存在动态回复与动态再结晶现象, 采用 Avrami 方程描述了动态再结晶动力学行为, 在 870℃, 应变速率为 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时合金的再结晶体积分数为: $X_d = 1 - \exp[-0.0741 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_p} \right)^{1.4211}]$ 。

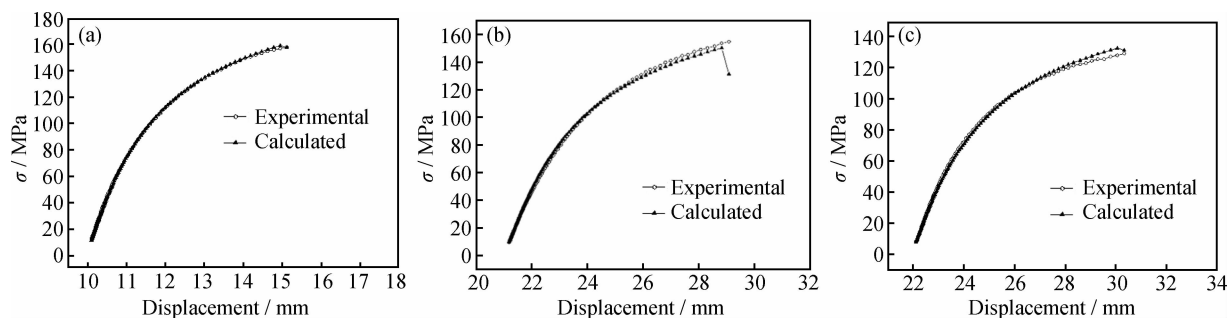


图7 不同温度下流动应力计算值与实验值比较 (a)850℃;(b)870℃;(c)890℃

Fig. 7 The comparison of σ_{calc} and σ_{exp} at different temperatures (a)850℃;(b)870℃;(c)890℃

(2)采用逐步回归、逐步修正的方法,即利用经典模型 Arrhenius 方程获得了本构关系后,把方程左边的因变量即 σ_{calc} 作为自变量,再加一个温度 T 或 $1/T$ 的调节变量作为自变量,而将实验所得 σ_{exp} 作为因变量,通过 1stopt 软件在程序中自动查找拟合,可使本构关系得到修正,修正后本构方程的精度可达 99.9%。

参考文献

- [1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(增刊): 4—11.
CAO C X. Change of material selection criterion and development of high damage-tolerant titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(Suppl): 4—11.
- [2] SINHA V, SOBOYEJOW W O. An investigation of the effects of colony microstructure on fatigue crack growth in Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 319—321: 607—612.
- [3] 李辉, 曲恒磊, 赵永庆, 等. 显微组织对 Ti-6Al-4VELI 合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(3): 26—29.
LI H, QU H L, ZHAO Y Q, et al. Effects of microstructure on fatigue crack growth rate of damage tolerance for TC4-DT alloy[J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(3): 26—29.
- [4] SWIFT T. Damage tolerance capability[J]. International Journal of Fatigue, 1994, 16(1): 75—96.
- [5] ARRIETA A J, STRIZ A G. Optimal design of aircraft structures with damage tolerance requirements[J]. Struct Multidisc Optim, 2005, 30(2): 155—163.
- [6] 陈学海, 陈康华, 董朋轩, 等. 7085 铝合金的热变形组织演变及动态再结晶模型[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 44—50.
CHEN X H, CHEN K H, DONG P X, et al. Microstructure evolution and dynamic recrystallization model of 7085 aluminum alloy during hot deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 44—50.
- [7] YANG J H, LIU Q Y, SUN D B, et al. Recrystallization behavior of deformed austenite in high strength microalloyed pipeline steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(1): 75—80.
- [8] 王智祥, 刘雪峰, 谢建新. AZ91 镁合金高温变形本构关系[J]. 金属学报, 2008, 44(11): 1378—1383.
WANG Z X, LIU X F, XIE J X. Constitutive relationship of hot deformation of AZ91 magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(11): 1378—1383.
- [9] 喻森真, 王高潮, 郑漫庆, 等. TC4-DT 合金应变诱发最大 m 值超塑性变形研究[J]. 航空材料学报, 2014, 34(3): 15—20.
YU M Z, WANG G C, ZHENG M Q, et al. Superplastic deformation based on strain-induced and maximal m value in TC4-DT titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(3): 15—20.
- [10] 喻森真, 王高潮, 郑漫庆, 等. TC4-DT 合金改锻工艺及超塑性变形行为[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(5): 1—6.
YU M Z, WANG G C, ZHENG M Q, et al. Forging pretreatment process and superplastic deformation behavior of TC4-DT alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(5): 1—6.
- [11] 张庭芳. 镁合金板料热拉深成形实验与数值模拟研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
ZHANG T F. Study on experiment and numerical simulation of magnesium alloy sheet metal warm deep drawing[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.
- [12] 刘智恩. 材料科学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008. 273—274.
- [13] LIU Z E. Material Science[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008. 273—274.
- [14] LIN Y C, CHEN M S. Numerical simulation and experimental verification of microstructure evolution in a three-dimensional hot upsetting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4578—4583.
- [15] 范定兵, 王高潮, 赵晓宾. Ti-15-3 超塑性研究[J]. 南昌航空工业学院学报: 自然科学版, 2007, 21(1): 26—29.
FAN D B, WANG G C, ZHAO X B. Research on superplasticity of Ti-15-3 titanium alloy[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology: Natural Science Edition, 2007, 21(1): 26—29.
- [15] 耿启东, 王高潮, 董洪波. TA15 合金应变速率循环超塑性研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(11): 43—48.
GENG Q D, WANG G C, DONG H B. Superplasticity of TA15 titanium alloy induced by strain rate cycling[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(11): 43—48.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075196); 江西省教育厅基金(GJJ12451)

收稿日期: 2013-09-16; 修订日期: 2014-06-03

通讯作者: 王高潮(1956—), 男, 教授, 主要从事航空复杂构件精密成形的研究, 联系地址: 南昌航空大学航空制造工程学院(330063), E-mail: Wanggaochao@nchu.edu.cn