

文章编号: 1000-6893(2003)03-0278-04

细晶态 FGH96 热成型时的流动行为研究

刘玉红¹, 李付国¹, 吴诗¹, 王淑云²

(1. 西北工业大学 材料科学与工程系, 陕西 西安 710072)

(2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

Flow Behavior Study on Fine-Grain FGH96 P/M Superalloy During Hot Deformation

LIU Yu-hong¹, LI Fu-guo¹, WU Shi-chun¹, WANG Shu-yun²

(1. College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 通过热模拟试验,对细晶态 FGH96 合金的高温流动特性进行了研究,分别从宏观和微观上对影响 FGH96 流动特性的因素(变形温度、变形速率和变形程度以及 Z 因子和动态再结晶晶粒尺寸等)作了系统分析。结果表明:变形温度、变形速率和变形程度对流动应力和再结晶晶粒尺寸均有不同程度的影响。在此基础上,建立了细晶态 FGH96 合金热成型时的本构模型,该模型充分考虑了变形温度、变形速率和变形程度对流动应力的影响,这对 FGH96 合金热成型过程的数值模拟和热力参数的合理制订具有重要意义。

关键词: FGH96 合金; 细晶态; 热成型; 流变模型; Z 因子

中图分类号: V261.3; TG132.3+2 **文献标识码:** A

Abstract: The hot deformation behavior of FGH96 superalloy has been characterized in the temperature range of 1050 ~ 1100 °C and strain rate range 0.001 ~ 0.1 /s by hot compressive simulation experiments on the fine-grain material. From the macroscopic and microscopic views, the correlation between flow stress of FGH96 and influencing factors (such as process parameters: deformation temperature, deformation rate and deformation degree and Zener-Hollomon parameter and grain size) was analyzed systematically. Flow curves show that the material exhibits dynamic recovery and dynamic recrystallization during deformation. The influences of deformation temperature, deformation rate and deformation degree on the flow stress and grain size are different. The deformation degree mainly influences the shape of flow curves. On the basis of systematic analysis and study, a phenomenological constitutive relationship model is established through a mathematical regression by taking the strain as a modification factor. The calculated and experimental values are in good agreement. Therefore, the essential prerequisite is created for the improvement of numerical simulation accuracy and for the rational choice of process parameters for FGH96 superalloy.

Key words: FGH96 superalloy; fine-grain; hot deformation; constitutive model; Zener-Hollomon parameter

随着航空发动机推重比的提高,致使涡轮盘的温度不断升高,因而对涡轮盘材料的耐热性提出了更高的要求。新型粉末高温合金由于其具有:组织均匀、晶粒细小、屈服强度高及良好的高温力学性能和高温疲劳性能等优点,已成为高性能航空发动机发展的关键材料。新一代粉末高温合金 FGH96 的诞生,将极大地提高航空发动机的性能,为了促进其研究工作的深入,必须建立合理的热成型过程的流动应力行为模型,以便准确地计算粉末冶金涡轮盘在高温大载荷下的应力应变响应,通过有限元法对材料热成型过程进行数值模拟。这对锻造工艺的合理制定、锻件组织性能

的控制及成型设备吨位的确定具有指导意义。

FGH96 高温合金盘形件等温锻造工艺分两部分:等温墩饼和盘形件成型等温锻造,相应地,热态物理模拟试验也分为两部分:热等静压态等温压缩试验和细晶态等温压缩试验,对热等静压态下的 FGH96 合金的热模拟试验及本构关系已作过相应研究。本文针对细晶态 FGH96 合金,采用等温恒变速率压缩试验,对其高温流动特性进行研究,利用数学回归方法,确定细晶态 FGH96 合金的唯象本构关系模型^[1]中的参数,为 FGH96 研究工作的深入和有限元模拟打下良好的基础。

1 热模拟试验

试验所用细晶态 FGH96 合金数据^[2]由北京

收稿日期:2002-06-17; 修订日期:2002-09-02

基金项目:航空基础科学基金(98H53068)和“十五”航空预研项目及西北工业大学博士论文创新基金(200212)资助

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/03/0278/>

航空材料研究院提供,其化学成分(质量百分数 wt %): Cr15.57, Co12.25, W4.12, Mo3.87, Ta0.1, Nb0.73, Al2.27, Ti3.51, Zr0.05, Si < 0.05, Ce0.01, Fe0.17, Mn < 0.05, N0.0018, O0.0042, C0.043, S0.002, P < 0.01, B0.014, 其余为 Ni。试样为 $\phi 8\text{mm} \times 12.2\text{mm}$ 的圆柱体,在两端面上加工有深度为 0.1mm,直径为 7.6mm 的浅槽,以贮存润滑剂,减少试样与压头之间的摩擦。在 Thermecmastor-Z 型热模拟试验机上进行等温恒应变速率压缩试验,热模拟试验温度为 1050 和 1100,应变速率为 0.001、0.01 和 0.1s^{-1} ,共 6 种试验组合,最大真应变为 0.75。

2 试验结果与分析

2.1 流动行为

图 1 为 FGH96 合金等温恒应变速率压缩试验的真实应力应变曲线。由两图可以看出,变形程度对 FGH96 合金的流动应力的影响并不明显,它主要影响流动曲线的形状;而变形速率和变形温度对流动应力的影响则非常显著,它们决定着流动应力的大小,而对流动曲线的形状影响很小。当变形程度达到一定值时,流动应力出现极大值后,变形程度再增加,流动应力不仅不继续增加,反而有减小的趋势,这说明 FGH96 合金在变形过程中发生了动态回复和动态再结晶,其软化效应超过了由于变形而引起的加工硬化效应。

在同量变形程度下,流动应力随变形温度的升高而减小,不是简单的线性关系。因为随着变形温度的升高,原子热振动的振幅增大,同时,温度升高,使滑移阻力降低,并有新的滑移系产生,从而使变形时的流动应力呈渐减趋势。在同量变形程度下,流动应力随变形速率的增加而增加。图 2 为流动应力与应变速率的关系曲线,从图知,真应力随应变速率的增加而增加,不是简单的线性关系。从微观上说,材料塑性变形的本质是位错塞积与松弛的结果,增加,变形过程缩短,材料内部的畸变加剧,继续变形困难,从而使变形抗力增加。

2.2 影响因素评价

表 1 为热模拟试验得到的流动应力值,将此试验结果进行极差分析有:变形温度的极差 R_T 为 93.65MPa,应变速率的极差 $R_{\dot{\epsilon}}$ 为

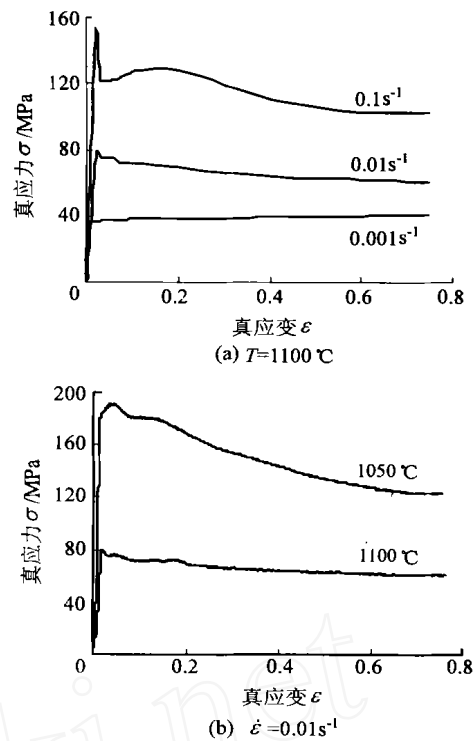


图 1 流动应力与真应变关系

Fig. 1 Relationship between flow stress and real strain

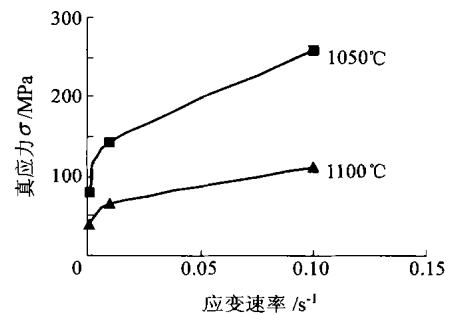


图 2 流动应力与应变速率关系

Fig. 2 Relationship between flow stress and strain rate at a strain of 0.4

123.40MPa,变形程度的极差 R 为 32.93MPa。从极差结果可以看出,变形速率和变形温度的极差要远大于变形程度的极差,锻造热力参数对 FGH96 合金流动应力的影响次序为: $\dot{\epsilon} > T > \epsilon$,说明变形速率和变形温度是影响 FGH96 合金成型性能的主要因素,这与由流动应力曲线图得出的结论相吻合。

由于变形温度、变形速率和变形程度都不同程度地影响着 FGH96 合金的成型性能及成型件的力学性能,因此,科学地确定 FGH96 合金的本构关系模型,对实际生产中制定合理的成型规范,提高锻件的成型性能及锻后组织和力学性能具有极其重要的意义。

表1 细晶态 FGH96 流动应力试验值/MPa

Table 1 Flow stress value (in MPa) obtained in fine-grain compression on FGH96

真应变	温度 $T/$	应变速率 $\dot{\epsilon}/s^{-1}$		
		0.001	0.01	0.1
0.05	1100	37.35	75.35	121.37
	1050	113.25	189.51	276.14
0.06	1100	37.78	75.09	122.24
	1050	112.45	186.23	278.54
0.08	1100	37.89	72.21	124.68
	1050	111.31	180.76	280.84
0.1	1100	38.12	71.47	126.50
	1050	113.03	180.96	281.07
0.2	1100	38.59	69.17	128.32
	1050	99.39	168.56	276.76
0.3	1100	38.41	65.94	119.72
	1050	85.50	154.60	269.52
0.4	1100	39.24	64.26	111.12
	1050	79.90	143.31	258.47
0.5	1100	39.75	62.69	105.29
	1050	74.15	134.54	244.13
0.6	1100	40.26	61.89	102.42
	1050	68.79	127.92	231.21
0.7	1100	40.54	60.65	102.18
	1050	65.82	123.50	222.75

2.3 流动模型

通过对试验数据结果的分析可知,FGH96合金在热成型过程中伴随有应变硬化及软化等复杂微观现象,变形温度、变形速率和变形程度对变形抗力都有不同程度的影响,且关系较为复杂,不能用简单的函数关系来描述。依据试验所得数据,并对现有的材料塑性变形本构方程模型^[3]进行比较及精度分析,最后确定细晶态 FGH96 合金热成型时的本构模型为 Arrhenius^[4,5]型方程中的双曲正弦型,即

$$\sigma = B_0 \operatorname{arsinh} \left\{ \left(\dot{\epsilon} / A \right)^{1/n} \exp \left[Q / (nRT) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: A , B_0 为与材料有关的常数; n 为应变速率敏感性指数; Q 为变形激活能(J); R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$; σ 为真实应力(MPa); $\dot{\epsilon}$ 为应变速率(s^{-1}); T 为变形绝对温度(K)。

将式(1)变形得

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\sigma / B_0)]^n \exp(-Q / (RT)) \quad (2)$$

对式(2)取自然对数

$$\ln[\sinh(\sigma / B_0)] = -\frac{1}{n} \ln A + \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{nR} \frac{1}{T} \quad (3)$$

由式(3)知, $\ln[\sinh(\sigma / B_0)]$ 是 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $1/T$ 的线性函数,取 $B_0 = 233.82 \text{ MPa}$,在不同的应变水平下,对式(3)进行多元线性回归分析,所得到的 $\ln A$ 和 Q 的值均随真应变 ϵ 的增大而减小,且逐渐趋于平稳; n 的值随真应变 ϵ 的变化不大,在一个平

衡值上下波动,其平均值为 3.9094。综合 $\ln A$, Q 和 n 随 ϵ 的变化趋势,可将 $\ln A$, Q 和 n 表示为真应变 ϵ 的幂函数形式,即

$$Y = B_1 + B_2 \epsilon^{B_3} \quad (4)$$

式中: Y 为 $\ln A$, n 或 Q ; B_1 , B_2 和 B_3 为待定系数。对式(4)进行线性回归分析,得各参数值列于表 2。

表2 式(4)的回归系数值

Table 2 Constants obtained using Eq. (4) to represent $\ln A$, n and Q with respect to strain

系数	$\ln A$	n	Q
B_1	0	3.9094	0
B_2	74.86	0	8.5048×10^5
B_3	-0.1407	0	-0.1424

把各回归系数代入式(1)中,得到细晶态 FGH96 合金的本构关系模型

$$\sigma = 233.82 \operatorname{arsinh} \left\{ \left(\dot{\epsilon} / A \right)^{1/n} \exp \left[Q / (nRT) \right] \right\} \quad (5)$$

$$A = \exp(74.86 \epsilon^{-0.1407}) \quad (6)$$

$$n = 3.9094 \quad (7)$$

$$Q = 8.5048 \times 10^5 \epsilon^{-0.1424} \quad (8)$$

2.4 动态再结晶分析

上一节在稳态流变基础上,建立了细晶态 FGH96 合金的流变模型。从微观上说,在热成型过程中,稳态流动应力 σ 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和变形温度 T 的关系,实质上是流动应力 σ 与稳定动态再结晶晶粒尺寸 D 的关系,而晶粒尺寸随成型参数的变化通常与 Zener-Hollomon 参数 Z 有关^[4,6,7] $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q / (RT))$ 。 Z 因子在动态再结晶过程中起着非常重要的作用,决定再结晶晶粒的尺寸 D ^[7,8],即: $D = CZ^{-n_D}$,式中 C , n_D 为试验常数。图 3 为 $T = 1050$ 和 $\dot{\epsilon} = 0.01 s^{-1}$ 时 Z 因子与真应变的关系,由图可知, Z 因子随变形速率的上升而增大,随热变形温度的升高而减小,在等温恒应变速率变形过程中, Z 因子随真应变的增大而减小,由 $D-Z$ 关系知,晶粒尺寸随 Z 因子的增大(即热变形温度的下降、变形速率的上升)而细化,随变形程度的增大而长大。而晶粒尺寸最终决定着锻件的质量,因此,在实际生产中,可通过调整成型工艺参数(如变形温度、变形速率和变形程度)来细化晶粒尺寸,提高锻件组织和力学性能。

3 模型验证

对回归方程进行显著性检验^[9](F 检验),在显著性水平 $\alpha = 0.001$ 下, $F = 1271.58 > F_{0.001}^{(3,56)} = 6.26$,证明此回归方程高度显著;由相关系数 $R =$

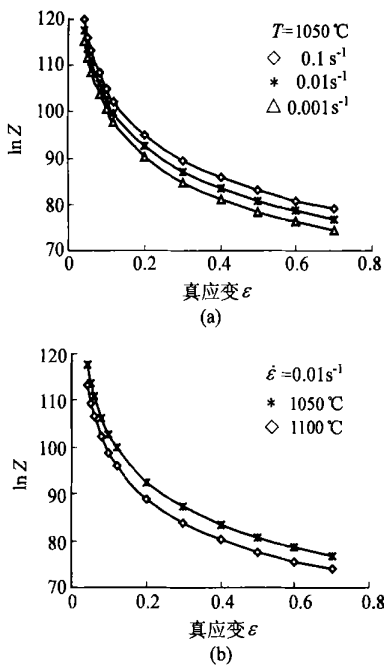


图 3 $\ln Z$ 与真应变 的关系

Fig. 3 Variation of $\ln Z$ with strain

0.9927, 进一步证明了回归方程具有很好的曲线拟合特性。利用回归方程(5)~(8), 计算应力, 并与试验值对比(见图 4), 90%的数据点的相对误差均在 10%以内, 其余数据点的相对误差在 15%以内。为下一步用有限元对 FGH96 合金热成型过程的数值模拟奠定了基础。

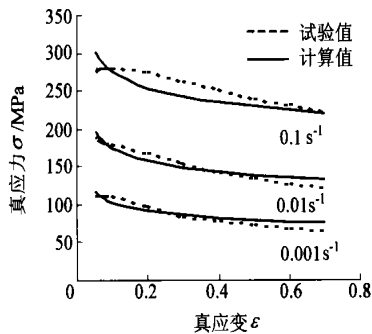


图 4 流动应力计算值与试验值的比较($T = 1050$)

Fig. 4 Comparison of the calculated and the experimental flow curves($T = 1050$)

4 结 论

(1) 细晶态 FGH96 合金在热成型过程中, 由于应变硬化及动态恢复和动态再结晶等引起的加工硬化和软化平衡作用, 当变形程度达到一定值, 流动应力出现极大值后, 变形程度再增加, 流动应力不再继续增加, 而是维持在一个稳定值左右。

(2) 热成型时, 变形温度、变形速率及变形程度对流动应力和再结晶晶粒尺寸均有不同程度的影响, 其中, 变形温度和变形速率对流动应力的影

响尤为显著。因此, 在实际生产中, 为获得质量优良的产品, 应严格控制变形温度和变形速率。

(3) 在稳态流变基础上, 建立的细晶态 FGH96 合金的本构模型, 能较好地描述其热成型过程中的动态流动特性, 经 F 检验, 证明该本构方程高度显著, 实测数据与计算值吻合较好。

参 考 文 献

- [1] 周纪华, 管克智. 金属塑性变形阻力[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 211 - 229.
(Zhou J H, Guan K Z. Resistance of metal plastic deformation [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1989. 211 - 229.)
- [2] 王旭青. FGH96 高温合金粉末显微组织及夹杂分析[J]. 粉末冶金技术, 2001, 19(2): 70 - 73.
(Wang X Q. The analysis of microstructure and inclusion of FGH96- powder of 750 superalloy[J]. Powder Metallurgy Technology, 2001, 19(2): 70 - 73.)
- [3] Gronostajski Z. The constitutive equations of FEM analysis [J]. J Mater Process Technol, 2000, 106: 40 - 44.
- [4] Rao K P, Hawbolt E B. Development of constitutive relationships using compression testing of a medium carbon steel[J]. Transactions of ASME, 1992, 114(1): 116 - 123.
- [5] Brand A J, Karhausen K, Kopp R. Microstructural simulation of nickel base alloy inconel 718 in production of turbine disks[J]. Materials Science and Technology, 1996, 12(11): 963 - 969.
- [6] Medeiros S C, Prasad Y V R K, Frazier W G, et al. Microstructural modeling of metadynamic recrystallization in hot working of IN 718 superalloy[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A293: 198 - 207.
- [7] Sellars C M. Hot working and forming processes[A]. Sellars C M, Davies G J eds. Proceedings of the Conference of Hot Working and Forming Processes[C]. London: IMS, 1980. 3 - 11.
- [8] 何宜柱, 陈大宏, 雷廷权, 等. 形变 Z 因子与动态再结晶晶粒尺寸间的理论模型[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(1): 26 - 30.
(He Y Z, Chen D H, Lei T Q, et al. Mathematical modeling of the dependence of grain size on Zener-Hollomon parameter during dynamic recrystallization[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(1): 26 - 30.)
- [9] 朱伟勇, 傅连魁. 冶金工程试验统计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991. 118 - 126.
(Zhu W Y, Fu L K. Test Statistics in Metallurgical Engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991. 118 - 126.)

作者简介:



刘玉红(1971 -) 女(满族), 辽宁丹东人, 西北工业大学 2001 级博士, 主要从事材料体积成型现代设计与控制一体化技术的研究, Email: nwplyh587@sina.com.

(责任编辑: 蔡 斐)