

GH4169 高温合金高应变率本构关系试验研究

王涛^{*}, 陈国定, 巨江涛

西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072

摘要: 基于高应变率下 GH4169 高温合金的本构关系是采用有限元法对 GH4169 高温合金进行切削加工数值分析研究的基础。本文针对 GH4169 高温合金, 通过试验对其在温度为室温至 1 000 °C、应变率为 2 000~10 000 s⁻¹ 的范围内对本构关系进行了研究。研究发现高应变率下 GH4169 高温合金的流动应力与塑性应变关系接近线性关系, 同时温度影响着高应变率下应变率对本构关系的影响程度及方式。根据 GH4169 合金流动应力曲线的特点, 对 Johnson-Cook 本构模型进行修正。基于试验结果, 通过数据拟合确定了对应高应变率 GH4169 高温合金的材料常数, 建立了描述 GH4169 高温合金高应变率下的本构模型, 为切削加工有限元数值分析提供了理论基础, 并为相关类似研究提供了思路。

关键词: 本构关系; 流动应力; 高应变率; GH4169; 高温合金

中图分类号: V252; TH140.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2013)04-0946-08

GH4169 高温合金在常温与高温下都具有良好的机械性能、抗氧化性能和抗腐蚀性能, 在航空制造领域中有重要的应用价值, 广泛用于制造涡轮盘、叶片、轴和机匣等^[1-3]。作为一种难加工合金材料, 切削工艺对 GH4169 高温合金零件的表面完整性具有重要的影响。因此, 开展 GH4169 高温合金加工工艺研究, 借以改善零件表面完整性和疲劳强度, 是十分重要并受到极大关注的工作。

对 GH4169 高温合金切削加工进行研究, 除试验方法外, 基于有限元技术的切削加工数值分析方法也已成为重要研究手段, 并与试验方法相辅相成。采用数值分析对 GH4169 高温合金的切削加工进行研究的重要基础工作之一便是对材料本构关系的研究。

目前有关 GH4169 高温合金(类似于美国 Inconel 718 合金)的本构关系, 国内外有不少学

者开展了相关的研究^[3-11]。其中 Thomasa 等在温度为 900~1 080 °C 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 为 0.000 5~0.1 s⁻¹ 的范围内建立了 Inconel 718 合金材料的双曲正弦本构模型^[4]; 李森泉等在温度 1 203~1 323 K 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 为 0.1~50 s⁻¹ 的范围内, 建立了 GH4169 高温合金的流动应力模糊神经网络计算模型^[7-8]; 魏洪亮等通过准静态单调拉伸、对称循环和非对称循环试验研究了 GH4169 高温合金的本构关系, 采用修正的 Chaboche 粘塑性理论, 结合非线性优化算法建立了本构关系^[10]。上述研究工作虽都涉及 GH4169 高温合金的本构关系, 但多是在高温, 中、低应变率条件下开展的材料本构关系研究, 其构造本构模型的工况与涉及高应变率的切削加工工况相差甚远, 同时在高应变率下 GH4169 高温合金的本构关系研究鲜见报道, 因此开展 GH4169 高温合金高应变率下本构关系研究是很有必要的。

收稿日期: 2012-04-06; 退修日期: 2012-05-29; 录用日期: 2012-07-17; 网络出版时间: 2012-08-16 08:59

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120816.0859.004.html

* 通讯作者. Tel.: 029-88493929 E-mail: wangt0415@126.com

引用格式: Wang T, Chen G D, Ju J T. Experimental study of constitutive relationship of superalloy GH4169 under high strain rates. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(4): 946-953. 王涛, 陈国定, 巨江涛. GH4169 高温合金高应变率本构关系试验研究. 航空学报, 2013, 34(4): 946-953.

本文以霍普金森杆(SHPB)试验装置为研究平台,在温度为室温 $\sim 1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 为 $2\ 000\sim 10\ 000\ \text{s}^{-1}$ 范围内开展 GH4169 高温合金高应变率下本构关系试验,获得了 GH4169 高温合金在高应变率下的流动应力曲线。为了进行对比,同时采用 Gleeble 热模拟试验机对 GH4169 高温合金进行了温度为室温 $\sim 1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 的低、中应变率流动应力测量试验。根据实验结果分析了高应变率下 GH4169 高温合金的流动应力曲线的特点,以及温度和应变率对其本构关系的影响规律,并拟合了描述 GH4169 高温合金在高应变率下本构关系的本构方程。

1 材料状态及相关试验

1.1 GH4169 高温合金成分和热处理状态

GH4169 材料成分见参考文献[2],热处理状态为:锻后水冷,再加热到 $720\ ^\circ\text{C}$ 保温 $8\ \text{h}$,以 $50\ ^\circ\text{C}/\text{h}$ 的冷却速度炉内冷却至 $620\ ^\circ\text{C}$,再次保温 $8\ \text{h}$,最后空冷至常温。

1.2 试验方法

本文重点研究高应变率下 GH4169 高温合金的本构关系,这不仅要求进行高应变率下的变形试验,同时也需要进行中、低应变率下的变形试验,以便于对结果进行对比性研究。

高应变率变形试验采用压缩试验方式,通过分离式霍普金森杆(SHPB)试验装置进行,试验参数及试件尺寸见表 1 所示。表 1 中: T_i 为试验温度, $\dot{\epsilon}$ 为应变率。

中、低应变率下本构关系采用 Gleeble3500 热模拟机通过压缩试验获得,试验参数及试件尺寸见表 2 所示。

表 1 SHPB 试验参数及试件尺寸

Table 1 Test parameters and specimen sizes of SHPB experiment

$T_i/^\circ\text{C}$	Specimen size(diameter \times length,mm \times mm)		
	$\dot{\epsilon}=2\ 000\ \text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon}=6\ 500\ \text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon}=10\ 000\ \text{s}^{-1}$
20(T_{room})	$\varnothing 8\times 4$	$\varnothing 3\times 2$	$\varnothing 2\times 2$
200	$\varnothing 8\times 4$	$\varnothing 3\times 2$	$\varnothing 2\times 2$
500	$\varnothing 8\times 4$	$\varnothing 3\times 2$	$\varnothing 2\times 2$
800	$\varnothing 8\times 4$		
1 000	$\varnothing 8\times 4$		

表 2 中、低应变率下试验参数及试件尺寸

Table 2 Test parameters and specimen sizes for experiments under medium and low strain rate conditions

$T_i/^\circ\text{C}$	Specimen size(diameter \times length,mm \times mm)		
	$\dot{\epsilon}=0.01\ \text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon}=1\ \text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon}=50\ \text{s}^{-1}$
20(T_{room})	$\varnothing 4\times 6$	$\varnothing 4\times 6$	
200	$\varnothing 4\times 6$	$\varnothing 4\times 6$	
500	$\varnothing 4\times 6$	$\varnothing 4\times 6$	$\varnothing 4\times 6$
800	$\varnothing 8\times 12$	$\varnothing 8\times 12$	
1 000	$\varnothing 8\times 12$	$\varnothing 8\times 12$	$\varnothing 8\times 12$

2 试验结果及讨论

2.1 考虑温升的高应变率流动应力曲线修正

测量流动应力的试验中,试件的塑性变形能绝大部分转化为热,同时对于高应变率下的压缩试验,由于试验时间极短,试验过程接近绝热过程,这使得试验中试件温度不断升高,导致试验获得的流动应力曲线并非为常温条件下的流动应力,因此需要进行适当修正。本文采用以下修正方法:设高应变率下试验过程为绝热过程,试验中 90% 的塑性变形能转化为热^[12],这样,当试件发生塑性应变为 ϵ_i^p 时,试件温升 ΔT 可由式(1)计算。

$$\Delta T = \int_0^{\epsilon_i^p} \frac{\eta \sigma d\epsilon^p}{\rho c} \quad (1)$$

式中: σ 为单轴压缩试验所得应力; ϵ^p 为单轴压缩试验所获得塑性应变; η 为塑性变形能转化为热的转化比例,对于绝热过程 η 取 0.9 ; ρ 为 GH4169 的密度; c 为 GH4169 的比热。

通过式(1)可以计算出试验获得的一定应变速率和试验温度 T_i 下流动应力曲线上任意点所对应的实际温升,从而形成一系列塑性应变-温度-应力关系曲线,如图 1 所示。

取同一应变率、不同试验温度的试验曲线上具有相同塑性应变的点,对这些点所对应的温度和应力进行 B 样条拟合,根据拟合结果计算出对应于试验温度的点的应力值,最终获得常温条件下的流动应力曲线。本文所获得的流动应力曲线如图 2 所示。

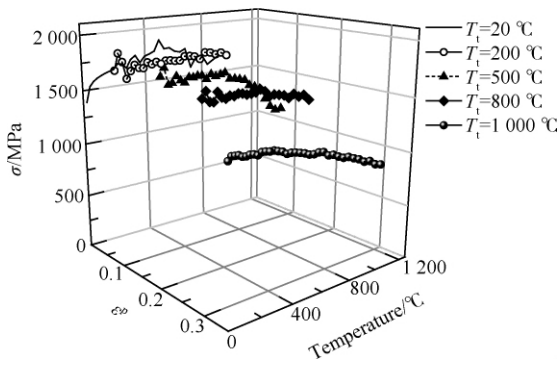


图1 不同试验温度下的塑性应变-温度-应力曲线 ($\dot{\epsilon} = 2\ 000\ \text{s}^{-1}$)
 Fig 1 ϵ^p - T - σ curves with different test temperatures ($\dot{\epsilon} = 2\ 000\ \text{s}^{-1}$)

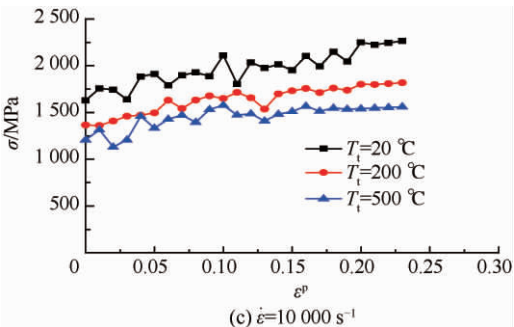
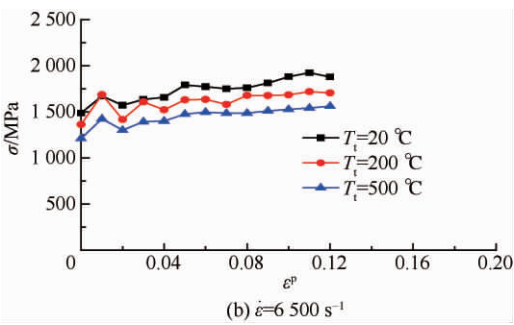
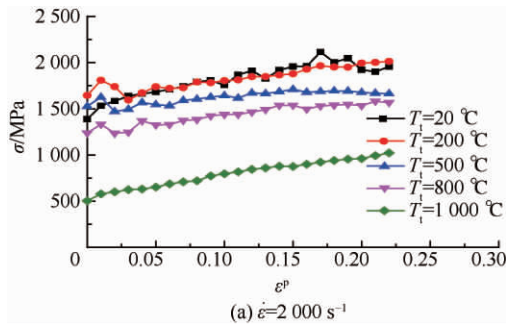
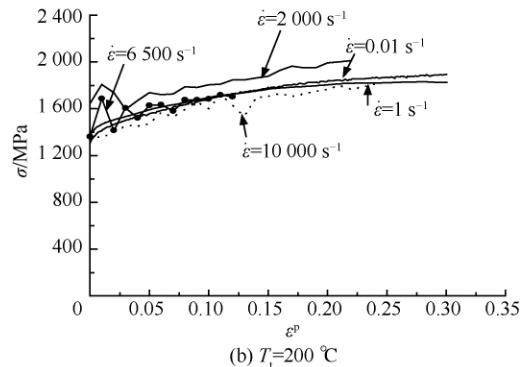
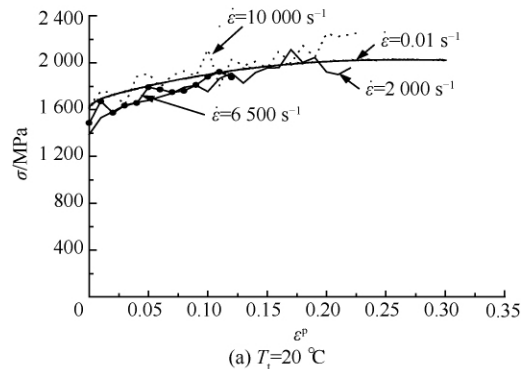


图2 高应变率下GH4169高温合金流动应力曲线
 Fig 2 Flow stress curves of superalloy GH4169 under high strain rate conditions

2.2 高应变率对流动应力曲线的影响

图3所示为常温下不同应变率对应的流动应力曲线,为更好地分析高应变率对GH4169高温合金流动应力的影响,图中同时绘出了应变率为 $0.01\ \text{s}^{-1}$ 和 $1\ \text{s}^{-1}$ 时对应的流动应力曲线。

图3显示出两个现象:其一,应变率对GH4169高温合金本构关系的影响与温度有关,在温度为 $20\ ^\circ\text{C}$, $200\ ^\circ\text{C}$, $500\ ^\circ\text{C}$ 时,不同应变率条件下所获得的流动应力曲线相互交叠,看不出应变率对流动应力值的明显影响关系,但 $800\ ^\circ\text{C}$ 与 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 的试验结果显示,应变率对GH4169合金本构关系有显著的影响,合金表现出明显的应变率硬化行为,其中 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 下获得的结果与参考文献[5]的结论相一致,尽管其只是研究了温度在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 附近、应变率为 $0.001\ \text{s}^{-1}$ 至 $1\ \text{s}^{-1}$ 的情况;其二,图3显示,在高应变率下,流动应力曲线相对于低应变率下的流动应力曲线更加直,同时GH4169合金显示出更多的加工硬化现象,尤其是图3(d)、图3(e),低应变率流动应力曲线先升后降,但在高应变率下流动应力曲线则完全没有下降的趋势。



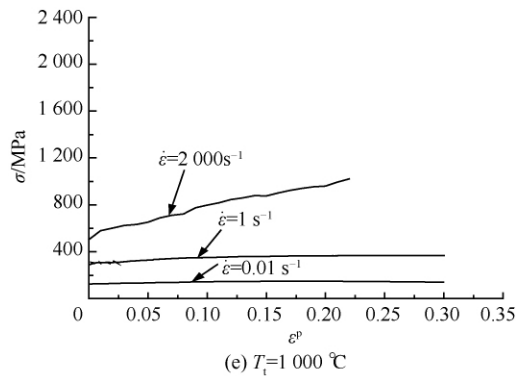
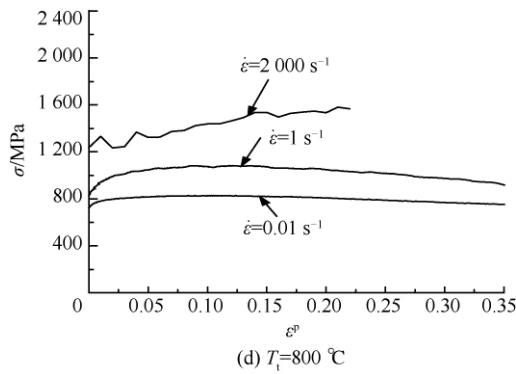
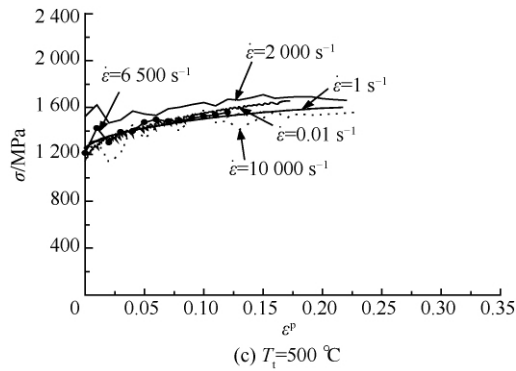
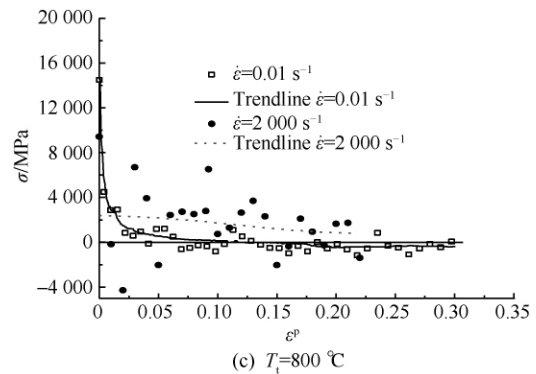
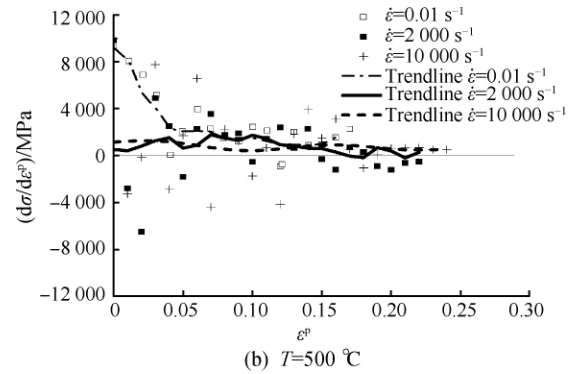
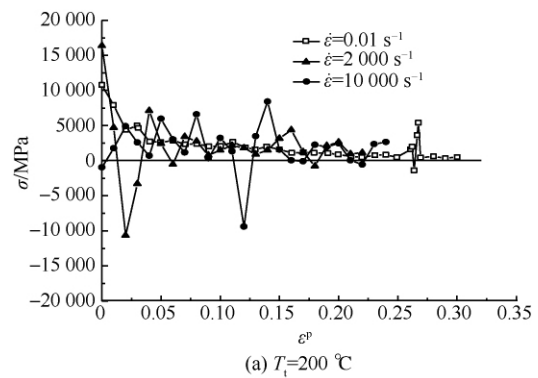


图 3 GH4169 高温合金流动应力曲线

Fig. 3 Flow stress curves of superalloy GH4169

图 4 为不同试验条件下 $d\sigma/de^p$ 与 ϵ^p 关系的散点图,如图 4 所示,应变率对 $d\sigma/de^p$ 有一定影响,而且随着温度的升高,应变率对 $d\sigma/de^p$ 的影响也越来越明显,图 4(a)与图 4(b)显示,在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时高应变率下所获得的塑性应变 ϵ^p 与 $d\sigma/de^p$ 的关系和低应变率下的关系基本一致,但当温度在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 下时,显然高应变率下的 $d\sigma/de^p$ 值较低应变率下要大,且大于 0,这再次表明高应变率下 GH4169 高温合金更多

的表现出加工硬化现象,而由图 4(c)、图 4(d)可见,在低应变率下材料开始显示出一定的加工硬化,但当塑性应变到达 0.15 左右时,出现 $d\sigma/de^p < 0$ 的现象,体现出加工软化现象,这与文献 [4]、文献[5]的研究结果相一致,一般认为,这是由动态再结晶以及动态恢复现象所导致。而对应高应变率情况,未出现软化现象,且加工硬化现象明显。图 4 中高应变率下测量结果明显分散,这是由于高速冲击下试件内部存在应力波动所致。



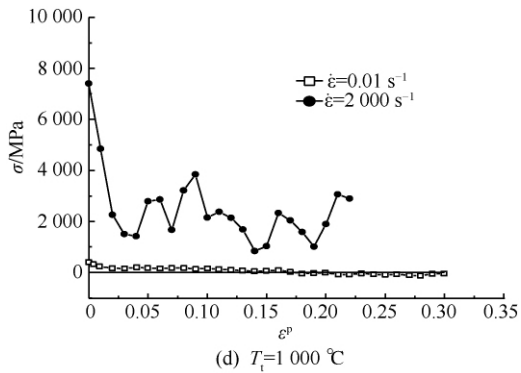


图 4 GH4169 高温合金 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon^p}$ - ε^p 关系图

Fig 4 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon^p}$ - ε^p curves of superalloy GH4169

2.3 温度对高应变率下流动应力曲线的影响

图 5 所示为不同温度下 $\ln(\dot{\varepsilon})$ 与屈服极限 σ_s 的关系。由图 5 可见,应变率对屈服极限的影响也受到温度的影响,当温度为室温 20 °C、200 °C 以及 500 °C 时,显然,屈服极限与 $\ln(\dot{\varepsilon})$ 的关系不十分明显,相关数据点几乎呈水平分布,但温度在 800 °C 和 1 000 °C 时, $\ln(\dot{\varepsilon})$ 与 σ_s 接近线性关系。

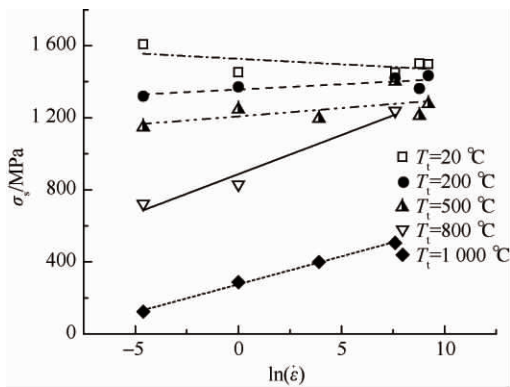


图 5 $\ln(\dot{\varepsilon})$ - σ_s 关系图

Fig 5 Relationship of $\ln(\dot{\varepsilon})$ vs σ_s

根据图 2 所示,高应变率下流动应力曲线接近直线,表明在高应变率下塑性应变与应力之间更接近线性关系。为此,本文通过线性拟合确定了不同应变率和不同温度下流动应力曲线的平均斜率,即 $d\sigma/d\varepsilon^p$ 的平均值,结果如图 6 所示,在高应变率下,流动应力的斜率在温度低于 500 °C 时,随着温度的增加而降低,斜率与温度几乎呈线性

关系,但当温度高于 500 °C 时,应变率为 2 000 s^{-1} 条件下所获得的数据显示,曲线斜率反而随着温度的增加而增加,这显示在 500 °C 附近存在某一温度临界点,小于此临界点时,流动应力曲线的斜率随温度增加而减小,而高于此临界温度时,则流动应力曲线的斜率随温度增加而增加,材料更多的体现出加工硬化现象。

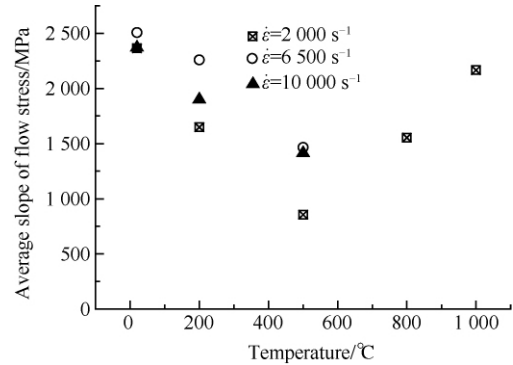


图 6 温度-流动应力曲线平均斜率散点图

Fig 6 Scatter diagram of average slope of flow stress curve vs temperature

2.4 GH4169 合金高应变率下本构方程的建立

目前被研究人员用于描述 GH4169 高温合金本构关系的本构方程类型主要有 Hollomon 模型、Ludwik 模型、Voce 模型、Swift 模型以及 Ludwigsen 模型,但这些模型中没有考虑温度及应变率的影响^[13],另外不少研究人员也采用了双曲正弦模型^[4]描述 GH4169 高温合金高温下变形的本构关系,但此模型没有直接体现应变对流动应力的影响。对于描述高应变率下 GH4169 高温合金的理想本构方程应直接包含温度、应变、应变率的影响,而 Johnson-Cook 经验型模型^[14-15]则是目前较为常用的模型之一,其表达式为

$$\sigma = [A + B(\varepsilon^p)^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] [1 - (T^*)^m] \tag{2}$$

式中: A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料常数; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$, T 、 T_{room} 和 T_{melt} 分别为温度、室温和熔化温度。

由图 2 中流动应力曲线的形态可知流动应力与塑性应变的关系可以用指数关系描述,而由图

5 可知, σ_s 与 $\ln(\dot{\epsilon})$ 基本呈线性关系, 由图 7 可知, σ_s 与温度的关系也可以采用指数关系描述, 这说明, 采用 Johnson-Cook 模型可以描述 GH4169 高应变率下的本构关系。

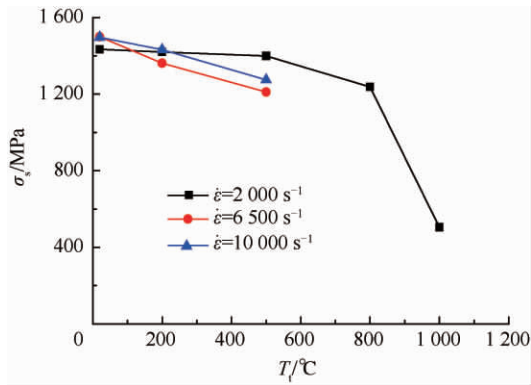


图 7 GH4169 高温合金不同温度和应变率下 σ_s 。

Fig 7 σ_s of GH4169 with different temperatures and strain rates

Johnson-Cook 模型中材料常数的一般确定过程为: 首先确定参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$, 其次, 将在参考应变率和室温条件下的屈服极限作为 A 的值, 然后对试验获得的应变率为参考应变率, 不同温度所对应的屈服极限 σ_s 与温度进行拟合, 获得 m 值, 再对参考应变率下室温流动应力曲线进行曲线拟合, 获得 B 和 n 两个材料常数, 最后, 对温度一定, 不同应变率下获得的屈服极限 σ_s 进行曲线拟合获得材料常数 C 。

采用以上过程建立高应变率下 GH4169 合金的本构方程时, 需要考虑 4 点问题: 第一, Johnson-Cook 模型中温度项自由度过少, 只有一个 m , 往往导致拟合误差过大; 第二, 如前所述, 在试验的范围内, 高应变率下 GH4169 合金的流动应力与塑性应变的关系接近线性关系; 第三, 流动应力曲线的平均斜率随着温度变化而变化, 当温度小于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 附近的临界温度时, 平均斜率随着温度的增加而减小, 但当温度高于临界温度时, 则平均斜率随着温度的增加而增大, 但这现象在 Johnson-Cook 模型中无法体现; 第四, 在温度小于临界温度时, GH4169 合金对应变率不敏感, 而当超过临界温度时则显示出明显的应变率硬化行为。

基于以上 4 点, 本文对 Johnson-Cook 模型进

行如下改进: ① 为模型温度项中无量纲温度 $(T^*)^m$ 乘以一个系数 D , 改进前后的效果对比见图 8 所示; ② 将 Johnson-Cook 模型进行简化, 取 $n=1$; ③ 本文将高应变率下 GH4169 合金的本构模型采用分段函数形式描述, 在温度小于临界温度时, 忽略应变率的影响, 取 C 为 0, 而在温度高于临界温度时则考虑应变率影响, 同时将 Johnson-Cook 模型中材料参数 B 视为无量纲温度 T^* 的函数, 且在小于和大于等于临界温度时具有不同形式。

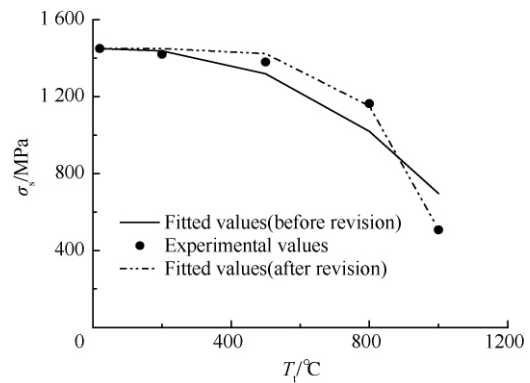


图 8 修正拟合结果与未修正拟合结果对比 ($\dot{\epsilon} = 2000\text{ s}^{-1}$)
Fig 8 Contrast of the fitting result before and after the revision ($\dot{\epsilon} = 2000\text{ s}^{-1}$)

基于以上考虑, 高应变率下 GH4169 合金本构方程的建立如下:

取参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 为 2000 s^{-1} , 根据试验结果, A 值取 1 450。温度小于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时的本构方程为

$$\sigma = [1\ 450 + B(T^*)\epsilon^p][1 - 2.487(T^*)^{5.03}] \quad (3)$$

式中: $B(T^*) = -14\ 182(T^*)^2 + 1\ 426.9T^* + 3\ 043.8$ 。

大于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 因受到条件限制, 高应变率冲击试验仅进行了不同温度下应变率为 2000 s^{-1} 的试验, 单独依靠应变率为 2000 s^{-1} 的试验结果不足以拟合本构方程, 为此, 本文将应变率为 50 s^{-1} 及 1 s^{-1} 中等应变率下所测得的 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 所对应的屈服极限补充到数据中, 这样便可以进行数据拟合了。拟合结果如下:

$$\sigma = [1\ 450 + B(T^*)\epsilon^p] \left[1 + 0.552 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{2\ 000}\right) \right] [1 - 2.49(T^*)^{5.03}] \quad (4)$$

式中: $B(T^*) = 54\,270(T^*)^2 - 47\,883T^* + 11\,909$ 。

图9为模型计算结果与试验结果对比情况。

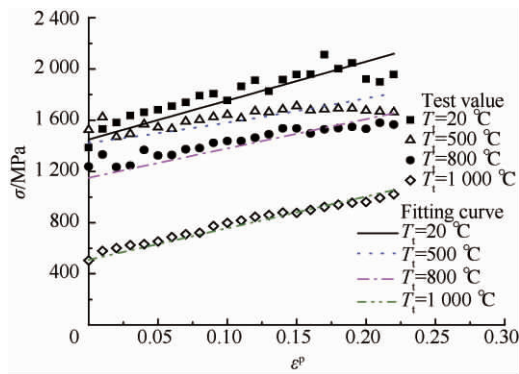


图9 试验流动应力值与模型计算结果对比($\dot{\epsilon} = 2\,000\text{ s}^{-1}$)
Fig. 9 Comparison of flow stress obtained by testing and calculating by constitutive model($\dot{\epsilon} = 2\,000\text{ s}^{-1}$)

3 结论

1) 应变率对 GH4169 高温合金具有重要影响,但主要体现在 500 °C 以上,高温下体现出明显的应变率硬化现象。

2) 在研究的范围内,GH4169 高温合金在高应变率下相比在中、低应变率下显示出更明显的加工硬化现象,且流动应力与塑性应变更加接近线性关系。

3) 在 500 °C 附近存在一临界温度,当低于此温度时,高应变率下随着温度的增加 GH4169 合金加工硬化现象减弱,而高于此温度时,随着温度的增加,GH4169 合金体现出更明显的加工硬化现象。

4) 高应变率下 GH4169 高温合金的本构关系可以通过采用修正的 Johnson-Cook 模型,以分段函数形式进行描述,效果较理想。

参 考 文 献

- [1] Kong X W, Li B, Jin Z B, et al. Broaching performance of superalloy GH4169 based on FEM. *Journal of Material Science and Technology*, 2011, 27(12): 1178-1184.
- [2] Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. *China aeronautical materials handbook*. Beijing: Standards Press of China, 2002: 232-359. (in Chinese)
《中国航空材料手册》编辑委员会. *航空工程材料手册*. 北京: 中国标准出版社, 2002: 232-359.
- [3] Wang Z T, Zhang S H, Cheng M, et al. Kinematics and dynamics model of GH4169 alloy for thermal deformation. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17(7): 75-78.
- [4] Thomas A, El-Wahabi M, Cabrera J M, et al. High temperature deformation of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1-3): 469-472.
- [5] Zhang J M, Gao Z Y, Zhuang J Y, et al. Strain-rate hardening behavior of superalloy IN718. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 70(1-3): 252-257.
- [6] Ning Y Q, Fub M W, Chen X. Hot deformation behavior of GH4169 superalloy associated with stick δ phase dissolution during isothermal compression process. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 540: 164-173.
- [7] Li M Q, Yao X Y, Luo J, et al. Study of flow stress model of the nickel-based superalloy GH4169 at high temperature deformation. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, 43(9): 937-942. (in Chinese)
李森泉, 姚晓燕, 罗皎, 等. 镍基高温合金 GH4169 高温变形流动应力模型研究. *金属学报*, 2007, 43(9): 937-942.
- [8] Li M Q, Wang X J, Su S B, et al. Deformation behavior and processing map of the nickel-based superalloy GH4169 in the isothermal compression. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(5): 1867-1870. (in Chinese)
李森泉, 王小津, 苏少博, 等. GH4169 合金塑性变形行为及加工图. *中国机械工程*, 2008, 19(5): 1867-1870.
- [9] Du J H, Zhuang J Y, Deng Q, et al. Impact property of alloy GH4169 at low temperature. *Journal of Iron and Steel Research*, 1998, 10(1): 31-33. (in Chinese)
杜金辉, 庄景云, 邓群, 等. GH4169 合金的低温冲击性能. *钢铁研究学报*, 1998, 10(1): 31-33.
- [10] Wei H L, Yang X G, Yu H C. Constitutive modeling and parameter identification of mechanical behavior for GH4169 alloy at high temperature. *Journal of Materials Engineering*, 2005(4): 42-45. (in Chinese)
魏洪亮, 杨晓光, 于慧臣. GH4169 合金高温力学行为本构建模及参数识别. *材料工程*, 2005(4): 42-45.
- [11] Cao M H, Chen G S, Zhou D H, et al. Influences of deformation speed and grain size on high temperature properties and microstructures of superalloy GH4169. *Journal of Iron and Steel Research*, 2003, 15(7): 361-365. (in Chinese)
曹美华, 陈国胜, 周奠华, 等. 变形速度及晶粒度对 GH4169 合金高温拉伸性能和组织的影响. *钢铁研究学报*, 2003, 15(7): 361-365.
- [12] Guo Y B, Tang Z P, Xu S L. A critical criterion for phase transformation considering both hydrostatic pressure and deviatoric stress effects. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2004, 25(4): 417-422. (in Chinese)

- 郭扬波, 唐志平, 徐松林. 一种考虑静水压力和偏应力共同作用的相变临界准则. 固体力学学报, 2004, 25(4): 417-422.
- [13] Pravenn K V U, Sastry G V S, Singh V. Work-hardening behavior of the Ni-Fe based superalloy IN718. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(1):65-78.
- [14] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metal subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the Seventh Symposium on Ballistics. The Hague, The Netherlands, 1983; 541-547.
- [15] Chen G, Chen Z F, Tao J L, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 541-546. (in Chinese)
- 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45 钢动态塑性本构参量与验证. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 541-546.

作者简介:

王涛 男, 博士研究生, 副教授. 主要研究方向: 金属切削机理, 机加工表面完整性, 有限元数值分析。

Tel: 029-88493929

E-mail: wangt0415@126.com

Experimental Study of Constitutive Relationship of Superalloy GH4169 Under High Strain Rates

WANG Tao^{*}, CHEN Guoding, JU Jiangtao

School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: Finite element numerical simulation of the cutting of superalloy GH4169 is based on its constitutive model, which describes the relationship between stress and strain under high strain rates. In this paper, the constitutive relationship of superalloy GH4169 with temperature in the range from room temperature to 1 000 °C and strain rates in the range of 2 000-10 000 s⁻¹ is studied by experiments. The results show that the relationship between flow stress and plastic strain is close to linear relationship. Meanwhile temperature affects the degree and mode of the influence of strain rate on the constitutive relationship. According to the characteristics of flow stress curve of superalloy GH4169, the Johnson-Cook constitutive model is modified. Based on experimental results, the constitutive parameter values are determined by data fitting and a constitutive model of superalloy GH4169 is built. The work of this paper provides not only a basis for the numerical simulation of cutting superalloy GH4169, but also a useful reference for similar studies in future.

Key words: constitutive relationship; flow stress; high strain rate; GH4169; superalloys