

DOI: 10.7652/xjtuxb201307014

Ti-6Al-4V 合金的修正本构模型及其有限元仿真

刘丽娟^{1,2}, 吕明¹, 武文革²

(1. 太原理工大学机械工程学院, 030024, 太原; 2. 中北大学机械工程与自动化学院, 030051, 太原)

摘要: 为解决高温高压环境下 Johnson-Cook(J-C)本构模型不再适用于 Ti-6Al-4V 合金切削有限元仿真的问题,建立了基于重结晶的修正 J-C 本构模型,它可以体现出高速切削 Ti-6Al-4V 合金时的应力回落现象。首先,利用霍普金森压杆试验测得了 Ti-6Al-4V 的应力-应变数据,利用变量分离法拟合出修正 J-C 本构模型,该模型可以反映材料发生相变时应力-应变曲线的变化趋势,并能很好地逼近压杆试验数据曲线。然后,以 AdvantEdge FEM 有限元软件为平台,采用回退映射应力积分算法编写子程序,将该修正本构模型和 J-C 本构模型导入有限元系统,并对这 2 种本构模型进行有限元仿真。仿真结果对比表明:在相同的切削条件下,当温度超过 850℃ 时,修正本构模型体现出流动应力急剧下降的现象,下降幅度为 46.7%,而 J-C 本构模型的流动应力下降平缓,仅下降了 11%,说明修正本构模型更贴近高速切削 Ti-6Al-4V 合金时的高温与高冲击环境。

关键词: 本构方程;钛合金;霍普金森压杆试验;高速切削;有限元仿真

中图分类号: TG113.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)07-0073-07

An Improved Constitutive Model and Finite Element Simulation for Machining Ti-6Al-4V Alloy

LIU Lijuan^{1,2}, LÜ Ming¹, WU Wenge²

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automatization, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Johnson-Cook (J-C) material constitutive model is inaccurate for machining simulation of titanium alloy with high temperature and heavy impact. In this study, a modified constitutive model of Ti-6Al-4V alloy based on recrystallization was established considering the phenomenon of stress decline during machining. High-temperature SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) test was conducted to determine the true flow stress-strain relationship of Ti-6Al-4V alloy. With the SHPB test data, the modified constitutive model was developed by the variable separation method. The flow stress decreased significantly at the temperatures higher than the recrystallization temperature in the modified constitutive model, showing a good agreement with experimental results. A subroutine was then coded and embedded in the finite element simulation software AdvantEdge FEM with the return mapping stress integration algorithm. Finite element simulations for both J-C constitutive model and the modified constitutive model were performed. The result shows that the simulated stress decreases in J-C model and the modified model at 850℃ by 11% and 46.7%, respectively, indicating the modified constitutive model is more

收稿日期: 2012-09-27。 作者简介: 刘丽娟(1975—),女,博士生;吕明(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975191);山西省重点实验室开放基金资助项目(2007031007);山西省自然科学基金资助项目(2008011056)。

网络出版时间: 2013-04-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130415.0941.003.html>

suitable for the condition of high temperature and heavy impact in machining titanium alloy.

Keywords: constitutive model; titanium alloy; split Hopkinson pressure bar (SHPB); high speed machining; finite element simulation

通常,材料在高变形速率下的力学性能不同于准静态载荷下的性能,大部分金属材料的流动应力随着应变率的增加而增加,表现出应变速率硬化效应,同时材料特性与应变速率的依赖关系受材料使用环境温度的影响。不同材料的本构模型是不同的,即使是同一种材料,因处理工艺的不同,其本构模型也不尽相同,因此,确定材料在高温、高应变速率和大应变条件下的力学行为,并在此条件下建立本构模型,对切削仿真有重要的意义。

近年来,各国的研究学者已经利用各种试验方法发展了多种切削变形本构模型,以期尽可能准确地描述金属材料的切削变形特性。使用较多的材料本构模型有 1983 年的 Johnson-Cook (J-C) 模型、1996 年的 Baumann-Chiesa-Johnson (BCJ) 模型和 2001 年的 Nemat-Nasser 模型等^[1-3]。Zerilli-Armstrong 本构模型是基于材料微观结构的位错力学模型,考虑了溶质和晶粒尺寸对本构的影响^[4]。Calamaz 和 Özel 等人研究了考虑应变软化现象的本构模型,并应用于切屑与刀具磨损等方面^[5-6]。国内方面对本构模型的研究也有很大的进展:程国强等在 J-C 模型中增加了软化项来反映材料的损伤^[7];彭建祥等对在不同温度、不同应变率下钽的应力应变进行了研究,提出了修正的 Zerilli-Armstrong 模型^[8];邹静等建立了多维热力学本构模型^[9];李海涛等结合 Tanaka 的相变理论,提出了形状记忆合金的两相混合本构模型^[10]。

以上本构模型的研究均是在考虑材料特性的基础上,从不同的角度来体现材料本构,但均没有考虑到材料在达到重结晶温度时产生的应力剧烈下降现象。本文在 J-C 本构模型的基础上,考虑 Ti-6Al-4V 合金在高速切削时会产生高温的特点,建立了基于重结晶的 Ti-6Al-4V 修正 J-C 本构模型,用来反映高速切削 Ti-6Al-4V 合金时的应力回落现象。

1 试验方法

高速切削过程中应变率高达 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$,由于高温、高压的耦合作用,材料在冲击载荷作用下表现出与静态或准静态时不同的力学特性,只有动态力学性能才能真实反映材料变形时的实际性能,故采用霍普金森压杆(SHPB)试验较适宜^[11]。

1.1 试验原理

分离式霍普金森压杆试验装置示意图如图 1 所示。压杆的直径为 14 mm,子弹、入射杆、透射杆的长度分别为 200、400 和 400 mm。入射杆、透射杆与枪管保持同轴,试样夹在入射杆与透射杆之间。子弹通过空气动力枪发射,光传感器向示波器发送速度信息,压杆上的应变信号经由超动态应变仪放大,并由瞬态波型存储器采集记录。

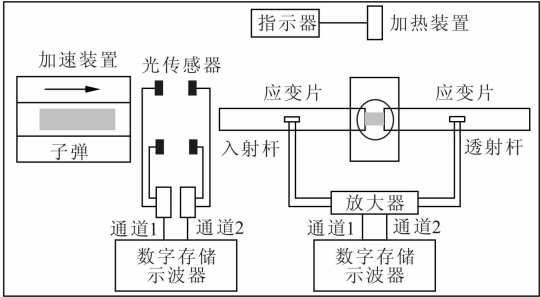


图 1 SHPB 试验装置示意图

SHPB 试验建立在两个假设之上:一个是平面假设,指压杆在变形时横截面保持为平面,沿截面只有均匀分布的轴向应力;另一个是均匀性假设,即只要加载波脉冲的延续时间足够长,试样的长度相对加载波形足够短,就可以近似认为试样中的应力是均匀的。当子弹以一定速度撞击入射杆时,在入射杆中产生一入射波脉冲 ϵ_i ,该脉冲以弹性波速向前传播,传到试样处使试样受高速压缩发生塑性变形,在透射杆中产生一透射脉冲 ϵ_t ,同时在入射杆中又反射了一个反射应力脉冲 ϵ_r 。入射波脉冲 ϵ_i 、反射波脉冲 ϵ_r 和透射波脉冲 ϵ_t 经贴在入射杆与透射杆上的应变片采集,由 Tektronix 示波器输出波形。

1.2 试验条件

试验所用材料为 Ti-6Al-4V 合金,其物理性质参数如表 1 所示。

表 1 Ti-6Al-4V 合金的物理性质参数

密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	热导率/ $W \cdot$ $(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	强度极限/ MPa	延伸 率/%
430	1 668	7.3	950	14.0
屈服极 限/MPa	弹性模 量/GPa	泊松比	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	
820	113.8	0.342	526	

本试验的最高应变率为 $8\,500\text{ s}^{-1}$,最高温度为 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试样分成 4 组,每组 5 个试样: $\Phi 8\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 组; $\Phi 7\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ 组; $\Phi 6\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 组; $\Phi 8\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 线切割组。前 3 组为切削加工试样,第 4 组为直接线切割试样,均取不同温度和应变率下试验结果的平均值。对于线切割试样,除进行压杆试验外还对其进行金相分析,发现线切割时产生的高温使钛合金发生了相变,导致其硬度下降,在相同的应变率与温度下,其流动应力曲线比其他试样下降了 400 MPa 左右。

2 试验结果及分析

图 2 为 SHPB 试验拟合的 Ti-6Al-4V 机加工试样的应力-应变曲线,其温度范围从室温 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 到 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变率为 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 。可以看出,随着温度的升高,Ti-6Al-4V 的流动应力明显降低,表现出显著的热软化效应,同时材料的塑性提高,应变硬化有所降低。

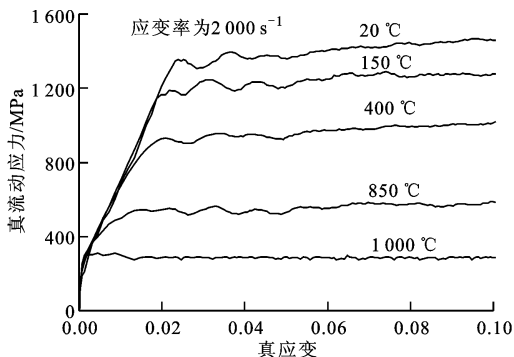


图 2 Ti-6Al-4V 机加工试样的应力-应变曲线

图 3 为线切割试样在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变率为 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 时的应力-应变曲线。与图 2 中 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所对应的曲线进行比较可以发现,线切割试样由于加工时的高温导致材料发生相变,使硬度显著下降,体现在应力-应变曲线中就是屈服应力明显降低,之后的应力趋

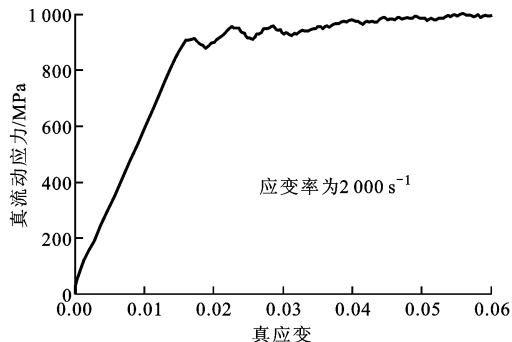


图 3 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Ti-6Al-4V 线切割试样的应力-应变曲线

势与机加工试样一致,但是真实流动应力值整体下降了 1 个数量级。

3 本构模型

3.1 J-C 本构模型

在高应变速率、高温条件下,本构方程一般采用 J-C 本构模型

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \left(\ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考塑性应变率; T_r 为室温; T_m 为材料的熔点温度。

J-C 本构方程中的 5 个参数 A 、 B 、 n 、 C 和 m 描述材料的塑性变形程度,其中 A 为室温下的原始屈服强度, B 为应变强化系数, C 反映应变率敏感度, n 反映应变硬化效应, m 反映热软化效应。

3.2 考虑 Ti-6Al-4V 合金重结晶的材料本构方程

3.2.1 修正的材料本构方程 当材料温度高于它的再结晶温度时将会发生材料的相变。考虑重结晶的本构方程最初见于文献[12],是在 J-C 本构方程的基础上添加了一项影响因子,用来反映材料在高温发生相变时应力-应变曲线的变化趋势。在此基础上,本文针对 Ti-6Al-4V 合金的高速切削,提出考虑重结晶的修正 J-C 本构方程如下

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \left(\ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \left\{ 1 - \left[1 - \frac{(\sigma_f)_{bc}}{(\sigma_f)_{ac}} \right] \text{fix} \left(\frac{T}{T_c} \right) \right\}^{-1} \quad (2)$$

式中: $(\sigma_f)_{bc}$ 为重结晶之前的流动应力; $(\sigma_f)_{ac}$ 为重结晶之后的流动应力; T_c 为重结晶温度; $\text{fix}(T/T_c)$ 是一个关于温度的取整函数。

Ti-6Al-4V 合金的熔点温度为 $1\,668\text{ }^{\circ}\text{C}$,其切削温度最高不会超过它的熔点,即 (T/T_c) 的值最大不会超过 1.68。选用取整函数 $\text{fix}(T/T_c)$ 时,若 $T < T_c$,则 $\text{fix}(T/T_c) = 0$,此时式(2)的修正本构相当于未添加重结晶软化项;若 $T > T_c$,则 $\text{fix}(T/T_c) = 1$,这时在 J-C 本构方程的基础上增加了重结晶前、后的应力比这一项影响因素,此时的修正本构方程为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \left(\ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \frac{(\sigma_f)_{ac}}{(\sigma_f)_{bc}} \quad (3)$$

Ti-6Al-4V 的重结晶温度为 $(995 \pm 15)\text{ }^{\circ}\text{C}$,在这

个温度下钛合金由 $\alpha+\beta$ 相变成了 β 相。由应力-应变曲线(图2)中选取应变为0.1时的一组流动应力数据,见表2。可以看出,流动应力随着温度的升高而下降,特别是当温度在重结晶温度附近时,流动应力急剧下降,而过了重结晶温度后应力变化趋于缓慢。可知: $(\sigma_f)_{ac} = \sigma_{1\,000\,^\circ\text{C}} = 298.3\text{ MPa}$; $(\sigma_f)_{bc} = \sigma_{950\,^\circ\text{C}} = 437.6\text{ MPa}$ 。

表2 应变为0.1时不同温度对应的流动应力比较

温度/ $^\circ\text{C}$	150	600	850	900
流动应力/MPa	1 186.6	708.4	593.2	555.3
温度/ $^\circ\text{C}$	950	1 000	1 100	
流动应力/MPa	437.6	298.3	218.6	

考虑重结晶的 Ti-6Al-4V 修正 J-C 本构模型如下

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \left(\ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \left[1 + 0.47 \text{fix} \left(\frac{T}{T_c} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

3.2.2 用变量分离法确定模型参数 首先,忽略应变率强化效应和热软化的影响,用准静态 $\dot{\epsilon} = 0.001\text{ s}^{-1}$ 、 $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的数据来拟合参数 A 、 B 和 n ,则式(4)中的

$$\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] = 1, \quad \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] = 1$$

从而有

$$\sigma = A + B\epsilon^n \quad (5)$$

式中: $A = \sigma_s$, 为常温($20\text{ }^\circ\text{C}$)且 $\dot{\epsilon} = 0.001\text{ s}^{-1}$ 时的静态屈服应力,这里测得 $A = 923.2\text{ MPa}$ 。

对式(5)两边求对数,有

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \epsilon$$

令 $Y = \ln(\sigma - A)$, $\ln B = D$, $X = \ln \epsilon$, 式(5)可进一步简化为: $Y = nX + D$ 。

选取应力-应变曲线上的点对线性方程进行回归计算,得出 $n = 0.466$, $\ln(B/\text{MPa}) = 6.512\,5$, 即 $B = 673.54\text{ MPa}$ 。

计算材料的应变率强化系数 C 需要常温下不同应变率对应的应力-应变数据。这里分别选取应变率为 $1\,000$ 、 $2\,000$ 、 $3\,500$ 、 $5\,600$ 、 $6\,500$ 、 $7\,800$ 和 $8\,500\text{ s}^{-1}$, 应变为 0.03 时所对应的应力值(见图4)进行拟合,不考虑温升效应,可得

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]$$

即

$$\frac{\sigma}{A + B\epsilon^n} = 1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad (6)$$

$(A + B\epsilon^n)$ 取的是应变率为 0.001 s^{-1} 下的流动

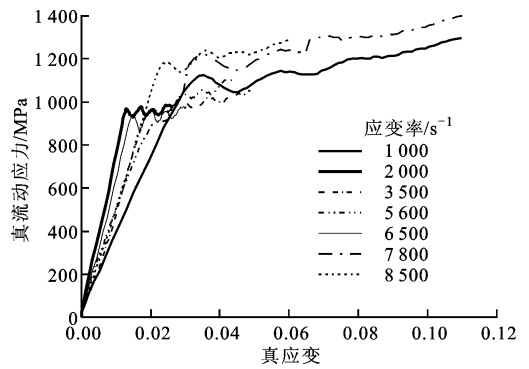


图4 常温下不同应变率对应的应力-应变曲线

应力。式(6)中的 C 可以看作是一直线的斜率,拟合后得 $C = 0.016\,7$ 。

接下来要确定热软化系数,用于表征温度对材料流动应力的影响。由试验结果可以看出,随着温度的升高,材料的流动应力随之降低。拟合热软化系数时要选择固定的应变与应变率,即忽略应变硬化和应变率强化的影响

$$\ln \left[1 - \frac{\sigma}{(A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]} \right] = m \ln \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \quad (7)$$

$$\ln \left[1 - \frac{\sigma}{(A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]} \right] = Y,$$

$\ln \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) = X$, 则式(7)可变换为 $Y = mX$, m 为这条直线的斜率。选取 150 、 400 、 600 、 850 、 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 时的应力值对线性方程(7)进行拟合,得到 $m = 0.73$ 。

经过计算,考虑重结晶的 Ti-6Al-4V 修正 J-C 本构方程为

$$\sigma = (923.2 + 673.54\epsilon^{0.466}) \left[1 + 0.016\,7 \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^{0.73} \right] \left[1 + 0.47 \text{fix} \left(\frac{T}{T_c} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

也可写成如下形式

$$\sigma = \begin{cases} (923.2 + 673.54\epsilon^{0.466}) \left[1 + 0.016\,7 \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^{0.73} \right], & T < T_c \\ 0.68(923.2 + 673.54\epsilon^{0.466}) \left[1 + 0.016\,7 \times \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^{0.73} \right], & T > T_c \end{cases} \quad (9)$$

将各参数的值分别代入 J-C 本构方程和考虑重

结晶的 Ti-6Al-4V 修正 J-C 本构方程,并与 SHPB 试验数据进行比较,结果如图 5 所示。在 850℃ 以下时,J-C 本构方程可以较好地逼近 SHPB 试验所得到的应力-应变曲线,且与本文考虑重结晶的修正 J-C 本构方程的直线基本重合;当温度继续升高到 850 和 1 000℃ 时,J-C 本构方程与试验数据之间存在较大偏差,但本文的修正 J-C 本构方程仍可逼近 SHPB 试验曲线。J-C 本构方程产生这种偏差的原因是由于在 Ti-6Al-4V 到达重结晶温度时发生了相变,进而出现应变软化现象,导致流动应力急剧下降,而 J-C 本构方程没有考虑这一现象。

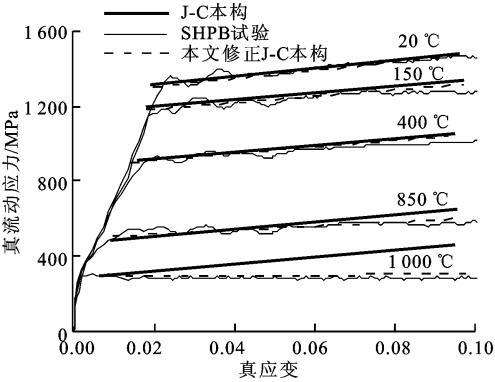


图 5 2 种本构方程与 SHPB 试验结果的比较

4 高速切削过程的数值模拟

4.1 子程序导入关键技术

有限元计算利用的是增量方法,屈服服从 Mises 条件,弹塑性体本构方程为

$$d\epsilon_{ij} = (\frac{1}{3K}d\sigma_m\delta_{ij} + \frac{1}{2G}d\sigma'_{ij}) + \frac{3}{2}d\lambda \frac{d\epsilon^p_{ij}}{\sigma_s} \quad (10)$$

本文利用 Fortran 语言编制用户材料本构模型^[13],利用返回映射法更新应力和其他状态变量,使用 AdvantEdge FEM 提供一个名为 mat_user 的接口子程序,将修正的本构模型导入 AdvantEdge FEM。编制的 mat_user.f 文件经编译生成一个自定义 UserMat.dll 文件,AdvantEdge FEM 引擎使用此文件来计算材料的状态。在运行 AdvantEdge FEM 时,该子程序被编译为一个动态链接库,运行程序时动态载入。子程序计算材料的应力变化,并将柯西应力返回到 AdvantEdge FEM。在 projectname-wp.twm 文件中指定材料参数,AdvantEdge FEM 引擎输出 project.tec 文件中用户自定义的状态变量。在 projectname-wp.twm 文件的顶部,“MODELTYPE”必须改变成“USER-DEFINED-MATERIAL”,以调用用户定义的材料参数。自旋

张量 $W\sigma^n + \sigma^n W$ 应用于子程序外部。从变形梯度 $eps(3,3)$ 计算更新 Cauchy 应力 σ^{n+1} 并返回到 sig(3,3)。流程图如图 6 所示。

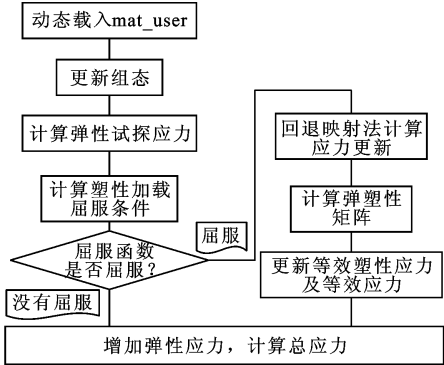


图 6 子程序流程图

4.2 高速切削过程的数值模拟^[14]

试验内容:高速铣削 Ti-6Al-4V 合金。

试验条件:铣削深度 $a_p=0.2\text{ mm}$,铣削速度 $v_c=100\text{ m/min}$,每齿进给量 $f_z=0.1\text{ mm}$,铣削宽度 $a_e=11\text{ mm}$ 。

模拟软件:AdvantEdge FEM。

分别从 J-C 本构模型和本文考虑重结晶的 Ti-6Al-4V 修正 J-C 本构模型中提取数据,其中每组数据要求应变率均为 $1\,000\text{ s}^{-1}$,应变均为 0.2,得到温度-应力曲线,如图 7 所示。从图中可以看出:J-C 本构模型与本文的修正 J-C 本构模型在达到重结晶温度(850℃ 左右)之前吻合良好;在到达重结晶温度时,由于 Ti-6Al-4V 出现了相变,导致流动应力急剧下降,但是 J-C 本构模型没有体现这一现象,而本文的修正 J-C 本构模型则很好地体现了在到达重结晶温度时的应力软化现象,正确地显示出 Ti-6Al-4V 合金在高速切削时的材料性质,更符合加工的实际情况。

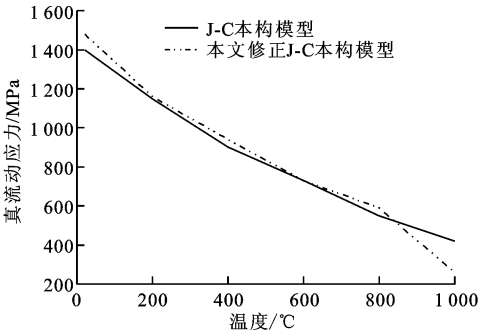


图 7 2 种本构模型的温度-应力曲线对比图

图 8 为 950℃ 左右时 2 种本构模型的应力仿真图(图形重合),可以看出 Ti-6Al-4V 合金的应力在 450 MPa 左右。图 9 为温度到达 1 000℃ 时的应力

仿真图:图 9a 为 J-C 本构模型的应力仿真结果,可以看出应力没有明显变化,仍保持在 400 MPa 左右;图 9b 是本文考虑重结晶的修正 J-C 本构模型的应力仿真结果,可见在温度达到相变温度时,应力有一个明显的变化,从 450 MPa 左右迅速跌落至 240 MPa 左右。

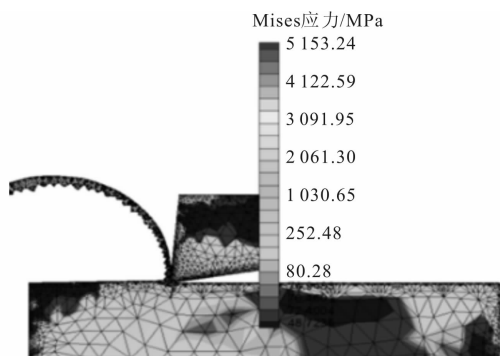
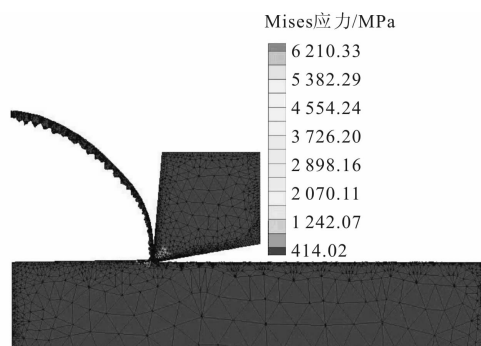
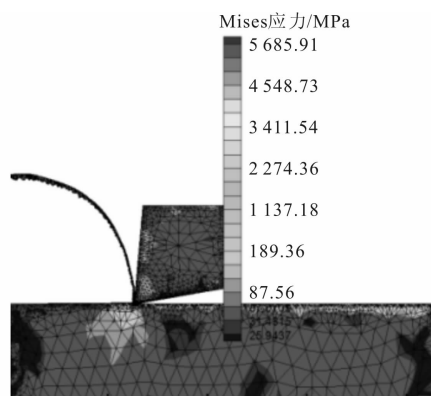


图 8 950℃左右时 2 种本构模型的应力有限元仿真结果



(a) J-C 本构模型的应力仿真



(b) 本文修正 J-C 本构模型的应力仿真

图 9 1 000℃左右时 2 种本构模型的应力有限元仿真结果

由以上的分析可知,本文提出的考虑重结晶的 Ti-6Al-4V 修正 J-C 本构模型更贴近 SHPB 试验所得的数据,能正确地显示出当 Ti-6Al-4V 合金的温度达到相变温度时出现的应力跌落现象。因此,本文的修正 J-C 本构方程更符合现实情况,更适合应用于高速切削生产实际中,可为生产中的参数选择、

温度控制、刀具选取等提供指导。

5 结 论

(1)对 4 组 Ti-6Al-4V 合金试样进行了 SHPB 试验,获得了应力-应变曲线。直接线切割试样的试验结果表明,当室温下应变小于 0.06 时,最大流动应力从 1 400 MPa 下降到 1 000 MPa 左右,证明高温时 Ti-6Al-4V 合金的相变导致了材料应力值的下降。

(2)利用 SHPB 试验的数据拟合出考虑重结晶的 Ti-6Al-4V 修正 J-C 本构模型,可反映出材料在高温发生相变时应力-应变曲线的变化趋势。

(3)利用 Fortran 语言编制了子程序,将本文的修正 J-C 本构模型导入 AdvantEdge FEM,进行数值模拟仿真,并与 J-C 本构模型的仿真结果进行了比较,证明在相同的切削条件下,当温度达到重结晶温度范围时,本文的修正 J-C 本构模型体现出在重结晶温度范围内流动应力急剧下降,从 450 MPa 下降到 240 MPa,下降了 46.7%,而 J-C 本构模型体现的流动应力下降较平缓,仅下降了 11%。

参考文献:

- [1] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]// Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic. Amsterdam, The Netherlands; The Hague, 1983: 541-547.
- [2] GUO Y B, WEN Q, WOODBURY K A. Dynamic material behavior modelling using internal state variable plasticity and its application in hard machining simulations [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(3): 749-759.
- [3] NEMAT-NASSER S. Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: experiments and modelling [J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(8): 425-439.
- [4] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation mechanics based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(5): 1816-1825.
- [5] CALAMAZ M, COUPARD D, GIROT F. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 2008, 48(3/4): 275-288.
- [6] ÖZEL T, SIMA M, SRIVASTAVA A K, et al. In-

- vestigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations [J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 77-82.
- [7] 程国强, 李守新. 金属材料在高应变率下的热粘塑性本构关系 [J]. *弹道学报*, 2004, 16(4): 18-22.
- CHENG Guoqiang, LI Shouxin. A thermo-viscoplastic constitutive model of metallic materials at high strain rates [J]. *Journal of Ballistics*, 2004, 16(4): 18-22.
- [8] 彭建祥, 李大红. 温度与应变率对钽流变应力的影响 [J]. *高压物理学报*, 2001, 15(2): 146-150.
- PENG Jianxiang, LI Dahong. The influence of temperature and strain rate on the flow stress of tantalum [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics* [J]. 2001, 15(2): 146-150.
- [9] 邹静, 钟伟芳. 形状记忆合金的多维本构关系 [J]. *固体力学学报*, 1999, 20(2): 171-176.
- ZOU Jing, ZHONG Weifang. The multi-dimensional constitutive relations of shape memory alloys [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1999, 20(2): 171-176.
- [10] 李海涛, 彭向和, 黄尚廉. 形状记忆合金的一种基于经典塑性理论的两相混合本构模型 [J]. *固体力学学报*, 2004, 25(1): 58-62.
- LI Haitao PENG Xianghe HUANG Shanglian. A conventional plasticity based two-phase constitutive model for shape memory alloys [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2004, 25(01): 58-62.
- [11] LINDHOLM U S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar [J]. *Mech Phys Solids*, 1964, 12(3): 17-35.
- [12] ANDRADE U R, MEYERS M A, VECCHIO K S, et al. Dynamic recrystallization in high-strain, high-strain-rate plastic deformation of copper [J]. *Acta Metall Mater*, 1994, 42(31): 83-95.
- [13] 杨曼娟. ABAQUS 用户子程序开发及应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [14] MARUSICH T D, ORTIZ M. Modelling and simulation of high-speed machining [J]. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 1995, 38(21): 3675-3694.

(编辑 葛赵青)

(上接第 61 页)

文方法对准双曲面齿轮的小轮进行实例分析,结果表明:与传统方法相比,缩短了齿轮的检测时间;与切平面近似法和圆柱面近似法相比,提高了近似曲面的精度,可以更准确地建立虚拟测量的数学模型,从而提高了评价结果的可信度。

参考文献:

- [1] AGMA. ANSI-AGMA 2009-B01 Bevel gear classification, tolerances and measuring methods [S]. Alexandria, USA: AGMA, 2001: 4-13.
- [2] GOCH G. Gear metrology [J]. *Annals of the CIRP*, 2003, 52(2): 659-695.
- [3] GUENTHER A. Evaluation of runout deviation at bevel gears based on pitch measurements [J]. *Annals of the CIRP*, 2006, 55(1): 539-542.
- [4] 石照耀, 左序涛, 林虎. 锥齿轮单项误差测量仪器的研制 [J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(9): 1163-1167.
- SHI Zhaoyao, ZUO Xutao, LIN Hu. Development of bevel gear deviations measuring machine [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(9): 1163-1167.
- [5] 齿轮手册编委会. 齿轮手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 苏智剑, 吴序堂, 毛世民, 等. 基于齿面参数化表示的准双曲面齿轮的设计 [J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(1): 17-20.
- SU Zhijian, WU Xutang, MAO Shimin, et al. Design of hypoid gear tooth surface represented by non-uniform rational B-spline polynomial [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(1): 17-20.
- [7] 陈维恒. 微分几何 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 176-181.
- [8] 吴序堂. 齿轮啮合原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 195-196.

(编辑 管咏梅)