

基于动态材料模型的材料热加工工艺优化方法

鲁世强¹, 李 鑫¹, 王克鲁¹, 董显娟¹, 李臻熙², 曹春晓²

(1. 南昌航空工业学院 材料科学与工程学院, 南昌 330063;

2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 基于动态材料模型理论的加工图技术被广泛用于设计和优化材料热加工工艺中, 以实现微观组织和性能的控制。综述动态材料模型的相关理论, 介绍基于动态材料模型的稳定变形区和失稳变形区的各种判据及其物理含义, 比较和分析各种判据的应用情况及其有效性, 对判据在某些情况下预测失败的原因进行分析, 指出利用各种判据优化材料热加工工艺时的选用原则。

关键词: 动态材料模型; 加工图; 变形稳定区判据; 变形失稳区判据; 工艺优化

中图分类号: TG 316; TG 312

文献标识码: A

Optimizing approach of materials hot working processes based on dynamic material model

LU Shi-qiang¹, LI Xin¹, WANG Ke-lu¹, DONG Xian-juan¹, LI Zhen-xi², CAO Chun-xiao²

(1. School of Materials Science and Engineering,

Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330063, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 10095, China)

Abstract: The approach of processing maps based on dynamic material model (DMM) theory was widely applied to design and optimize materials hot working processes with the aim of realizing the control of microstructures and properties of hot worked materials. The theories with respect to DMM were reviewed, and various criteria for the occurrence of flow stabilities and instabilities as well as their physical meaning were introduced respectively. The application and validity of various criteria were compared and analyzed, and the reason for predicting failure of criteria under some situations were analyzed. In addition, the selecting principle of the criteria was proposed to precisely optimize materials hot working processes.

Key words: dynamic material model; processing map; deformation stability criterion; deformation instability criterion; hot working process optimization

近年来, 基于动态材料模型的加工图技术被广泛地应用于设计许多材料的近净成形热加工工艺。利用加工图不仅可以优化加工性能, 还可以确定不同微观变形机制所在的加工区域, 避开失稳变形区域, 获得所需要的组织和性能, 并且使得热加工重复性好, 实现组织与性能的控制。

Frost 和 Ashby^[1]率先利用变形机制图来描述材料对加工工艺参数的响应, 该加工图本质上适用于低应变速率下的蠕变机制。但是一般的金属塑性加工在比较高的应变速率下进行, 因而不适合用 Ashby 图进行描述。Raj^[2]扩展了 Ashby 图的概念, 利用原子理论与基本参数相结合, 建立了 Raj 加工图, 该加工图标示

出了空洞、楔形裂纹、绝热剪切带三种有害的损伤变形机制和动态再结晶这种有益的变形机制所在的热力参数区域。但 Raj 加工图的建立过程涉及很多材料参数, 对纯金属和简单合金来说, 这些参数的数据可以获得, 而对于复杂的合金来说, 不但这些材料参数数据很难获得, 而且合金对加工参数的响应也不容易用简单的机制模型来描述。另外, Raj 图仅给出了比较大的安全加工范围, 并没有给出获得内禀可加工性的最佳工艺参数。为了弥补原子模型不能适合商业化合金的缺点, 同时也为了将材料本构变形行为明确地引入到有限元流变分析中, Gegel 提出了动态材料模型 (DMM) 概念^[3], 随后 Prasad^[2,4]、Gegel^[4-6]、Malas^[6-7]、Alexander 等^[8]对 DMM 理论又进行了进一步完善和发展, 对 DMM 中各参数的物理意义进行了解释, 在提出功率耗散图概念的基础上, 又推导出稳定变形区和失稳变形区的判据, 建立失稳图, 将功率耗散图与失稳图叠加便形成了加工图。

由于加工图不仅直观地反映出稳定变形区和失稳变形区, 而且加工图中呈现的不同区域对应着不同的变形机理, 因而对应着不同的组织和性能。因此, 基于 DMM 理论的加工图可以用来优化材料变形热力参数范围, 这对避免热加工缺陷产生, 节省工艺设计时间, 获得组织性能优良且稳定一致的加工件提供了一种理论研究方法和手段。目前, 国内外许多学者陆续采用该理论和方法来研究钛合金、锆合金、钢、铝合金等材料的热加工工艺优化和组织性能控制。本文作者对 DMM 的相关理论及其应用效果和使用原则等问题进行了综述和分析。

1 动态材料模型相关理论

DMM 方法的理论基础是大塑性流变连续介质力学(这里材料作为能量耗散体, 而不是存储体)、物理系统模型(原来用于电、磁等系统的功率耗散量和功率耗散协量等概念引入冶金系统)、不可逆热力学^[9]。DMM 方法建立在系统工程概念的基础上^[10], 以挤压过程为例, 系统包括功率源(液压机)、功率储存体(挤压筒、挤压杆、模具等工具)和功率耗散体(工件材料)3 部分。液压机产生功率传递给工具, 工具储存功率并通过润滑界面传递给工件。本构方程体现了变形工件的本质特征, 因为它描述了工件所吸收能量的转变方式, 即通常以热和微观组织演化进行耗散。

在给定温度和应变下, 材料对应变速率的响应可用以下动力学本构方程来表示

$$\bar{\sigma} = K \dot{\bar{\epsilon}}^m \quad (1)$$

式中 K 为常数; m 为应变速率敏感指数, 其定义为

$$m = \left[\frac{\partial(\ln \bar{\sigma})}{\partial(\ln \dot{\bar{\epsilon}})} \right]_{\bar{\epsilon}, T} \quad (2)$$

工件吸收来自工具的功率 P 在塑性变形中通过以下两个方面进行耗散

$$P = \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} = G + J = \int_0^{\dot{\bar{\epsilon}}} \bar{\sigma} d\dot{\bar{\epsilon}} + \int_0^{\bar{\sigma}} \dot{\bar{\epsilon}} d\bar{\sigma} \quad (3)$$

式中 $G = \int_0^{\dot{\bar{\epsilon}}} \bar{\sigma} d\dot{\bar{\epsilon}}$ 称为功率耗散量, 表示由于塑性变形引起的功率耗散, 它转化为粘塑性热; $J = \int_0^{\bar{\sigma}} \dot{\bar{\epsilon}} d\bar{\sigma}$ 称为功率耗散协量, 表示在变形过程中与组织演化, 如动态回复、动态再结晶、内部裂纹(空穴形成和楔形裂纹)、位错、动态条件下的相和粒子的长大、针状组织的动态球化、相变等有关的功率耗散。图 1 所示为各种应力-应变速率曲线时的系统输入功率分配示意图。由于

$$\left[\frac{\partial J}{\partial G} \right]_{\bar{\epsilon}, T} = \left[\frac{\dot{\bar{\epsilon}} \partial \bar{\sigma}}{\bar{\sigma} \partial \dot{\bar{\epsilon}}} \right]_{\bar{\epsilon}, T} = \left[\frac{\partial(\ln \bar{\sigma})}{\partial(\ln \dot{\bar{\epsilon}})} \right]_{\bar{\epsilon}, T} = m \quad (4)$$

因此应变速率敏感指数 m 决定了 P 在 G 和 J 二者之间的分配。对于图 1(c)所示的理想线性耗散来说, J 具有最大值 $J_{\max} = \frac{P}{2}$ 。定义 $\eta = \frac{J}{J_{\max}}$ 为功率耗散效率, 则

$$\eta = 2 \left(1 - \frac{1}{\bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}}} \int_0^{\dot{\bar{\epsilon}}} \bar{\sigma} d\dot{\bar{\epsilon}} \right) \quad (5)$$

当 m 为常数时可求得

$$\eta = \frac{2m}{1+m} \quad (6)$$

η 为一个无量纲的参数, 它随应变速率和温度的变化便形成了功率耗散图。功率耗散图上的等值线表示与材料的微观结构演化相关的相对熵产率^[11], 由于它们表示了热变形中微观结构的变化, 所以也被称为微观组织轨迹线^[12]。

根据热力学第二定律, 一切非孤立体系的熵变 dS 由熵流和熵产生两部分组成, 即

$$dS = d_e S + d_i S \quad (7)$$

式中 熵流 $d_e S$ 表示由体系与环境进行物质和能量交换而产生的熵变; 熵产生 $d_i S$ 表示由体系本身不可逆过程产生的熵变。在非平衡态的不可逆过程中, 如果^[13]

$$-d_e S > d_i S \quad (8)$$

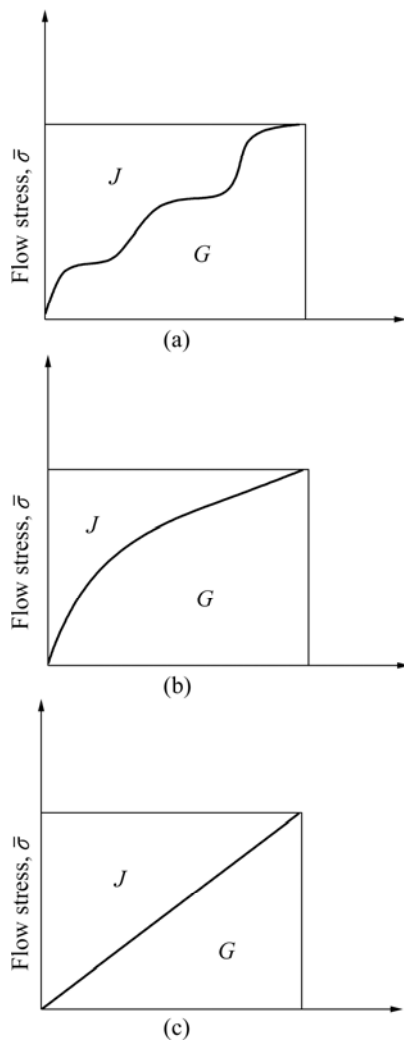


图1 系统输入功率的分配

Fig.1 Distribution of power put in material system: (a) Non-linear energy dissipator when m is not a constant; (b) Non-linear energy dissipator when m is a constant except 1; (c) Ideal linear energy dissipator when m is 1

若式(8)成立, 则体系的总熵变 $dS < 0$, 就是使系统由初态演变为熵较低的有序状态。而且, 如果系统已处于这种有序状态, 只要使 $d_e S = -d_i S < 0$ ^[14], 就可使 $dS = 0$, 即维持这种有序结构。这就是说, 虽然这时系统内存在着不可逆过程, 但系统可以维持较低熵值不变, 也就是维持较有序的稳态, 这个稳态不是平衡态, 而是非平衡的稳态, 显然可以通过控制各种负熵流来获得一系列不同的稳态。文献[15]表明, 在平衡态附近, 发展过程主要表现为趋向平衡态或与平衡态有类似行为的非平衡定态, 并总是伴随着无序的增加和宏观结构的破坏; 而在远离平衡的条件下, 非平衡定态可以变得不稳定, 发展过程可以经受突变, 并导致宏观结构的形成和宏观有序的增加,

形成耗散结构。文献[16-17]指出, 不仅开放系统可以形成耗散结构, 封闭系统由于与外界具有能量交换, 也可以形成耗散结构。

金属塑性变形中的工件从热力学观点可看作封闭系统, 它本身内部进行着不可逆变化(组织演变和热传递), 又与外部设备进行能量交换, 是远离平衡态的非线性的不可逆过程, 因此可以形成耗散结构。文献[10]指出, 以超熵作为 Liapunov 函数, 当超熵对时间的导数(超熵产生)非负时, 材料稳定流动, Liapunov 函数的解决定不稳定性的程度。功率耗散图可以解释为描述超熵产生, 功率耗散图上显示出的同心的 η 等值线区域对应于耗散结构。由于这些区域是确定的, 所以在塑性加工条件下这些区域内微观组织的发展可以被控制和重复产生。因此, 为了控制工件微观组织并确保重复性生产, 优化的热加工工艺应在这些确定性的区域内选择。这些区域有的对应所需要的组织和性能, 有的则对应有害的组织和性能。显然, 最优的热加工要选择前者的区域进行。

不可逆过程通常是由某种广义速率(通量) \dot{x}_K 和相应的广义力 X_K^i 来表征, 二者通过耗散函数 D 联系起来^[5]。结合不可逆热力学和大塑性流变连续介质力学, 可以证明^[5, 10]

$$\frac{dD}{dR} > \frac{D}{R} \quad (9)$$

式中 $R^2 = (\dot{x}_K \dot{x}_K)$, $D = X_K^i \dot{x}_K$ 。在塑性加工中, 广义的速率和力分别指应变速率和流动应力, 二者通过本构方程式(1)联系起来。

由式(7)可知, 为了从热力学上保证工件稳定变形, 确保工件通过冶金过程和粘塑性热产生的熵大于等于外来负熵流的绝对值($dS \geq 0$)是必要的^[5-6], 即

$$\frac{\partial D}{\partial T} = \frac{\partial P}{\partial T} \Big|_{\dot{\epsilon}} \geq \frac{P}{T} \quad (10)$$

设式(10)的左边为 \dot{S}_{sys} , 右边为 \dot{S}_{app} , 定义 $s = \dot{S}_{\text{sys}} / \dot{S}_{\text{app}}$ 为流动应力对温度敏感性参数, 则可推导出

$$s = -\frac{1}{T} \frac{\partial \lg \bar{\sigma}}{\partial (1/T)} \Big|_{\dot{\epsilon}} \geq 1 \quad (11)$$

2 失稳变形区和稳定变形区判据

一般认为金属热加工中的动态再结晶是最好的变形机制, 在这个过程中材料可以消除缺陷, 重建微观组织结构, 而动态回复相对差些。超塑性变形则不能

重建微观组织结构, 而且当应变速率稍大时还会在三叉晶界出现裂纹和空洞^[10]。其他的微观机制则对热加工不利, 如动态应变失效、裂纹、空洞、绝热剪切带等。为了避免产生这些缺陷, 减少获取安全热加工参数的工作量, 国外许多学者基于 DMM 理论发展了一些确定失稳变形区或稳定变形区的判据。

2.1 Gegel 稳定区判据

Gegel^[5-6]以热力学第二定律为基础, 结合 Liapunov 函数稳定性理论, 分别构造 Liapunov 函数 $V_1 = \eta \lg \dot{\varepsilon}$ 和 $V_2 = s \lg \dot{\varepsilon}$, 得到如下的稳定区判据

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial \lg \dot{\varepsilon}} < 0 & 0 < m \leq 1 \\ \frac{\partial s}{\partial \lg \dot{\varepsilon}} < 0 & s \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

2.2 Malas 稳定区判据

Malas^[7]认为 m 与 η 一样, 也反映了功率 J 和 G 之间的分配情况, 并且满足 Liapunov 函数稳定性理论, 故在 Gegel 判据的基础上提出用 m 代替 η , 获得了另外一组稳定区判据

$$\begin{cases} \frac{\partial m}{\partial \lg \dot{\varepsilon}} < 0 & 0 < m \leq 1 \\ \frac{\partial s}{\partial \lg \dot{\varepsilon}} < 0 & s \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

2.3 Prasad 失稳区判据

目前在采用 DMM 方法来优化材料热加工问题时, 稳定性判据式(12)和(13)较少使用, 多数学者采用 Prasad^[10]建立的不稳定性判据。这种判据以应用于大塑性流变的不可逆热力学的极值原理为基础, 当满足式(9)时, 材料稳定变形, 相反, 如果式(14)成立, 则会出现流动失稳。

$$\frac{\partial D}{\partial R} < \frac{D}{R} \quad (14)$$

由于耗散协量与冶金过程的组织演化有关, 于是 Prasad 用 J 代替 D 得到

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{\varepsilon}} < \frac{J}{\dot{\varepsilon}} \quad (15)$$

由此可推导出失稳区域判据为

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (16)$$

2.4 Murty 失稳区和稳定区判据

Murty^[18]判据是从 J 的定义出发推导出的。由于 $J = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \dot{\sigma} d\dot{\varepsilon}$, 所以

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{\varepsilon}} = \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} \frac{\partial \ln \dot{\sigma}}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} = m \dot{\sigma} \quad (17)$$

由式(5)得

$$\frac{J}{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \eta \dot{\sigma} \quad (18)$$

结合式(15)可得

$$2m < \eta \quad (19)$$

当全部功率转化为粘塑性热, 即 $J=0$ 时, $\eta=0$, 这时就出现绝热剪切引起的不稳定塑性流动。因此, 结合式(19)可知, 当式(20)的条件满足时, 便会出现流动失稳。

$$2m < \eta \text{ 或 } \eta \leq 0 \quad (20)$$

或者当式(21)的条件满足时, 材料稳定流动。

$$0 < \eta < 2m \text{ 且 } 0 < m \leq 1 \quad (21)$$

2.5 Semiatin 失稳区判据

Semiatin 和 Lahoti^[19]把平面压缩下的流动软化和材料性能通过参数 α 联系起来

$$\alpha = -\frac{\gamma}{m} \quad (22)$$

式中 $\gamma = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \varepsilon}$ 为流动软化速率。在钛和钛合金微观

组织观察的基础上, Semiatin 认为当式(23)成立时, 钛合金材料出现局部流变。

$$\alpha > 5 \quad (23)$$

3 判据的物理意义

对于判据式(12), Gegel^[5]认为 m 与连续效应或力学稳定性相关, 而 s 与材料或结构的稳定性相关。对判据式(13), Malas 认为 $m < 0$ 时会出现两种失稳现象, 即动态应变失效和以前存在的或新产生的微裂纹的扩展, 而 $m=1$ 对应玻璃态金属的牛顿流动的理想超塑性行为; $s \geq 1$ 是从热力学上考虑的, 要求系统内的净熵产率大于等于 0; 而 $\partial m / \partial \lg \dot{\varepsilon} < 0$ 和 $\partial s / \partial (\lg \dot{\varepsilon}) < 0$ 则是从系统的总能量的连续降低来考虑的。Malas 还认为, 高的 m 和 s 值有利于金属的稳定流动。对于 $0 < m$

≤ 1 , Prasad^[1]从位错角度来进行解释,认为在变形时耗散量 G 对应位错的产生,而耗散协量 J 则对应位错的消失,由于位错的消失率不可能大于位错的产生率,那么 J 就不可能大于 G ,因而 m 值小于等于 1。如果 m 等于 0,则工件不能通过冶金机制来耗散能量,而是通过位错的产生来“储存”能量。因此,对于稳定的粘塑性流动, m 值出现在 0 和 1 之间。Prasad^[1]还认为会出现 $m > 1$ 的情形时,材料称为“锁固体”,材料的流动应力不再遵循幂函数规律,其应力-应变速率的凹凸性会相反,当超过某一临界应变速率后流动应力急剧增加,变得几乎与应变和应变速率无关,这是由于声子和电子的牵引以及相对论效应限制了材料由位错运动引起的变形。判据式(16)的物理意义是,如果系统产生熵的速率小于外加熵的速率,则系统将产生局部流动导致流动失稳。Murty 认为,判据式(16)仅在 m 为常数时成立,当 m 不为常数,即随应变速率而变化时,判据(16)便是错误的。而判据式(20)和(21)对任何应力-应变速率曲线,即不管 m 是否为常数均成立。判据式(23)不是基于动态材料模型理论推导出来的,缺乏严密的理论依据,只是根据钛合金的实验观察而总结出的经验公式,因而没用明确的物理意义,适用范围较窄,对其它合金未必适用。

4 判据的应用及分析

Cavaliere^[20]采用 Gegel 判据研究了粒子强化铝基复合材料的热加工,利用扫描电镜观察到失稳区域的微观组织中出现粒子断裂和粒子与基体结合面之间出现孔洞现象。文献[21]中采用 Malas 判据研究了 TC11 钛合金在应变为 0.60 和 0.05 时的稳定区热力参数范围,并分别给出了对应这两个应变的最优加工温度和应变速率,该优化工艺参数与生产中已采用的工艺参数相吻合。文献[22]中也用 Malas 判据研究了不锈钢的热加工,通过计算和组织观察,发现在稳定区的激活能和晶粒大小的变化不大,组织稳定一致。文献[20-22]的研究结果表明,用 Gegel 判据和 Malas 判据确定的稳定区内组织和性能是优良的,而失稳区内则相反。这些应用结果表明,采用这两组判据来预测和优化材料热加工工艺还是比较有效和可靠的。

Prasad 等利用式(16)研究了多种合金材料的热加工和温加工,包括铁铝粉末冶金材料^[12]、钛合金^[23]、不锈钢^[24]、镍铬超合金^[25]、铜合金^[26]、锆合金^[27]等。Cavaliere 等^[28]使用 Prasad 判据研究了铝基复合材料的

热加工。文献[29-31]中则利用 Prasad 判据研究了 D₂ 钢、镁合金 AZ31B 及铝合金 2618 的热变形行为。所有这些研究结果表明,由该判据确定的变形稳定区和失稳区与组织检验结果是一致的。一般来说,高 η 值区域对应着最佳的加工性能区^[32],但在应用 Prasad 判据时也有例外。如,Prasad 等^[33]在研究 IMI685 钛合金时发现,在温度为 775~850 °C 和应变速率为 0.003~0.3 s⁻¹ 的区域对应的耗散效率在整个变形区域是最大的(高达 94%),但在该区域条件下变形却出现裂纹。Seshacharyulu 等^[34]在研究 Ti-6Al-4V 合金的加工图时发现,该合金的 η 最大值约为 58%左右,但在低温高应变速率变形时,也存在耗散效率为 47%却对应裂纹的区域。Venugopal 等^[24]在研究不锈钢 ALSi316L 时,也发现高耗散效率对应裂纹的情况。所有这些裂纹均出现在稳定区,且具有耗散效率变化比较快的特征。文献[24, 34]的裂纹均出现在高应变速率区域且沿着绝热剪切带方向约与应力轴线呈 45°。对此,文献[24]表明,宏观的绝热剪切变形及其所引起的裂纹主要与试样的几何形状(决定传热)和应力状态(决定最大切应力方向)及转化为热的功率耗散量 G 有关,而 Prasad 判据是与通过组织演变的耗散协量 J 有关,因此不能预测到这种裂纹的产生。文献[25]中则指出,能量转化为裂纹表面的自由能,这种方式比动态再结晶等方式耗散能量的效率更高。本文作者认为,上述高耗散效率区域出现裂纹也许与 η 值的计算按 m 为常数来处理有关,因为某些材料或变形条件下的应变速率敏感性因子 m 未必是常数,即与应变速率有关,这时 Prasad 判据的可靠性值得商榷。Murty 采用其推导的判据陆续研究了钛合金 Ti-24Al-20Nb^[35]、镍铬合金^[36]、铝合金^[20]及铝基复合材料^[37]的热加工问题,结果表明,组织检验结果与判据基本相符合。Murty 等^[35]将推导的判据与 Semiatin 判据做了比较,发现二者对 Ti-24Al-20Nb 合金均是有效的,但在文献[37]中对 ELI grade Ti-6Al-4V、Ti-24Al-11N 和 Commercial grade Ti-6Al-4V 也分别用这两种判据进行比较时,发现 Murty 失稳判据更为有效。由于 Murty 失稳判据是在大塑性流动连续性原则上推导出来的,而不是基于实验观察和具体合金,因此更具有广泛性。

Spigarelli 等^[38]在研究 6061+20%Al₂O₃ 复合材料的热加工时,把 Gegel 判据与 Prasad 判据以及 Murty 判据做了比较,经组织对比发现,在低温区域的粒子损害在用 Prasad 判据作出的失稳图中出现在稳定区,而在其他两种判据作出的失稳图中则出现在失稳区域,并且发现 Gegel 判据在加工图中确定的安全区域较小。Cavaliere 等^[20]也将 Gegel 判据与 Prasad 判据做

了比较,发现 Gegel 判据在预测铝基复合材料的加工损伤方面比 Prasad 判据更有效、对于其它金属材料,目前还没有定论。

5 各种判据的选用原则

上节的应用案例说明,采用 Gegel 判据、Malas 判据和 Murty 判据确定的变形稳定区和失稳区与组织检验结果一致性较好,而 Prasad 判据的一致性较差,预测失败的情况较多。从理论上讲,由于 Gegel 判据和 Malas 判据既考虑了连续效应或力学的稳定性,又考虑了材料或结构的稳定性,所以可靠性较高;而 Prasad 判据和 Murty 判据仅考虑了连续效应或力学的稳定性,故可靠性不如 Gegel 判据和 Malas 判据。因此,在采用基于动态材料模型理论的各种变形稳定区和失稳区判据来优化材料热加工工艺时,从理论上考虑,应优先选用 Gegel 判据和 Malas 判据,而 Semiatin 判据因缺乏严谨的理论依据和明确的物理含义需谨慎使用。但实际使用时还应根据具体条件下的材料本构变形行为特征灵活掌握。例如,对于纯金属和合金化低的合金,可简单地认为应力应变速率曲线满足幂函数方程式(1),这时采用 Gegel、Malas、Prasad 和 Murty 判据都是可行的;而对于复杂的合金系统,应力应变速率曲线往往难于满足幂函数规律方程,这时应尽量慎用 Prasad 判据。

6 结论

动态材料模型理论的提出和发展是对材料热加工传统研究方法的突破和创新。利用基于动态材料模型的稳定变形和失稳变形的各种判据来设计和优化材料热加工工艺,不仅可以改善和提高材料的可加工性能,避免热加工缺陷的产生,还可以控制材料热加工微观组织和性能,预测塑性变形机理,因此,在材料热加工,特别是难变形材料的热加工领域获得了广泛的应用,它对降低实际锻件的不合格率,提高产品的质量和可靠性具有重要的意义。

基于动态材料模型理论的材料变形稳定区或失稳区判据有多种形式,虽然每种判据的有效性在某些材料中得到了验证,但不同的判据在研究同一种材料的热加工时有时会出现不一致的结果。因此,研究某一个具体条件下的材料热加工时,合理地选择判据形式至关重要。由于 Gegel 判据和 Malas 判据既考虑了连

续效应或力学的稳定性,又考虑了材料或结构的稳定性,而 Prasad 判据和 Murty 判据仅考虑了连续效应或力学的稳定性,因此,从理论上讲,前者的可靠性要高于后者。当材料的应力应变速率曲线不满足幂函数方程时,采用 Prasad 判据往往会得出错误的结果,这时应优先选用 Gegel、Malas、和 Murty 判据。Semiatin 判据因缺乏理论基础,应尽量不采用。

REFERENCES

- [1] Frost H J, Ashby M F. Deformation mechanism maps, the plasticity and creep of metals and ceramics[M]. London: Pergamon Press, 1982: 265-276.
- [2] Raj R. Development of a processing map for use in warm forming and hot forming processes[J]. Metall Trans A, 1981, A12: 1089-1097.
- [3] Prasad Y V R K. Author's reply: Dynamic materials model: Basis and Principles[J]. Metall Mater Trans A, 1996, A27: 235-236.
- [4] Prasad Y V R K, Gegel H L, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-242[J]. Met Trans A, 1984, A15: 1883-1892.
- [5] Gegel H L. Synthesis of atomistic and continuum modeling to describe microstructure, computer simulation in materials science[M]. OH: ASM, 1986: 291-344.
- [6] Gegel H L, Malas J C, et al. Modeling techniques used in forging process design, metals handbook[M]. OH: ASM, 1988: 417-426.
- [7] Malas J C, Seetharaman V. Using material behavior models to develop process control strategies[J]. JOM, 1992(6): 8-14.
- [8] Alexander J M. Modelling of hot deformation of steels[M]. Berlin: Springer Verlag, 1989: 105-115.
- [9] Prasad Y V R K. Author's reply: dynamic materials model: basis and principles[J]. Met Trans A, 1996, A27: 235-247.
- [10] Prasad Y V R K. Recent advances in the science of mechanical processing[J]. INDIAN J Technol June-August, 1990: 435-451.
- [11] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Modelling of hot deformation for microstructural control[J]. International Materials Reviews, 1998, 43(6): 243-252.
- [12] Prasad Y V R K, Sastry D H, et al. Processing maps for hot working of a P/M iron aluminide alloy[J]. Intermetallics, 2000(8): 1067-1074.
- [13] 范宏昌. 热学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 251-256.
FAN Hong-chang. Calorifics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 251-256.
- [14] 郑重知. 不可逆热力学及现代反应动力学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 77-80.
ZHENG Zhong-zhi. Introduction of non-reversible thermodynamics and modern reaction kinetics[M]. Beijing: High Education Press, 1987: 77-80.
- [15] 陈忠伟, 坚增运, 介万奇, 等. 非平衡态热力学与动力学[J]. 西安工业学院学报, 2001, 21(2): 142-149.

- CHEN Zhong-wei, JIAN Zeng-yun, JIE Wan-qi, et al. Non-equilibrium thermodynamics and kinetics[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2001, 21(2): 142-149.
- [16] 杨瑞成, 王军民, 杨瑞成, 等. 耐热钢 12Cr1MoV 高温时效中的耗散结构[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(1): 28-31.
YANG Rui-cheng, WANG Jun-min, YANG Rui-cheng, et al. Dissipative structures of heat-resistant steel 12Cr1MoV during high-temperature aging[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(1): 28-31.
- [17] 孙 飞, 李青华. 耗散结构理论及其科学思想[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2004, 21(3): 76-79.
SUN Fei, LI Qing-hua. The theory of dissipative structure and its scientific idea[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2004, 21(3): 76-79.
- [18] Narayana Murty S V S, Nageswara Rao B. On the development of instability criteria during hotworking with reference to IN 718[J]. Mater Sci Eng A, 1998, A254: 76-82.
- [19] Semiatin S L, Lahoti G D. The occurrence of shear bands in isothermal hot forging[J]. Metall Trans A, 1982, A13: 275-288.
- [20] Cavaliere P, Cerri E, et al. Hot deformation and processing maps of a particulate reinforced 2618/Al₂O₃/20_p metal matrix composite[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64: 1287-1291.
- [21] 刘 东, 崔 刚, 罗子健, 等. 应用热力学方法确定钛合金锻造热力参数[J]. 锻压技术, 1994, 19(6): 3-7.
LIU Dong, CUI Gang, LUO Zi-jian, et al. The determination of thermomechanical parameters for forging processes of titanium alloys by using thermodynamic approach[J]. Forging and Stamping Technology, 1994, 19(6): 3-7.
- [22] Venugopal S, Mannan S L. On the optimization of hot workability in austenitic stainless steels using dynamic material model and a novel methodology for the control of microstructure during hot working[C]//2003 ASME International Mechanical Engineering Congress. Washington D C, 2003: 15-21.
- [23] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T, et al. Influence of oxygen content on the forging response of equiaxed($\alpha+\beta$) perform of Ti-6Al-4V:commercial vs ELI grade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 108: 320-327.
- [24] Venugopal S, Mannan S L, et al. Optimization of cold and warm workability in stainless steel type AISI 316L using instability maps[J]. Journal of Nuclear Materials, 1995, 227: 1-10.
- [25] Srinivasan N, Prasad Y V R K. Hot working characteristics of nimonic75, 80A and 90 superalloys: a comparison using processing maps[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51: 171-192.
- [26] Prasad Y V R K, Rao K P. Processing maps and rate controlling mechanisms of hot deformation of electrolytic tough pitch copper in the temperature range 300-900 °C[J]. Mater Sci Eng A, 2005, A391: 141-150.
- [27] Chakravarty J K, Dey G K, et al. Characterization of hot deformation behavior of Zr-2.5Nb-0.5Cu using processing maps[J]. Journal of Nuclear Materials, 1995, 218: 247-255.
- [28] Cavaliere P, Cerri E, et al. Isothermal forging of AA2618+20%Al₂O₃ by means of hot torsion and hot compressing tests[J]. Mater Sci Eng A, 2004, A387/389: 857-861.
- [29] 高 珊, 刘相华, 王国栋, 等. 应用 Processing Map 研究 D₂ 钢高温变形的动态应变时效[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(2): 19-22.
GAO Shan, LIU Xiang-hua, WANG Guo-dong, et al. Study on dynamic strain aging of D2 steel during high temperature deformation using processing map[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1998, 10(2): 19-22.
- [30] 汪凌云, 范永革, 黄志杰, 等. 镁合金 AZ31B 的高温塑性变形及加工图[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1068-1072.
WANG Ling-yun, FANG Yong-ge, HUANG Zi-jie, et al. Plastic deformation at elevated temperature and processing maps of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1068-1072.
- [31] 黄光胜, 汪凌云, 陈 华, 等. 2618 铝合金的热变形和加工图[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 763-766.
HUANG Guang-sheng, WANG Ling-yun, CHEN Hua, et al. Hot deformation and processing maps of 2618 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(5): 763-766.
- [32] Robi P S, Dixit U S. Application of neural networks in generating processing map for hot Working[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 289-294.
- [33] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Processing maps for hot working of titanium alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1998, A243: 82-88.
- [34] Seshacharyulu T, Medeiros S C, et al. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure[J]. Mater Sci Eng A, 2002, A325: 112-125.
- [35] Narayana Murty S V S, Nageswara Rao B. On the flow localization concept in the processing maps of titanium alloy Ti-24Al-20Nb[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104: 103-109.
- [36] Narayana Murty S V S, Nageswara Rao B. On the hot working characteristics of INCONEL alloy MA754 using processing maps[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2000, 29: 146-150.
- [37] Narayana Murty S V S, Nageswara Rao B, et al. On the hot working characteristics of 6061Al-SiC and 6061-Al₂O₃ particulate reinforced metal matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2003, 631: 119-135.
- [38] Spigarelli S, Cerri E, et al. An analysis of hot formability of the 6061+20%Al₂O₃ composite by means of different stability criteria[J]. Mater Sci Eng A, 2002, A327: 144-154.

(编辑 陈爱华)