

Aermet100 钢高温变形行为及热加工图研究

乔慧娟, 李付国, 冀国良, 肖美立

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 通过热模拟压缩试验研究了 Aermet100 钢在应变速率为 $0.01\sim 50\text{ s}^{-1}$, 变形温度为 $1073\sim 1473\text{ K}$ 和变形程度为 $0.05\sim 0.9$ 条件下的热变形行为, 并采用正交分析方法研究了工艺参数(应变、应变速率、变形温度)对 Aermet100 钢热变形流动应力的影响规律, 建立了基于正交分析的回归型 Aermet100 钢的热变形本构方程。综合考虑应变速率和变形温度对材料微观结构及性能的影响, 依据动态材料模型(DMM)建立了基于本构方程的 Aermet100 钢的热加工图, 并利用热加工图确定了 Aermet100 钢热变形时的流变失稳区, 分析讨论了不同区域的 Aermet100 钢的高温变形特征。

关键词: Aermet100 钢; 本构关系; 热加工图; 变形特征

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)04-0926-06

研究金属材料的高温变形行为和热成形性能, 对于正确合理地设计热加工工艺, 实现热成形过程的精确控制十分重要。影响材料热成形性能的因素有很多, 例如合金的化学成分、组织状态、变形温度、应变速率和变形程度等。在目前最常用的成形加工方法高温锻造变形过程中^[1], Aermet100 钢的微观组织演变影响到锻件的最终理化性能^[2-4], 而微观组织演变与材料高温流变行为等有着密切的关联。因此, 研究 Aermet100 钢的高温流变行为及其热加工性能对于准确控制锻件内部组织, 实现合理的理化性能等具有非常重要的意义。

本工作在热模拟压缩试验的基础上, 采用正交分析方法回归出了 Aermet100 钢的高温热变形本构方程。并基于动态材料模型^[5-7], 建立了 Aermet100 钢的热加工图, 同时探讨了该合金的成形性能和热变形特征。

1 实验

利用 Gleeble-3500 型热模拟试验机对 Aermet100 钢进行等温恒应变速率压缩实验(Aermet100 钢名义化学成分如表 1), 压缩试样采用 $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的圆柱体, 其原始金相照片如图 1 所示。为减小试样端面摩擦对变形不均匀的影响, 采用石墨片对试样端面进行润滑。实验选取的变形温度分别为 1073 、 1173 、 1273 、 1373 、 1423 、 1473 K ; 应变速率分别为: 0.01 、 0.1 、 1 、 10 、 50 s^{-1} ; 最大变形程度为 60% 。试样变形后用水冷却以保持高温变形时的奥氏体组织。采用线切割方法将试样沿轴线剖开, 制备金相试样, 观察其纵剖面的

表 1 Aermet100 钢名义化学成分

Element	C	Ni	Co	Cr	Mo	Fe
Content	0.23	11.73	13.85	3.13	1.25	Bal.

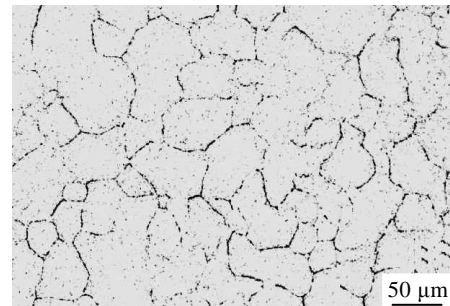


图 1 Aermet100 钢原始金相组织

Fig.1 Original metallographic structure of Aermet100 steel

显微组织, 显示奥氏体晶粒的腐蚀剂为饱和苦味酸+纯净水+洗洁剂(体积比 4:2:1)。

2 结果与讨论

2.1 流动应力曲线

热模拟压缩试验得到的 Aermet100 钢的流动应力-应变曲线如图 2 所示。可以看出, 应变速率和变形温度对流动应力的影响非常显著。增加变形温度和降低应变速率都会降低材料的流动应力, 并且在温度升高和应变速率减小时, Aermet100 钢表现出了非常

收稿日期: 2013-04-21

基金项目: 航空科学基金(2011ZE53059); 国家自然科学基金(51275414)

作者简介: 乔慧娟, 女, 1988 年生, 硕士, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88474117, E-mail: Qiaohj685@gmail.com

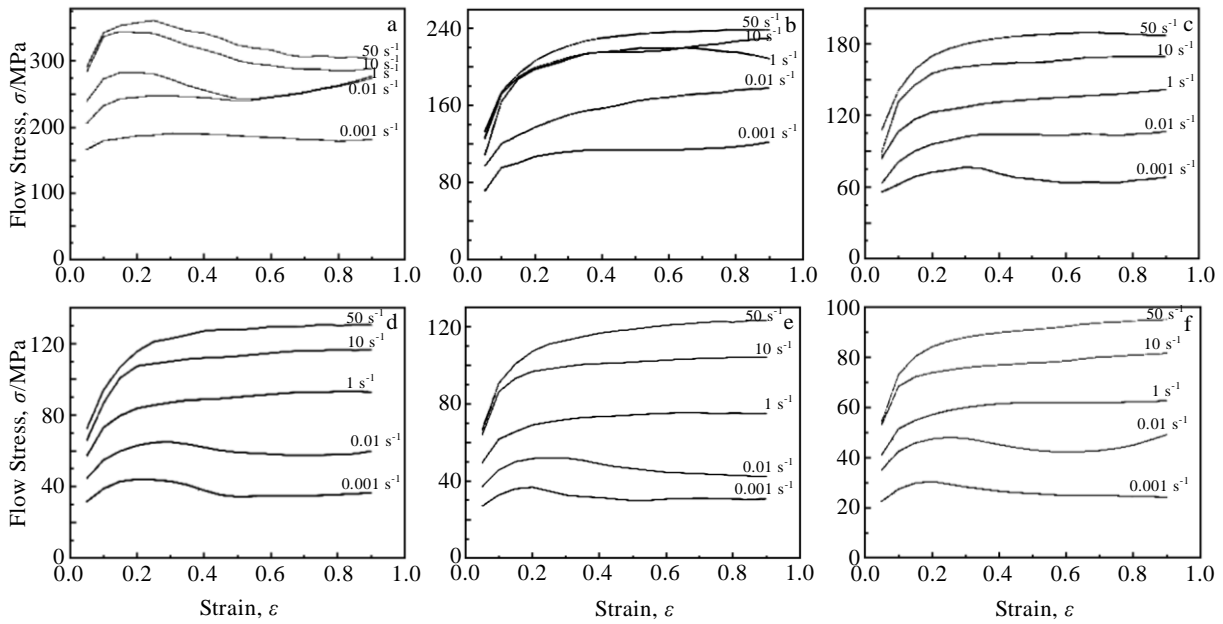


图 2 AerMet100 钢高温流变曲线

Fig.2 Flow stress-stain curves of AerMet100 steel under the isothermal compression: (a) 1073 K, (b) 1173 K, (c) 1273 K, (d) 1373 K, (e) 1423 K, and (f) 1473 K

明显的动态软化效果,材料发生了动态回复和动态再结晶。

2.2 本构关系模型

金属的实际屈服强度取决于位错运动受到的阻力大小,而位错运动所受的各种阻力又和金属的化学成分及组织结构相关^[8]。因此,在高温变形条件下,金属材料发生塑性变形时的本构方程可以表达为:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, C, S) \tag{1}$$

式中, ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; T 为变形温度(绝对温度); C 代表材料的化学成分; S 代表材料内部显微组织结构。在材料热变形过程中,金属材料的化学成分一般不会发生改变,因而参数 C 可以不作考虑,材料内部的微观组织结构随应变、应变速率和温度变化,因此流变曲线上对应的真应力所表示的后续屈服应该是关于变形温度、应变速率和应变的函数,即它是受变形条件而影响的,因此可将式(1)简化为^[9]:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \tag{2}$$

上式是 Zener-Hollomon^[10]最早提出的本构方程一般表达式,在文献[11]的本构方程建立过程中,依据正交试验分析,从主次角度出发,对本构方程进行了构建,其表示形式如式(3)所示:

$$\sigma = A f_{\varepsilon} f_{\dot{\varepsilon}} f_T \tag{3}$$

式中, A 为试验条件下金属材料的参考应力值; f_{ε} 、 $f_{\dot{\varepsilon}}$ 、 f_T 分别为应变 ε , 应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 及变形温度 T 对流动应力的影响因子。本工作采用基于正交分析的建模思想

来建立 AerMet100 钢的高温变形本构方程,即先通过正交分析方法确定变形温度、应变速率及变形程度对流动应力的影响规律,建立数学模型,即 f_{ε} 、 $f_{\dot{\varepsilon}}$ 、 f_T 的函数表达式,再根据公式(3),通过数学回归的方法构建出 AerMet100 钢的高温变形本构方程。

图 3 为流动应力及各参数拟合曲线。如图 3a 所示,不同应变条件下平均流动应力值与应变的关系符合 5 次多项式表达,流动应力与应变之间函数表达式如式(4)所示:

$$\sigma = 1928.075\varepsilon^5 - 5511.414\varepsilon^4 + 6056.507\varepsilon^3 - 3158.974\varepsilon^2 + 770.589\varepsilon + 64.636 \tag{4}$$

由图 3b 所示,平均流动应力对数值与应变速率对数值符合线性拟合关系,基于不同应变速率条件下的应力平均值,得到流动应力与应变速率之间的函数关系如式(5)所示:

$$\ln \sigma = 0.09493 \ln \dot{\varepsilon} + 4.84463 \tag{5}$$

对式(5)两边取幂,考虑到后面要回归分析 A 值,现不计常数项对应力的影响,则影响因子函数 $f_{\dot{\varepsilon}}$ 与独立因素 $\dot{\varepsilon}$ 之间的函数关系式(6)如下:

$$f_{\dot{\varepsilon}} = \dot{\varepsilon}^{0.09493} \tag{6}$$

由方程(6)获得的 Aermet100 钢的应变速率敏感性指数 m 平均值应为 0.09493,应变速率敏感性指数表征的是材料抵抗变形颈缩的能力,其值越大则表示材料抵抗变形颈缩的能力越强,随之材料的延伸率升高。

如图 3c 所示平均流动应力值与变形温度倒数

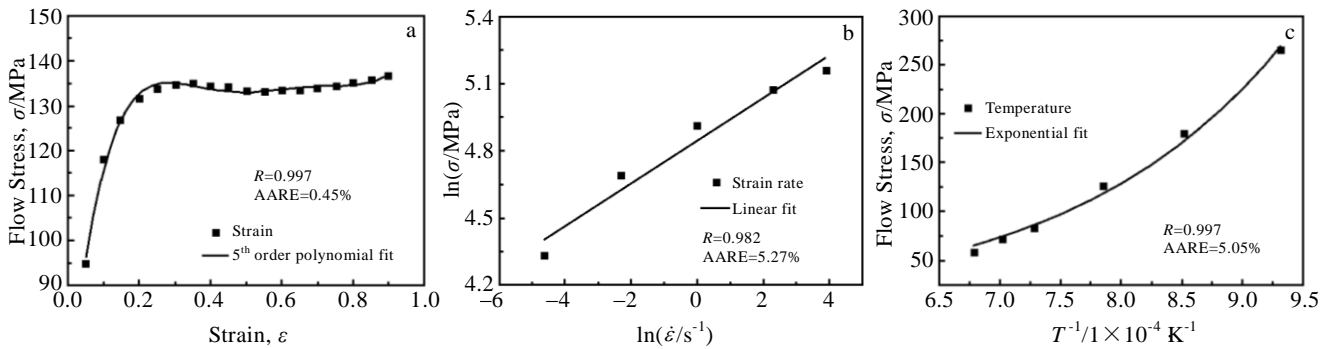


图 3 流动应力及各参数拟合曲线

Fig.3 Relationship between σ and ε (a); $\ln\sigma$ and $\ln\dot{\varepsilon}$ (b); σ and $1/T$ (c)

呈指数函数关系，考虑到后续要回归分析 A 值，因此不计常数项对影响因子函数 f_T 的影响，则影响因子函数 f_T 与独立因素 T 间的函数关系为：

$$f_T = \exp(5593.3/T) = \exp(0.09493 \times 489.86 \times 10^3 / RT) \quad (7)$$

式中， R 表示普氏气体常数，其值为 $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ；并可以推导出 Aermet100 钢在试验条件下的热变形激活能 Q 平均值为 $489.86 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。热激活能大小表征了材料的热变形难易程度，激活能越高则材料越难变形。

综上所述，将影响因子函数 $f_{\dot{\varepsilon}}$ 、 f_T 和 f_{ε} 代入式 (3) 中，并通过 MatLab 数学软件回归计算出使得流动应力计算值与实验值之间误差最小时的 A 值，从而获得 Aermet100 钢在试验条件下的高温变形流动应力关于应变、应变速率及变形温度的本构关系方程：

$$\sigma = 0.01043 \times (1928.075\varepsilon^5 - 5511.414\varepsilon^4 + 6056.507\varepsilon^3 - 3158.974\varepsilon^2 + 770.589\varepsilon + 64.636) \times [\dot{\varepsilon} \cdot \exp(489.86 \times 10^3 / RT)]^{0.09493} \quad (8)$$

为了能够准确地验证本构方程与试验数据的吻合度，现引入平均相对误差 (AARE) 和相关性系数 R 进行误差分析，其表达式为：

$$\text{AARE}(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100 \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (10)$$

式中， E_i 代表试验流动应力值 (MPa)； \bar{E} 代表试验流动应力平均值 (MPa)； P_i 代表预测的流动应力值 (MPa)； \bar{P} 代表预测的流动应力平均值 (MPa)； N 代表选取应力值的个数。

图 4 是 Aermet100 钢本构方程预测值与试验值的相关性对比图。相关性系数 R 是一个用以表征预测数据和试验数据之间线性相关程度的统计参量，其值在

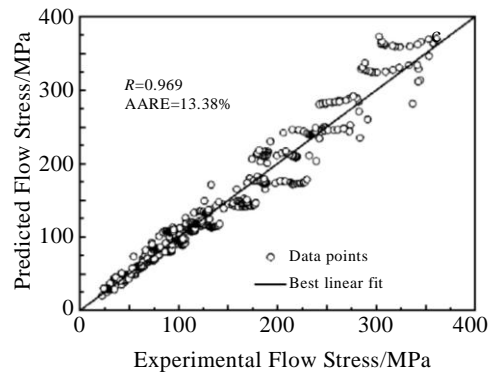


图 4 预测应力值与试验数据相关性比较

Fig.4 Correlation between the experimental and the predicted flow stress data

0~1 之间变化。值得注意的是，较高的相关系数值并不能表示预测结果与试验结果吻合良好。而平均相对误差是对点与点之间的相对误差进行分析，它是一个无偏统计参数，可以用来准确预测本构方程的精确程度。误差分析结果表明，流动应力模型计算值与试验数据的相关性 R 为 0.969，平均相对误差为 13.38%。因此，本文所建立的基于正交分析的回归型高温变形本构模型能够较为准确地描述 Aermet100 钢在热变形过程中的流动行为，同时还能够方便地求出材料变形时的应变速率敏感性指数 m 及变形激活能 Q 。

2.3 Aermet100 钢热加工图及分析

基于 Prasad 和 Gegel 等人根据大塑性变形连续介质力学、物理系统模型和不可逆热力学理论建立起来的动态材料模型 DMM (Dynamic Materials Model)^[5,12]。根据热加工图的原理和方法，本文利用热模拟压缩实验数据和回归出的本构方程，计算出了 Aermet100 钢热变形的能量耗散率值及非稳定性工艺参数范围，并将两者叠加即可获得 Aermet100 钢热加工图。在建立热加工图的过程中，应变速率敏感性指数 m 是一个非

常重要的参数;依据由上述正交分析方法建立的本构方程式(8)可知:在特定的应变和变形温度下,流动应力会转变成一个关于应变速率的幂函数形式:

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = K\dot{\epsilon}^m \quad (11)$$

式(11)中, $K = Af_{\epsilon} f_T$, 根据正交试验原理,其值与应变速率无关,采用本构方程(8)的计算值,比对实验流动应力和式(11)。因此, m 值可推导如下:

$$m = \frac{\log \sigma - \log K}{\log \dot{\epsilon}} \quad (12)$$

根据式(12),在一定的变形程度和变形温度下, m 的大小可以由 $\log \dot{\epsilon}$ 的 $N(3 \leq N \leq 5)$ 次多项式进行拟合:

$$m = a + b \log \dot{\epsilon} + c(\log \dot{\epsilon})^2 + d(\log \dot{\epsilon})^3 + \dots \quad (13)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 均为拟合系数。

依据能量耗散率计算式(14),将不同应变下的 Aermet100 钢的热模拟压缩实验数据代入计算即可获得相应应变下的能量耗散图。

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (14)$$

通过对公式(13)两边求导即可得到 m' 关于 $\log \dot{\epsilon}$ 的函数如下:

$$m' = b + 2c \log \dot{\epsilon} + 3d(\log \dot{\epsilon})^2 + \dots \quad (15)$$

在一定的应变下,将不同的应变速率值代入式(15)中就可以计算出 m' 的值。

采用 Malas 准则^[13]中的稳定性判据: $0 < m \leq 1$ 及 $m' < 0$, 通过插值的方法作出应变 0.1、0.3、0.5、0.7

和 0.9 下关于应变速率敏感性指数表征的失稳图,将之与相应应变下的能量耗散图叠加,即可得到应变为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 的由应变速率对材料塑性变形行为和可加工性影响的热加工图。如图 5 所示,图中阴影部分为 $m' > 0$ 的变形失稳区。

观察图 5a~5e 可以发现,由 $m' > 0$ 失稳判据确定的非稳定区的面积随应变变化显著。当应变为 0.1 时,在较低温度和中等应变速度区(1073~1150 K, 1200~1300 K, 0.05~10 s⁻¹)只有一小部分非稳定区域,而当应变达到 0.3 后, $m' > 0$ 所确定的变形非稳定区域出现在整个中低温范围内,且随着变形程度的增加,非稳定区域逐渐向高应变速度区转移,应变增大时材料变形失稳区逐渐向左上角和右下角移动,当应变达到 0.7 后,在高温低应变速度条件下也会出现变形的非稳定区域。这说明 Aermet100 钢在进行中低温变形时,变形速率始终不能太快,否则容易产生流变失稳;而后随着变形程度的逐渐增加,才能逐步加快 Aermet100 钢的变形速率,但必须限制在图 5d~5e 所示的合理范围内。如果采用等温成形可以考虑在大于 1300 K 且小于 1400 K 的温度范围内,在大范围的应变速率成形;或在小于 0.1 s⁻¹ 应变速率范围内,从终锻温度到 1400 K 以下的大范围温度段内选择成形温度;也可以维持较高的成形速率(应变速率大于 1 s⁻¹),温度高于 1300 K 的范围内成形。

材料变形失稳区的变化反映了微观组织的演化过

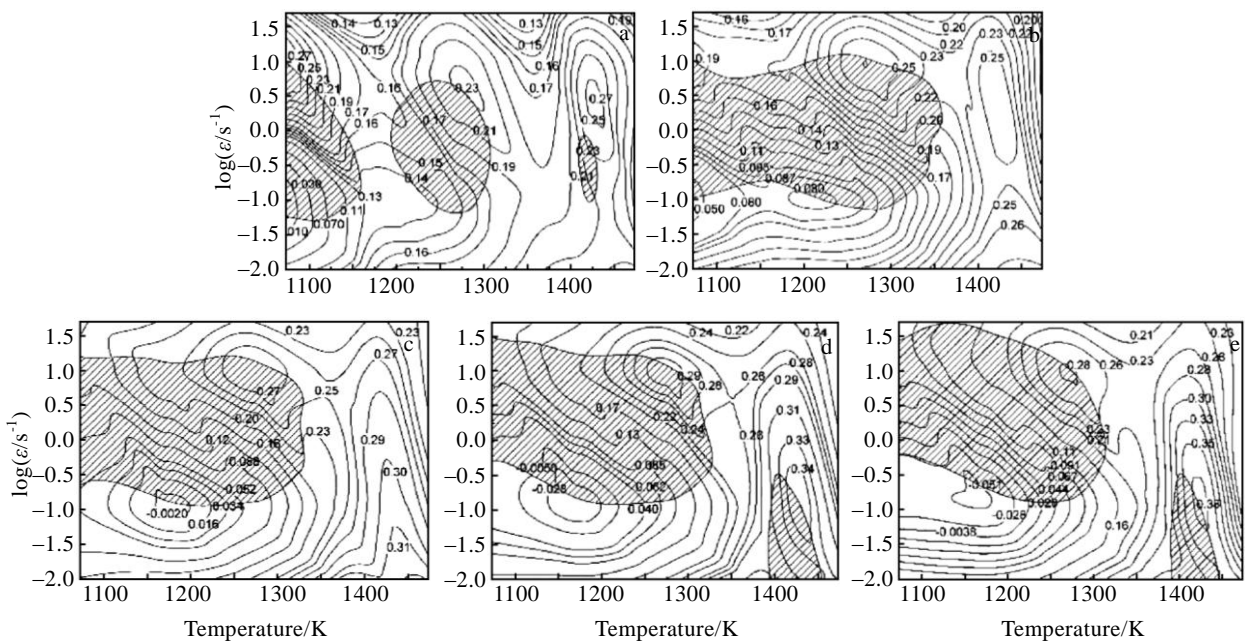


图 5 不同应变下基于 Malas 判据 $0 < m \leq 1$ 及 $m' < 0$ 的失稳图

Fig.5 Instability map based on Malas criterion $0 < m \leq 1$ and $m' < 0$ under different strains: (a) $\epsilon=0.1$, (b) $\epsilon=0.3$, (c) $\epsilon=0.5$, (d) $\epsilon=0.7$, and (e) $\epsilon=0.9$

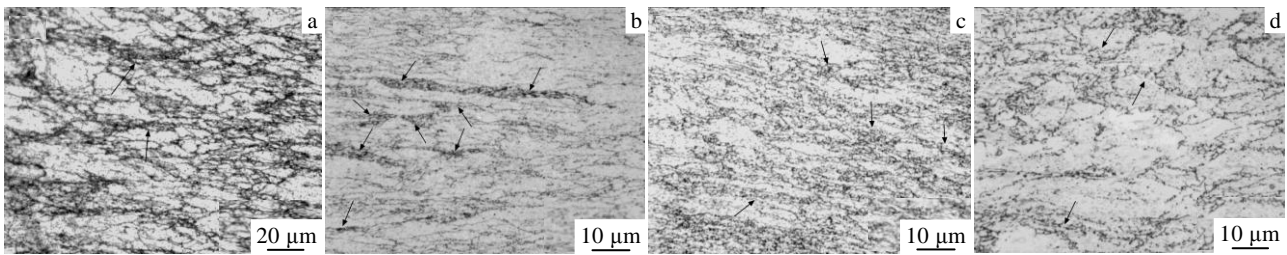


图 6 不同应变速率与变形温度下的微观组织形貌

Fig.6 Microstructures deformed at 0.1 s^{-1} and 1073 K (a), 1 s^{-1} and 1073 K (b), 10 s^{-1} and 1073 K (c), 10 s^{-1} and 1173 K (d)

程。变形温度为 1073K, 应变速率分别为 0.1 、 1 、 10 s^{-1} 时的微观组织如图 6a、6b 和 6c 所示; 变形温度为 1173 K, 变形速率为 10 s^{-1} 时的微观组织如图 6d 所示。这些微观组织中显示大量穿过多个晶粒的剪切带, 剪切带中存在大量细小晶粒。剪切带是具有非晶特征的强烈非均匀变形区域, 它发生于塑性变形过程中滑移和孪晶变形受到严重阻碍的细小孪晶处, 常常穿过多个晶粒, 有时甚至穿过整个试样。

剪切带的形成表明塑性变形已经局域化, 可能导致裂纹和空洞, 如图 6a、6b 所示, 剪切带相互交叉形成了鱼骨状组织, 这常常会导致微裂纹与空洞的产生。当 Aermet100 钢在低温奥氏体区压缩变形时, 随着压缩变形的进行, (111)滑移面通过滑移和孪晶变形不断地转动到压缩方向, 这时很难激活新的滑移系协调晶粒之间的应变, 剪切带就会从细小的层状孪晶中产生。在细小的层状孪晶中相邻孪晶晶界间距很小而位向差很大, 从而能够积累高密度的位错, 这就导致不需要大的应变而形成大量细小的新晶粒。而在新形成的细小晶粒中, 滑移和晶界滑移是主要的塑性变形机制, 因此, 剪切带提供了塑性流动局域化的路径。在金属和合金中形成剪切带导致了塑性流动局域化, 而在剪切带之间仍然保持大量的难以变形的孪晶, 这会导致微裂纹和不均匀变形, 热加工中应避免这一加工区域。

3 结 论

1) 建立了基于正交分析的回归型 Aermet100 钢的热变形本构模型。在所研究的变形温度和应变速率范围内, 流动应力的计算值与试验值的相关性为 0.969, 平均相对误差为 13.38%。分析计算出的 Aermet100 钢的应变速率敏感性指数 m 平均值为 0.09493, 热变形激活能 Q 平均值为 489.86 kJ/mol。

2) 基于建立的正交分析回归型本构方程及其与试验数据的对比分析, 求解出了变化的 m 值, 采用 Malas 稳定性判据与能量耗散率, 分别建立了反映应

变速率和变形温度对材料塑性变形行为及可加工性影响的热加工图。同时对图中非稳定变形区域进行了分析, 结果表明: 由应变速率引起的流变失稳主要集中在中低温及中高应变速率区, 即应变速率大于 1 s^{-1} 、温度小于 1273 K 的区域; 且当变形温度大于 1373 K 时, 在低应变速率区也容易引起流变失稳。

3) 结合热加工图分析及微观组织观察, 当采用温度大于 1350 K 和小于 1400 K 的等温成形时, 可采用较大范围的应变速率成形; 而当应变速率小于 0.1 s^{-1} 时, 可以从终锻温度到 1400 K 以下的大范围温度段内选择成形温度; 也可以维持较高的成形速率(应变速率大于 30 s^{-1}), 温度选在高于 1200 K 的范围内模锻成形。

参考文献 References

- [1] Fu Sunjing(傅孙靖). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 1991, 3: 007
- [2] Hemphill R. *Steel Times*[J], 1995, 223(5): 191
- [3] Li Zhi(李志), Zhao Zhenye(赵振业). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2006, 26(3): 265
- [4] Ayer R, Machmeier P. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1998, 29(3): 903
- [5] Prasad Y V R K, Gegel H, Doraivelu S et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1984, 15(10): 1883
- [6] Gegel H, Malas J, Doraivelu S et al. *Metals Handbook*[J], 1988, 14: 417
- [7] Ma Xiong(马雄), Zeng Weidong(曾卫东), Sun Yu(孙宇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(5): 756
- [8] Aifantis E C. *International Journal of Plasticity*[J], 1987, 3(3): 211
- [9] Sellars C, Tegart W. *International Metallurgical Reviews*[J], 1972, 17(1): 1
- [10] Zerilli F J, Armstrong R W. *Journal of Applied Physics*[J],

- 1987, 61(5): 1816
- [11] Xiao M, Li F, Zhao W *et al. Materials & Design*[J], 2012, 35: 184
- [12] Zeng Weidong(曾卫东), Zhou Yigang(周义刚), Zhou Jun(周军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(5): 673
- [13] Malas J C, Seetharaman V. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*[J], 1992, 44(6): 8

Deformation Behavior at Elevated Temperature and Processing Map of Aermet100 Steel

Qiao Huijuan, Li Fuguo, Ji Guoliang, Xiao Meili

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Constitutive analysis for hot working of Aermet100 steel was carried out using experimental stress-strain data from isothermal hot compression tests, in a wide range of temperatures (1073~1473 K), strains (0.05~0.9) and strain rates (0.01~50 s⁻¹). A constitutive equation based on orthogonal experiment has been established considering the independent effects of strain, strain rate and temperature. With consideration of the effects of the deformation temperatures and the strain rates on microstructures and properties of Aermet100 steel, processing maps were established based on the dynamic material model (DMM). And the instability zones of flow behavior could also be recognized by the maps. The hot deformation characteristics of Aermet100 steel in different zones were also analyzed.

Key words: Aermet100 steel; constitutive relation; processing map; deformation characteristics

Corresponding author: Li Fuguo, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88474117, E-mail: fuguolx@nwpu.edu.cn