

SP700 钛合金热压缩失稳变形数值模拟研究

邱 仟¹, 王克鲁¹, 鲁世强¹, 欧阳德来², 李 鑫¹, 张开铭¹, 高 鑫¹

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

摘 要: 利用 SP700 钛合金在 Gleeble-3800 型热模拟试验机下进行等温恒应变速率压缩得到的实验数据, 构建出基于 Prasad 失稳准则的失稳图, 得到在变形温度为 700~950 °C、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 时 SP700 钛合金的热压缩失稳变形的边界条件, 并以此为基础结合 Deform-3D 有限元软件对 SP700 钛合金在热压缩过程中失稳变形区域的分布及变化情况进行有限元数值模拟研究。结果表明: 热压缩实验得到的 SP700 钛合金微观组织与有限元数值模拟结果的吻合度较高, 即通过 Deform-3D 有限元软件可以有效模拟预测出 SP700 钛合金热压缩过程的失稳变形区域的分布及变化情况。

关键词: SP700 钛合金; 热压缩; 失稳变形; 数值模拟

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)08-2985-07

在合金进行热压缩过程中, 其内部不仅会出现加工硬化以及高温和形变共同影响产生的动态软化现象, 且还经常伴随着局部温升和流动软化现象, 造成合金发生了不均匀变形和不同程度的失稳变形, 使得其可加工性达不到使用要求, 难以得到形状复杂和尺寸精度高的零件^[1,2]。在热压缩过程中合金出现的失稳变形主要有局部流动、宏观剪切带和微裂纹 3 种形式, 这些都容易对合金造成严重缺陷^[3,4]。因此, 需要对合金在热压缩过程中可能发生失稳变形的区域进行预测, 以此指导实际生产加工中规避这些区域。

目前预测材料发生塑性失稳变形主要是依据动态材料模型 (DMM) 理论的 Prasad 失稳准则^[5]。通过该准则建立材料的失稳图可以得到可能发生塑性失稳变形的变形工艺参数范围。但由此所得的变形工艺参数范围不能很好的表现出材料在整个塑性变形过程中发生的具体变化。为了能更好地对实际生产加工进行指导, Lu 等人^[6]采用有限元软件对 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si 合金的锻造失稳变形过程进行了数值模拟, 发现将分析失稳图得到的变形工艺参数范围与有限元软件结合可以很好地模拟预测出金属在锻造过程中失稳变形区域。

本实验所采用的 SP700 钛合金 (Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe) 具有较好的可加工性能, 并且强度、塑性等性能也较好, 被广泛应用于国防军工以及民用等领域^[7,8]。因此, 通过对该合金在 Gleeble-3800 型热模拟

试验机下进行等温恒应变速率压缩得到的实验数据, 构建出基于 Prasad 失稳准则的失稳图, 得到在变形温度为 700~950 °C、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 时 SP700 钛合金的热压缩失稳变形的边界条件, 并以此为基础使用 Deform-3D 有限元软件对 SP700 钛合金在热压缩过程中失稳变形区域的分布及变化情况进行有限元数值模拟研究。

1 实 验

本实验所用材料为 SP700 钛合金。为进行等温恒应变速率压缩实验, 将材料加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱体。在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上实验前用砂纸将试样端面打磨光滑, 同时在两端面黏粘石墨片。试验机上设定实验参数: 变形温度 700、750、800、850、900 和 950 °C, 应变速率 0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹, 高度压速率 60%。实验过程以 10 °C/s 的升温速率升至设定温度后保温 3 min, 然后进行热压缩过程。待实验完成后立即取出试样并进行水冷。

2 结果与分析

2.1 确定失稳变形参数范围

采用多数学者对材料热变形过程中发生失稳变形研究而使用的 Prasad 失稳准则^[9-11]来确定 SP700 钛合金失稳变形参数范围。该准则结合了 Ziegler^[12]的最大熵产生率理论, 规定在热加工过程中出现失稳变形成

收稿日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金 (51761029); 江西省研究生创新专项资金 (YC2020-S539)

作者简介: 邱 仟, 男, 1997 年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: 1152517738@qq.com

象的时候，有如式 (1) 所示的关系式：

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\epsilon}} < \frac{D}{\dot{\epsilon}} \quad (1)$$

式中， D 为已知条件下的耗散函数， $\dot{\epsilon}$ 为应变速率， s^{-1} 。

由于耗散函数 D 可以用功率耗散协量 J 代替，故式 (1) 可以用式 (2) 表示：

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{\epsilon}} < \frac{J}{\dot{\epsilon}} \quad (2)$$

由于功率耗散协量 J 的表达式如式 (3) 所示：

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m\sigma\dot{\epsilon}}{m+1} \quad (3)$$

式中， σ 为流动应力，MPa， m 为应变速率敏感指数，表达式如式 (4)：

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

故经过整理可得式 (5)：

$$\frac{\partial \ln J}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + 1 < 1 \quad (5)$$

由此，综合可得 Prasad 失稳准则的表达式，如式 (6) 所示：

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (6)$$

式中， $\xi(\dot{\epsilon})$ 为流变失稳系数。根据式 (6) 可以计算出各个变形条件下的失稳系数，将这些数值随应变速

率和变形温度的变化绘制出等值线图，所得即为流变失稳图，图 1 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 700 ~ 950 °C、应变速率为 0.001 ~ 1 s⁻¹ 时热压缩过程中得到的失稳图。当流变失稳系数为负数时，会在图中呈现阴影部分，此阴影部分即为材料失稳变形区域，也就是在此条件下对材料进行热加工可能会出现失稳变形现象^[13]。

根据 SP700 钛合金在应变为 0.3、0.5、0.7 以及 0.9 下计算得到的基于 Prasad 失稳准则得到的失稳图可知：4 个失稳图均在左上角和右上角的部分出现阴影区域，即阴影部分对应着应变速率较高且变形温度较低以及较高的情况。由此可以知道在高应变速率-低变形温度以及高应变速率-高变形温度下进行塑性变形会出现失稳变形现象。具体分析如下：当真应变为 0.3 时，如图 1a 所示，失稳变形区域主要集中在变形温度为 710 ~ 830 °C、应变速率为 0.05 ~ 1 s⁻¹ 以及变形温度为 850 ~ 950 °C、应变速率为 0.1 ~ 1 s⁻¹。当真应变为 0.5 时，如图 1b 所示，随着应变的增加，失稳变形区域减少，此时失稳变形区域在变形温度为 700 ~ 775 °C、应变速率为 0.05 ~ 1 s⁻¹ 以及变形温度为 930 ~ 950 °C、应变速率为 0.1 ~ 1 s⁻¹；而当真应变为 0.7 时，如图 1c 所示，失稳变形区域出现在变形温度为 700 ~ 775 °C、应变速率为 0.1 ~ 1 s⁻¹ 以及变形温度为 940 ~ 950 °C、应变速率为 0.1 ~ 1 s⁻¹。而当真应变增大为 0.9 时，如图 1d 所示，失稳变形区域增大，失稳变形区域出现在应变速率为 0.05 ~ 1 s⁻¹，变形温度分别为 700 ~ 775 °C、850 ~ 900 °C、925 ~ 950 °C。

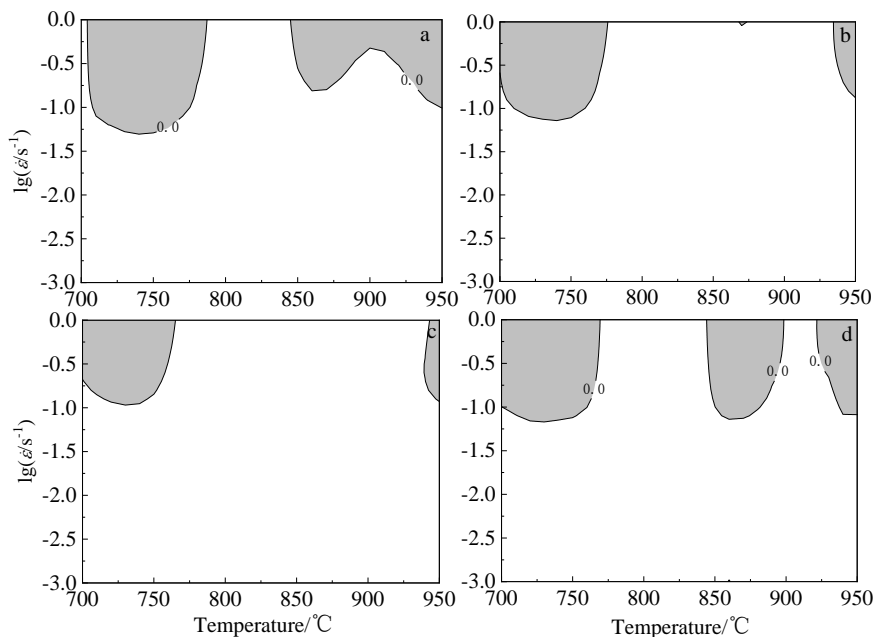


图 1 SP700 钛合金不同应变下的失稳图

Fig.1 Instability maps of SP700 titanium alloys at different strains: (a) 0.3, (b) 0.5, (c) 0.7, and (d) 0.9

2.2 Deform-3D 有限元软件数值模拟

使用 Deform-3D 有限元软件对 SP700 钛合金热压缩过程中失稳变形区域的分布及变化情况进行有限元数值模拟，将上述得到的应变为 0.3、0.5、0.7 以及 0.9 下的 SP700 钛合金发生失稳变形工艺参数作为模拟的边界条件导入 Deform-3D 有限元软件，并进行二次开发。设置坯料为刚塑性体，所用模具的压头则设置为刚体；同时模具的初始温度设置为 25 °C，模具压头与坯料间的剪切摩擦因子选择 0.3，传热系数则为 $11 \text{ N s}^{-1} \text{ mm}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ；坯料与环境间的对流系数设为 $0.02 \text{ N s}^{-1} \text{ mm}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ [14]。此外，选择模拟变形温度为 750 °C，应变速率为 0.001、0.01、0.1 和 1 s^{-1} ；由于实验最大高度压下率为 60%，模具上压头所走的实际行程设置 7.2 mm。考虑 SP700 钛合金热变形过程中会发生不均匀变形，且为了便于研究，选取了中心大变形区域点 P1、中心圆周小变形区域 P2、端面中心难变形区域 P3 以及端面圆周难变形区域 P4 这 4 个标示点来作为 SP700 钛合金的失稳变形模拟代表点。

由于 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.001 s^{-1} 以及 0.01 s^{-1} 时热压缩模拟效果大致相同，故在应变速率为 0.001 s^{-1} 下的模拟结果不予分析。图 2 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.01 s^{-1} 时热压缩高度压下率分别为 0%、30% 以及 60% 的模拟结果。图 3 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.01 s^{-1} 时进行热压缩模拟得到的 4 个代表点的应变速率、真应变、温度和真应力这 4 个物理量随着高度压下率的变化曲线。由图 2 可知，在此条件下整个热压缩模拟过程中并未出现失稳变形区域。由图 3 可知，P1 和 P4 的 4 个物理量变化趋势一致，P2 和 P3 处变化趋势一致。具体分析如下：在图 3a 中，当应变速率到达了设定的 0.01 s^{-1} 左右时，随着高度压下率的继续增大，P1 和 P4 的应

变速率继续增大到 0.025 s^{-1} 左右然后开始急剧减小，而 P2 和 P3 处则缓慢开始减小。在图 3b 中，4 个代表点的真应变值都逐渐增大，但 P1 和 P4 处增大的幅度稍大一些。在图 3c 中，4 个代表点温度都较设定的 750 °C 稍有升高，但 P1 和 P4 初期增大较快，但到达高点逐渐回落并趋于平稳。在图 3d 中，4 个代表点的变化趋势都为先急剧增大到峰值后缓慢减小。以上规律是由于 P1 和 P4 为变形程度较大的区域，故而应变速率以及真应变会增加的较为急剧；而温度则由于出现了局部升温现象，造成曲线快速增高；真应力则是材料在变形前期出现了加工硬化，随后又出现了动态软化现象。

图 4 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.1 s^{-1} 时热压缩高度压下率分别为 0%、30% 以及 60% 的模拟结果。图 5 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.1 s^{-1} 时进行热压缩模拟时 4 个代表点的应变速率、真应变、温度和真应力这 4 个物理量随着高度压下率的变化曲线。由图 4 可知，在此条件下热压缩模拟进行到高度压下率为 30% 时，除 P3 点附近没有出现失稳变形区域外，其他区域都出现了失稳变形。这是由于此时应变速率较大，热压缩变形时大量塑性功转变成的热量以及界面滑移产生的应力集中没有足够的时间通过扩散等途径释放出去，导致发生了失稳变形 [15]。当进行到高度压下率为 60% 时，整个试样基本上都为失稳变形区域。而图 5 所示在此条件下的 4 个代表点的 4 个物理量变化规律及原因如上述变形温度为 750 °C、应变速率为 0.01 s^{-1} 时一致，此处不再赘述。不过，与变形温度为 750 °C、应变速率为 0.01 s^{-1} 时相比，随着应变速率的增大，试样局部升温加剧，温度增加略大。同时导致变形速度加快，试样内部位错运动不充分，位错密度增大，使得应力增大 [16]，其峰值应力增大约 100 MPa。

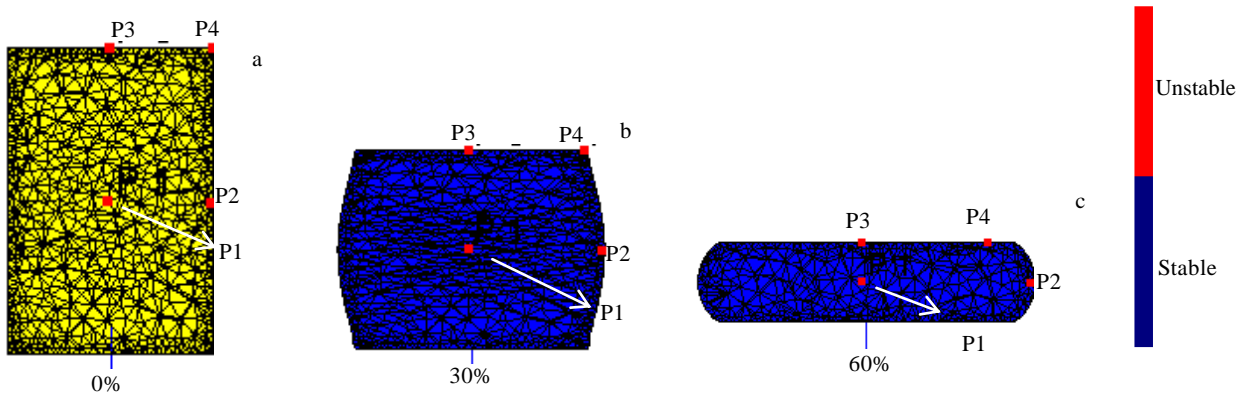


图 2 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.01 s^{-1} 时的失稳变形模拟结果

Fig.2 Simulation results of instability deformation of SP700 titanium alloy at deformation temperature of 750 °C and strain rate of 0.01 s^{-1} : (a) 0%, (b) 30%, and (c) 60%

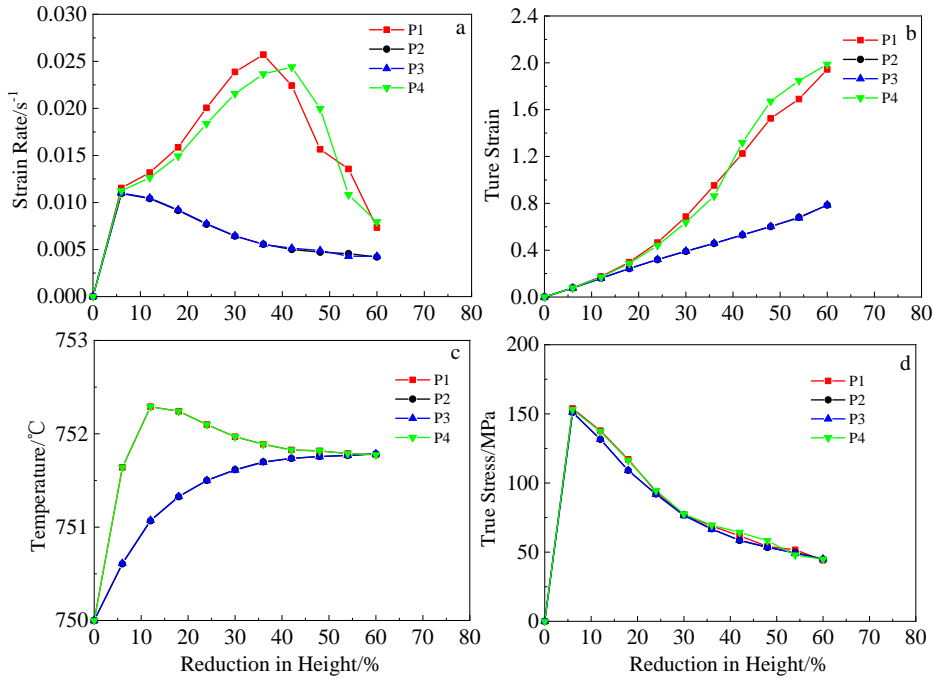


图 3 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.01 s⁻¹ 时 4 个代表点的 4 个物理量变化曲线

Fig.3 4 physical quantity change curves of 4 representative points of SP700 titanium alloy at deformation temperature of 750 °C and strain rate of 0.01 s⁻¹: (a) strain rate, (b) true strain, (c) temperature, and (d) true stress

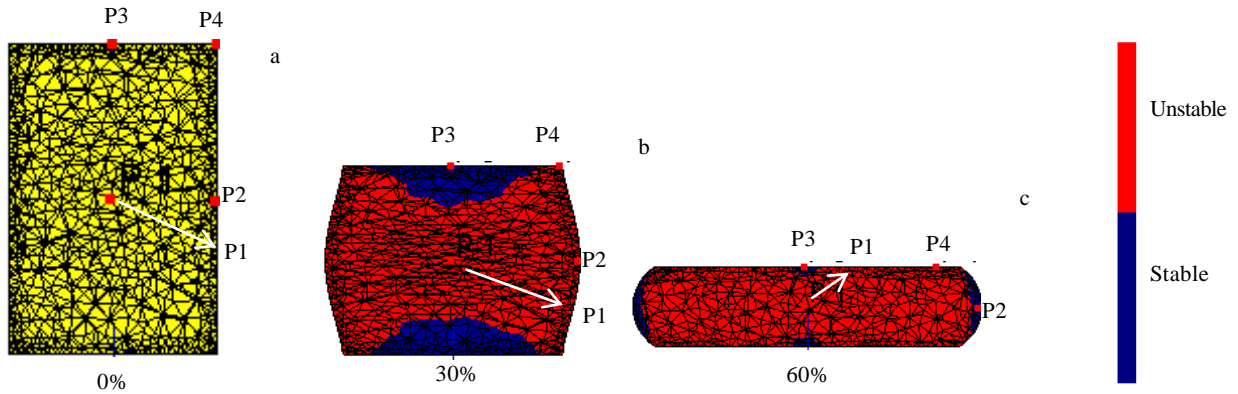


图 4 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.1 s⁻¹ 时的失稳变形模拟结果

Fig.4 Simulation results of instability deformation of SP700 titanium alloy at deformation temperature of 750 °C and strain rate of 0.1 s⁻¹: (a) 0%, (b) 30%, and (c) 60%

图 6 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 1 s⁻¹ 时热压缩高度压下率分别为 0%、30% 以及 60% 的模拟结果。图 7 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 1 s⁻¹ 时进行热压缩模拟时 4 个代表点的应变速率、真应变、温度和真应力这 4 个物理量随高度压下率的变化曲线。由图 6 可知，在此条件下整个热压缩模拟过程中均出现失稳变形区域。这是由于应变速率达到最大，各个点的变形程度

都较大，在高度压下率为 30% 时试样就出现了全域失稳变形。而图 7 所示在此条件下的 4 个代表点的 4 个物理量变化规律及原因如上述变形温度为 750 °C、应变速率为 0.01 s⁻¹ 时大致相同，只不过在此条件下，由于应变速率高，试样出现温升效应明显，温度变化曲线一直保持上升，表明此时热压缩过程中更可能出现绝热剪切带和局部流动等失稳变形机制。此外，随着应变速率增大，应力峰值增大大约 75 MPa。

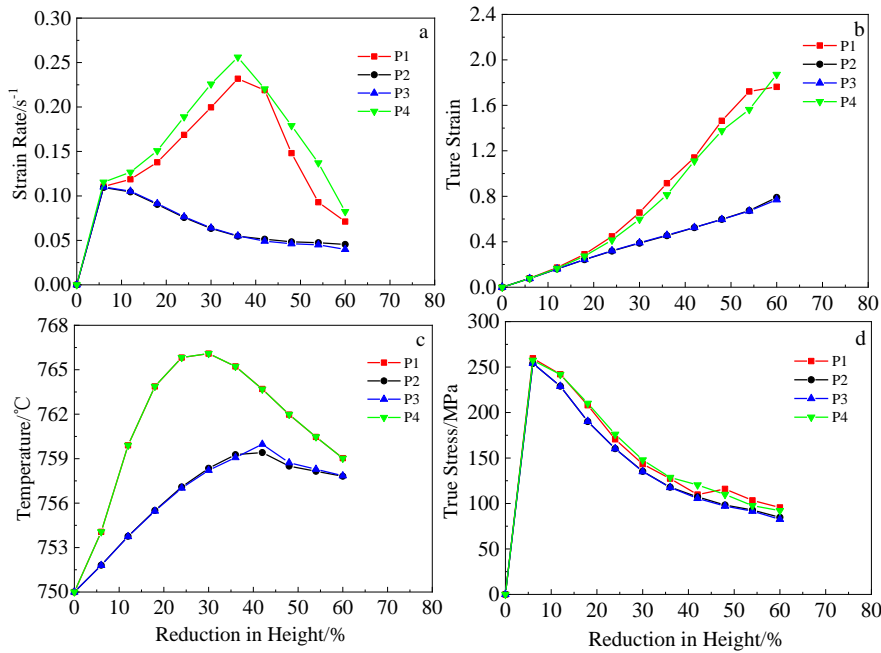


图 5 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 0.1 s⁻¹ 时 4 个代表点的 4 个物理量变化曲线

Fig.5 4 physical quantity change curves of 4 representative points of SP700 titanium alloy at deformation temperature of 750 °C and strain rate of 0.1 s⁻¹: (a) strain rate, (b) true strain, (c) temperature, and (d) true stress

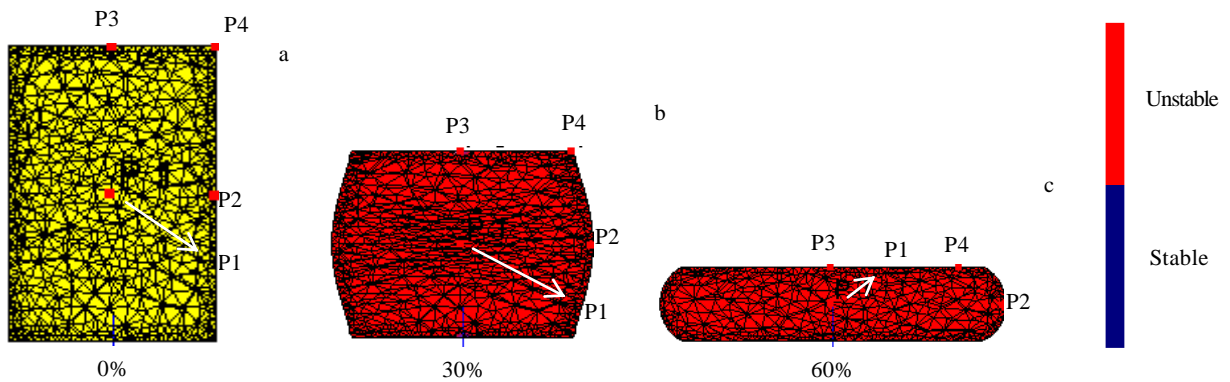


图 6 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 1 s⁻¹ 时的失稳变形模拟结果

Fig.6 Simulation results of instability deformation of SP700 titanium alloy at deformation temperature of 750 °C and strain rate of 1 s⁻¹: (a) 0%, (b) 30%, and (c) 60%

2.3 实验结果与模拟结果验证

根据上述得到的失稳变形模拟结果以及 4 个代表点的 4 个物理量的变化规律，可以清楚表明该模拟是可行的，但是仍需要结合热压缩实验结果来进一步确定数值模拟结果的准确性。现选取 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C，应变速率分别为 0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹ 下热压缩高度压下率为 60% 的试样，进行微观组织观察，如图 8 所示。图 8a 所示为 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C，应变速率为 0.001 s⁻¹ 下的热压缩微观组织，图中白色部分为 α 相，呈现出球化状，且球化程度较高，组织分布均匀，为稳定变形下的微观组织形式。图 8b 所示为 SP700 钛合金在变形温度为

750 °C，应变速率为 0.01 s⁻¹ 下的热压缩微观组织，此时 α 相的球化率较图 8a 略低，但也并未显现出失稳变形的微观组织状态。而图 8c 和 8d 所示分别是 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C，应变速率为 0.1 s⁻¹ 以及 1 s⁻¹ 下的热压缩微观组织，在图 8c 和 8d 中均出现了局部流动现象，这是典型的材料发生了失稳变形的微观组织状态。

通过以上对 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C，应变速率分别为 0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹ 下进行高度压下率为 60% 的热压缩微观组织观察分析可知，SP700 钛合金热压缩实验结果与经过 Deform-3D 有限元软件进行热压缩失稳变形数值模拟的结果十分吻合。

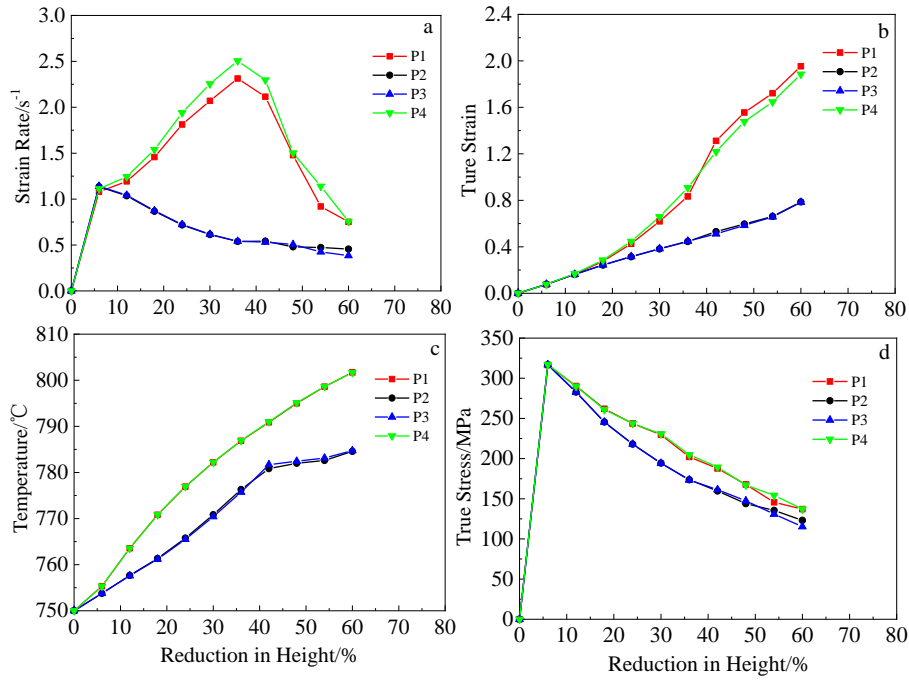


图 7 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、应变速率为 1 s⁻¹ 时 4 个代表点的 4 个物理量变化曲线

Fig.7 4 physical quantity change curves of 4 representative points of SP700 titanium alloy at deformation temperature of 750 °C and strain rate of 1 s⁻¹: (a) strain rate, (b) true strain, (c) temperature, and (d) true stress

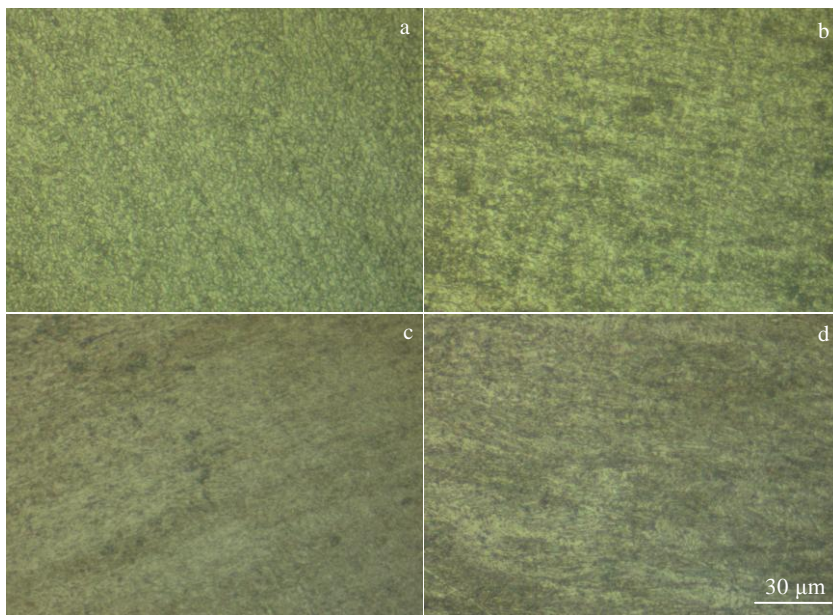


图 8 SP700 钛合金在变形温度为 750 °C、不同应变速率下进行热压缩的微观组织

Fig.8 Microstructures of SP700 titanium alloy under hot compression at deformation temperature of 750 °C and different strain rates (a) 0.001 s⁻¹, (b) 0.01 s⁻¹, (c) 0.1 s⁻¹, and (d) 1 s⁻¹

3 结 论

1) 利用 SP700 钛合金在变形温度为 700 ~ 950 °C、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 下得到的等温恒应变速率压缩实验数据, 构建出了基于 Prasad 失稳准则的失稳图,

得到了此条件下该合金发生失稳变形的参数范围。

2) 以 SP700 钛合金发生失稳变形的参数范围为边界条件, 模拟了该合金在变形温度为 750 °C, 应变速率分别为 0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹ 时的失稳变形, 经过对比分析, 发现得到的模拟结果与实验结果吻合。

3) 通过 Deform-3D 有限元软件可以较为准确地对 SP700 钛合金发生失稳变形的区域进行模拟预测。

参考文献 References

- [1] Jiang Xueqi(姜雪琦), Fan Xiaoguang(樊晓光), Zhan Mei(詹梅) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2020, 27(7): 33
- [2] Dong Xianjuan(董显娟), Lu Shiqiang(鲁世强), Wang Kelu(王克鲁) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(5): 1485
- [3] Sun Y, Zeng W D, Zhao Y Q et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(3): 1205
- [4] Su Juanhua(苏娟华), Sun Hao(孙浩), Ren Fengzhang(任凤章) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2018, 28(1): 78
- [5] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1984, 15(10): 1883
- [6] Lu Shiqiang, Li Xin, Wang Kelu et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(12): 3739
- [7] Zhang Gang(张钢), Zhang Fengshou(张丰收). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 687
- [8] Fu Mingjie(付明杰), Chen Li(陈俐), Zeng Yuansong(曾元松). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(8): 2555
- [9] Ding Haochen(丁浩晨), Zhao Yanjun(赵艳君), Hu Zhiliu(胡治流) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2021, 13(3): 97
- [10] Li Hongjiang(李鸿江), Yu Yang(于洋), Song Xiaoyun(宋晓云) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2020, 44(5): 462
- [11] Zhao Qinyang, Chen Yongnan, Xu Yiku et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(11): 3653
- [12] Ziegler H. *Progress in Solid Mechanics*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1963: 93
- [13] Luo Liangshun(骆良顺), Wang Fuxin(王富鑫), Wu Xiaoming(吴晓明) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(7): 2049
- [14] Liu Cheng(刘诚), Dong Hongbo(董洪波). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2015, 35(2): 21
- [15] Wei Lili(韦莉莉), Pan Qinglin(潘清林), Zhou Jian(周坚) et al. *Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报, 自然科学版)[J], 2013, 44(5): 1798
- [16] Qiu Qian(邱仟), Wang Kelu(王克鲁), Lu Shiqiang(鲁世强) et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2021, 42(2): 145

Numerical Simulation Research on Hot Compression Instability Deformation of SP700 Titanium Alloy

Qiu Qian¹, Wang Kelu¹, Lu Shiqiang¹, Ouyang Delai², Li Xin¹, Zhang Kaiming¹, Gao Xin¹

(1. College of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. College of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Using the experimental data obtained by isothermal and constant strain rate compression of the SP700 titanium alloy on the Gleeble-3800 thermal simulation test machine, the instability map based on the Prasad instability criterion was constructed. The boundary conditions for the thermal compression instability deformation of SP700 titanium alloy when the deformation temperature is 700~950 °C and the strain rate is 0.001~1 s⁻¹ were obtained. Based on this, combined with Deform-3D finite element software to analyze the SP700 titanium alloy in the process of hot compression, the distribution and change of the unstable deformation area were studied by finite element numerical simulation. The results show that the microstructure of the SP700 titanium alloy obtained by the hot compression experiment is in good agreement with the finite element numerical simulation results. The Deform-3D finite element software can effectively simulate and predict the distribution and change of the unstable deformation area of the SP700 titanium alloy during the hot compression process.

Key words: SP700 titanium alloy; hot compression; unstable deformation; numerical simulation

Corresponding author: Wang Kelu, Ph. D., Professor, College of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: 29018@nchu.edu.cn