

2219 铝合金热加工及组织演化

任东超^{1,2}, 邱娟³, 杨涛³, 余万华², 翟月雯¹, 邓开豪⁴

(1. 北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 2. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083;

3. 中国航空工业标准件制造有限责任公司, 贵州 贵阳 550014; 4. 广西工业职业技术学院机械工程学院, 广西 南宁 530001)

摘要: 利用 Gleeble-1500 试验机进行变形温度为 400~480 °C、变形速率为 0.001~10 s⁻¹ 的单轴热压缩试验, 得到了不同变形条件下的真应力-真应变曲线, 建立了不同应变量下的热加工图, 研究了挤压态 2219 铝合金在不同变形条件下的微观组织演变规律。研究表明: 在所选择的变形区间内, 变形抗力随着变形温度的增加以及变形速率的降低而降低。分析了不同应变量条件下的 2219 铝合金热加工图, 并结合微观组织进行验证, 结果吻合良好。最终, 确定了 2219 铝合金最佳热变形区间为: 应变速率为 0.001~0.368 s⁻¹、变形温度为 430~480 °C, 在所确定的可加工区域动态软化机制为动态再结晶, 热加工之后晶粒为均匀等轴状。

关键词: 2219 铝合金; 热变形; 热加工图; 微观组织; 动态软化机制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.031

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 05-0211-06

Thermal working and microstructure evolution for 2219 aluminum alloy

Ren Dongchao^{1,2}, Qiu Juan³, Yang Tao³, Yu Wanhua², Zhai Yuewen¹, Deng Kaihao⁴

(1. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Ltd., Beijing 100083, China;

2. School of Materials Science & Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. AVIC Standard Parts Manufacturing Co., Ltd., Guiyang 550014, China;

4. Department of Mechanical Engineering, Guangxi Vocational & Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China)

Abstract: The uniaxial thermal compression tests were carried out at deformation temperatures from 400 to 480 °C and deformation rates from 0.001 to 10 s⁻¹ by testing machine Gleeble-1500, and the true stress-true strain curves under different deformation conditions were obtained. Then, the thermal processing diagrams under different strain amounts were established, and the microstructure evolution laws of the extruded 2219 aluminum alloy under different deformation conditions were studied. The results show that the deformation resistance decreases with the increasing of deformation temperature and the decreasing of deformation rate within the selected deformation interval. The thermal processing diagrams of 2219 aluminum alloy under different strain amounts were analyzed, which was verified by combining with the microstructure, the results are in good agreement. At last, the best thermal deformation interval of 2219 aluminum alloy is determined as the strain rate of 0.001-0.368 s⁻¹ and the deformation temperature of 430-480 °C. The dynamic softening mechanism in the determined machinable region is dynamic recrystallization, and the grains are uniform equiaxed after thermal processing.

Key words: 2219 aluminum alloy; thermal deformation; thermal processing diagram; microstructure; dynamic softening mechanism

2219 铝合金属于铝铜系强化铝合金, 因其相对密度较低、强度较高以及低温下性能较好的特点, 被广泛应用于航空航天领域^[1-3]。2219 铝合金的加

工区间窄, 在热加工过程中易出现组织不均匀、性能不稳定等现象^[4-5], 限制了 2219 铝合金大锻件的应用。热加工图是预测金属流动不稳定性、优化工艺参数和调控微观组织的有效手段^[6]。因此, 开展 2219 铝合金的热模拟试验, 构建其热加工图, 并结合微观组织研究确定 2219 铝合金的安全加工范围以及最优热加工工艺参数, 为实际锻造生产提供依据。

热模拟试验完成后, 将得到的数据通过 Origin 软件进行处理, 得到 2219 铝合金的真应力-真应变曲线, 测得不同应变量下的真应力峰值, 得到应变分量

收稿日期: 2021-08-09; 修订日期: 2021-11-10

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项 (2018ZX04044001)

作者简介: 任东超 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: rendongchao1997@163.com

通信作者: 邓开豪 (1967-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 2233578149@qq.com

别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 0.9 时的热加工图，结合微观组织验证热加工图中的适宜变形区间，从而为 2219 铝合金热加工工艺的制定提供理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为 2219 铝合金，状态为挤压态，通过线切割和机床加工成表面光整的圆柱试样，直径为 $\Phi 10$ mm，高度为 15 mm。化学成分如表 1 所示。

表 1 2219 铝合金的成分 (%，质量分数)
Table 1 Compositions of 2219 aluminum alloy
(%, mass fraction)

Cu	Mn	Si	Zr	Fe	Mg	Zn	V	Ti	Al
5.8~6.8	0.2~0.4	≤ 0.2	0.10~0.25	≤ 0.3	≤ 0.02	0.1	0.05~0.15	0.02~0.10	余量

1.2 热模拟试验

热模拟试验在 Gleeble-1500 热模拟机上进行，变形温度为 400、450 和 480 $^{\circ}\text{C}$ ，应变速率为 0.001、0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} ，试样加热速度为 5 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ，

加热至预定变形的温度后保温 300 s，然后按照不同的应变速率进行等温压缩，最大变形量为 60%，压缩完成后样品立即采用水冷降温，保留高温下的组织。

将热模拟压缩试验得到的试样沿径向进行切割，得到用于观察微观组织演变的试样。试样经磨抛后，采用阳极覆膜处理，电压为恒压 20 V、时间为 40 s，冲洗吹干后采用 Zeiss Axio Scope A1 金相显微镜的偏光模式进行观察拍照。

2 结果及讨论

2.1 2219 铝合金的真应力-真应变曲线

2219 铝合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出：变形过程基本分为 3 个阶段：以加工硬化为主阶段、以动态软化为主阶段和稳态流变阶段^[7]。2219 铝合金在 400~480 $^{\circ}\text{C}$ 温度区间变形时，具有以下特点：在真应变为 0.1 左右时，合金的真应力快速上升至峰值真应力；随着真应变的增大，动态软化作用逐渐增强，真应力达到峰值后开始下降；最后阶段，动态软化作用和加工硬化作用达到平衡，曲线较为平稳。在同一变形温度下，2219 铝合金的真应力随着应变速率

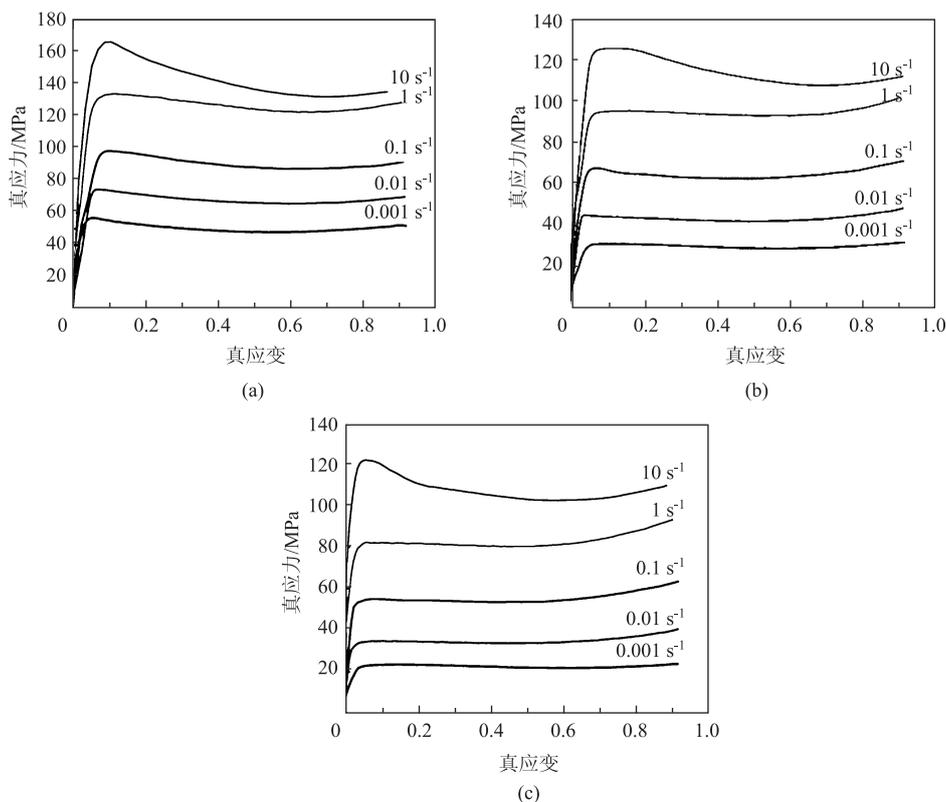


图 1 2219 铝合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线
(a) 400 $^{\circ}\text{C}$ (b) 450 $^{\circ}\text{C}$ (c) 480 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 1 Curves of true stress-true strain for 2219 aluminum alloy at different deformation conditions

的增大而迅速提高,这主要是因为高的应变速率导致位错密度急剧增高,抵消则需要更久的时间,不同变形温度下的真应力-真应变曲线呈现出相似的特点。

2.2 2219 铝合金的热加工图

热加工图分为 Raj 热加工图和基于动态材料模型 (Dynamic Material Model, DMM) 的热加工图,但 Raj 热加工图的使用存在局限性,并不能很好地解释复杂合金的变形行为,因此,最常用的热加工图是 Prasad Y V R K 等^[8]提出并建立的基于动态材料模型 (DMM) 的热加工图^[9-10]。

应变与变形温度一定时, Prasad Y V R K 等^[11]认为材料应力与应变速率之间的关系可用以下动力学方程来表示:

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

式中: σ 为应力; K 为常数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; m 为应变速率敏感因子。

在变形过程中,材料得到的总能量 P 主要消耗在以下两方面:材料变形所消耗的能量 G 和变形过程中微观组织演变消耗的能量 J ,即 P 可以表达为^[12]:

$$P = \sigma\dot{\varepsilon} = J + G = \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma + \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: G 为材料变形所消耗的能量,称为耗散量; J 为微观组织演变消耗的能量,称为耗散协量。

利用应变速率敏感因子 m 可以表示能量在二者之间的分配,即:

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\partial(\ln\sigma)}{\partial(\ln\dot{\varepsilon})} \quad (3)$$

可定义无量纲参数 η 表示耗散效率,当 $m=1$ 时,材料处于理想线性耗散,此时耗散协量 J 最大,为 J_{\max} 。因此,耗散效率 η ^[13] 如式 (4) 所示:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (4)$$

此外,为了确定耗散效率图中的失稳区,需要引入失稳判据 ξ ^[12]:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln\dot{\varepsilon}} + m \quad (5)$$

而通常材料流变失稳的判据为:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) < 0 \quad (6)$$

首先,通过 2129 铝合金的真应力-真应变曲线得到不同变形参数下的峰值真应力;然后,通过 Origin 画出 $\ln\dot{\varepsilon}$ 与 $\ln\sigma$ 的散点图,通过插值拟合的方法得到 m 值,根据式 (4) 和式 (5) 求得不同应

变量条件下的耗散效率 η 和失稳判据 ξ ;最后,在 Origin 中分别绘出耗散效率等高线图和失稳判据等高线图后,将两者叠加在一起即可获得热加工图。

图 2 为 2219 铝合金在不同应变变量 ($\varepsilon=0.2$ 、 0.4 、 0.6 、 0.8 和 0.9) 下的热加工图。其中, T 为变形温度,深色区域为热变形失稳区,浅色区域为热变形安全区,同一等高线代表耗散效率 η 相同。

结合图 2 可以看出:当 $\varepsilon=0.2$ 和 $\varepsilon=0.4$ 时 (图 2a 和图 2b), 2219 铝合金的热变形失稳区相差不大,大致呈条状,由低温高应变速率区域向高温高应变速率方向延伸。在低应变速率下,2219 铝合金不存在热变形失稳区,失稳区主要集中在应变速率 $\dot{\varepsilon} \approx 0.368 \sim 10.000 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) = -1 \sim 2$)、变形温度为 $400 \sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$ 、耗散效率范围大约为 $0.10 \sim 0.30$ 的区域。

当 $\varepsilon=0.6$ 时 (图 2c), 2219 铝合金的热变形失稳区与 $\varepsilon=0.2$ 和 $\varepsilon=0.4$ 时相比,形状发生变化,失稳区域进一步扩大。失稳区分为两部分: $\dot{\varepsilon} \approx 0.050 \sim 1.000 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) = -3 \sim 0$)、变形温度为 $400 \sim 440 \text{ }^\circ\text{C}$ 的区域以及 $\dot{\varepsilon} \approx 0.135 \sim 10.000 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) = -2 \sim 2$)、变形温度为 $430 \sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$ 的区域。

当 $\varepsilon=0.8$ 和 $\varepsilon=0.9$ 时 (图 2d 和图 2e), 2219 铝合金的热变形失稳区与 $\varepsilon=0.6$ 时相比,形状发生了变化,虽然仍为两部分失稳区,但其中一个失稳区在热加工图的右上角,近乎消失,另一个失稳区较为规则,主要集中在 $\dot{\varepsilon} \approx 0.050 \sim 1.000 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) = -3 \sim 0$)、变形温度为 $400 \sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$ 的区域。在中、高应变速率条件下,2219 铝合金失稳区几乎覆盖整个变形温度区间,耗散效率范围大约为 $0.010 \sim 0.330$ 。

2.3 微观组织分析

热加工图是从理论上表征材料的塑性变形过程,因此,还需要将热加工图与微观组织结合起来共同分析,从而为研究 2219 铝合金实际热变形过程提供依据。以应变量为 0.9 的 2219 铝合金热加工图为基础,如图 3 所示,选取热变形安全区 I、III 和热变形失稳区 II 的 2219 铝合金的微观组织进行分析,微观组织如图 4 所示。

图 4a 为 2219 铝合金原始微观组织,原始状态是挤压态,采用 Image Tool 软件测量其晶粒大小,可以得出:沿径向的晶粒尺寸约为 $370 \mu\text{m}$,沿轴向的晶粒尺寸约为 $35 \mu\text{m}$ 。当 $\varepsilon=0.9$ 时,高应变速率条件下变形区为热变形安全区,此时, $\dot{\varepsilon} \approx 1.65 \sim 10.00 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) \approx 0.5 \sim 2.3$)、 $T \approx 400 \sim 470 \text{ }^\circ\text{C}$ 。以图 3 中 I 区为例说明, I 区的 2219 铝合金的微观组

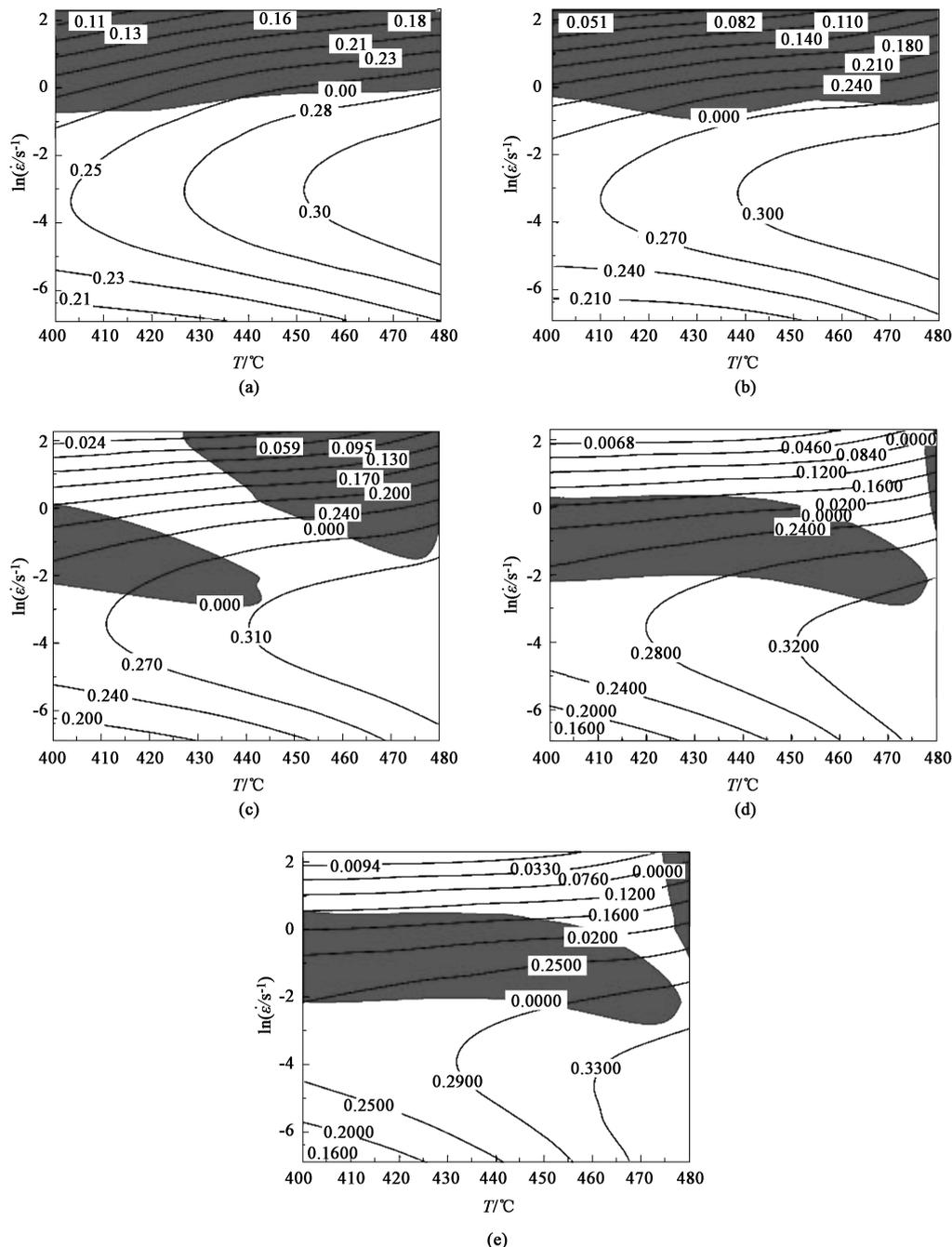


图 2 不同应变变量下 2219 铝合金的热加工图

(a) $\varepsilon=0.2$ (b) $\varepsilon=0.4$ (c) $\varepsilon=0.6$ (d) $\varepsilon=0.8$ (e) $\varepsilon=0.9$

Fig. 2 Hot working diagrams of 2219 aluminum alloy under different strain amounts

织如图 4b 所示,可以看出:晶粒表现为等轴状,尺寸大小不一,并未发生明显的动态再结晶。这主要有两个原因:(1)层错能较高,在热变形过程中倾向于发生动态回复;(2)变形温度较低,热激活能不足以激发动态再结晶。

当 $\varepsilon=0.9$ 时,2219 铝合金的热变形失稳区主要集中在 $\dot{\varepsilon} \approx 0.14 \sim 1.65 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) \approx -2 \sim 0.55$)、 $T \approx 400 \sim 475 \text{ }^\circ\text{C}$ 的区域。以图 3 中 II 区为例进行说明,

II 区的 2219 铝合金的微观组织如图 4c 所示,可以看出:此时已经发生了动态再结晶,晶界呈现锯齿状,尺寸为 $20 \mu\text{m}$ 左右的细晶分布在尺寸为 $100 \mu\text{m}$ 的较大晶粒周围,形成了混晶组织;此热变形区间内耗散效率为 0.2900,一部分能量用于动态再结晶形成新晶粒,但更大一部分则用于晶粒的长大。微观组织的不均匀会大幅度降低材料的使用性能,在服役过程中易造成应力集中引发失效^[14]。

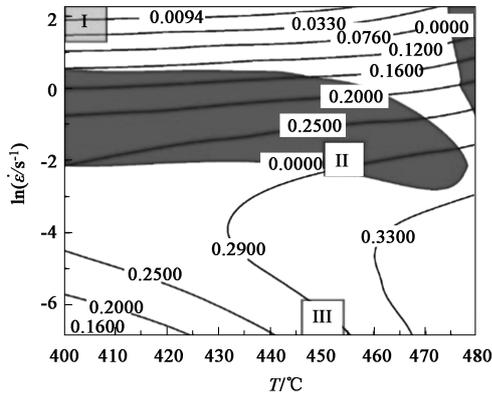


图 3 应变量为 0.9 时的 2219 铝合金热加工图
Fig. 3 Hot working diagram of 2219 aluminum alloy with strain amount of 0.9

当 $\varepsilon = 0.9$ 时, 2219 铝合金热变形安全区为中低应变速率区, 即 $\dot{\varepsilon} \approx 0.001 \sim 0.368 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) = -6 \sim -3$)、 $T \approx 400 \sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$ 区域, 该加工区的耗散效率为 0.160~0.330, 此时的耗散效率普遍较高, 说明此区域内的能量主要用于组织演变, 热变形区间适宜在此区域内选择。同理, 以图 3 中 III 区为例进行说明, III 区的 2219 铝合金的微观组织如图 4d 所示。此时动态再结晶已经充分进行, 微观组织均匀、细小且为等轴状, 晶粒尺寸约为 $45 \text{ }\mu\text{m}$ 。

因此, 通过采用热加工图与微观组织相结合的分析研究方法表明: 在所研究的变形温度和应变速率条件下, 根据热加工图确定 2219 铝合金的热变形安全区是基本适用的。

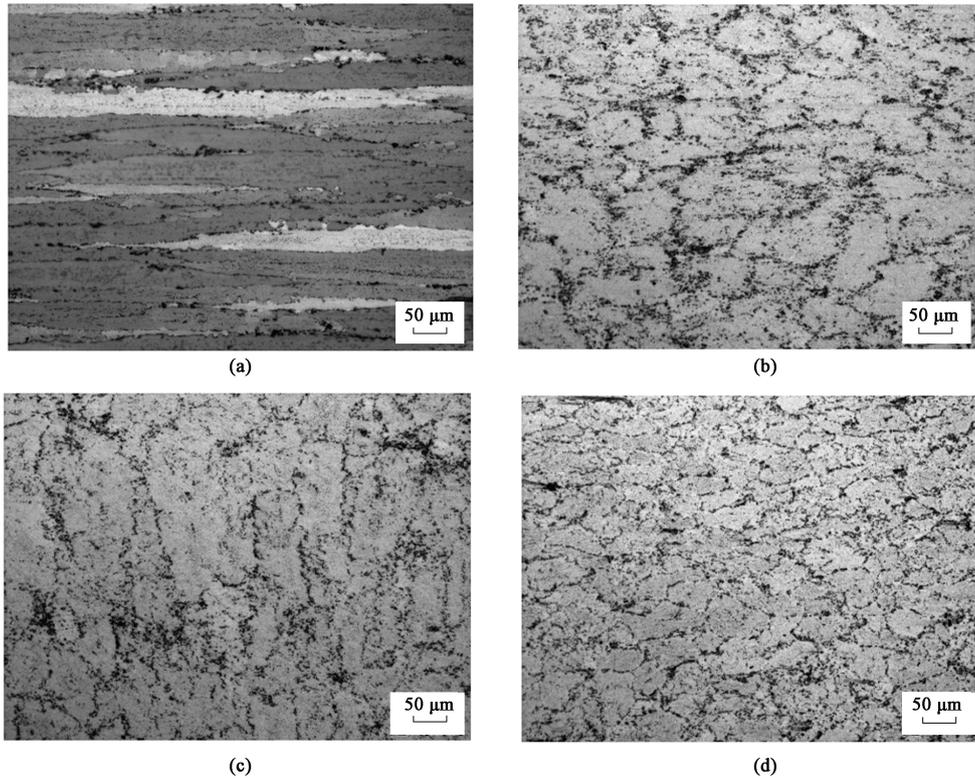


图 4 不同变形条件下 2219 铝合金的微观组织图
(a) 原始组织 (b) $T=400 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=10 \text{ s}^{-1}$ (c) $T=450 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$ (d) $T=450 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$

Fig. 4 Microstructure diagrams of 2219 aluminum alloy under different deformation conditions

(a) Original structure (b) $T=400 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=10 \text{ s}^{-1}$ (c) $T=450 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$ (d) $T=450 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$

3 结论

(1) 应变量不同的 2219 铝合金热加工图之间存在差异, 整体上随着应变量的增加, 热变形失稳区呈现稳态变化, 当应变量大时 ($\varepsilon = 0.8$ 和 $\varepsilon = 0.9$), 热加工图不再发生变化。

(2) 结合 2219 铝合金的热加工图和微观组织分析可知: 在所研究的变形温度和应变速率条件下, 根据热加工图确定 2219 铝合金的热变形安全区是基本适用的。其中, 应变量为 0.9 时, 得到的 2219 铝合金的最佳热变形区间为: $\dot{\varepsilon} \approx 0.001 \sim 0.368 \text{ s}^{-1}$ ($\ln(\dot{\varepsilon}) = -6 \sim -3$)、 $T \approx 400 \sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$, 此区域耗散效率较高。

参考文献:

- [1] 柏久阳. 2219 铝合金 GTA 增材制造及其热处理过程的组织演变 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Bai J Y. Microstructure Evolution of 2219-Al during GTA Based Additive Manufacturing and Heat Treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [2] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22 (5): 68-75.
Guan R G, Lou H F, Huang H, et al. Development of aluminum alloy materials: current status, trend, and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (5): 68-75.
- [3] 丁吉坤, 宋建岭, 蒙丹阳, 等. 2219 厚板铝合金钨极和熔化极惰性气体保护焊焊接接头组织与性能对比 [J]. 宇航材料工艺, 2020, 50 (5): 93-97.
Ding J K, Song J L, Meng D Y, et al. Comparison of microstructure and properties of welded joints in tungsten & metal inert gas welding of 2219 thick plate aluminum alloy [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50 (5): 93-97.
- [4] 陈镇扬, 彭文飞, 牛波凯, 等. 超大型环形件用 2219 铝合金的热变形本构方程及热加工图 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 83-92.
Chen Z Y, Peng W F, Niu B K, et al. Hot deformation constitutive equation and hot processing map of 2219 aluminum alloy for super large rings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 83-92.
- [5] Yang Y L, Zhan L H, Ma Q Q, et al. Effect of pre-deformation on creep age forming of AA2219 plate: Springback, microstructures and mechanical properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 697-702.
- [6] Tan Y B, Yang L H, Tian C, et al. Processing maps for hot working of 47Zr-45Ti-5Al-3V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 597: 171-177.
- [7] 胡亚美, 黄海广, 郑必举, 等. Ti-4Al-2.5V-1.5Fe 合金多道次热变形行为及微观组织演变 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (9): 132-139.
Hu Y M, Huang H G, Zheng B J, et al. Multi-pass hot deformation behavior and microstructure evolution of Ti-4Al-2.5V-1.5Fe alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (9): 132-139.
- [8] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doriavelu S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15 (10): 1883-1892.
- [9] 郝建军, 张瑞丰, 宋耀辉, 等. 2205 双相不锈钢的热加工图和组织研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 190-198.
Hao J J, Zhang R F, Song Y H, et al. Study on thermal processing diagram and microstructure for 2205 duplex stainless steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 190-198.
- [10] 曾卫东, 周义刚, 周军, 等. 加工图理论研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (5): 673-677.
Zeng W D, Zhou Y G, Zhou J, et al. Recent development of processing map theory [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35 (5): 673-677.
- [11] Prasad Y V R K, Rao K P, Sasidhara S. Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps [M]. 2nd Edition. OH: ASM International, 2015.
- [12] Rao K P, Prasad Y V R K, Suresh K. Hot working behavior and processing map of a γ -TiAl alloy synthesized by powder metallurgy [J]. Materials & Design, 2011, 32 (10): 4874-4881.
- [13] 李昌民, 谭元标, 赵飞. Inconel 718 高温合金流变曲线修正及热加工图 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (6): 585-596.
Li C M, Tan Y B, Zhao F. Modification of flow stress curve and processing maps of Inconel 718 superalloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (6): 585-596.
- [14] Hou G C, Xie J, Yu J J, et al. Room temperature tensile behaviour of K640S Co-based superalloy [J]. Materials Science and Technology, 2019, 35 (5): 530-535.

欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 232 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册) (包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部