

挤压态 7A85 铝合金高温热变形显微组织演变*

张显峰^{1†}, 陆政¹, 赵钊², 高文理³, 仇丽丽³, 杜振涛³

(1.北京航空材料研究院, 北京 100095; 2.南京大学 现代工程与应用科学学院,
江苏 南京 210093; 3.湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要:7A85 铝合金密度小、强度高、热加工性能好、焊接性能优良, 而且具有较好的耐腐蚀性和较高的韧性, 广泛应用于航空和航天中的受力结构件。本文通过挤压态 7A85 铝合金的单向等温热压缩实验, 利用光学显微镜、透射电镜研究了合金在变形温度为 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 应变速率为 0.01 s⁻¹, 0.1 s⁻¹, 1 s⁻¹, 10 s⁻¹ 时的高温流变行为和显微组织演变。结果表明: 变形温度和应变速率对挤压态 7A85 铝合金热压缩后的组织有重要影响。随着变形温度的升高和应变速率的降低(lnZ 减小), 组织中亚晶长大, 位错密度逐渐降低, 析出相数量减少, 再结晶晶粒长大, 动态软化机制由动态回复转变为动态再结晶; 挤压态 7A85 铝合金热压缩后组织中大量的析出相弥散分布在基体内或沿晶界分布, 抑制了动态再结晶的发生。

关键词:7A85 铝合金; 热压缩; 显微组织演变; 动态再结晶

中图分类号:TG146.2

文献标志码:A

Microstructure Evolution of As-extruded 7A85 Aluminum Alloy during High Temperature Deformation

ZHANG Xianfeng^{1†}, LU Zheng¹, ZHAO Zhao², GAO Wenli³, QIU Lili³, DU Zhentao³

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2.College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3.College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: 7A85 aluminum alloy, possessing the characteristics of low density, high strength, excellent hot working property, fine weldability, good corrosion resistance and high toughness, has been widely used in aerospace and mechanical structural parts. High temperature rheological behavior and microstructure evolution of as-extruded 7A85 aluminum alloy were investigated by optical microscope(OM), transmission electron microscope(TEM) and the unidirectional isothermal compression tests conducted at different temperatures(300, 350, 400 and 450 °C) with different strain rates of 0.01, 0.1, 1 and 10 s⁻¹. It is concluded that the deformation temperature and strain rate have an important effect on the microstructure of the as-extruded 7A85 aluminum alloy after hot compression. With the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate(decreasing of lnZ), the subgrains and the recrystallization grains grow, the dislocation density and the quantity of precipitates decrease, and the softening mechanism transforms from dynamic recovery to dynamic recrystallization. Plenty of precipitates of as-extruded 7A85 aluminum alloy after hot

* 收稿时间: 2016-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51271076, 51474101), National Natural Science Foundation of China(51271076, 51474101)

作者简介: 张显峰(1975—), 男, 内蒙古赤峰人, 高级工程师, 工学硕士

† 通讯联系人, E-mail: zhangxf0476@sohu.com

compression, dispersing in the matrix or along the grain boundaries, inhibit the occurrence of dynamic recrystallization.

Key words: 7A85 aluminum alloy; hot compression; microstructure evolution; dynamic recrystallization

7 系 Al-Zn-Mg-Cu 超高强铝合金是航空、航天、军事装备等领域的重要结构材料,工业生产中常通过挤压、锻造等热变形工艺使合金获得优良性能^[1-3].热模拟实验能够模拟工业锻造及轧制等热加工工艺,因此研究金属热变形时微观组织演变对优化金属的热加工工艺及控制热变形后的组织具有重要意义.Taleghani 等^[4]研究了粉末冶金 7075 铝合金的热压缩流变行为,其热变形激活能 Q 随生坯密度增大而增大,为 157~192 kJ/mol;ZHANG 等^[5]对比了 7056 和 7150 铝合金的流变行为,结果表明在相同变形条件下,7150 铝合金的变形激活能(229.75 kJ/mol)比 7056 铝合金(244.64 kJ/mol)低,但峰值流变应力高,因为 7150 铝合金中更多细小的亚结构和高密度析出相强化了合金;陈学海等^[6-7]、CHEN 等^[8]研究了 7085 铝合金热变形行为、加工图、组织演变和动态再结晶模型等,对 7085 铝合金的热变形进行了较为全面、系统的研究.

7A85 铝合金是我国自主研发的新型铝合金,目前,我国对 7A85 铝合金的热模拟研究尚处于起步阶段.贾逢博等^[9]研究了 7A85 铝合金锻件热压缩流变行为,探究了流变应力 σ 和变形温度 T 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的关系,其中,变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 可用 Zener-Hollomon(Z)参数概括, Z 参数定义为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q_0}{RT} \quad (1)$$

贾逢博等采用线性回归方法获得其流变应力本构方程;罗国云等^[10]研究了模具温度对 7A85 铝合金大规格锻件多向锻造成形均匀性的影响,利用 Deform3D 有限元软件对锻造成形进行数值模拟.在工业生产中,除了直接对铸态的金属和合金进行热加工,也常常对已经过塑性变形的合金再次进行热加工,以得到晶粒细小的高性能组织.故本文采用等温热压缩试验,研究不同热变形条件下挤压态 7A85 铝合金的流变应力行为和显微组织演变规律,分析激活能与显微组织的关系.

1 实验材料及方法

本实验所用材料为北京航天材料研究所提供

的 7A85 铝合金铸锭,其名义成分(质量分数%)为: 8.53~8.90Zn, 2.59~2.81Mg, 2.28~2.32Cu, 0.12~0.18Zr, Al 余量.铸锭经 460 °C/24 h 均匀化处理后,加工成 $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱体试样,并在两端加工 0.2 mm 深的凹槽,以填充润滑剂(75%石墨+20%机油+5%硝酸三甲苯酯,均为体积分数)来减小试样与实验机压头间的摩擦.在 Gleeble-3500 热模拟实验机上进行等温恒应变速率热压缩实验,变形温度为 300 °C, 350 °C, 400 °C 和 450 °C,应变速率为 0.01 s⁻¹, 0.1 s⁻¹, 1 s⁻¹ 和 10 s⁻¹,试样先以 10 °C/s 的加热速度升至 460 °C,保温 3 min,然后以 5 °C/s 降至压缩温度,保温 1 min 后,进行恒应变速率压缩实验,真应变为 1.1,压缩完立即水淬,以保留铝合金热压缩后的变形组织.

本实验运用线性回归方法建立 7A85 铝合金动态再结晶模型;利用 Zeiss 金相显微镜观察变形后的金相组织,观察部位为与压缩方向平行的纵截面;利用 JEM-3010 高分辨透射电子显微镜观察变形后组织中的亚结构和第二相的数量、分布情况.

2 结果与讨论

图 1 为挤压态 7A85 铝合金在不同热压缩条件下的显微组织.由图可见,热压缩后试样大变形区的组织已经没有明显的沿轴向的纤维状组织.当 $\ln Z$ 为最大值 50.47 时,晶粒被压缩,沿径向拉长(见图 1(a)),从轴向拉长的纤维组织到沿径向拉长的晶粒,晶粒的变形程度很大.在该变形条件下,析出相数量很多,由于应变速率很大,析出相没有溶解,在质点周围形成位错塞积,引起晶粒内部位错密度增加,使合金产生加工硬化,变形抗力显著增加.当 $\ln Z$ 降低至 44.30 时,变形温度升高,位错牵动和重新排列,同一滑移面上的异号位错可以相互吸引而抵消,位错可以滑移和攀移,形成与滑移面垂直的亚晶界,发生了“多边化”,晶粒细小,晶界比较模糊,晶粒的形状发生不均匀变形(见图 1(b)),为典型的动态回复组织.随着变形温度升高、应变速率降低,即 $\ln Z$ 值降低至 38.71 时,晶粒大致呈等轴状,晶界清晰,可在大晶粒周围观察到细小的等轴晶(见图 1

(c)),但是数量较少,说明该变形条件下已经开始发生动态再结晶.当温度继续升高,应变速率降低时,即 $\ln Z$ 降低至 33.57 时,晶粒逐渐长大,在大晶粒周围有大量细小的等轴晶(见图 1(d)),说明发生了动态再结晶.较高的变形温度和较低的应变速率有利于动态再结晶的发生,但是从图中没有观察到可以被压缩接触至将晶粒夹断的锯齿形晶界,说明该变形条件下挤压态 7A85 铝合金没有发生几何动态再

结晶.此时析出相数量减少,因为高温变形时基体固溶度增大,大量的析出相溶解,随着应变的增加,真应力-真应变曲线中有明显的软化现象.

综上所述,挤压态 7A85 铝合金的位错密度随温度的升高和应变速率的降低而减小,流变应力降低.晶粒尺寸随着 $\ln Z$ 的减小而增大,在高温低速变形时发生动态再结晶,软化机制由动态回复转变为动态再结晶,析出相数量逐渐减少.

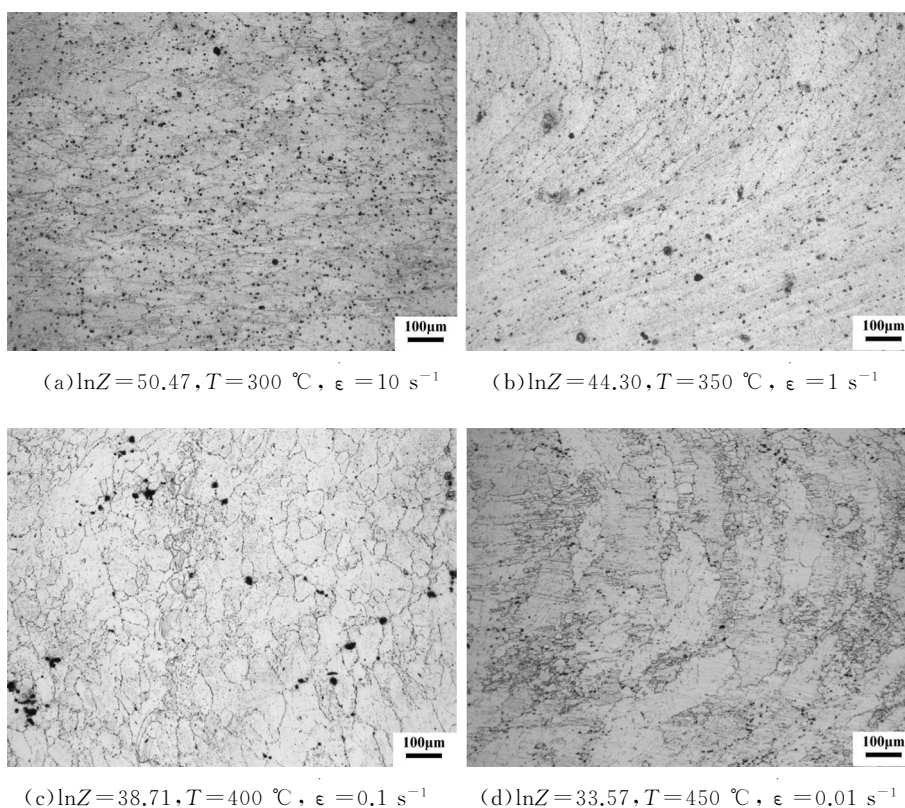


图1 挤压态 7A85 铝合金在不同变形条件下的金相图

Fig.1 Optical deformed microstructures of extruded 7A85 aluminum alloy under different deformation conditions

图 2 为挤压态 7A85 铝合金在不同变形条件下的透射电镜照片.当 $\ln Z$ 为最大值 50.47 时,由于应变速率很大,变形储能来不及释放,位错密度很大,位错相互缠结,一部分位错开始通过滑移和攀移排列成位错墙,大量的析出相或弥散分布在晶粒内,或排列在晶界处,弥散分布的析出相钉扎位错使位错相互交割缠结,螺型位错的交滑移及刃型位错的攀移能力较弱,晶界上的析出相阻碍了再结晶晶核界面迁移,提高了再结晶温度.因此在该变形条件下,热压缩的流变应力最大,主要发生动态回复,难以发生动态再结晶.当 $\ln Z$ 降低至 44.30 时,原子热激活能力增强,可以激活原本不利于变形的滑移系,因此可观察到许多由位错墙形成的亚晶界,说明开始形成亚晶粒.该变形条件下组织中的位错密

度略有降低,主要发生动态回复,真应力有所降低,但是析出相数量仍然很多,主要为与基体完全共格的 Al_3Zr ,平均尺寸为 10~20 nm. Al_3Zr 析出相颗粒对位错的钉扎延缓了位错的对消和重新排列,颗粒钉扎亚晶界减慢了亚晶的长大,从而延缓了回复过程,阻碍了动态再结晶的发生,保留了比较大的加工硬化效果,该变形条件下没有发生动态再结晶.当 $\ln Z$ 降低至 38.71 时,可观察到较大角度的亚晶.由于温度升高、应变速率降低,高温变形时由位错累积和重组形成的亚晶在外加应力的作用下,具有相近取向差的亚晶群通过转动可以合并成一个大的亚晶,在转动过程中,小角度界面取向差逐渐减小,大角度界面取向差增大;扭转和非对称界面取向差减小,倾斜和对称界面取向差增大.亚晶发展成

更大角度的晶粒,大量亚晶界消失,该过程为“连续动态再结晶”^[11].由于该变形条件温度升高、应变速率降低,很多第二相粒子会溶解于基体中,所以析出相对位错的钉扎减弱,温度的升高和应变速率的降低还会加快位错抵消,位错密度很小,当 $\ln Z$ 为最小值 33.57 时,位错很少,晶界明晰且锋锐,变形温度升高可促进亚晶发展成大角度晶粒及增强再结晶晶界的迁移能力,应变速率降低可使动态再结晶过程进行得更充分,再结晶晶粒有足够的时间长

大,因此可观察到大量的再结晶晶粒,且尺寸增大,说明在该变形条件下主要以动态再结晶为主,此时析出相数量很少.

综上所述,随着 $\ln Z$ 的减小,挤压态 7A85 铝合金的位错密度降低,析出相数量减少,流变应力降低,晶界越清晰和锋锐,动态软化机制由动态回复转变为动态再结晶,动态再结晶机制主要为连续动态再结晶和不连续动态再结晶.

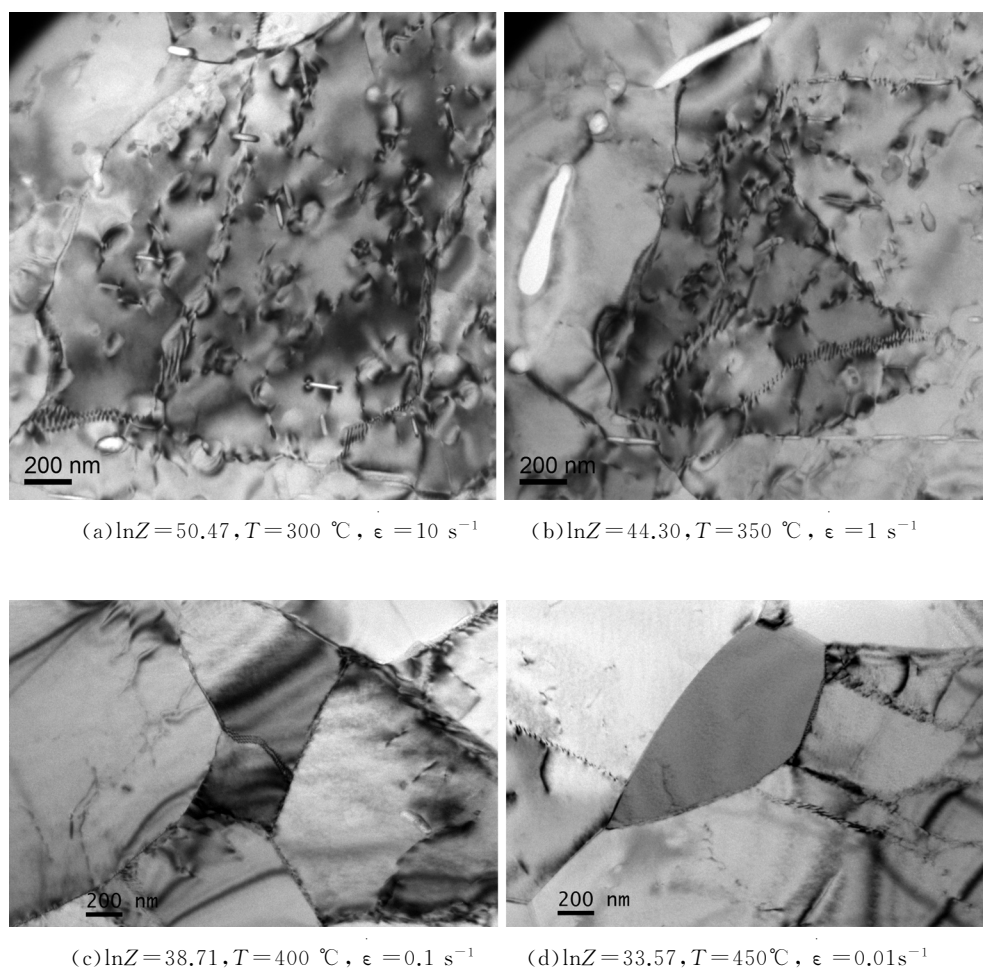


图 2 挤压态 7A85 铝合金在不同 $\ln Z$ 值下的 TEM 图

Fig.2 TEM micrographs of extruded 7A85 aluminum alloy under different $\ln Z$

3 结 论

1) 挤压态 7A85 铝合金在 GP 区和 η' 相的共同强化作用下,热压缩变形时的流变应力更大.挤压态 7A85 铝合金热压缩后组织中析出相数量较多,弥散分布在基体内或沿晶界分布,抑制了动态再结晶的发生.

2) 挤压态 7A85 铝合金在热压缩过程中发生了

动态回复和动态再结晶,并且随着 $\ln Z$ 的减小,热压缩后的组织由动态回复组织向动态再结晶组织转变,挤压态 7A85 铝合金的再结晶机制为连续动态再结晶(CDRX)、不连续动态再结晶(DDRX).

3) 随着 $\ln Z$ 的减小,挤压态 7A85 铝合金热压缩后组织中亚晶长大,位错密度降低,析出相数量减少,再结晶晶粒长大,动态软化机制由动态回复转变为动态再结晶.

参考文献

- [1] 王洪,付高峰,孙继红,等.超高强铝合金研究进展[J].材料导报,2006,20(2):58—60.
WANG Hong, FU Gaofeng, SUN Jihong, *et al.* Present research and developing trends of ultra high strength aluminum alloys[J]. Materials Review, 2006, 20(2): 58—60. (In Chinese)
- [2] 李恒,汪永红,鄂孔元,等.热处理参数对超高强铝合金硬度的影响[J].重庆文理学院学报,2012,31(5):20—23.
LI Heng, WANG Yonghong, E Kongyuan, *et al.* The influence of heat treatment parameters on the hardness of super-high strength aluminum alloy[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences, 2012, 31(5): 20—23. (In Chinese)
- [3] DENG Y L, WAN L, ZHANG Y Y, *et al.* Influence of Mg content on quench sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011, 509(13): 4636—4642.
- [4] TALEGHANI M A J, NAVA E M R, SALEHI M, *et al.* Hot deformation behaviour and flow stress prediction of 7075 aluminium alloy powder compacts during compression at elevated temperatures[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 534(2): 624—631.
- [5] ZHANG H, JIN N P, CHEN J H. Hot deformation behavior of Al-Zn-Mg-Cu-Zr aluminum alloys during compression at elevated temperature[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 437—442.
- [6] 陈学海,陈康华,董朋轩,等.7085 铝合金的热变形组织演变及动态再结晶模型[J].中国有色金属学报,2013,23(1):44—50.
CHEN Xuehai, CHEN Kanghua, DONG Pengxuan, *et al.* Microstructure evolution and dynamic recrystallization model of 7085 aluminum alloy during hot deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 44—50. (In Chinese)
- [7] 陈学海,陈康华,梁信,等.7085 铝合金热变形的流变应力行为和显微组织[J].粉末冶金材料科学与工程,2011,16(2):225—230.
CHEN Xuehai, CHEN Kanghua, LIANG Xin, *et al.* Flow stress behavior and microstructure of 7085 aluminum alloy during hot deformation[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(2): 225—230. (In Chinese)
- [8] CHEN S, CHEN K, PENG G, *et al.* Effect of heat treatment on hot deformation behavior and microstructure evolution of 7085 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 537: 338—345.
- [9] 贾逢博,易幼平,黄施全,等.7A85 铝合金热压缩流变行为与本构方程研究[J].热加工工艺,2010,39(16):19—21.
JIA Fengbo, YI Youping, HUANG Shiquan, *et al.* Study on flow behavior and constitutive equation of 7A85 aluminum alloy during hot compression[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(16): 19—21. (In Chinese)
- [10] 罗国云,易幼平,崔金栋.7A85 铝合金大锻件多向锻造均匀性研究[J].热加工工艺,2014(9):147—150.
LUO Guoyun, YI Youping, CUI Jindong. Research on uniformity of multi-directional forging for 7A85 aluminum alloy large-sized forgings[J]. Hot Working Technology, 2014(9): 147—150. (In Chinese)
- [11] HU H E, ZHEN L, ZHANG B Y, *et al.* Microstructure characterization of 7050 aluminum alloy during dynamic recrystallization and dynamic recovery [J]. Materials Characterization, 2008, 59(9): 1185—1189.