

# 热变形温度对 7085 铝合金组织和性能的影响

陈学海, 陈康华, 梁信, 陈送义, 彭国胜

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

**摘要:** 对 7085 铝合金进行温度范围为 350~450 °C 的恒应变速率热压缩实验, 模拟其工业等温锻造过程。采用金相显微镜、扫描电镜、力学性能测试、剥落腐蚀测试以及应力腐蚀开裂(SCC)测试技术研究热变形温度对 7085 铝合金锻件的显微组织、力学性能、剥落腐蚀性能以及应力腐蚀性能影响。研究结果表明: 在 350 和 400 °C 下变形的合金在热压缩与压缩后缓冷过程中未发生再结晶, 而在 420 和 450 °C 下变形的合金再结晶迹象明显; 7085 变形形态合金经固溶与时效处理后, 合金时效态的再结晶程度以及平均晶粒尺寸随变形温度的升高而增大; 7085 合金时效态的室温强度随变形温度升高而减小, 塑性降低不显著; 不同温度变形的 7085 合金的断裂模式均为韧性断裂; 随着变形温度的升高, 7085 合金 T6 态的抗剥落腐蚀与抗应力腐蚀性能降低。

**关键词:** 7085 铝合金; 热变形温度; 显微组织; 力学性能; 剥落腐蚀; 应力腐蚀

中图分类号: TG I46.2 文献标志码: A

## Effects of hot deformation temperature on microstructure and properties of 7085 aluminum alloy

CHEN Xue-hai, CHEN Kang-hua, LIANG Xin, CHEN Song-yi, PENG Guo-sheng

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The isothermal hot compression tests of 7085 aluminum alloy were carried out at a constant strain rate and temperatures from 350 to 450 °C to simulate the isothermal forging process. The effects of hot deformation temperature on microstructure, mechanical properties, exfoliation corrosion property and stress corrosion property of 7085 alloy were investigated by optical microscope, scanning electron microscope, mechanical property testing, exfoliation corrosion and stress corrosion cracking testing. The results show that the recrystallization during the isothermal hot compression process and subsequent slow cooling is not activated when the alloy is deformed at 350 and 400 °C, respectively. However, the recrystallization happens obviously when the alloy is deformed at 420 and 450 °C, respectively. After solution treatment and aging treatment, the recrystallization and mean grain size of the alloy increase with raising hot deformation temperature. With the increase of deformation temperature, the strength of aged 7085 alloy at room temperature decreases, but the elongation decreases a little. The fracture models of all aged alloys deformed at different temperatures are ductile fracture. The exfoliation corrosion resistance and anti-stress corrosion cracking properties of peak-aged 7085 alloys decrease with the increase of deformation temperature.

**Key words:** 7085 alloy; hot deformation temperature; microstructure; mechanical properties; exfoliation corrosion; stress corrosion

新一代飞机构件大型化的发展趋势, 提高超大厚度铝合金锻件的需求<sup>[1-4]</sup>。美国 ALCOA 锻造产业公司

2003 年开发的 7085 铝合金, 相比传统的 7×××系高强度铝合金, 具有淬透性好的显著特点, 更适用于新

基金项目: 国家重点基础研究计划资助项目(2010CB731701); 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金资助项目(50721003)

收稿日期: 2010-03-15; 修订日期: 2010-06-21

通信作者: 陈康华, 研究员, 博士; 电话: 0731-88830714; E-mail: khchen@mail.csu.edu.cn

一代飞机大厚度结构件。目前, 已用于A380大型客机的机翼大梁和翼肋, 成为新一代飞机中质量最大的铝合金主承力结构件<sup>[5-6]</sup>。

等温锻造工艺是一种可以低成本获得内部组织细密均匀、缺陷少、加工余量小、形状复杂、性能优良的零件热加工工艺<sup>[7-9]</sup>, 其中锻造温度是该热变形工艺的重要参数之一。目前, 人们就锻造温度对7085铝合金的热变形影响进行了大量模拟研究: 寇琳媛等<sup>[10]</sup>研究了7150合金在不同温度下的热变形流变应力行为及显微组织演化规律, 研究结果表明: 7150铝合金在高温压缩变形时的流变应力随变形温度的升高而减小。在较低的应变速率下, 当变形温度为450℃时, 7150铝合金的主要软化机制为动态再结晶; 当变形温度低于450℃时, 合金的主要软化机制为动态回复。蔡一鸣等<sup>[11]</sup>研究了7039合金在变形温度为300~500℃的流变变形行为。LIN等<sup>[12]</sup>对Al-Zn-Mg-Cu-Cr铝合金的研究表明: 高温变形有利于合金动态再结晶的发生。然而, 到目前为止, 关于热变形温度对7085合金变形态及时效态的组织和性能影响未见报道。因此, 本文作者以7085铝合金为研究对象, 通过在不同热变形温度下进行等温压缩试验, 模拟工业中不同锻造温度条件下的等温锻造, 研究锻造温度对7085合金的显微组织、力学性能、抗剥落腐蚀性能以及抗应力腐蚀性能的影响, 以期为7085的相关研究提供理论和实验参考。

## 1 实验

以高纯Al(99.997%)、工业纯Zn(99.9%)、工业纯Mg(99.9%)和Al-49.5%Cu、Al-4.55%Zr中间合金为原料制备7085铝合金, 合金名义化学成分(质量分数, %)为: Zn 7.5, Mg 1.5, Cu 1.6, Zr 0.12, Al余量。合金在电阻炉中进行熔炼, 经过C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>精炼, 浇入预热铁模中。铸锭经过(450℃, 24 h)成分均匀化后开坯处理, 机加工去除头尾和表皮后成d 65 mm×60 mm的圆柱试样。等温压缩试验在5 000 kN液压机上进行, 试样与模具接触面涂抹润滑剂(75%石墨+20%机油+5%硝酸三甲苯脂)以减小试样与高温合金模具的摩擦。试样采用自行研制的电阻炉(保温时, 温度波动范围为-2~0℃)进行加热, 由室温经1 h加热到变形温度, 并保温1 h后再进行等温压缩。试样沿圆柱高度方向进行等温压缩, 变形温度为350、400、420和450℃, 变形度为85%, 恒应变速率为0.1 s<sup>-1</sup>。压缩后, 试样空冷至室温。合金的固溶处理和时效制度为: 由室温经

1 h升温至470℃, 在470℃保温1 h后水淬, 再进行120℃, 24 h峰时效处理。

变形态试样采用Keller腐蚀试剂(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO<sub>3</sub>+95 mL H<sub>2</sub>O)腐蚀, 时效态试样采用Graff Sargent腐蚀试剂(1 mL HF+16 mL HNO<sub>3</sub>+3 g CrO<sub>3</sub>+83 mL H<sub>2</sub>O)以观察亚晶<sup>[13]</sup>; 腐蚀后的试样在PME3-313uN型金相显微镜上观察组织, 观察部位为法线与压缩轴垂直的纵截面。

沿试样锻造面的径向取室温拉伸试样和应力腐蚀试样, 室温拉伸试样规格如图1所示。拉伸实验在Instron3369力学试验机上进行, 断口形貌观察在X-650型扫描电镜上进行。

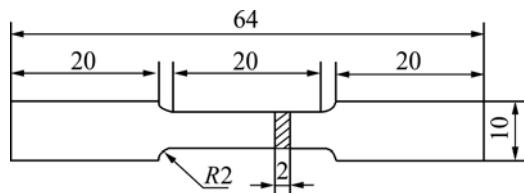


图1 拉伸试样尺寸规格

Fig.1 Schematic diagram of tensile sample (mm)

剥落腐蚀实验参照HB5455-90标准进行, 腐蚀介质分为4 mol/L NaCl+0.4 mol/L KNO<sub>3</sub>+0.1 mol/L HNO<sub>3</sub>的标准剥落腐蚀溶液, 实验温度为(25±1)℃, 腐蚀介质体积与腐蚀面的面积之比为25 mL/cm<sup>2</sup>。试样在溶液中48 h后取出, 根据标准判断合金浸泡的剥蚀情况。评级代号如下: N表示没有发生明显腐蚀; P表示点蚀; EA、EB、EC、ED分别代表剥落腐蚀逐渐加重。

应力腐蚀试验参照高强度合金双悬臂试样应力腐蚀试验方法(GB/T 12445.1—1990)进行。双悬臂试样用螺钉加载预裂, 置于恒温箱中, 溶液温度控制在(35±1)℃范围内, 试验介质为3.5%NaCl水溶液, 用读数显微镜跟踪测量并记录两表面裂纹扩展时的长度和相应的时间, 测量裂纹扩展长度的面和组织观察面相同。由各测量时间的平均裂纹长度a(m), 根据下式计算相应的应力强度因子K<sub>I</sub>(MPa·m<sup>1/2</sup>):

$$K_I = \frac{ELh[3h(a+0.6h)^2 + h^2]^{1/2}}{4[(a+0.6h)^3 + h^2a]} \quad (1)$$

式中: L为加载位移, m; E为弹性模量, MPa; h为试样的半高度, m。最后求得da/dt(应力腐蚀开裂扩展速率)—K<sub>I</sub>(应力强度因子)曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 合金的金相组织

#### 2.1.1 合金的变形态组织

在不同温度下变形的合金变形态金相组织如图 2 所示。在 350 和 400 °C 变形后空冷的合金试样呈现黑色和灰色交替的板条状区域，这些区域边界是合金经锻压变形后压扁的原始晶粒晶界，未发现再结晶的迹象(见图 2(a)和(b))。而在 420 和 450 °C 变形后空冷试样的原始晶粒晶界处出现细小的新晶粒，表现出较为明显的再结晶迹象(见图 2(c)和(d))。

#### 2.1.2 合金的时效态组织

图 3 所示为时效态 7085 合金试样经 Graff Sargent 试剂腐蚀后的金相组织。Graff Sargent 腐蚀剂不仅能腐蚀晶界，而且能腐蚀亚晶界。时效态 7000 系的合金经 Graff Sargent 试剂腐蚀后，在较低倍数的显微镜下观察，合金中非再结晶区域由于含有大量细小亚晶组织而呈黑色，而再结晶区域由于亚晶合并

长大使该区域亚晶界减少而呈亮白色。在较高倍数的显微镜下观察，可观察到非再结晶区域为大量的细小亚晶，再结晶区域为粗大条形的晶粒<sup>[14-15]</sup>。由合金的时效态组织可以看出，350 和 400 °C 变形的时效态合金内部保留了大量细小的亚晶组织，并且保持明显的纤维状组织，呈典型的未再结晶组织(见图 3(a)和(b))；420 和 450 °C 变形的时效态合金的亚晶已经长大，部分亚晶已经合并成为条形的粗大晶粒，呈部分再结晶组织(见图 3(c)和(d))。总的来说，随着合金的变形温度升高，合金 T6 态的再结晶程度和平均晶粒尺寸增大。

### 2.2 合金力学性能

在不同温度下变形的合金 T6 态力学性能如表 1 所列。由表 1 可知，合金强度(抗拉强度和屈服强度)和塑性都随着变形温度升高而降低，但塑性降低不显著：经 350 °C 变形合金 T6 态的抗拉强度为 587.6 MPa，屈服强度为 549.6 MPa，伸长率达到 16.7%。经 400 °C 变形时效态合金相对于经 350 °C 变形时效态合金的抗拉强度和屈服强度分别降低了 10.5 MPa 和 8.1 MPa，伸长率降低了 0.8%。相对于经 400 °C 变形合金的 T6

