

## 7050 铝合金厚板织构、拉伸性能及断裂韧性的不均匀性

张新明, 韩念梅, 刘胜胆, 宋丰轩, 曾瑞林, 黄乐瑜

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 采用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜、X 射线衍射、常温拉伸和紧凑拉伸实验, 对 120 mm 厚的 7050 铝合金板材的织构分布、拉伸性能及断裂韧性进行分析。结果表明: 沿板材厚度方向, 合金的组织、织构、强度及断裂韧性呈不均匀分布; 在同一厚度处, 合金的强度和断裂韧性具有明显的各向异性; 由板材表层到中心, 粗大第二相及再结晶晶粒尺寸逐渐增大; 板材表层的织构主要由剪切织构  $\{111\}\langle 110\rangle$  和立方织构  $\text{Cube}\{001\}\langle 100\rangle$  组成, 中心主要由  $\beta$  取向轧制织构和少量立方织构组成, 1/4 厚度处是过渡层; 由板材表层到中心, 轧向及长横向强度呈不均匀变化, 板材中心处强度比表层的小; 板材同一厚度处, 强度和断裂韧性具有明显的各向异性, 轧向强度大于长横向和短横向强度, L-T 取向的断裂韧性大于 T-L 取向和 S-L 取向的断裂韧性; L-T 取向的断裂方式主要是穿晶断裂, S-L 取向的断裂方式以沿晶断裂为主, T-L 取向是混合型断裂, 其穿晶断裂比例比 L-T 取向的穿晶断裂比例小, 沿晶断裂比例比 S-L 取向的沿晶断裂比例小。

**关键词:** 7050 铝合金; 不均匀性; 各向异性; 织构; 拉伸性能; 断裂韧性

中图分类号: TG 146.1

文献标识码: A

## Inhomogeneity of texture, tensile property and fracture toughness of 7050 aluminum alloy thick plate

ZHANG Xin-ming, HAN Nian-mei, LIU Sheng-dan, SONG Feng-xuan, ZENG Rui-lin, HUANG Le-yu

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The texture distribution, tensile property and fracture toughness of 7050 aluminum alloy thick plate were investigated by optical microscopy, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray diffractometry, tensile and toughness tests. The results show that the microstructure, texture, tensile property and fracture toughness are inhomogeneous in different layers along the thickness direction. At the same thickness, the tensile property and fracture toughness show appreciable anisotropy. From the surface to the center, the average sizes of the coarse second phase particles and recrystallization grains increase. Near the surface of the plate, typical shear textures  $\{111\}\langle 110\rangle$  and cube textures  $\{001\}\langle 100\rangle$  are observed, while the center of the plate shows typical  $\beta$  fiber texture with a scattering of cube texture. The quarter layer of the plate seems to serve as a transition layer. From the surface to the center, the strength is inhomogeneous in the rolling direction and long transverse direction. The strength in the center is smaller than that on the surface of the plate. The strength and fracture toughness show appreciable anisotropy at the same thickness. The strength in the rolling direction is higher than that in the long transverse direction and the short transverse direction, and the fracture toughness in the L-T orientation is higher than that in the T-L and S-L orientations at the same thickness. The fracture mode in the L-T orientation is transgranular fracture, and in the S-L orientation the fracture mode is intergranular fracture. In the T-L orientation, the fracture mode is a mixed fracture, the fraction of the transgranular fracture is lower than that in the L-T orientation, and the fraction of the intergranular fracture is lower than that in the S-L orientation.

**Key words:** 7050 aluminum alloy; inhomogeneity; anisotropy; texture; tensile property; fracture toughness

现代飞机逐渐向大型、高速、多载、长寿命和确保安全方向发展,这就要求结构材料具有更高的强度和更优良的断裂韧性<sup>[1-2]</sup>。如果能够在不降低合金强度的基础上提高合金的断裂韧性,就可充分发挥合金的应用潜力。

7050 铝合金的淬火敏感性低,适用于大规格厚板及锻件的生产,特别是 7050-T7451 预拉伸厚板已广泛用于美国的第四代战斗机 F22 和 F35 的主体构件中,并大量应用于 Boeing777 客机中,主要用作飞机的机身框架、翼梁和尾翼等部件<sup>[3]</sup>。目前人们对 7050 铝合金板材的微观组织、热处理过程、变形过程及性能之间的关系做了大量研究<sup>[4-5]</sup>,但对厚度方向不均匀性的研究较少。铸锭组织不均匀、轧制过程中变形不均匀、固溶中再结晶不均匀和淬火敏感性等因素导致板材的组织、织构及性能沿厚度方向不均匀分布并呈现明显的各向异性,严重地阻碍了其在航空、航天领域的应用<sup>[6-9]</sup>。因此,本文作者对 120 mm 厚的 7050-T7451 轧制板的显微组织、拉伸性能、织构、断裂韧性进行研究,探讨影响厚板不均匀性和各向异性的因素,以期能为改善厚板的不均匀性并提高材料的强度、断裂韧性提供依据。

## 1 实验

实验选用的材料为 120 mm 厚的 7050-T7451 铝合金轧制板材。合金实际分析成分为(质量分数, %): Zn 5.89, Mg 2.16, Cu 1.99, Zr 0.11, Fe 0.08, Si 0.03, 余量为 Al。

沿板材厚度方向从表面到中心间隔均匀取 5 个厚度为 2.5 mm 的板材,按国家标准 GB/6497—14 规定加工轧向(LT)和长横向(TL)的拉伸试样,垂直板材厚度方向取 2.5 mm 厚的板材,加工短横向(SL)的拉伸试样,在 CSS 44100 电子万能实验机上进行拉伸力学性能测试。

织构样品也在 2.5 mm 厚的板材上切取,试样尺寸为 24 mm × 14 mm × 2.5 mm,试样表面采用氢氧化钠溶液腐蚀以减少试样表面的残余应变和应力的影响。织构测定在 Bruker D8 Discover 型 X 射线衍射仪上进行,管电压为 40 kV,管电流为 40 mA,采用 Cu K<sub>α</sub> 辐射,用 Schulz 背反射法测量 {111}、{200}、{220} 和 {311} 4 张不完整极图,测得的极图经修正后,采用 Bunge 级数展开法计算取向分布函数,结果用恒  $\varphi_2(\Delta\varphi_2=5^\circ)$  截面图表示。采用 TANG 等<sup>[10]</sup>提出的方法进行织构的定量计算,角度偏差在 15.5° 以内视为同一种织构。

按照国家标准 GB—4161 规定:当板材厚度大于二倍试样厚度时,应在材料 1/4 厚度处取样。故在本实验中在板材 1/4 厚度处切取 24 mm 厚的板材,制备 T-L、L-T、S-L 3 个取向的标准紧凑拉伸试样,测量其断裂韧性。

样品经过粗磨、抛光后用铬酸试剂腐蚀,在 XJP-26A 型金相显微镜上进行组织观察。

在 KYKY-2800 扫描电镜下观察不同厚度层的组织结构,对比观察粗大第二相、再结晶晶粒的大小与分布,并对粗大第二相粒子合金元素的能谱进行分析。采用扫描电镜观察试样的断口形貌,加速电压为 20 kV。

## 2 实验结果

### 2.1 铝合金的组织观察

7050 铝合金纵向面的金相组织如图 1 所示。由图

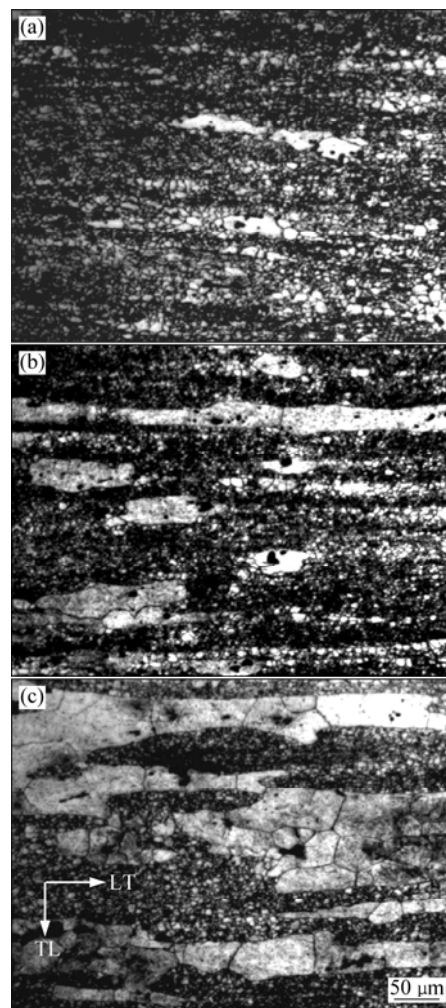


图 1 7050 铝合金纵向面的金相组织

Fig.1 Optical micrographs of 7050 aluminum alloy plate: (a) Near plate surface; (b) At quarter layer of plane; (c) At center of plane

1 可知：试样发生部分再结晶，由大量细小的亚晶和异常粗大的再结晶晶粒组成；腐蚀后再结晶区域呈白色，未再结晶区域含大量亚晶，腐蚀后呈黑色。横断面上的再结晶晶粒呈类等轴状，纵向面和轧制面上的再结晶晶粒沿轧向拉长，整个再结晶晶粒呈扁平状；表层主要是大量的亚晶和少量的再结晶，再结晶晶粒的尺寸较小；板材 1/4 厚度处，再结晶晶粒所占比例明显增大，再结晶晶粒尺寸也变大；板材中心处再结晶晶粒的尺寸进一步增大。

在不同厚度处 7050 铝合金的 SEM 像如图 2 所示。由图 2 可见，粗大第二相以链状形式沿轧制方向分布，从板材表层到中心，第二相尺寸明显增大；粗大第二相多分布在再结晶晶粒内部，表明再结晶是通过粗大第二相诱发形核的。对第二相粒子进行能谱分析，发现一些第二相主要含 Al, Cu 和 Mg 元素，摩尔比约为 2:1:1，形貌为规则椭球状，应为 S 相( $Al_2CuMg$ )；

有些第二相主要含 Al, Cu 和 Fe 元素，形状不规则，化学成分接近  $Al_7Cu_2Fe$  相；还有一部分第二相含大量 Mg 和 Si 元素，化学成分接近  $(Al)Mg_2Si$ 。由文献[11]的研究结果可知，这些是在铸造或均匀化过程中形成的不溶化合物。

## 2.2 再结晶组织

图 3 所示为 7050 铝合金厚板不同厚度层的组织。由图 3 可知，板材中主要有 3 种类型的组织：剪切织构(旋转立方织构  $r\text{-cube}\{001\}\langle 110\rangle$ ,  $\{111\}\langle 110\rangle$  织构)、再结晶织构(立方织构  $Cube\{001\}\langle 100\rangle$ ,  $Cube_{ND}$  织构(绕法向旋转  $20^\circ\sim 25^\circ$  的立方织构))和变形织构(黄铜织构 Brass  $\{011\}\langle 211\rangle(B)$ , S 织构  $\{123\}\langle 634\rangle$  和铜织构 Copper  $\{112\}\langle 111\rangle$ )。板材表层和 1/8 层处主要是剪切织构(旋转立方织构  $r\text{-cube}\{001\}\langle 110\rangle$ ,  $\{111\}\langle 110\rangle$  织构)和立方织构  $Cube\{001\}\langle 100\rangle$ ；中心层和 3/8 层处主要

