

2297-T87 铝合金厚板力学性能的各向异性与厚向不均匀性

王海金, 郑子樵, 范雪松

(中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过拉伸试验、金相显微镜、X 射线衍射、扫描电镜和透射电镜分析研究了 85 mm 厚的 2297-T87 铝合金厚板力学性能的各向异性与厚度方向的不均匀性。结果表明: 在 2297-T87 合金厚板 L 方向上力学性能沿厚度层呈不均匀性, 从表层到中心强度逐渐提高, 而 LT 方向性能变化不明显; 织构沿厚度方向分布不均匀, 厚板中心主要是 β 纤维成分和部分的 Goss 织构; 而表层除了少量变形织构, 还存在再结晶织构; T/8 厚度为大量的剪切织构; T/4 厚度层是一个过渡层, 同时存在少量再结晶织构、剪切织构和 β 纤维。同一厚度层不同方向的力学性能各向异性较为明显, 强度和塑性的变化趋势一致: $L > LT > ST$ 。这种各向异性与晶粒结构和第二相粒子有关。

关键词: 2297-T87 合金厚板; 各向异性; 不均匀性; 力学性能; 织构

中图分类号: TG146.2^{†1}

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)05-1196-07

2297 合金是 20 世纪 90 年代初由美国 Alcoa 铝业公司研发的第 3 代铝锂合金。主要产品形式为厚板, 其厚度可达 152 mm, 热处理状态为 T87。该合金具有低密度、高弹性模量和较高的疲劳裂纹扩展抗力, 可代替早期的 7050-T7451 和 2124-T851 合金厚板, 是机身框架类等主承力结构件的优选材料^[1-3]。作为飞机首选的结构材料, 其力学性能的各向异性和不同厚度层的均匀性必须达到相当的标准, 但是对于厚板合金, 由于加工和热处理工艺条件以及微观组织的变化, 导致其强度、韧性和疲劳裂纹扩展抗力等方面呈现出一定程度的各向异性和厚度方向的不均匀性。

关于 Al-Li 合金在热处理和加工过程中的微观组织, 包括织构的演变, 已经进行了很多研究^[4-8]。Chung 等^[4]研究了晶粒形貌和织构对 Al-Li 合金的影响。Spriano 等^[5]认为 A. A. 8090-T87 合金厚板屈服强度的各向异性是由析出相强化、固溶强化、晶界强化及织构共同决定的, 织构通过 Taylor 因子影响材料的强度, 在厚板表面为再结晶立方织构, 而在厚板中心为 Brass 织构。Jata 等^[6]认为固溶态材料屈服强度的各向异性归因于材料中的晶体学织构, 而挤出态材料的各向异性是由于析出粒子和织构的共同作用。Vasudevan 等^[7]认为晶体学织构是影响厚板屈服强度不均匀的部分因素, 晶粒大小、不同厚度的淬火速率及析出相也是影响因素。

本实验对 2297-T87 合金厚板力学性能的各向异性和厚度方向的不均匀性进行研究, 并探讨织构和微观组织对其的影响机理, 以期为该合金在飞机结构中的应用提供实验依据。

1 实验

实验所用材料为国产 85 mm 厚的 2297-T87 铝锂合金厚板。拉伸试样分别取自板材不同方向、不同厚度, 即在板材轧向 L 和长横向 LT 方向的表层(试样中心距表面 5 mm)、T/8、T/4、3T/8、T/2 厚度层分别取样, 并在短横向 ST 方向取样。

金相观察是在 Leica DMILM 光学显微镜下进行。先对金相试样进行阳极覆膜, 在 200 mL 水中加 5 mL 氟硼酸作为阳极覆膜溶液, 覆膜电压为 24 V。拉伸试验在 MTS 858 材料试验机上进行, 拉伸速度为 2 mm/min。SEM 观察是用 Sirion 200 场发射扫描电镜进行, 加速电压为 15 kV。TEM 观察是在 TecnaiG² 20 型透射电镜上进行, 加速电压为 200 kV。TEM 试样先经机械减薄至 0.08 mm 左右, 然后采用双喷电解减薄仪减薄。电解溶液为 25% 硝酸和 75% 甲醇混合溶液(体积分数)。采用液氮冷却至 -20~-35 °C, 工作电压为 15~20 V, 电流控制在 80~95 mA。织构样品尺寸为 10 mm × 10 mm × 2 mm, 对表面进行轻微腐蚀以消除残余应力。

收稿日期: 2015-05-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2013AA032401)

作者简介: 王海金, 男, 1988 年生, 硕士生, 中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083, 电话: 0731-88830270, E-mail: wanghaijin2011@126.com

织构分析是在 Bruker D8 Discover 型 X 射线衍射仪上进行, 加速电压为 200 kV。

2 实验结果

2.1 拉伸性能

对 2297-T87 合金厚板的不同方向、不同厚度的试样进行拉伸性能测试, 结果如图 1 所示。从图 1a 中可知, 在 L 方向上, 从板材表层到中心, 抗拉强度和屈服强度逐渐升高, 变化幅度较大, 伸长率降低较明显; 在 LT 方向上, 从表层到中心, 抗拉强度和屈服强度升高不明显, 伸长率降低幅度很小。即 2297-T87 合金厚板 L 方向的拉伸性能在厚度方向呈不均匀性。同时, 合金厚板在同一厚度上也存在较为明显各向异性, 如图 1b 所示, L 方向试样强度和延伸率最高, ST 方向的强度最差, 尤其是屈服强度, LT 方向强度居中, LT 和 ST 方向的延伸率均很低。

2.2 金相组织

图 2 为 2297-T87 厚板不同厚度层的三维金相组织。从图中可以看出, L-LT 面和 L-ST 面上, 厚板中心层和 T/4 厚度层晶粒呈纤维状更加明显、均匀。从 LT-ST 面上看, 同样是厚板中心层和 T/4 厚度层的晶粒界面更加细小、扁平、均匀; 对比中心层和 T/4 层的晶粒, T/4 层的晶粒更为细小一些, 可能在前期变形加工和热处理过程中发生了相对较多的再结晶。相比来说, 厚板表层的晶粒尺寸差异较大, 并未完全形成扁平的纤维状组织结构。

2.3 SEM 观察

图 3 为不同厚度层第二相粒子的扫描电镜照片。整体上来说, 第二相粒子沿轧向呈链状分布。图 3a 为厚板表面的第二相粒子分布情况, 粒子数量较少, 但较为粗大, 出现部分沿晶界连续分布的现象; 图 3b 中 T/4 层的第二相粒子分布密度相对大一些, 但分布弥散不连续; 而图 3c T/2 层的第二相粒子分布密度较 T/4 层小一些, 并且更为细小。这也可以看出表面的

晶粒较大, 尺寸差异较大, T/4 层的晶粒最小, 同时也较为均匀, T/2 层晶粒大小介于两者之间, 结果与金相照片相一致。同时, 对 T/2 层中第二相粒子进行能谱分析, 晶界上粗大的粒子为难溶的 Al(CuFeMn) 杂质相 (图 3d, 3e)。

2.4 TEM 观察

图 4 为在 2297-T87 厚板 T/8 和 T/2 厚度处析出相的 TEM 照片。图 4a、4b 分别为 T/8 和 T/2 厚度层 <112>_a 方向析出相暗场形貌。2297-T87 厚板合金中析出相主要为 T1 相, 不同厚度层的析出密度差别不明显: T/2 层析出 T1 相的密度相比 T/8 层略大一些, 而两者尺寸大小相差很小。T/8 和 T/2 厚度层的晶界形貌如图 4c、

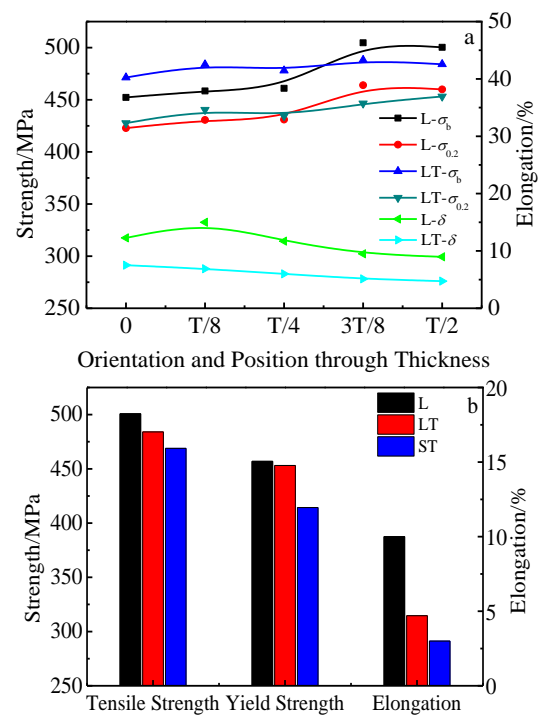


图 1 2297-T87 厚板不同方向、不同厚度的常规拉伸性能 Fig.1 Tensile properties of 2297-T87 plate in different layers through thickness: (a) L and LT orientation of different layers; (b) L, LT and ST orientation in the center layer

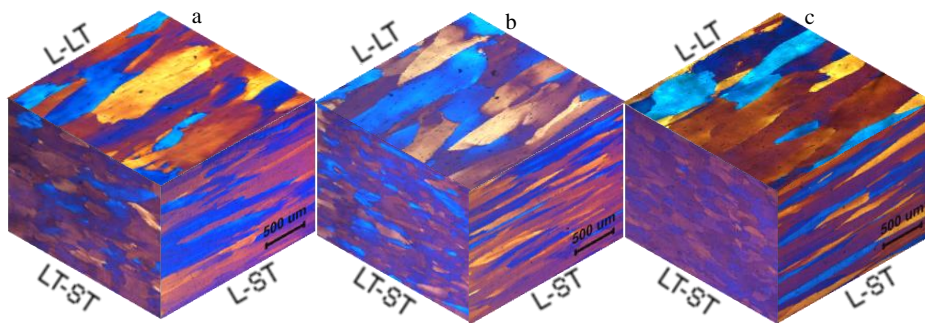


图 2 2297-T87 厚板不同厚度层的三维金相组织

Fig.2 Triplanar optical micrographs of 2297-T87 plate in different layers: (a) surface, (b) T/4 layer, and (c) T/2 layer

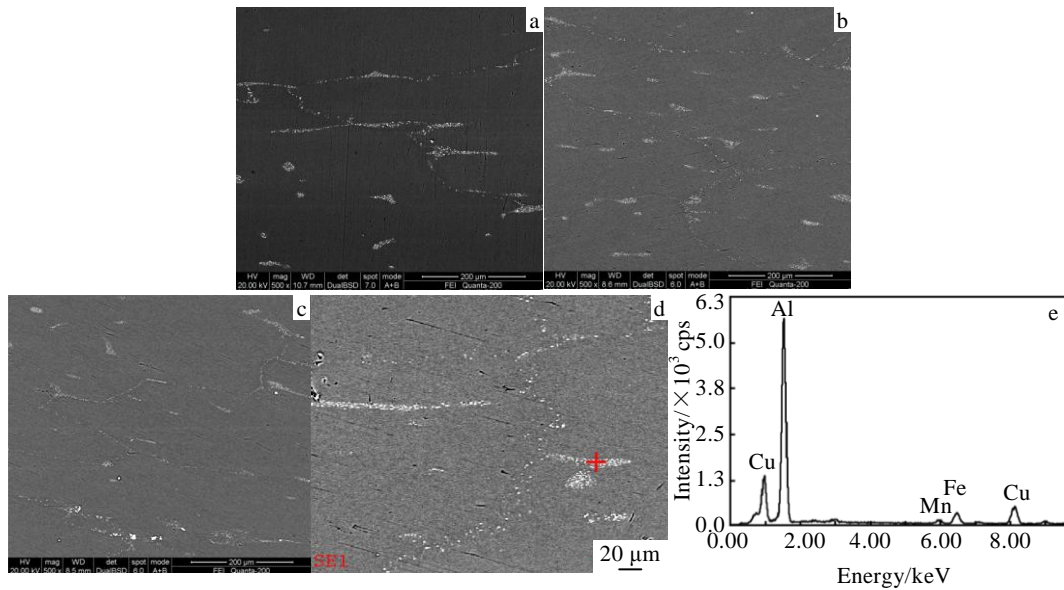


图 3 2297 合金厚板不同厚度轧面第二相粒子扫描电镜照片及能谱分析

Fig.3 SEM micrographs of second phase particles in different layers of 2297 plate: (a) surface; (b) T/4 layer; (c) T/2 layer; (d, e) SEM micrograph and the corresponding EDX spectrum of the second phase particles for T/2 layer

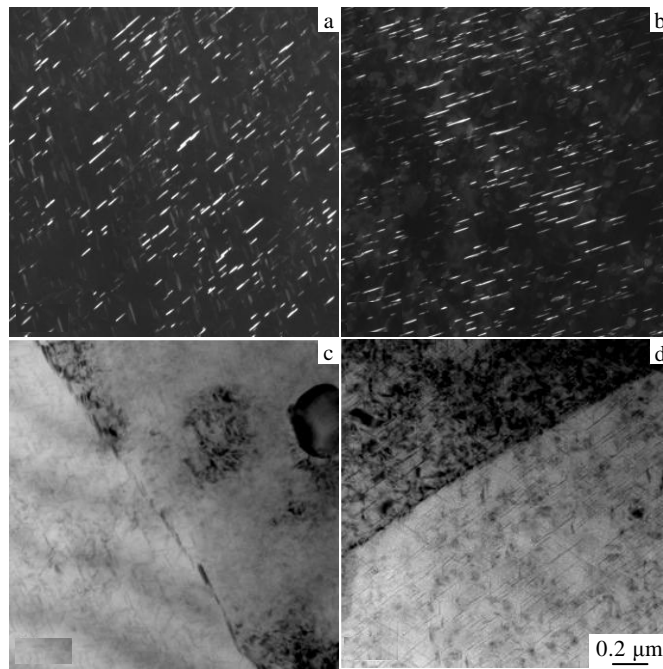


图 4 2297-T87 合金厚板不同厚度的 TEM 照片

Fig.4 TEM micrographs in different layers of 2297-T87 plate: (a, b) the dark field images of T/8 and T/2 layer from $\langle 112 \rangle\alpha$; (c, d) bright field images of grain boundary in T/8 and T/2 layers

4d 所示, T/8 厚度层的晶界的析出相比 T/2 层更为粗大, 并且呈不连续分布, 但是他们的晶界均未出现明显的无沉淀析出带。

2.5 断口观察

对不同厚度、不同方向的拉伸样断口侧面进行金相组织观察。图 5a、5b 分别为 T/4、T/2 厚度层 L 方

向试样的 L-ST 断口金相组织, 晶粒断裂方式均为穿晶断裂。图 5c、5d 分别为 T/4、T/2 厚度层 LT 方向试样的 LT-ST 断口金相组织, 大部分晶粒断裂为穿晶断裂, 并有部分的沿晶断裂。观察两组照片可以发现, 无论是 L-ST 断口还是 LT-ST 断口, T/4 层的晶粒较 T/2 层更为细小。另外, L 方向试样的晶粒被拉长, 而

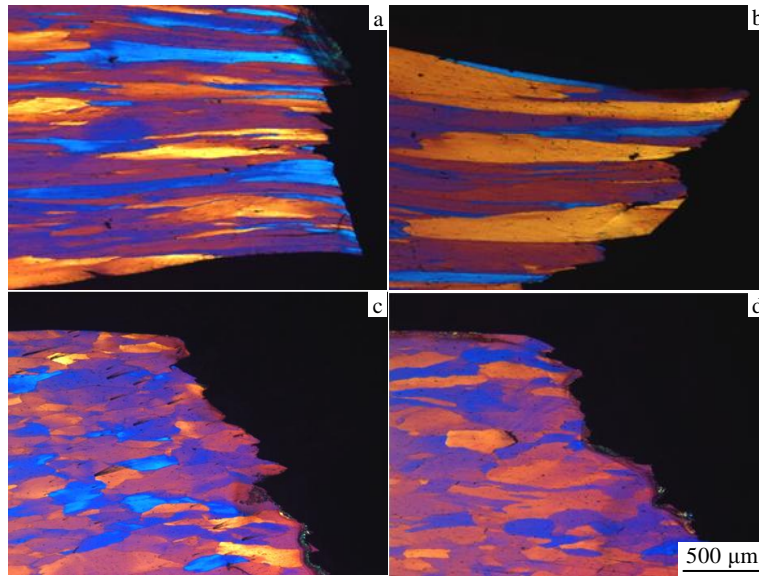


图 5 2297-T87 厚板拉伸试样断口附近的金相组织

Fig.5 Optical micrographs near tensile sample fracture of 2297-T87 plate: (a, b) L orientation in T/4 layer and T/2 layer; (c, d) LT orientation in T/4 layer and T/2 layer

LT 方向试样的晶粒并未出现很明显的拉长, 因此 LT 方向断裂伸长率较低。

图 6 为 2297-T87 厚板中心层不同方向拉伸试样的 SEM 断口形貌。从图中可知, L 方向试样断口形貌为混合型断口, 以韧窝状的塑性断裂为主, 夹杂着少量的沿晶断裂, 韧窝较深, 大小分布均匀, 韧窝排列没有明显的方向性。局部放大后发现大韧窝中存在若干小韧窝。LT 方向的断裂形式也是混合型断裂模式, 但沿晶断裂增多, 沿轧向存在明显的分层, 不同层的晶粒断裂模式不同, 穿晶断裂的韧窝沿着轧向平行排列。局部放大后发现韧窝比 L 方向的要大一些, 大小不均匀。ST 方向断口几乎均为沿晶断裂, 断口局部呈平面状, 断口中分布着难溶的第二相粒子。局部放大后发现少量的韧窝, 韧窝很浅, 绝大部分为脆性沿晶断裂。

2.6 结构分析

图 7 和图 8 分别显示了 2297-T87 厚板合金不同厚度层的结构图和不同结构的体积分数。从图中可以看出, 厚板中心的结构主要是由典型的平面应变变形产生的择优取向, 主要是沿 β 取向的纤维变形结构, 包括从 $S\{123\}\langle 634\rangle$ 结构到 Brass $\{110\}\langle 112\rangle$ 结构, 还有部分的 Goss $\{110\}\langle 100\rangle$ 结构。在表面附近同样存在这 3 种结构成分, 同时还存在再结晶结构 Cube $\{100\}\langle 100\rangle$ 。而在亚表层 T/8 厚度层上产生了大量的剪切结构 R-Cube $\{100\}\langle 110\rangle$, 其余的结构成分则较少。T/4 厚度层上存在相对较多的再结晶结构 Cube $\{100\}\langle 100\rangle$ 和少量的剪切结构 R-Cube $\{100\}\langle 110\rangle$, 同时也存在着少量的 β 纤维成分, T/4 厚度层为以剪切结构为主的亚表层到以变形结构为主的中心层的过渡层。

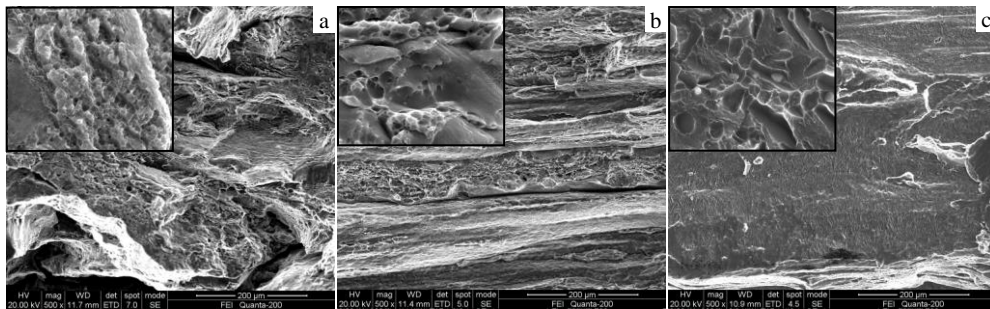


图 6 2297-T87 厚板中心层拉伸试样的 SEM 断口形貌

Fig.6 SEM fractographs of tensile samples for 2297-T87 plate in the center layer: (a) L orientation, (b) LT orientation, and (c) ST orientation

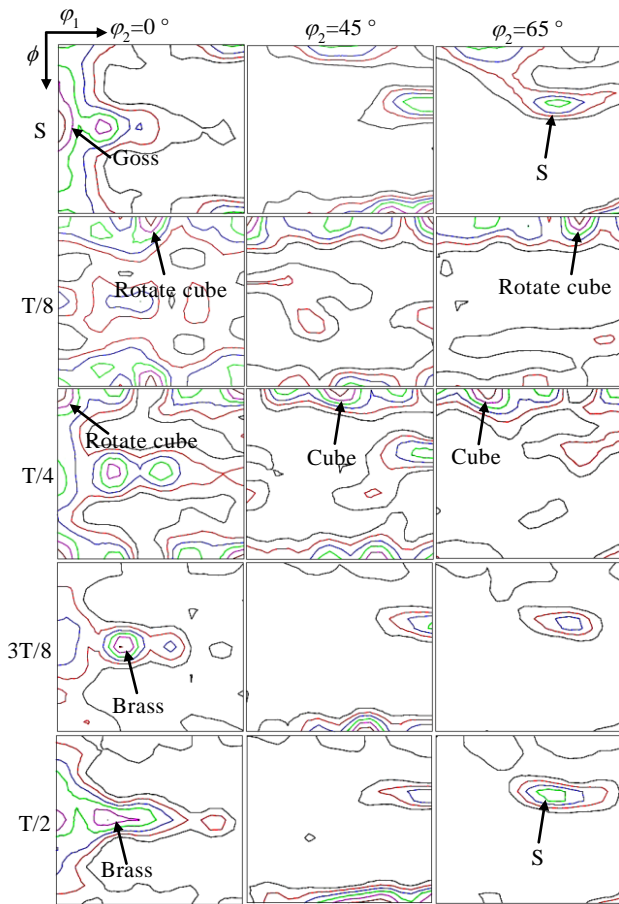


图 7 2297-T87 厚板合金不同厚度层的 ODF 织构分布图
Fig.7 ODF graph of texture distribution in different layers of 2297-T87 plate

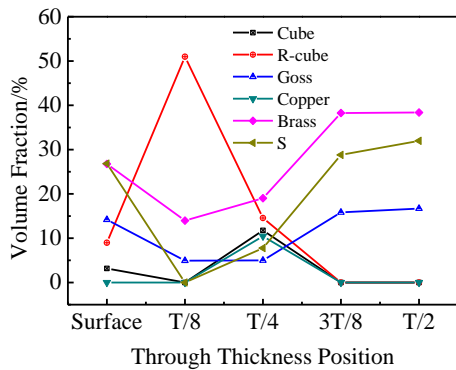


图 8 2297-T87 厚板合金不同厚度层结构的体积分数
Fig.8 Textures volume fraction in different layers of 2297-T87 plate

3 分析与讨论

在 Al-Li 合金厚板的轧制过程中，合金厚板的表面与轧辊接触，摩擦力作用会形成大量的剪切带，形成剪切织构。随着板材与轧辊的摩擦系数的不断增加，

剪切形变渗透到亚表层，这样使得 T/8 处剪切织构最为强烈，在后续的固溶等热处理过程中，反而是表层的剪切织构消失^[9]；同时由于再结晶动力学的缘故，剪切织构处很难形成再结晶织构^[10]，所以 T/8 处并无再结晶织构。在本实验中，再结晶织构主要出现在 T/4 层，为 Cube 织构。对于再结晶织构的形成，Bennett 等^[11]和张新明等^[12]认为，在厚板的一定区域，第二相粒子控制着再结晶的形核过程，即 PSN 机制。反观本实验中 2297-T87 厚板的扫描电镜照片，不同厚度层的第二相粒子分布虽有差异，但共同特点就是沿晶界呈串状分布，并未成为再结晶形核位点，T/4 层再结晶的形核过程主要受立方带形核机制^[13]影响。随着轧制变形量的增加，在晶内形成剪切带使形变变得不均匀，这种剪切带导致了厚板中心层附近 Goss 和 Brass 变形织构的增加^[6]。中心层主要是 β 取向变形织构，还有少量的 Goss 织构，再结晶织构则很少，Jata 等人^[6]认为 Brass 织构储能较低，无法提供再结晶所需的能量，Brass 织构对于再结晶有很强的抗力，从而抑制再结晶的发生。2297-T87 合金厚板中心产生了较多的 S 和 Brass 变形织构，同时厚板中心的储能也较低，抑制了再结晶织构的形成，所以厚板中心的再结晶织构很少。本实验合金厚板织构成分的分布情况和 Spriano^[5]与 Chen^[14]的研究结果一致。整体上说，2297 合金中含有 Zr 元素，形成 Al_3Zr 弥散相，对晶界的钉扎作用明显，抑制了再结晶织构的形成，主要在合金厚板的 T/4 层会形成少量的再结晶织构。

结合 Starink^[15]等提出的模型中同等数量滑移系下不同织构对应的 M 值，代入本实验中 2297-T87 合金厚板中的织构成分含量，得出不同厚度层的 M 值，如图 9 所示。从图中可知， M 值从 T/8 厚度到中心呈上升趋势，如果晶体学织构是影响强度的唯一因素的话，

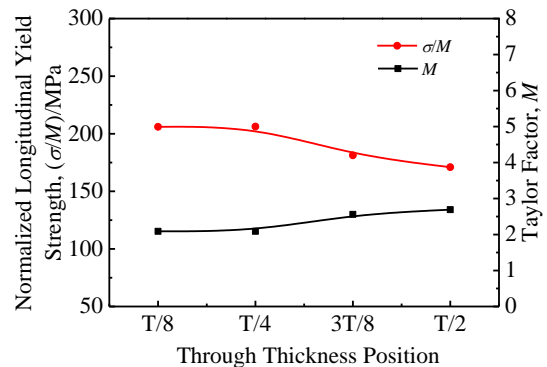


图 9 2297-T87 合金厚板不同厚度层的 M 值和归一化纵向屈服强度 σ/M
Fig.9 Taylor factor M and the normalized longitudinal yield strength in different layers of 2297-T87 plate

沿厚向的归一化轧向屈服强度 σ/M 曲线应为一水平线, 然而实验结果为从亚表层到中心呈逐渐降低的趋势。Vasudevan^[7]等也得到了类似的研究结果。这说明晶体学织构并不是影响这种厚向不均匀性的唯一因素。

事实上, 析出相能否影响织构对各向异性的作用, 是增强还是减弱是由析出相的惯习面决定^[16]。图 10 为合金厚板中不同织构成分与轧面的位相关系。从中可以看出, Brass、S 和 Goss 变形织构的原子密排面与轧面的夹角较小, 而再结晶 Cube 织构和剪切织构的原子密排面与轧面的夹角则更大。T1 相是在{111}基体晶面上形成的六角片状相, 与基体处于半共格状态, 晶格畸变程度较高, 使得位错移动从切割机制变为绕过机制, 能显著提高合金的强度, 当原子密排面更接近于轧面的情况下, 强化效果明显加强。从 $\langle 112 \rangle_a$ 方向的暗场形貌照片中可以看出, 中心层析出的 T1 相密度与 T/8 层 T1 相密度差别很小, 这种情况下, 变形织构结合 T1 相对 L 方向的力学性能的增强作用更为明显, 再结晶织构的强化效果会差一些。这样就造成了 L 方向上的抗拉强度和屈服强度, 从板材表层到中心呈上升的趋势。Acosta 等^[17]也研究了 2297 合金厚板的力学性能, 厚度方向的硬度值从中心到表层逐渐降低, 与本实验力学性能测试结果一致。图 11 为不同厚度处 L 与 LT 方向的屈服强度比。比值从表层到中心逐渐升高, 这表明从厚板表层到中心的织构成分对不同方向力学性能的影响不同。晶体学织构是晶粒沿轧制方向的择优取向, 对轧向的力学性能影响较大, 而对长横向 LT 方向力学性能影响较小, 故 L 方向的性能梯度变化较明显, 而 LT 方向性能变化梯度较小。D. J. Chakrabarti^[18]等也得到了相同的研究结果。

同一厚度层力学性能的各向异性与晶粒结构、第二相粒子的分布有关。从图 1b 中可以看出, 试样的强度和塑性规律为: L 方向>LT 方向>ST 方向。如图 2c

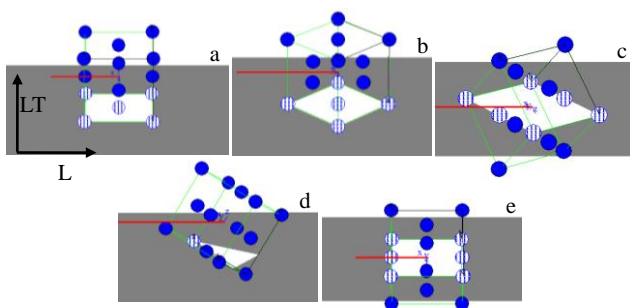


图 10 不同织构成分与轧面的位相关系

Fig.10 Position relationship between different textures and the rolling face: (a) Cube texture, (b) R-Cube texture, (c) Brass texture, (d) S texture, and (e) Goss texture

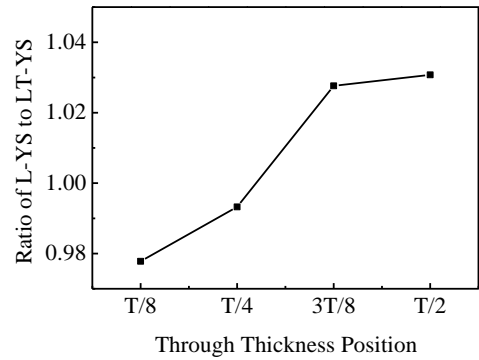


图 11 2297-T87 合金厚板不同厚度处 L 与 LT 方向的屈服强度比

Fig.11 Ratio of L-yield strength to LT-yield strength in different layers of 2297-T87 plate

所示, 厚板中心的晶粒结构为长条形的饼状结构, 沿轧向被拉长呈纤维状, L 试样施加载荷后晶粒进一步被拉长, 随着载荷增加, 在晶内产生大量的位错滑移。由于较多 T1 相的存在, 阻碍了位错滑移, 在晶内发生复杂的位错缠结, 并未在晶界上发生位错塞积, 减少了晶界上的应力集中, 断裂形式也多为穿晶断裂, 强度较高。同时晶粒较长, 可开动的滑移系较多, 塑性也较好; LT 方向和 ST 方向的试样性能要差一些, 尤其是 ST 方向试样。一是晶粒的择优取向是沿着轧制方向, 使 L 方向的强度较高, 二是由于载荷方向垂直于纤维晶粒结构的原因, 晶粒宽度较小, 使得位错容易滑移到晶界处, 发生位错塞积, 产生应力集中而发生沿晶脆性断裂, 强度和塑形都较差。2297-T87 合金厚板中大量第二相粒子沿轧制方向以链状形式分布在晶界上, 主要是难溶的 Al(CuFeMn)脆性相。这些相的存在, 使晶界变脆, 当大量位错塞积后造成应力集中, 容易在第二相粒子和晶界结合处产生微孔, 发生脆性沿晶断裂, 造成 LT 方向和 ST 方向合金强度和局部塑性变形能力降低。

4 结 论

1) 在 2297-T87 合金厚板 L 方向上, 从板材表层到中心, 抗拉强度和屈服强度出现了较为明显的升高, 而在 LT 方向上则变化不明显, 即 L 方向的力学性能在厚度方向呈不均匀性。

2) 变形加工和后续热处理造成了厚度方向织构分布不均匀, 厚板中心主要是 β 纤维成分和部分的 Goss 织构; 在表层除了存在变形织构, 还存在再结晶织构; T/8 厚度上产生了大量的剪切织构; T/4 厚度层则是一个过渡层, 存在少量再结晶织构、剪切织构和

β 纤维。

3) 同一厚度层不同方向的力学性能各向异性较为明显, 强度和塑性的变化趋势一致: $L > LT > ST$, 是晶粒结构和第二相粒子综合作用的结果。

参考文献 References

- [1] Roberto J R, Rioja J, John L. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43A: 3325
- [2] Balmuth E S. *Proceedings of the International Conference on Light Materials for Transportation Systems*[C]. Pusan: The Indian Academy of Science, 2001: 513
- [3] Wei Xiuyu(魏修宇), Zheng Ziqiao(郑子樵), Pan Zhengrong(潘峥嵘) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(11): 1996
- [4] Chung Y H, Cho K K, Han J H et al. *Scripta Materialia*[J], 2000, 43(8): 759
- [5] Spriano S, Doglione R, Baricco M. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 257: 134
- [6] Jata K V, Panchanadeeswaran S, Vasudevan A K. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 257: 37
- [7] Vasudevan A K, Fricke W G, Malcolm R C et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1988, 19A: 731
- [8] Alexandre B B, Carl B, Franck A et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 597: 62
- [9] Engler O, Huh M Y, Tome C N. *Metallurgical and Material Transactions A*[J], 2000, 31(9): 2299
- [10] Kamijo T, Kataoki S, Inagaki H. *Acta Metallurgica et Materialia* [J], 1993, 41(6): 1713
- [11] Bennett T A, Petrov R H, Kestens L A I et al. *Scripta Materialia*[J], 2010, 63: 461
- [12] Zhang Xinming(张新明), Han Nianmei(韩念梅), Liu Shengdan(刘胜胆) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(2): 202
- [13] Engler O. *Scripta Materialia*[J], 2001, 44(2): 229
- [14] Chen J Z, Zhen L, Shao W Z et al. *Materials Letters*[J], 2008, 62: 88
- [15] Starink M J, Wang S C. *Acta Materialia*[J], 2003, 51: 5131
- [16] Bate P, Roberts W T, Wilson D V. *Acta Metallurgica*[J], 1981, 29: 1797
- [17] Acosta E, Garcia O, Dakessian A et al. *Materials Science Forum*[J], 2002, 396-402: 1157
- [18] Chakrabarti D J, Weiland H, Cheney B A et al. *Materials Science Forum*[J], 1996, 217-222: 1085

Mechanical Anisotropy and Inhomogeneity through Thickness of 2297-T87 Aluminum Alloy Thick Plate

Wang Haijin, Zheng Ziqiao, Fan Xuesong
(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The mechanical anisotropy and inhomogeneity through thickness of 2297-T87 aluminum alloy thick plate of 85 mm in thickness were investigated by tensile test, optical microscopy, X-ray diffractometry, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results show that the mechanical properties in L orientation are inhomogeneous in different layers along the thickness direction, and the strength increases from the surface to the center. However, the difference of LT orientation is not significant. Meanwhile the texture distributes nonuniformly through thickness. The centre of the plate is mainly β fiber texture and Goss texture, while besides deformation texture, the recrystallization texture is observed near the surface. In the T/8 layer, the fraction of the shear texture is maximal. The T/4 layer seems to serve as a transition layer, presenting a small amount of the recrystallization texture, shear texture and β fiber texture at the same time. At the same thickness, the anisotropy of mechanical properties is obvious. There is reasonable concordance between changes of the strength and plasticity: $L > LT > ST$. The anisotropy is associated with the grain structure and the second phase particles.

Key words: 2297-T87 plate; anisotropy; inhomogeneity; mechanical properties; texture

Corresponding author: Zheng Ziqiao, Professor, School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, Tel: 0086-731-88830270, E-mail: s-maloy@mail.csu.edu.cn