

2198 铝锂合金的熔炼、轧制和热处理

赵天章¹, 金龙¹, 高铁军¹, 刘春忠¹, 徐勇², 张士宏²

(1. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 铝锂合金具有高比强度和高比模量等优点, 广泛应用于航空领域。系统研究了 2198 铝锂合金的制造工艺, 成功制备了性能优越的板材, 为其工业生产提供了理论依据。采用真空感应熔炼法制备了 2198 铝锂合金铸锭, 均匀化处理后, 利用多道次热轧将铸锭轧制为板材, 经过固溶、淬火、预变形、自然时效和人工时效处理, 板材沿轧制方向的抗拉强度高达 486 MPa。人工时效过程中析出的 T1 时效相 (Al_2CuLi), 不仅能明显提高板材强度, 而且有利于弱化其各向异性。

关键词: 铝锂合金; 熔炼; 轧制; 热处理

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)07-2305-05

对铝合金来说, 锂元素是降低密度和提高比刚度的最佳元素。每添加 1% 的锂, 可使铝合金密度降低 3%, 模量提高 6%^[1]。据推算, 如采用先进铝锂合金取代传统铝合金制造波音飞机, 结构质量可减轻 13% 左右。战斗机质量若减轻 15%, 则可缩短飞机滑跑距离约 15%, 增加航程约 20%^[2]。因此, 铝锂合金得到了广泛的关注, 被认为是航空航天最理想的结构材料, 具有广阔的应用空间^[3]。

半个多世纪来, 铝锂合金的发展经历了 3 个阶段, 在力学性能、各向异性和抗腐蚀性能上都得到大幅度优化。第 1 代铝锂合金起源于 1924 年德国研发的 Scleron 合金, 发展至 2020 和 1420 铝锂合金, 但因其塑性差和断裂韧性低等缺点, 并没有得到广泛应用。20 世纪 70 年代开始发展起来的第 2 代铝锂合金中, 普遍提高 Li 元素的含量至 2% 左右, 包括常见的 2090、8090 和 8192 铝锂合金等, 其各向异性严重、强度不高, 尤其是横向强度较低, 限制了第 2 代铝锂合金的应用, 从而促进了新一代铝锂合金的诞生。第 3 代铝锂合金降低了 Li 元素的含量, 降低了各向异性, 具有良好的强度和塑性匹配, 加工性能得到提升, 主要包括 2196、2198、2199 和 2060 等铝锂合金^[4]。

2198 铝锂合金是一种具有代表性的新型第 3 代铝锂合金, 其强度高、塑性好, 且裂纹扩展速率低^[5]。Zhang^[6]研究了时效时间和温度对 2198 铝锂合金力学

性能的影响, 发现 160 °C 以上时效时才析出 T1 时效相。凌娟等^[7]研究了 2198-T3 态铝锂合金的各向异性, 构建了本构方程并应用在了充液拉伸成形中。刘大海等^[8]发现 2198 铝锂合金的成形性能随着温度的升高逐渐提高。Dorin 等^[9,10]系统研究了 T1 时效相在不同条件下的析出规律以及对 2198 铝锂合金力学性能的影响。T1 时效相起主导强化作用、呈片状, 与 Al 基体的 {111} 平行^[11-13]。塑性变形过程中位错和 T1 时效相的作用机制取决于 T1 相的尺寸, 与时效温度和时间相关^[14]。因其优越的性能, 2198 铝锂合金主要应用于大飞机的蒙皮。

但是, 国内尚无可生产 2198 铝锂合金板材的企业, 大飞机所需的 2198 铝锂合金板材完全依靠进口, 此被动形势严重限制了大飞机生产技术的完全国产化。本研究采用真空感应加热的熔炼方法制备了 2198 铝锂合金铸锭, 均匀化后, 经过多道次热轧得到了 2 mm 厚的板材, 热处理后具有优越的力学性能。旨在为 2198 铝锂合金板材的生产提供一定的理论依据。

1 实验

熔炼过程中, 将原料混合后放于石墨坩埚, 置于真空炉中, 加热过程中进行电磁搅拌以增加均匀性, 达到一定温度后利用特殊设备加入锂, 待融化并充分混合后, 冷却至室温, 取出铸锭。真空度对熔炼过程

收稿日期: 2018-07-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51605310); 辽宁省教育厅基金 (L201631); 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室开放基金资助 (SHSYS2016004)

作者简介: 赵天章, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 沈阳航空航天大学, 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136, E-mail: tzzhao@alum.imr.ac.cn

非常重要，尽量避免锂元素因氧化而损失。另外，需要保持原材料和石墨坩埚的洁净，防止引入其他额外元素造成污染。最终得到 2198 铝锂合金的铸锭。

分别在铸锭的上端、中间和下端取金属屑，利用化学方法测定 3 个位置材料的成分。为了选择合适的均匀化温度，取铸锭的金属屑进行 DSC 测试，测试条件为：初始温度为 100 °C，升温速率为 20 °C/min。最终确定了两级均匀化的工艺：420 °C/14 h 和 520 °C/28 h。随后，去除铸锭的冒口部分和表面氧化皮，并切成长方体。然后将其多道次热轧成厚 2 mm 的板材，每道次的变形量约为 25%，道次间均对板材进行退火热处理，温度为 450 °C，保温约 2 h。将热轧板于 520 °C 固溶 2 h，水淬后立即进行 3% 的室温预变形。空气中静置 7 d 进行自然时效，随后进行温度为 155 °C 保温 18 h 的人工时效，得到最终的 2198 铝锂合金板材。

利用 Instron 5848 试验机测试了 2198 铝锂合金板材人工时效状态的室温力学性能，应变速率为 0.005 s⁻¹，取样方向为沿着与轧向呈 0°、45°和 90°。金相样品是用经过不同粒度的砂纸打磨和抛光，并用 Keller 试剂腐蚀得到。采用场发射电子扫描显微镜 (SEM) FEI Nova Nano 观察拉伸断口形貌。采用透射电子显微镜 (TEM) Tacnai F30 观察 2198 铝锂合金自然时效和人工时效后的析出相形态。

2 实验结果

2.1 化学成分和 DSC 结果

表 1 为 2198 铝锂合金铸锭的成分。图 1 为 2198 铝锂合金铸锭的 DSC 曲线。在 300~420 °C 之间出现了吸热反应，并在 510 °C 时出现了 1 个明显的波谷，发生了共晶反应，故确定了 420 °C/14 h 和 520 °C/28 h 的两级均匀化工艺。

2.2 金相组织

图 2 给出了 2198 铝锂合金不同状态的金相照片。图 2a 是 2198 铝锂合金铸锭的组织。可见明显的枝晶组织，属于常见的铸态组织。经过均匀化后，2198 铝锂合金铸锭的金相组织如图 2b 所示，枝晶组织基本被消除。经过多道次热轧，晶粒被严重拉长，形成了沿着轧向分布的纤维组织，如图 2c 所示。经过固溶、自然时效和人工时效后，晶粒长大，沿着轧制方向形呈扁平状，如图 2d 所示。

2.3 力学性能

图 3 为经过人工时效后 2198 铝锂合金板材的单向拉伸应力-应变曲线，屈服强度约为 396 MPa，抗拉强度约为 486 MPa，延伸率约为 10%。

2.4 拉伸断口

图 4 为 2198 铝锂合金人工时效状态板材沿轧向的单向拉伸断口照片，主要以韧窝为主，局部出现少量的解理面，说明人工时效状态的 2198 铝锂合金板材的断裂属于韧性断裂。另外，韧窝的形成源于基体中的增强相，而图中的韧窝大小不同，从侧面说明 2198 铝锂合金板材可能含有尺寸不同的增强相。

3 讨论

3.1 人工时效状态 2198 铝锂合金板材各向异性

在人工时效状态的 2198 铝锂合金板材中分别沿着与轧向呈不同角度 (0°、45°和 90°) 的方向取单向拉伸样品并进行力学性能测试，屈服强度和抗拉强度随角度的变化如图 5 所示。从图中可以看出，45°方向上的屈服强度和抗拉强度均低于轧向和 90°方向，而 90°方向的抗拉强度最高。可见，经过轧制、热处理和人工时效的 2198 铝锂合金板材存在明显的各向异性，45°的强度最低。

造成各向异性的原因主要有 3 个方面：晶体学织构、T1 时效相和晶粒形貌。首先，2198 铝锂合金铸锭经过多道次热轧后出现强烈的 {110}<112> 织构^[15, 16]。其次，在 2198 铝锂合金中起主导强化作用的 T1 时效相呈片状，与 Al 基体的 {111} 平行，取向关系为 {0001}T1//{111}Al, 1 $\bar{1}$ 00 T1//1 $\bar{1}$ 0 Al^[13, 17, 18]。因此，T1 时效相具有明显的方向性，对各向异性有较大贡献。最后，晶粒在轧制过程中逐渐被拉长，经过固溶处理得到“pancake”形状的晶粒形貌^[4]，如图 2d 所示，构成了铝锂合金各向异性的第 3 个微观来源。

表 1 2198 铝锂合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2198 alloy (wt%)

Cu	Li	Mg	Ag	Zr	Zn	Mn	Si	Al
3.24	0.99	0.53	0.33	0.09	0.04	0.05	0.07	Balance

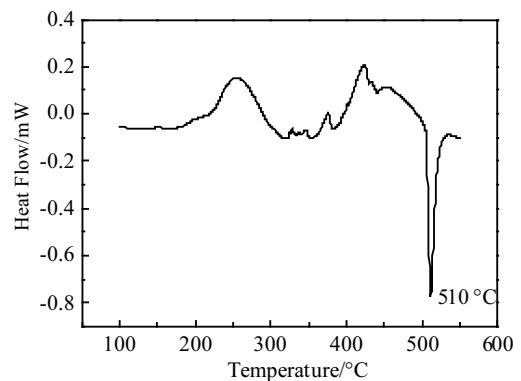


图 1 2198 铝锂合金铸锭 DSC 曲线

Fig.1 DSC curve of as-cast 2198 alloy

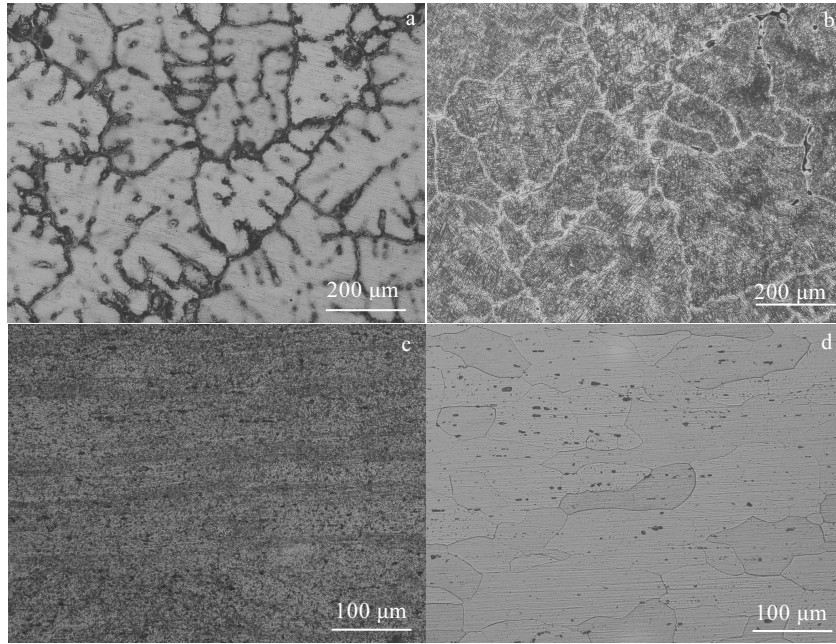


图 2 2198 铝锂合金的金相组织

Fig.2 Optical microstructures of 2198 alloy: (a) as-cast, (b) homogenized, (c) hot rolled, and (d) artificial aging

3 个各向异性的微观来源并不是孤立存在的，而是相互依赖的。固溶过程中发生再结晶，在一定程度上会改变轧制过程中形成的晶体学结构。一旦晶体学结构发生变化，T1 的位向也会随即发生改变。另外，当晶粒形态和取向发生变化后，板材淬火后的预变形过程中产生的位错密度及类型也会不同，进而影响时效过程中 T1 时效相析出量和形态，最终影响 2198 铝锂合金板材的力学性能。

3.2 T1 时效相对 2198 铝锂合金板材各向异性的影响

图 6 为 2198 铝锂合金自然时效板材与轧向呈不同角度方向的屈服强度和抗拉强度。与人工时效状态的力学性能相比，首先自然时效状态的板材具有更低的

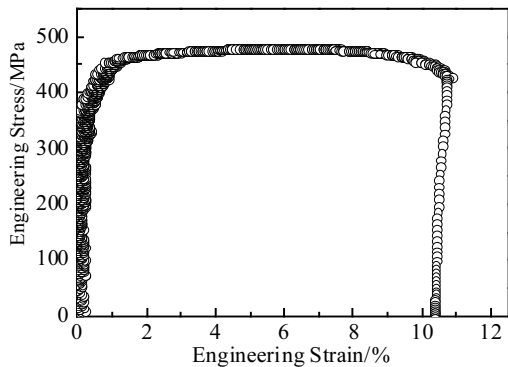


图 3 人工时效的 2198 铝锂合金的单向拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Engineering stress-strain curve of 2198 alloy after artificial aging

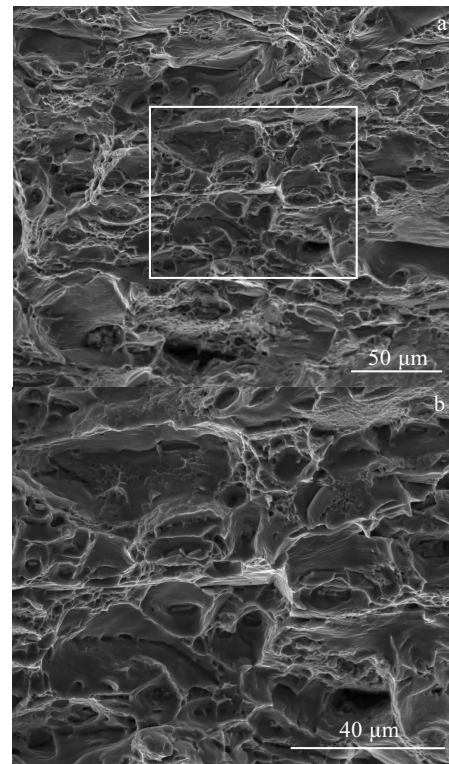


图 4 轧制方向拉伸断口及局部放大图

Fig.4 Fracture surface of tensile specimens in longitudinal direction (a) and magnification (b)

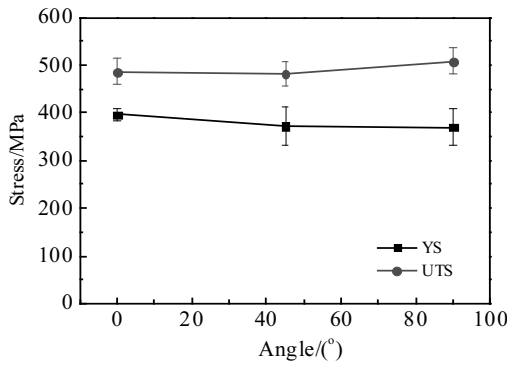


图 5 人工时效状态的 2198 铝锂合金板材与轧向呈不同角度方向的屈服强度和抗拉强度

Fig.5 Yield stress (YS) and ultimate tensile stress (UTS) of 2198 alloy sheet after artificial aging in different directions from the longitudinal direction

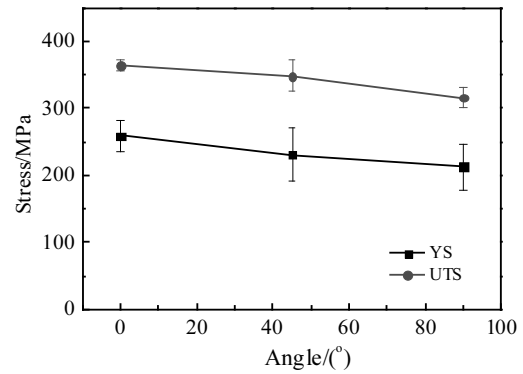


图 6 自然时效状态 2198 铝锂合金板材与轧向呈不同角度方向的屈服强度和抗拉强度

Fig.6 Yield stress and ultimate tensile stress of 2198 alloy sheet after natural aging in different directions from the longitudinal direction

强度，轧向的屈服强度只有 206 MPa，抗拉强度只有 370 MPa。其次，与轧向呈 90° 的方向拥有最低的强度。

在工艺路线上，2 个状态的板材同样经历了热轧、固溶、淬火和预变形，不同的是自然时效状态在预变形后经过自然时效至稳定状态，而人工时效状态则在自然时效状态的基础上增加了人工时效。所以，造成两者强度和各向异性差异的原因来自人工时效阶段。

采用 TEM 分别对 2198 铝锂合金自然时效和人工时效状态的板材进行了微观组织观察，结果如图 7 所示。经过人工时效后，基体中产生大量的片层状的 T1 时效相，而在自然时效状态的板材中仅有球形的 δ 时效相 (Al₃Li)，并未发现 T1 时效相。

δ 时效相与基体 Al 的晶格错配度非常小，塑性变形过程中位错可以切过，因此自然时效的 2198 铝锂合金的强度较低。相比而言，人工时效过程中产生的 T1 是平行于基体 Al{111} 面的片层状时效相，且具有密排六方结构，位错一般需要绕过，具有更大的临界剪切应力。另外，T1 时效相数量比 δ 时效相大得多，降低了位错滑移的平均自由程，增加了位错运动的阻力。综上，相比于自然时效，人工时效过程中析出的大量的 T1 时效相具有明显的强化效果^[6,19]。

T1 时效相的空间位向是择优的，与晶体 Al 的晶体学取向密切相关，而 δ 时效相并无明显的方向性，导致了 2198 铝锂合金板材人工时效和自然时效状态各向异性不同，有利于提高 2198 铝锂合金板材 90° 方向的相对强度。实际上，第 1 代和第 2 代铝锂合金没有得到广泛应用的主要原因之一是各向异性过强，尤其是横向的强度较低。在第 3 代铝锂合金中，起主要

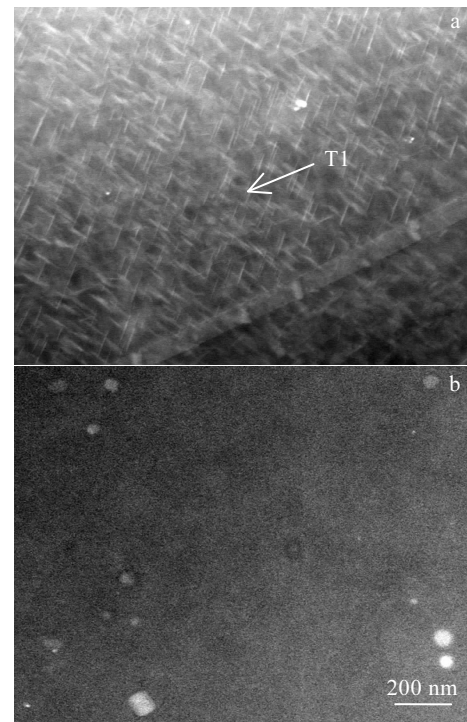


图 7 2198 铝锂合金不同热处理状态的 TEM 照片

Fig.7 TEM images of 2198 alloy: (a) artificial aging and (b) natural aging

强化作用的是 T1 时效相，能有效地提高横向的强度，也是一种减弱各向异性的有效途径。

4 结 论

1) 利用真空感应炉成功炼制了 2198 铝锂合金铸锭，热轧成厚 2 mm 的板材，经过 520 °C/2 h 固溶处

理, 淬火后经 3% 的预变形, 7 d 自然时效和 155 °C/18 h 的人工时效后, 2198 铝锂合金板材的抗拉强度达到 486 MPa, 延伸率超过 10%。

2) 人工时效状态的 2198 铝锂合金板材具有明显的各向异性, 与轧向呈 45° 方向具有最低的强度。微观原因为晶体学织构、T1 时效相和晶粒形态。

3) 和自然时效相比, 人工时效过程中 2198 铝锂合金板材析出大量的 T1 时效相, 不仅仅大幅度增加了板材的强度, 而且有效降低了板材的各向异性。

参考文献 References

- [1] Lavernia E J, Srivatsan T S, and Mohamed F A. *Journal of Materials Science*[J], 1990, 25(2): 1137
- [2] Li Jinfeng(李劲风), Zheng Ziqiao(郑子樵), Chen Yonglai(陈永来) *et al. Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2012(1): 13
- [3] Williams J C, Starke E A. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(19): 5775
- [4] Prasad N E, Gokhale A A, Wanhill R J H. *Aluminum-Lithium Alloys: Processing, Properties and Applications*[M]. Oxford: Elsevier, 2014: 4
- [5] Wei Wei(魏伟). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012
- [6] Zhang Saifei, Zeng Weidong, Yang Wenhua *et al. Materials & Design*[J], 2014, 63: 368
- [7] Ling Juan(凌娟), Guo Xunzhong(郭训忠), Li Huaguan(李华冠) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2015, 22(2): 78
- [8] Liu Dahai(刘大海), Xu Bixin(徐必信), Li Junchu(黎俊初) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2015, 22(3): 28
- [9] Dorin T, Geuser F D, Lefebvre W *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 605: 119
- [10] Dorin T, Deschamps A, Geuser F D *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 75: 134
- [11] Zhao Zhilong(赵志龙), Zhang Guang(张光), Han Dong(韩栋) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 1998, 22(3): 200
- [12] Wei Qilong(魏齐龙). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002
- [13] Donnadiu P, Shao Y, Geuser F D *et al. Acta Materialia*[J], 2011, 59(2): 462
- [14] Mao Baiping(毛柏平), Yan Xiaodong(闫晓东), Shen Jian(沈健). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(9): 2366
- [15] Jata K V, Hopkin A K, Rioja R J. *Materials Science Forum*[J], 1996, 217-222: 647
- [16] Zhu Yubo (朱宇波). *Thesis for Master* (硕士论文)[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012
- [17] Bois-Brochu A, Blais C, Goma F A T *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 597: 62
- [18] Khanikar P, Liu Yi, Zikry M A. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 604: 67
- [19] Deschamps A, Zein N N, Metwally M A *et al. Acta Materialia*[J], 2013, 61(11): 4010

Processing of 2198 Al-Li Alloy: Melting, Rolling and Heat Treatment

Zhao Tianzhang¹, Jin Long¹, Gao Tiejun¹, Liu Chunzhong¹, Xu Yong², Zhang Shihong²

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Al-Li alloy is widely used in the aerospace field, due to its high specific strength and high specific modulus. In the present paper, the processing of 2198 alloy was investigated and 2198 alloy sheet with excellent mechanical properties was successfully manufactured, which could be helpful to the industrial production of 2198 Al-Li alloy. The ingot was melted and cast in a vacuum induction melting (VIM) furnace. During the followed homogenization, the as-cast microstructure vanished completely. The ingot was rolled to sheet with 2 mm in thickness, via multi-pass hot-rolling. Then, the solution, water quenching, pre-deformation, natural aging and artificial aging were carried out. The tensile strength of the final 2198 Al-Li alloy sheet in the rolling direction is 486 MPa. The precipitate T1 generated in the artificial aging can not only increase the strength obviously, but also decrease the anisotropy of 2198 Al-Li alloy sheet.

Key words: Al-Li alloy; melting; rolling; heat treatment

Corresponding author: Zhao Tianzhang, Ph. D., Lecturer, Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, E-mail: tzzhao@alum.imr.ac.cn