2050 铝锂合金形变热处理工艺

朱宏伟　　陈永来　　刘春立

（航天材料及工艺研究所，北京　100076）

文　摘　为获得较优的 2050 铝锂合金形变热处理工艺，本文采用正交试验和极差分析探究固溶温度、预变形量、时效温度与时效时间对合金力学性能和组织的影响。通过 TEM、金相分析不同工艺下材料的微观结构，探究其与力学性能间的影响关系。结果表明，固溶温度 525℃，预变形量 12%，时效温度 160℃，时效时间 48 h 的工艺参数能够获得较优综合力学性能。

关键词　2050 铝锂合金，力学性能，形变热处理，正交试验

中图分类号：TG156　　DOI：10. 12044/j. issn. 1007-2330. 2019. 02. 009

Thermo-Mechanical Treatment Process of 2050 Al-Li Alloy

ZHU Hongwei　　CHEN Yonglai　　LIU Chunli

（Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing　100076）

Abstract　In order to get better thermo-mechanical treatment process of 2050 Al-Li alloy, the orthogonal experiment and range analysis were used to investigate the mechanical properties and structure of 2050 Al-Li alloy under different solution temperature, pre-deformation, aging temperature and aging time. The microstructure of materials under different processes was analyzed by TEM and metallography, and the relationship between the microstructure and mechanical properties was explored. The results show that selecting technological parameters of 525℃ solution temperature, 12% pre-deformation, 160℃ aging temperature and 48 h aging time can obtain better comprehensive mechanical properties.

Key words　2050 Al-Li alloy, Thermo-mechanical treatment, Orthogonal experiment, Mechanical properties

0　引言

铝锂合金作为航空航天飞行器件上应用广泛的主要结构材料，拥有十分优异的性能优势。新型铝锂合金密度低、比强度高、比刚度高、弹性模量高、腐蚀性能好、低温和高温性能优越、疲劳裂纹扩展速率低、超塑成型性能卓越，用其代替常规的高强度铝合金可使结构质量减轻 10%～20%，因此做为航空航天飞行器件上的主要结构材料是十分理想的[1-4]。

2050 铝合金作为 Al-Cu-Li 系热处理可强化新型铝锂合金的代表，是在 2098 铝锂合金的基础上进行微量合金元素如 Mn、Mg、Li 含量的调整，用于飞机机身壁板整体结构件，与被取代的 7050 合金相比，密度降低 4%，弹性模量提高 5%，实现了 5%的减重。作为未来战神火箭的主要结构材料，2050 铝锂合金主要用于乘务舱部件框架、肋条、窗口[5]。2050 铝锂合金的主要强化相为 θ'（Al_2Cu）和 T_1 相。T_1 相能够有效的抑制 δ'（Al_3Li）相共面滑移从而引起的性能各向异性。θ'（Al_2Cu）过渡相转化为与基体无共格关系的 θ 相，则合金强度下降[6-8]。沉淀强化相的种类、数量、尺寸和形态分布对材料的性能有着显著的影响。目前，对 2050 铝锂合金热处理工艺的研究有部分关于原材性能均匀化处理的研究，以及不同时效温度的 T8 态热处理的研究。本文选择固溶温度、预变形量、时效温度和时效时间参数，设计正交试验[9-10]。并通过对这部分试验结果的极差分析了解全面试验的情况，得到各个因素的敏感性影响程度以及各因素的最佳水平，最终确定获得 2050 铝锂合金力学性能的较优工艺参数组合。

1　实验

1.1　材料

收稿日期：2018-06-15

第一作者简介：朱宏伟，1994 年出生，硕士研究生，主要从事铝锂合金形变热处理的研究工作。E-mail：1033938010@ qq.com

2050 铝锂合金板材。板材状态为退火态,厚度 8 mm,化学成分(wt%)为 3.2~3.9Cu、0.7~1.3Li、0.2~0.6Mg、0.2~0.7Ag、0.2~0.5Mn、0.06~0.14Zr、0.25Zn、0.1Ti。

1.2 实验设计

试样按照固溶、淬火、预变形、时效的顺序进行处理。选择时效时间(A)、固溶温度(B)、时效温度(C)、预变形量(D)四个工艺参数为正交试验因素。考虑到时效时间的可选范围较大,其他三个因素选择 3 水平,时效时间选择 6 水平进行试验设计。固溶温度(510、525、540℃)、预变形量(3%、7%、12%)、时效温度(140、160、180℃)以及时效时间(8、12、18、24、36、48h)。

1.3 测试分析

将热处理后试样通过万能试验机进行拉伸性能测试,测试标准为 GB/T228.1—2010,获得其抗拉强度、屈服强度和延伸率三项性能数据。通过光镜 DM4000M 对部分试样拍摄金相显微照片,观察分析其晶粒组织。在 Tecnai G^{20}ST 透射电子显微镜上观察微观组织,加速电压为 200 kV。

2 结果与分析

2.1 正交试验

表 1 为 2050 铝锂合金正交试验设计正交表 $L_{18}(6\times3^3)$。表 1 中不同热处理制度下 2050 铝锂合金的力学性能数据有较大差异,屈服强度最低小于 300 MPa,最高达到 570 MPa;抗拉强度最低接近 400 MPa,最高接近 590 MPa;延伸率均高于 10%,最大延伸率可达 24%

表 1 $L_{18}(6\times3^3)$ 正交试验设计及力学性能

Tab.1 Values of orthogonal design and mechanical property

试验号	时效时间/h	固溶温度/℃	时效温度/℃	变形量/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
1	8	510	140	3	275	397	24.0
2	8	525	160	7	514	544	14.3
3	8	540	180	12	549	571	13.3
4	12	510	160	12	569	587	11.5
5	12	525	180	3	536	571	12.3
6	12	540	140	7	368	451	22.0
7	18	510	180	7	534	565	13.3
8	18	525	140	12	484	527	15.0
9	18	540	160	3	535	567	13.5
10	24	510	140	3	351	448	20.0
11	24	525	160	7	546	571	14.5
12	24	540	180	12	550	574	12.0
13	36	510	160	12	571	589	12.3
14	36	525	180	3	541	579	14.5
15	36	540	140	7	498	537	17.8
16	48	510	180	7	519	552	13.5
17	48	525	140	12	565	584	13.5
18	48	540	160	3	557	587	13.3

2.2 极差分析及性能变化规律

表 2 为 2050 铝锂合金力学性能极差分析表。考虑到 2050 铝锂合金主要应用于航天器上的结构件,要求性能在保证一定延伸率的前提下,屈服强度和抗拉强度的期望是取得相对最大值,因而在因素主次选择上应优先考虑屈服强度、抗拉强度由大及小,再考虑延伸率由大及小。

从表 2 中的极差分析可以看出,影响显著性从大到小依次为时效温度、时效时间、预变形量、固溶温度。

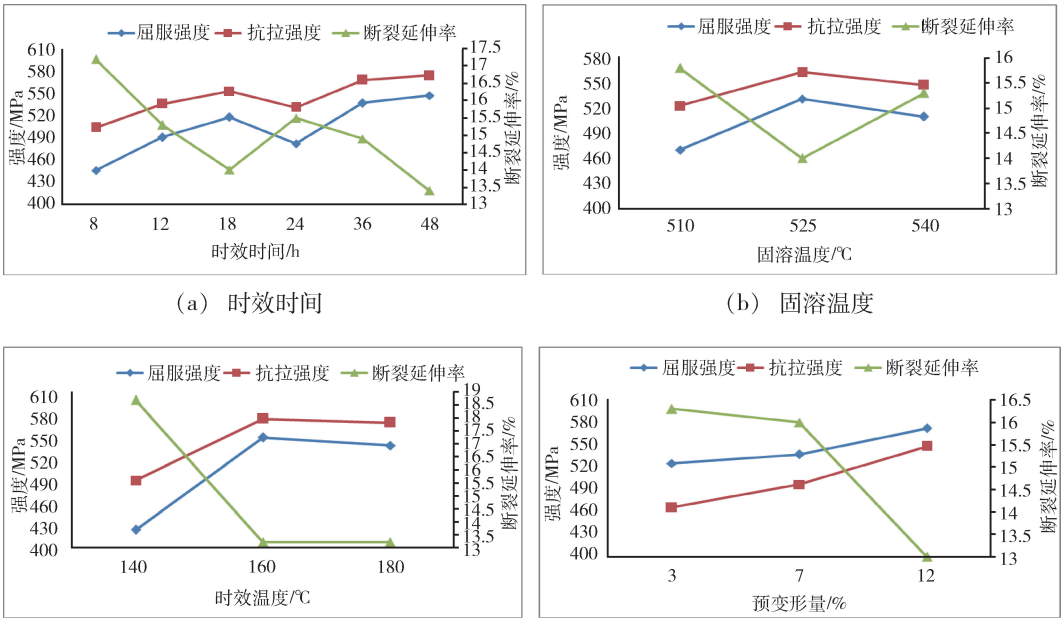
图 1 为 2050 铝锂合金力学性能随不同工艺参数的变化。图 1(a)为材料屈服强度、抗拉强度、延伸率随时效时间的变化曲线。可见:(1)时效时间从 8~18 h,合金的屈服强度、抗拉强度不断提高;18~24 h,材料强度有明显下降;24~48 h,材料强度继续提高。(2)材料延伸率随着时效时间的变化规律与材料强度相对应,在 18 h 处出现极小值;之后到 24 h,有所上升;时效时间继续延长,材料延伸率逐渐降低。

图 1(b)为材料屈服强度、抗拉强度、延伸率随固溶温度的变化曲线。由图可见:(1)固溶温度在 525℃时材料的屈服强度、抗拉强度比固溶温度在 510 和 540℃时高。但整体来看,材料强度受固溶温度的影响并不大。(2)材料延伸率随着固溶温度的变化规律与材料强度相对应,在 525℃处出现极小值。

表 2　2050 铝锂合金力学性能极差分析

Tab.2　Range analysis on mechanical properties of 2050 Al-Li alloy

指标	屈服强度				抗拉强度				延伸率			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	446	470	424	466	504	523	491	525	17.2	15.8	18.7	16.3
k_2	491	531	549	497	536	563	574	537	15.3	14.0	13.2	16.0
k_3	518	510	538	548	553	548	569	572	14.0	15.3	13.2	13.0
k_4	482				531				15.5			
k_5	537				568				14.9			
k_6	547				574				13.4			
R	101	61	125	82	70	40	83	47	3.8	1.8	5.5	3.3
水平主次	653241	231	231	321	653241	231	231	321	142536	132	132	123
因素主次	C ： A ： D ： B				C ： A ： D ： B				C ： A ： D ： B			



（a）时效时间　（b）固溶温度

（c）时效温度　（d）预变形量

图 1　2050 铝锂合金力学性能随工艺参数的变化曲线

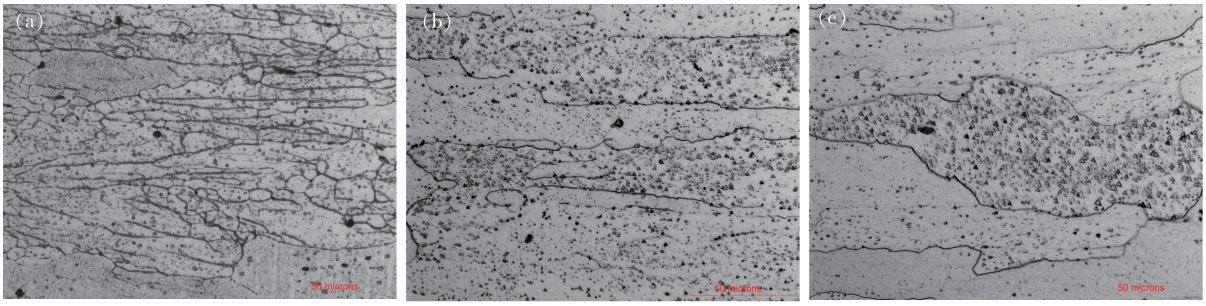
Fig.1　Change of mechanical properties of 2050 Al-Li alloy versus technological parameter

图 1(c)为材料屈服强度、抗拉强度、延伸率随时效温度的变化曲线。由图可见:(1) 时效温度在 160℃时材料的屈服强度、抗拉强度达到极大值。与图 2 相比,时效温度的变化对材料强度的影响比固溶温度变化的影响要更为显著。(2) 材料延伸率随着时效温度的变化规律与材料强度相对应,时效温度 160℃时延伸率出现极小值。

图 1(d)为材料屈服强度、抗拉强度、延伸率随预变形量的变化曲线。可见:(1) 随着预变形量的增加,材料的屈服强度、抗拉强度逐渐增加;(2) 材料预变形量的增加会导致延伸率的降低。材料的延伸率均在 10%以上,工艺参数的选择考虑屈服强度、抗拉强度即可。综合考虑制定热处理工艺为时效时间 48 h、固溶温度 525℃、时效温度 160℃、预变形量 12%。

图 2 为 2050 铝锂合金在不同热处理制度下的形貌照片。选取表一中 12#、15#和 6#三组不同工艺处理的试样进行金相显微镜观察,分别对应图 2(a)(b)(c)。图 2(b)(c)两图,预变形量均为 7%的工艺,晶粒尺寸无明显变化,但图 2(b)图材料强度性能高于图 2(c)图,推测是由于时效时间的延长,使析出相析出更加充分,从而使材料的强度得到提高。对比图 2(a)(b)和图 2(a)(c)两组图,晶粒尺寸有较大变化,图 2(b)、图 2(c)中粗大晶粒尺寸达到长约 180 μm,宽约 40 μm,而图 2(a)中晶粒平均尺寸约长 20 μm,宽 10 μm,细化效果显著。在工艺方面,图 2(a)工艺为预变形量为 12%,高于图 2(b)(c)工艺的

7%，可见预变形量对晶粒尺寸有着重要影响，结合表2，图2(a)对应材料强度也高于图2(b)(c)。这是由于预变形量的增大，促进了 T_1 相的形核，从而起到细化晶粒，提高强度的作用。



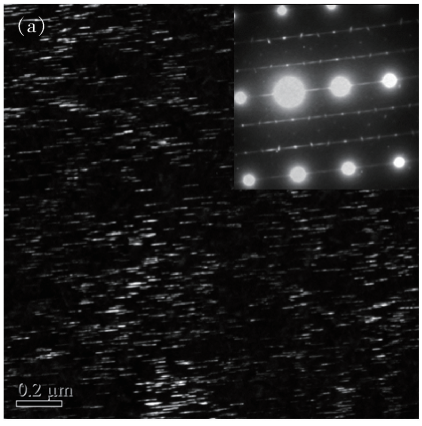
(a) 12%预变形+180℃时效24 h　(b) 7%预变形+140℃时效36 h　(c) 7%预变形+140℃时效12 h

图2 2050铝锂合金在不同热处理制度下的形貌照片(固溶温度为540℃)

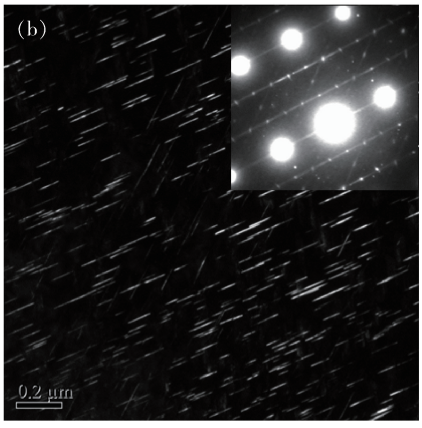
Fig.2 Morphology pictures of 2050 Al-Li alloy under different heat treatments(solution temperature is 540℃)

2.3 TEM分析

图3为两组不同工艺下合金析出相的TEM和选区[112]衍射花样。可以看出，两种工艺均析出较多 T_1 相。暗场像中，图3(a)中 T_1 相短而粗，图3(b)中 T_1 相长而细，且分布较为均匀。均匀分布的较细 T_1 相能有效提高合金的强度，但 T_1 相的长度的增加会使材料的延伸率降低。结合表2、表3进行分析，图3(a)对应8#试验，图3(b)对应9#试验。结合极差分析结果，在相同时效时间的前提下，图3(a)工艺中的固溶温度、预变形量参数选择均优于图3(b)，图3(b)的时效温度参数优于图3(a)工艺。性能方面，与图3(a)相比，图3(b)试样强度提高约50 MPa，延伸率降低1.5%。图4为2050铝锂合金510℃固溶时透射电镜下微观组织照片。可见，固溶处理后合金内部并未出现相析出行为，得出析出相析出行为于时效阶段进行，而析出相强化是2050铝锂合金主要的强化方式。



(a) 525℃固溶+12%预变形+140℃时效18 h



(b) 540℃固溶+3%预变形+160℃时效18 h

图3 2050铝锂合金在不同热处理制度下的衍射斑及TEM暗场像

Fig.3 Dark field TEM images of 2050 Al-Li alloy after different heat treatments

通过图3、图4的微观结构分析得出，时效温度的变化影响材料的相析出行为，主要表现在影响 T_1 相析出的数量、尺寸、分布等特征。其对材料强度影响的显著性要比固溶温度高，这与正交试验极差分析的计算结果一致。

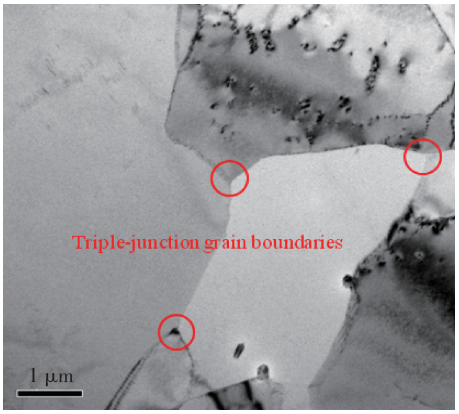


图4 510℃固溶处理后2050铝锂合金TEM图像

Fig.4 TEM images of the 2050 Al-Li alloy after solid solution at 510℃

(下转第58页)