新型高强铝锂合金热变形工艺及其变形后的组织性能

陈永来　杜志惠　张宇玮　单　群　谢　飞
（航天材料及工艺研究所，北京　100076）

文　摘　研究了锻造温度、锻造比等对新型高强铝锂合金成形质量的影响，总结了新型高强铝锂合金在不同锻造比下的组织性能变化规律。结果表明：锻造比为 3 ~7 时，合金热处理后径向抗拉强度均大于 500 MPa，并且其径向抗拉强度明显高于轴向；并且随着锻造比的增大，晶粒尺寸也逐渐增大。

关键词　铝锂合金，锻造，力学性能，组织

Mechanical Properties and Microstructure of New Al-Li Alloy After Deformation

Chen Yonglai　Du Zhihui　Zhang Yuwei　Shan Qun　Xie Fei
(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing　100076)

Abstract　The mechanical properties and microstructure of a new high-strength Al-Li alloy is characterized as functions of the different forging ratio after the forging process. Results show that the radial stretch strength is more than 500 MPa, and the radial stretch strength is higher than the axial stretch strength. The grain size is increased with the increase of the forging ratio.

Key words　Al-Li alloy, Forging, Mechanical properties, Microstructure

0　引言

Li 是自然界中最轻的金属元素，密度仅为 0.53 g/cm^3，在铝合金中加入 Li，可在降低合金密度的同时提高合金的弹性模量。文献[1]表明，在铝合金中每添加 1% 的 Li，可使合金密度降低 3%，弹性模量提高 6%，并可保证合金在淬火和人工时效后硬化效果良好。可见，铝锂合金作为一种低密度、高弹性模量、高比强度和高比模量的铝合金，在航空航天领域显示出了广阔的应用前景[2-4]。

为适应航空航天发展的需要，我国在“十五”期间自主研制了一种同时兼顾强度和韧性的高强高韧新型铝锂合金，该合金不仅要求强度高，而且要求韧性好，这就对合金的组织提出了比较高的要求。只有细化组织才能保证新型高强铝锂合金在具有高强度的同时具有高的韧度。虽然提高合金变形程度，可以细化组织，但变形程度过大将造成铝锂合金在后续的热处理过程中产生粗大组织，反而使合金性能下降。而变形程度过小，又会造成合金组织不能充分细化，合金综合性能不好。为此，本文采用热模拟试验研究变形温度和变形速率等对合金组织性能的影响。通过 Gleeble 热模拟试验，分析了新型高强铝锂合金在不同变形温度（360、400、440、480、520℃）、应变速率（0.01、0.1、1.0、10 s^{-1}）条件下的变形常数，研究合金组织的变化规律，确定新型高强铝锂合金的热加工工艺。

1　实验

1.1　新型高强铝锂合金锻坯制备

从工业化新型高强铝锂合金（Al-Cu-Zn-Mg-Mn-Zr）铸锭上截取 Φ100 mm 圆柱作为试验用料，其高度分别为 120、160、200、240、280 mm，然后按不同的锻造比 3、4、5、6、7 进行锻造试验，锻坯的高度均为 40 mm。其锻造工艺参数为：变形温度 460 ~ 480℃，保温 5 h，锻造方式：镦粗。

1.2　新型高强铝锂合金锻坯热变形组织与性能

将不同锻造比的新型高强铝锂合金锻坯锯下 1/4，分别沿轴向和径向用线切割进行取样。轴向试样

收稿日期：2011-11-21

作者简介：陈永来，1972 年出生，博士，高级工程师，主要从事铝合金、钛合金的研究工作。E-mail：chenyonglai@263.net

尺寸规格为 Φ8 mm×40 mm 的棒材,径向试样尺寸规格为 Φ8 mm×50 mm 棒材,取样部位见图 1。

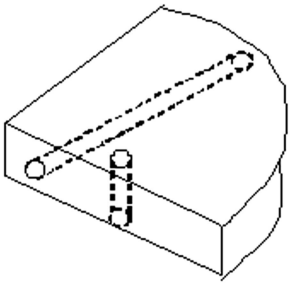

图 1　新型高强铝锂合金锻坯的拉伸试样取样部位

Fig. 1　Position of stretch sample intercepted from forging ingot of a new Al-Li alloy

将试样进行固溶时效处理,固溶制度:盐浴,519℃/90 min,冷水淬火;时效制度:170℃/24 h;190℃/12 h。测试其热处理后合金力学性能,分析时效温度对合金性能的影响;同时从拉伸试样上截取小段试片,分别按照光学显微镜和透射电镜观察制备试样,通过光学显微镜(OM)、透射电镜(TEM)等测试手段研究新型高强铝锂合金在不同时效温度下组织性能变化规律。

2　结果与分析

2.1　新型高强铝锂合金锻坯制备

图 2 为新型高强铝锂合金圆柱锻造前后宏观形貌照片,可以看出,不同锻造比的锻坯,其表面均未出现裂纹等缺陷,这表明所采用的锻造工艺参数对于新型高强铝锂合金是适用的,同时也验证了热模拟试验研究成果。

(a)　锻造前　　(b)　锻造后

图 2　新型高强铝锂合金圆柱锻造前后宏观形貌照片

Fig. 2　Overview of a new high-strength Al-Li alloy before and after forging process

2.2　新型高强铝锂合金锻坯力学性能

表 1 为不同锻造比的新型高强铝锂合金锻坯在不同热处理制度下的力学性能,可以看出,新型高强铝锂合金锻造比为 3 ~ 7 时,采用 170℃/24 h 及 190℃/12 h 两种制度进行时效时,合金径向抗拉强度均大于 500 MPa;并且其径向抗拉强度明显高于轴向 10% ~20%。对比不同热处理制度下的新型高强铝锂合金锻坯力学性能,可以发现经 190℃/12 h 处理的合金径向强度高于经 170℃/24 h 处理的,而二者的轴向强度则基本相当。

表 1　不同锻造比的新型高强铝锂合金锻坯在不同热处理制度下的力学性能

Tab. 1　Mechanical properties of a new high-strength Al-Li alloy forged by the ratio under different heat-treatment

锻造比	190℃/12 h,径向			170℃/24 h,径向			190℃/12 h,轴向			170℃/24 h,轴向		
	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
3	523	469	10.7	502	457	14.5	460	377	8.0	459	399	6.5
4	530	487	11.1	518	460	14.1	470	337	8.2	450	407	5.6
5	525	483	11.4	503	463	13.1	489	331	8.1	465	396	8.1
6	551	506	9.9	527	454	14.1	460	359	7.0	486	375	6.3
7	525	465	10.8	507	443	11.9	444	334	7.0	445	323	6.2

新型高强铝锂合金锻坯径向强度高于轴向,原因在于在锻造过程中圆柱的径向是材料的变形方向,类似于板材的轧制方向,造成材料的变形程度较高,致使合金在后续的时效过程中析出大量的取向近于变形方向的强化相。由于圆柱轴向不是材料的变形方向,不仅材料的变形程度较低,而且合金在后续热处理过程中析出的强化相也呈现出各向同性,从而造成新型高强铝锂合金锻坯经不同时效温度处理后其轴向强度相差不大。新型高强铝锂合金经 190℃ /12 h 时效处理的强度高于经 170℃/24 h 时效处理的,则与新型高强铝锂合金在不同温度下的微观组织有关,170℃/24 h 时效的合金可能尚未达到峰值时效。

2.3　不同锻造比对新型高强铝锂合金锻坯金相组织的影响

图 3 ~ 图 6 分别为经 190℃/12 h 时效处理的不同锻造比的新型高强铝锂合金金相组织照片。可以看出,新型高强铝锂合金经 190℃/12 h 时效后,呈现出再结晶形态,并且随着锻造比的增大,晶粒尺寸也逐渐增大。提高合金变形程度(即增大锻造比),虽然可以细化晶粒,但也会增大晶粒形核长大驱动力,缩短再结晶过程,促进晶粒长大,因此,若变形程度过大(如锻造比为 7 时),不仅不能细化组织,反而会造成组织粗大(图 7),从而使合金性能下降(表 1)。

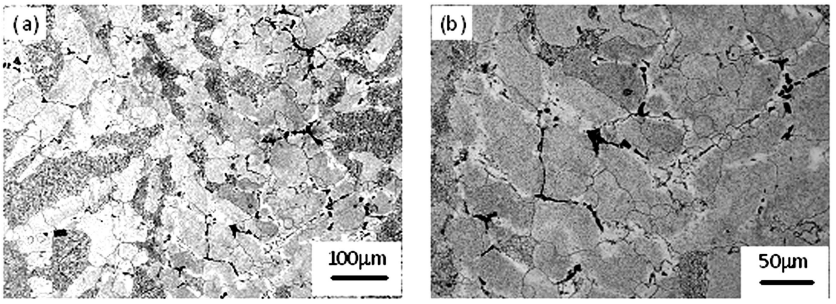

图 3　经 190℃/12 h 时效处理的新型高强铝锂合金锻坯(锻造比 3)的金相组织

Fig. 3　Microstructure of a new Al-Li alloy forged at the ration 3 under aging 190℃ for 12 h

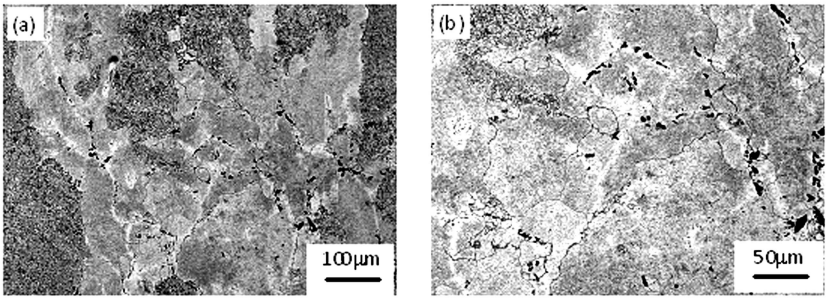

图 4　经 190℃/12 h 时效处理的新型高强铝锂合金锻坯(锻造比 4)的金相组织

Fig. 4　Microstructure of a new Al-Li alloy forged at the ration 4 under aging 190℃ for 12 h

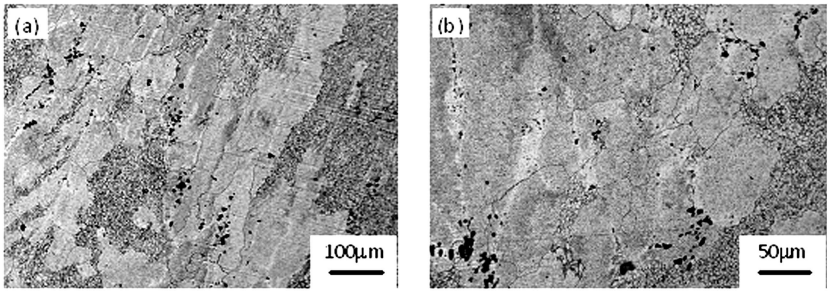

图 5　经 190℃/12h 时效处理的新型高强铝锂合金锻件(锻造比 5)的金相组织

Fig. 5　Microstructure of a new Al-Li alloy forged at the ration 5 under aging 190℃ for 12 h

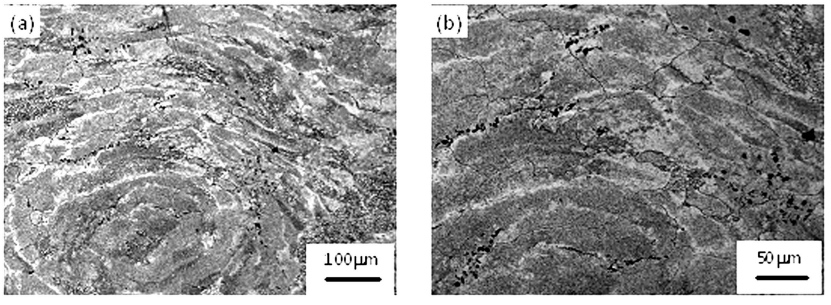

图 6　经 190℃/12 h 时效处理的新型高强铝锂合金锻件(锻造比 7)的金相组织

Fig. 6　Microstructure of a new Al-Li alloy forged at the ration 7 under aging 190℃ for 12 h

2.4　锻件热处理后微观组织

图 7、图 8 分别为锻造比为 5 的新型高强铝锂合金锻坯经 519℃/90 min 固溶、170℃/24 h 及 190℃/12 h 时效处理后的微观组织 TEM 照片,可知新型高强铝锂合金锻坯晶内主要析出强化相为 T_1 相(Al_2CuLi)及θ′相(Al_2Cu),并且在晶界分布有平衡相。

对比图7与图8,可以发现:(1)经190℃/12 h时效处理的合金中T_1相密度相对较高,并且尺寸相对较大(其长度方向较长);(2)经190℃/12 h时效处理的合金中θ′相密度相对较低,但尺寸较粗大;(3)经190℃/12 h时效处理的合金晶界平衡相较粗大,而且分布不连续;而较低温度时效(170℃)时,晶界平衡相尺寸较小,而且分布较连续。由于T_1相强化效果优于θ′相,而经190℃/12 h时效处理的合金中T_1相密度较高,因而新型高强铝锂合金经190℃/24 h时效处理的强度高于经170℃/24 h时效处理的。

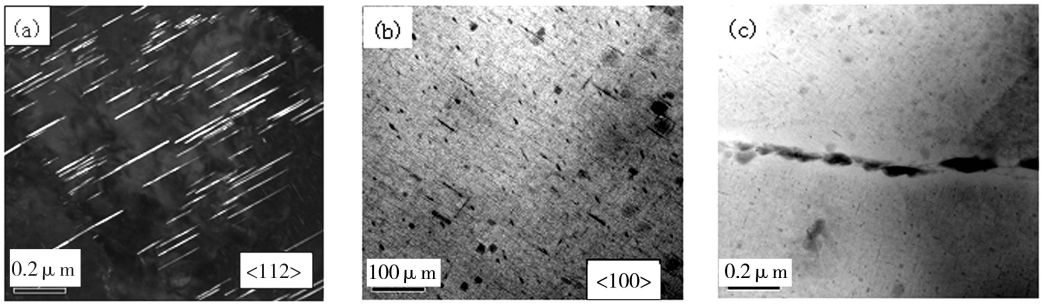

图7　锻造比为5的新型高强铝锂合金锻坯经519℃/90 min固溶、170℃/24 h时效处理后的微观组织TEM照片

Fig. 7　TEM of a new Al-Li alloy forged at ration 5 after solution treatment at 519℃ and aging 170℃ for 24 h

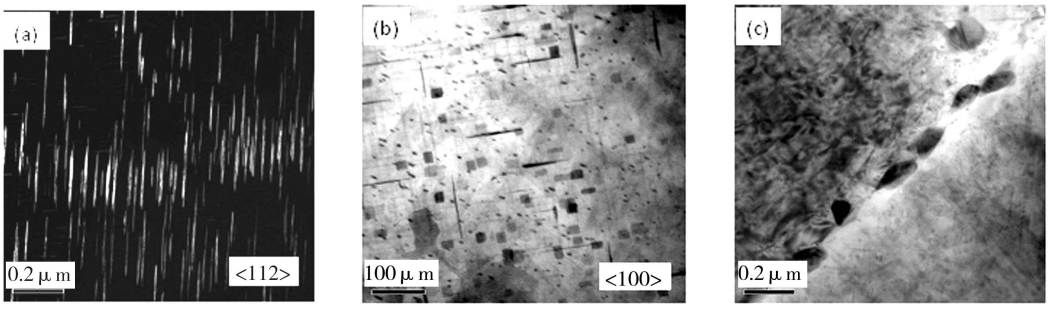

图8　锻造比为5的新型高强铝锂合金锻坯经519℃/90 min固溶、190℃/12 h时效处理后的微观组织TEM照片。

Fig. 8　TEM of a new Al-Li alloy forged at ration 5 after solution treatment at 519℃ and aging 190℃ for 12 h

3　结论

(1)采用热模拟试验所确定的锻造工艺参数(470℃,保温5 h)制备的新型高强铝锂合金锻坯表面光滑,未出现裂纹等缺陷,并且组织细小均匀。

(2)新型高强铝锂合金锻造比为3~7时,采用170℃/24 h及190℃/12 h两种制度进行时效时,合金的径向抗拉强度均大于500 MPa;并且其径向抗拉强度明显高于轴向。

(3)新型高强铝锂合金锻坯的组织形貌受锻造比影响。经190℃/12 h时效后,合金呈现出再结晶形态,并且随着锻造比的增大,晶粒尺寸也逐渐增大。

(4)新型高强铝锂合金锻坯晶内主要析出强化相为T_1相(Al_2CuLi)及θ′相(Al_2Cu),并且在晶界分布有平衡相。经190℃/12 h时效处理的合金与经170℃时效处理的合金相比,前者的T_1相密度相对较高,并且尺寸相对较大;θ′相密度则相对较低,并且尺寸较粗大;并且晶界平衡相较粗大,而且分布不连续。

参考文献

[1] Williams J C, Starke J E A. Progress in structural materials for aerospace system [J]. Acta Materialia, 2003, 51: 5775-5799

[2] 熊焕. 低温贮箱及铝锂合金的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2001(6): 33-41

[3] 赵祖虎. 航空航天用铝锂合金近况[J]. 航天应用与遥感,1998, 19: 40-42

[4] 霍红庆,郝维新,耿桂宏. 航天轻型结构材料——铝锂合金的发展[J]. 真空与低温,2005,11: 63-69

(编辑　李洪泉)