

'94 秋季中国材料研讨会 Ⅲ

新型材料及表面技术

中国材料研究学会

C-MRS

1

化学工业出版社

'94 秋季中国材料研讨会会议论文集

'94 C-MRS Materials Conference Proceedings

第Ⅲ卷

新型材料及表面技术

Vol. III Advanced Materials and
Surface Techniques

第一分册 新型轻金属材料、稀土元素在材料中应用

刘伯操 陆盘金 屠海令 熊炳昆

中国材料研究学会(C-MRS) 编

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字039号

图书在版编目(CIP)数据

新型材料及表面技术: 94'中国材料研讨会论文集/中国材料研究学会组织编写. -北京:化学工业出版社, 1995.9

ISBN 7-5025-1512-7

I. 新… II. 中… III. ①工程材料, 新型-材料科学-学术会议-文集 ②工程材料, 新型-表面精整-学术会议-文集 IV. ①TB39-53 ②TG178-53

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第09244号

出版发行: 化学工业出版社(北京市朝阳区惠新里3号)

社长: 俸培宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所

印 刷: 有色金属研究总院印刷厂

装 订: 有色金属研究总院印刷厂

版 次: 1995年6月第1版

印 次: 1995年6月第1次印刷

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 27 1/4

字 数: 698千字

印 数: 1-600

定 价: 195元

(1分册60元; 2分册65元; 3分册70元)

'94 秋季中国材料研讨会论文集

编辑委员会

顾问：师昌绪 严东生

主任：李恒德

副主任：韩雅芳 吴伯群

委员：（按姓氏笔划排列）

马莒生	甘子剑	刘伯操	刘家浚	李诗卓
朱鹤孙	阮雪榆	邹广田	吴人洁	吴伯群
周 廉	周本濂	陆盘金	姚 熹	姜德生
张兴栋	张允什	张传厉	张荟星	张少卿
张锐生	俞耀庭	侯静泳	柳襄怀	闻立时
胡壮麒	胡黎明	柯 伟	钟家湘	袁润章
徐 僖	徐 懋	海锦涛	章靖国	屠海令
韩雅芳	熊炳昆			

统编人员：侯静泳 韩雅芳

责任编辑：徐 蔓 夏叶清 管德存

前 言

本书是中国材料研究学会 (C-MRS) 组织编写的《'94秋季中国材料研讨会会议论文集》之一。“'94秋季中国材料研究会”于1994年11月至15日在北京召开。这是我国材料界最盛大的一次跨学科的学术交流会,参加会议的有来自国内102所高等院校、75个科研院所、15个工矿企业及有关领导机关的材料科学家、企业家共1000余人。中国科协主席、中国工程院院长朱光亚到会作了重要讲话,我国材料界的著名科学家师昌绪、严东生、林兰英、钱人元、葛庭燧等应邀在大会上作了学术报告。日本、韩国、美国、法国、英国、澳大利亚等国家的材料科学家也应邀出席了大会并作了学术报告。会议共收到论文1500余篇,除26位在大会上作综合性报告外,另分23个分会进行了学术交流。23个分会分别为:

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. 智能(机敏)材料 | 13. 超塑性 with 超塑成形 |
| 2. 梯度材料 | 14. 喷射成形(工艺)技术 |
| 3. 新型工程塑料 | 15. 反应加工新技术 |
| 4. 超导(高、低 T_c)材料 | 16. 摩擦学材料 |
| 5. 生物医用材料 | 17. 材料的腐蚀与防护 |
| 6. 超硬材料 | 18. 异材连接与封装技术 |
| 7. 薄膜材料与薄膜技术 | 19. 稀土元素在材料中的应用 |
| 8. 储氢材料 | 20. 计算机在材料研究与工程中的应用 |
| 9. 非晶态、急冷与快速凝固材料 | 21. 材料研究新技术 |
| 10. 新型轻金属材料 | 22. 超细材料与技术 |
| 11. 富勒烯球(C_{60} 等) | 23. 材料科学前沿 |
| 12. 束流表面改性 | |

本次大会的论文涉及面广,学术水平较高,反映了在上述领域内我国材料研究的最新成就。所有论文均按照规定的评审程序和正式的出版要求进行了审查,最终收集在本论文集的论文共1012篇,分四卷,10分册。

第一卷为新型功能材料(含三个分册);第二卷为低维材料(含二个分册);第三卷为新型材料与表面技术(含三个分册);第四卷为材料加工和研究新技术(含二个分册)。

本书对从事材料开发和研究的科学家、工程技术人员、大专院校师生以及有关领导机关的人员均有重要的参考价值。

全书四卷论文集,作者几千人,汇编成书正式出版尚属首次,缺乏经验,且成书时间甚为紧迫,诸多作者联系不便,不足之处在所难免,祈请各界同仁鉴谅并予以指正。考虑到材料科学和应用技术发展日新月异,拟在日后每召开一次研讨会,即将会议交流论文汇集成册,正式出版,此举还望材料界有关人士予以大力支持。

责任编辑：徐 蔓 夏叶清 管德存

《新型材料及表面技术》卷包含的内容主要有：新型轻金属材料、稀土元素在材料中的应用、金属材料的表面改性、材料的腐蚀与防护、超硬材料与摩擦学材料。其中讨论了铝、钛及其复合材料的新工艺、新技术；稀土在钢铁和有色金属中的应用；束流表面改性的范围，包括离子束、等离子体和激光束材料的表面改性；材料的高温腐蚀与防护、环境和力学因素共同作用下的破坏机理；超硬材料、摩擦学材料的制备技术及其特性等。

第Ⅰ卷 新型功能材料

- 第一分册 智能(机敏)、梯度和储氢材料
- 第二分册 新型工程塑料及生物医用材料
- 第三分册 超导材料及富勒烯球

第Ⅱ卷 低维材料

- 第一分册 薄膜材料与薄膜技术
- 第二分册 非晶态、快凝材料与超细材料及其技术

第Ⅲ卷 新型材料及表面技术

- 第一分册 新型轻金属材料及稀土元素的应用
- 第二分册 金属材料的表面改性及腐蚀、防护
- 第三分册 超硬材料与摩擦学材料

第Ⅳ卷 材料加工和研究新技术

- 第一分册 超塑成形、反应合成与加工及异材连接
- 第二分册 材料研究新技术及材料科学前沿

ISBN 7-5025-1512-7



9 787502 515126 >

ISBN7-5025-1512-7/Z·55

定价：195 元

(1 分册 60 元；2 分册 65 元；3 分册 70 元)

目 录

新形轻金属材料

Al-Li 合金的热处理工艺对组织与性能的影响

-----司鹏程 方 渝 吴雨虹 施 琦 张 荻	(1)
铝锂合金中间形变热处理与稀土微合金化的交互作用---	马 勤 陈 铮 何 明 (7)
铝锂合金环境氢损伤研究-----陈 廉 刘中豪 龙瑞斌 佟 敏	(13)
二元Al-Li合金 δ' 相析出行为的研究-----	闵光辉 彭德林 安阁英 (19)
二元Al-Li合金 δ' 相双峰组织及其控制机理-----	闵光辉 彭德林 安阁英 (24)
2091Al-Li合金的电场均匀化处理-----	刘 伟 丁 桦 崔建忠 (29)
强电场对2091Al-Li合金再结晶规律的影响-----	刘 伟 丁 桦 崔建忠 (35)

Al-Li-Cu-Ce合金熔核凝固组织形态与热裂纹敏感性

-----王引真 贺 勇 高大路 王忠平 贺运佳	(40)
2090Ce铝锂合金焊缝断裂韧性研究-----	贺 勇 王忠平 (44)

双级时效对Al-Li-Cu-Mg-Zr合金力学性能及组织的影响

-----赵 刚 茹红强 王兴海 林肇琦	(49)
RSP Al-Li合金的冲击断裂行为-----	杨德庄 甄 良 崔约贤 于桂复 (54)
8090铝锂合金挤压棒和锻件的力学性能研究---	孙廷富 李德坤 成建国 谢海华 (60)

铝锂合金的熔炼和铸造

-----强 俊 吴一雷 朱德云 欧阳润根 李永伟 陆 政 刘伯操	(66)
Al-1.8%Si合金的预结晶状态控制-----	坚增运 杨根仓 周尧和 张津生 (72)
机械合金化Al-10Ti合金的结构与性能-----	李志超 梁国宪 王尔德 李志民 (77)
中间热机械处理在工业高强度铝合金上的应用-----	张守勇 郑 鹏 张禄山 (82)
新型高强度高尺寸稳定性铸造铝合金研究-----	刘志超 金建新 孙建科 (89)
回复再时效在新型超高强度变形铝合金7A55中的应用	

-----吴一雷 李永伟 强 俊 李春玉	(93)
镍钛记忆合金管接头的结构和性能-----	唐金彪 (98)
2324铝合金疲劳断裂行为研究-----	郑 鹏 郑玉珍 钱友荣 魏 晖 (103)
超声作用下铝-铁合金的制备和性能-----	陈 锋 何德坪 舒光冀 (109)
电磁铸造铝扁锭的工艺研究-----	金俊泽 张兴国 曹志强 (113)
高温高阻尼Al-Fe-Mo-Si/Al合金探索性研究	

-----戴圣龙 刘大博 王田珍 夏 洋 李春玉	(118)
--------------------------	-------

高阻尼铝合金阻尼特性的试验设计及其在振动条件下的特性研究

-----张迎元 石纯义	(124)
泡沫金属的渗流法制备及其水下声吸收性能研究-----	张 勇 何德坪 (130)
3004铝合金再结晶组织形成机理-----	王 云 王超群 陈洪育 (133)
7050合金厚板淬火和时效之间间隔时间对性能的影响---	汝继刚 王淑芝 石 健 (138)
冷凝条件和稀土对Al-7.7wt%Ti结晶组织与性能的影响	

-----吴年强 王广欣 李志章 吴进明 叶仲屏	(144)
--------------------------	-------

CONFORM连续挤压技术-----	戴焕海 宋宝樨 (149)
--------------------	---------------

铜基合金中预变形对马氏体转变及其晶界行为的影响-----	丁秀香 (154)
------------------------------	-----------

一种高温钛合金-----	张 蓊 王永良 于启山 尤力平 (158)
--------------	-----------------------

稀土钨化物颗粒在Ti-55高温合金拉伸过程中的行为	郝孟一 马济民 高 扬	(164)
Ti-55高温钛合金热机械处理工艺对力学性能的影响		
-----杜 娟 马济民 李学明 郭 灵 钟天纺 吴 浩		(169)
Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V合金组织与性能的研究	-----王桂生	(175)
几种新型舰船结构钛合金的特性及应用前景	-----陈春和 严中令 李树勋	(181)
Nb含量对Ti ₃ Al基合金抗氧化性能的影响	-----孙育峰 曹春晓 颜鸣皋	(186)
β 21S合金熔炼及性能的研究	-----彭子益 周光爵 脱祥明 李 阳	(192)
Ti-15-3钛合金的低温时效相变研究	-----张庆玲 王庆如 王世洪 沈桂琴	(197)
人造卫星相机镜头钛合金铸件的研制	-----谢成木	(203)
初探钛合金液相界面扩散焊之工艺关键——中间层合金	-----胡广文 刘效方	(210)
铝与钛的真空钎焊连接	-----李晓红 毛 唯 邓继雄	(216)
Ti ₃ Al基合金的研制及应用	-----脱祥明 周光爵 张启海 李 阳	(222)
新型的超高强度 β 钛合金—— β 21S	-----陈玉文 付作义 马济民	(228)
Zr ₃ 铸造钛合金的热稳定性研究	-----马文科	(235)
SiCp/LC4复合材料的制备及性能	-----谢海华	(242)
颗粒增强挤压铸造铝基复合材料显微组织与性能的关系和氢的影响	-----王明美	(248)
接触反应法制备铝基复合材料的工艺原理		
-----李春玉 柴世昌 李 英 王自东 李庆春		(254)
原位反应法制备铝基“内晶型”复合材料的研究	-----王自东 胡汉起 李春玉	(258)
先进铝基复合材料复合工艺研究	-----李 英 夏 洋 张 跃 李春玉	(262)
熔融铝对CVD SiC纤维簇压力渗透过程的研究	-----汪雨生 孙凤礼 赵新英	(267)
纤维/树脂/铝复合层板的研究	-----隋国鑫 周本濂 姚 戈	(272)
稀土化合物颗粒增强钛基复合材料研究	-----王 宝 李四清 曹春晓	(278)
Mu对Al ₃ Ti结构稳定性的影响及其电子结构研究	-----王立根 刘森英 王崇愚	(285)
冰晶石—氧化铝熔盐电解制备锆变质铝硅合金	-----王达健 谢 刚 施 哲	(290)

稀土元素在材料中应用

稀土元素在铸造Fe-Cr-Al耐热钢中的应用研究

-----王执福 王安东 公志光 王守仁 潘正伟		(294)
35Mn ₂ 抽油杆用钢稀土处理的研究	-----陈长白 贾连弟	(299)
稀土铸铁的高温性能研究	-----王昆林 盛 达 宫俊波 李树江	(303)
稀土钼材的高温强化机制研究	-----张久兴 周美玲 左铁镛 李 耳 王金淑	(309)
低温稀土高浓度渗碳工艺的研究	-----单永昕 刘志儒	(312)
磁性材料中的非线性问题	-----刘伍明 周本濂 蒲富恪	(318)
SrF ₂ :Eu, Tb中稀土离子的价态	-----吴 耶 尤洪鹏 石春山	(323)
1,10—邻菲罗啉稀土红光配合物的制备与性质	-----杨春明 毛向辉	(327)
Eu ²⁺ 的价态稳定及其转换	-----刘应亮 李沅英 杨燕生 石春山	(332)
含稀土铝基合金(ZA27)的相变研究	-----严 彪 朱耀华 唐人剑 徐 政	(336)
液淬Ti-5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.25Si-1Nd合金稀土相颗粒的形成		
-----李阁平 刘羽寅 李 东 胡壮麒		(343)
镁和稀土对烟花用铝镁合金粉性能的影响	-----陈有方 冯荣体 蒋序光	(347)
痕量稀土元素对高纯Ag回复效应的影响	-----宁远涛 文 飞 赵怀志 邓德国	(353)

含铈 Ni_3Al 的冷轧特性-----	袁泽喜	宋中华	习天辉	张细菊	余宗森	(359)
SOFC 空气电极 LaMnO_3 系陶瓷的合成与电导特性						
-----	张中太	唐子龙	齐建全	欧阳林		(364)
稀土元素在GaAs/Si的应用研究						
-----	施益和	宋 铭	李韵仪	李双喜	袁佑荣	丁墨元 (370)
湿法合成Nd、Fe 掺杂 BaCeO_3 质子导体及其电学性能研究						
-----	杨萍华	陈仿林	孟广耀	彭定坤		(375)
两种稀土氧化物填充聚丙烯的晶体结构-----	叶春民	刘景江	唐功本			(381)
变形铝合金晶粒的变质细化与稀土的作用-----	王经涛	王海波	许育中	庞玉华		(384)
稀土硝酸盐对细菌变异性的研究-----	徐书显	曾亚平	陈崇智	傅根铭		(390)
稀土元素在金属材料中的作用和机制-----				杜 挺		(392)
稀土元素改善钢脆性的机制-----	吴承建	张东彬	杨 让			(398)
$\text{Ca}_{2-2x}\text{P}_2\text{O}_7:\text{Ce}_x,\text{Na}_x$ 紫外荧光粉的发光-----	刘 一	韩钧祥				(403)
稀土元素在 $\text{W}_9\text{Mo}_3\text{Cr}_4$ VRE 高速钢中的作用初探-----	丘立一	潘保良				(407)
钛-硼-稀土对铸铝合金性能与结构的影响-----	程国安	李思佳	柳晓军			(413)
铜、钕氧化物对硅锌矿结晶釉的影响-----	杨兆雄	杨兆禧	吴绍祥			(417)
氧化铜对ZTM陶瓷晶界改性作用的初步认识-----	刘维跃	辛玉军	杨正方	袁启明		(422)

Al—Li 合金的热处理工艺对组织与性能的影响

司鹏程 方渝 张荻

(上海交通大学材料科学系 邮编:200030)

摘要 本文研究了 8090Al—Li 合金经不同热处理工艺后对其显微组织与力学性能的影响。测试了在不同热处理状态下的拉伸性能与光镜、电镜组织,分析了分级时效与时效前预变形等的影响,对不同工艺参数、组织与性能之间的相互关系进行了分析讨论。

关键词 Al—Li 合金 固溶处理 时效 显微组织 力学性能

1 前言

轻型高比刚度和比强度 Al—Li 合金是新一代航空和航天结构材料,用作飞机或宇航飞行器结构材料时,可减重 10~20%,从而节省燃料和提高运载性能。各国多年来竞相研制和部份试用几个牌号的 Al—Li 合金。在实用化进程上遇到较大的困难与阻力,塑性不足就是一个最大障碍[1]。Al—Li 合金的主要强化相 δ' (Al_3Li) 具有 Li_2 型结构,与基体共格,位错切过时易发生共面滑移,造成局部强烈滑移带,在人工时效特别是峰值时效状态下,晶界附近由于溶质 Li 贫化或空位贫化,而形成 δ' 无沉淀带 (PFZS),其强度低于晶内,则在晶界附近与晶界三叉点处产生应力集中和应变局部化,导致晶间低能断裂[2,3]。解决这一难题的途径除了采用合金化和微合金化、控制有害杂质元素含量等以外,通过改善热处理工艺从而控制组成相数量、大小、分布和晶界 PFZS 等是必要的。

研究[4]表明,时效前适当的预拉伸不仅可增加基体位错密度,更重要的是还可增强位错之间的交互作用,形成交滑移和位错割阶等,从而使强化相 T_1 (Al_2CuLi) 和 S' (Al_2CuMg) 不均匀沉淀增强,而使它们的分布均匀性得到改善。

Al—Li 合金中的沉淀相对合金的力学行为有很大的影响。增加基体内的 S' 和 T_1 的析出对提高强度和减少共面滑移是有利的,减少晶界平衡沉淀相的析出对断裂韧性有利[5]。时效前进行预变形和采用低温时效等途径可改变沉淀相的分布状况[6]。Miller 等[5]提出, T_1 相的析出促进晶界附近 δ' PFZS 的形成,并与 Cu 与 Li 的比例有关。8090 和 8091 Al—Li 合金中 S' (Al_2CuMg) 是主要的第二强化相,过时效状态平衡相的析出将导致局部区域贫 Li,小角度晶界处不形成 PFZS。Al—1%Li—4%Cu 合金的研究表明,350℃ 以下人工时效主要析出 θ' (Al_2Cu) 相,更高温度时效时因有 Li 原子进入而变为 T_B ($\text{Al}_{7.5}\text{Cu}_4\text{Li}$),高温长时间时效时将析出 T_1 相。Al—2%Li—3%Cu—0.12%Zr 合金固溶淬火态组织中存在细小均匀的 β' (Al_3Zr) 相,190℃ 时效将沉淀出 β' 、 θ' 、 δ' 、 T_1 和 T_2 (Al_5CuLi_3) 相,未发现 θ (Al_2Cu) 相。 T_1 相少的地方 δ' 密度大,反之亦然,说明 T_1 相的生长依靠 δ' 相的部份溶解,即 δ' 溶解为 T_1 相长大提供了 Li 原子。峰值时效状态下 T_1 和 θ' 的直径均长大了,但并不明显增厚。

时效前施加少量冷变形将提高基体中的位错密度和空位浓度,促进 T_1 和 S' 相的形核

与长大,加快Li的扩散,使 δ' 相粗化速率增大,达到峰值硬度所需时间缩短,可提高合金强度和韧性,而塑性几乎不降低[4,7]。但是,若预变形量过大,则可能使合金引起严重缺陷而降低塑性[8]。

然而许多实际构件要在时效前施以冷变形难以采用,此时可利用分极时效工艺而达到同样的目的。一般先采用低温时效,使强化相 δ' 呈弥散细小析出,然后再进行较高温时效,使 S' 、 T_1 等强化相析出并长大到一定尺寸,而 δ' 相发生部份溶解,另一部份也长大到一定尺寸,这样对晶界析出相的大小与分布影响不大[9],可使合金达到强韧性的配合。随时效温度的升高和时效时间的延长,晶界析出相将增多,而温度比时间对时效合金晶界微观结构的影响更明显。已有研究证明,低温时效处理与拉伸预变形适当配合,是提高强度同时提高韧性的有效途径[5]。

由上可见,AI-Li合金的强塑韧性依赖于组织的微细变化,从而热处理工艺参数的变化对性能影响很敏感[11]。根据将AI-Li合金大量应用于飞机和宇航工业的要求来看,目前国内外对AI-Li合金的热处理工艺参数与微观组织、力学与物理化学性能等的技术标准、工艺规范、宏观与微观组织的定量鉴定等方面尚需进行大量深入而系统的研究。本文将侧重于时效前预变形和多段时效工艺的结合及其对组织和性能影响的研究。

2 材料与实验步骤

本研究采用真空感应并充氩保护熔炼与浇注获得的8090Al-Li合金,其化学成份为Al-2.57Li-1.33Cu-1.11Mg-0.12Zr-0.082Fe-0.083Si。锭坯经460℃/16h+530℃/12h两段均匀化退火,然后经460℃/3h加热后热挤压再经460℃/1h加热后热锻成棒材。拉伸试样按GB6397-86标准取 $d_0/l_0=5$,标准 $l_0=40\text{mm}$, $d_0=8\text{mm}$,应力轴方向平行于锻棒纵向。固溶处理在硝酸盐浴炉内加热535℃/1h,淬入冰水中,然后进行170℃和190℃时效处理,取一系列不同保温时间冷却后用维氏显微硬度计测定硬度(截荷50g),作出时效动力学曲线。拉伸试样热处理工艺见表1。

表1 拉伸试样所采用的工艺类别及参数

工艺类别	热处理及预变形的参数
A	535℃/1h+冷水淬(CWQ)(固溶处理)
B	535℃/1h+CWQ+190℃/17h(峰值时效)
C	535℃/1h+CWQ+170℃/35h(欠时效)
D	535℃/1h+CWQ+5%预拉伸+170℃/35h
E	535℃/1h+CWQ+5%预拉伸+170℃/35h+240℃/10min+100℃/10 ⁴ min
F	535℃/1h+CWQ+170℃/35h+240℃/10min+100℃/10 ⁴ min

拉伸试验在 Shimadzu AG—100KNA 试验机上进行,控制夹头速率为 0.6mm/min,每种工艺状态取两根试样,测得 δ_b , $\delta_{0.2}$ 和 δ_5 后分别取平均值。然后在拉断试样上的标距内取样进行光镜与电镜分析。金相试样浸蚀剂为混合酸水溶液(1%HF+1.5%HCL+2.5% HNO_3 ,余为水)。制备 TEM 金属薄膜在双喷电介装置上进行,电解液为 $\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{OH}=1:3$,电压 6V,温度为 -30°C 。采用 philips CM12 型电镜进行 TEM 研究,加速电压为 100KV。

3 实验结果及讨论

3.1 力学性能

将 8090 合金经 $535^\circ\text{C}/1\text{h}$ 固溶处理后淬冰水,然后进行 190°C 时效处理不同时间($5\sim 10^4\text{min}$)后测定硬度 HV,可得到时效动力学曲线如图 1 所示。用冰水冷却仍不能完全抑制 δ' 相的析出,故固溶处理态是有部份弥散细小 δ' 相析出的过饱和固溶体。随着 190°C 时效时间的延长, δ' 进一步析出,并逐渐析出 S' 相,直至时效 17h 达到峰值时效状态。时效时间再延长可能在晶界上析出 $\delta(\text{Al-Li})$ 平衡相和 T_2 相,形成贫 Li 的无沉淀带, δ' 则发生粗化而体积分数减少。当 δ' 相尺寸长大到某一临界值时,位错运动通过 δ' 粒子将由切过转变为绕过方式, δ' 尺寸随时效时间延长尺寸越大对位错运动阻力越小,硬度必然渐降。

经过不同热处理工艺(A~F)的 8090 合金拉伸试验测得的 σ_b , $\sigma_{0.2}$ 和 δ_5 数据分别取平均值后以直方图示于图 2。

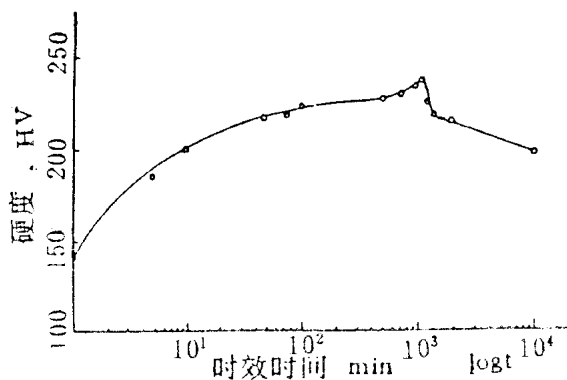


图1 研究合金 190°C 时效动力学曲线

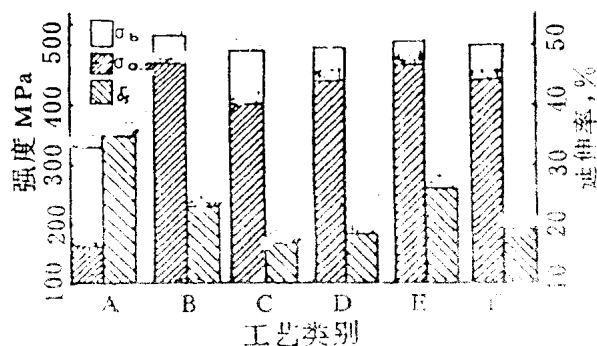


图2 合金经不同工艺后的力学性能比较

峰值时效态(工艺 B)具有很高的强度,并具有一定的塑性,因合金析出大量具有一定尺寸的强化相,并析出一定量的 S' , β 相等。固溶处理后 $170^\circ\text{C}/35\text{h}$ (工艺 C)时效是欠时效态,其强度与塑性均低于 $190^\circ\text{C}/17\text{h}$ 峰值时效。而在时效前先施以预变形 5% 后再 $170^\circ\text{C}/35\text{h}$ 时效(工艺 D),则比相同条件下的时效处理在强度和塑性方面均略有升高,特别是 $\sigma_{0.2}$ 升高明显。

当时效前先施以 5% 预拉伸变形后 $170^\circ\text{C}/35\text{h}$ 时效,再在 $240^\circ\text{C}/10\text{min}$ 高温短时时效,最后 $100^\circ\text{C}/10^4\text{min}$ 时效(工艺 E)时,其强度与延伸率与工艺 D 完全相当。若采用先 $170^\circ\text{C}/35\text{h}$ 亚时效 + $240^\circ\text{C}/10\text{min}$ 高温短时时效,最后 $100^\circ\text{C}/10^4\text{min}$ 长时间时效(工艺 F),其强度与延伸率和 $190^\circ\text{C}/17\text{h}$ 峰值时效状态几乎完全相当,它比 $170^\circ\text{C}/35\text{h}$ 一段时效不仅提高了强度,而且提高了塑性,说明采用分级多段时效有利于合金性能的改善。

3.2 微观组织分析

8090Al-Li 合金 535℃/1h 固溶处理后淬冰水得到过饱和的 α 固溶体,图 3 示 α 基体晶粒,微细的 δ' 相实际上已部份析出,但光镜下无法鉴别。图 4 示出 TEM 照片,可清晰看到过饱和固溶体中的大角度晶界及晶界上少量未溶相,晶内位错密度较低,在一定位向

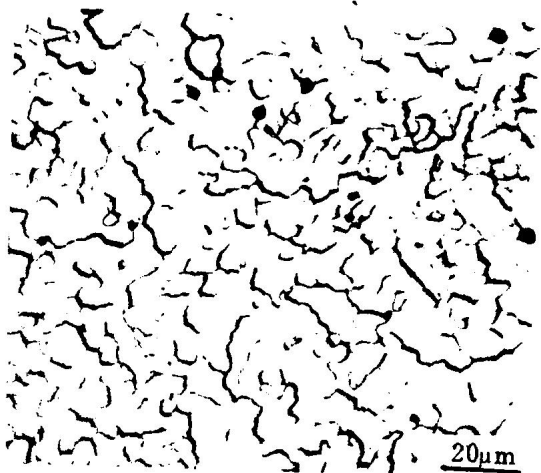


图 3 固溶处理态, DIC

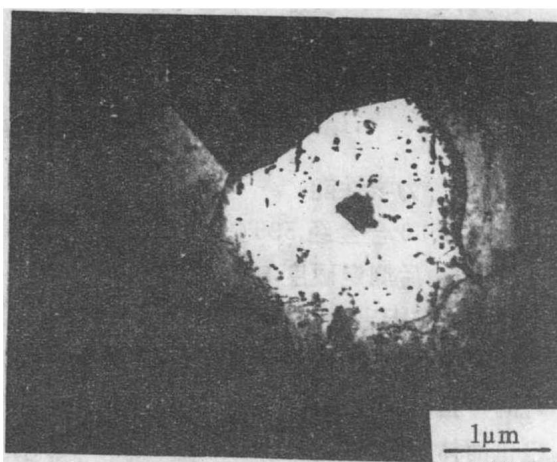


图 4 固溶处理态, TEM, 电子束//[110] α

某些晶粒内可观察到弥散分布极为细小的 δ' 颗粒,是淬冰水冷却过程中析出来的。固溶淬火态 α 晶粒晶界用混合酸水溶液浸蚀不易清晰,本文中以 DIC(偏光微差干涉衬度)条件下照相(图 3)。经过人工时效处理由于晶界上沉淀相比晶内析出多,故勾画出清晰的晶界,见图 5。过时效状态则由于沉淀相增多且长大,则晶界和沉淀相显示更明显,见图 6。

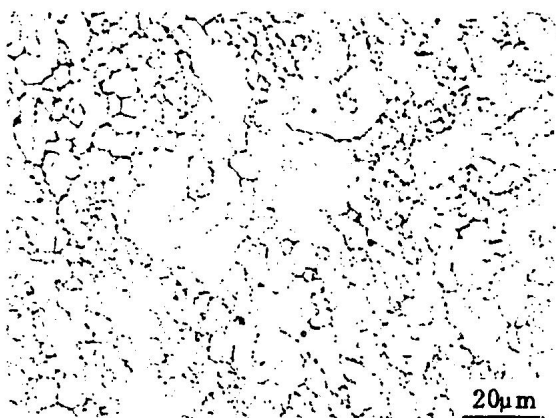


图 5 190℃/750min 欠时效组织

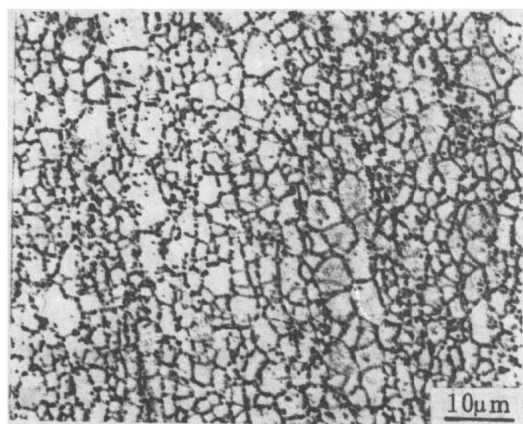


图 6 190℃/5×10³min 过时效组织

在 535℃/1h+CWQ+190℃/17h 峰值时效状态下, δ' , β' , S' , T_1 等多种沉淀相均已析出并长大到一定的尺寸,图 7 示 TEM 明场照片。在峰值时效状态下 TEM 观察时容易找到 δ' 的晶界无沉淀区。图 8 示 TEM 明场照片,在晶界附近的白亮带显示明显的 PFZ'S,这是由于晶界管道扩散加快了 δ' 的长大,而且平衡相 δ (AlLi)析出时表面能、应变能和激活能均较低, Li 原子和空位两者的耗贫使无沉淀区易于产生。PFZ'S 处强度低于晶粒内部,当共面滑移时在晶界附近位错塞积造成应力集中,在 PFZ'S 内造成应变局部化,促使低能晶间断裂的发生。

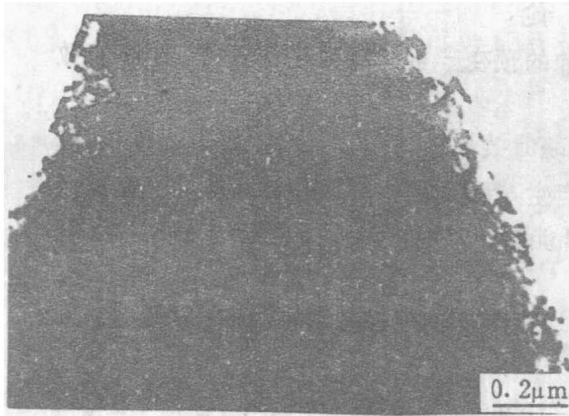


图7 峰值时效态,TEM

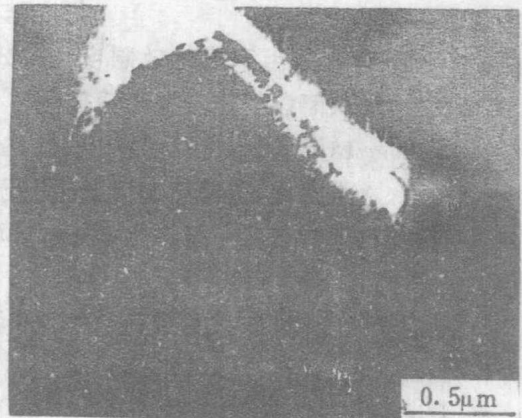


图8 峰值时效态,TEM,电子束方向//[112] α

经 $535^{\circ}\text{C}/1\text{h} + \text{CWQ} + 5\%$ 预变形 + $170^{\circ}\text{C}/35\text{h}$ 时效处理的金相照片中基体 α 晶粒呈轻微纤维状,晶粒沿拉伸方向伸长, $170^{\circ}\text{C}/35\text{h}$ 时效未使其发生再结晶。然后此试样再进行 $240^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ 短时高温时效 + $100^{\circ}\text{C}/10^4\text{min}$ 时效,其 TEM 象如图 9(a)所示,可看到明显的亚晶界,说明 $240^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ 短时高温时效使基体 α 晶粒发生了回复过程,但未发生再结晶。图 9(b)系此状态下 δ' 相的中心暗场象,细小白亮色颗粒为 δ' 相。亚晶界具有一定附加强化作用。仔细观察 TEM 象可发现 S' 相呈板条状, T_1 相呈直棒状析出,预拉伸变形引入的位错使 S' 和 T_1 相呈均匀地析出,有利于减缓共面滑移和改善塑性。

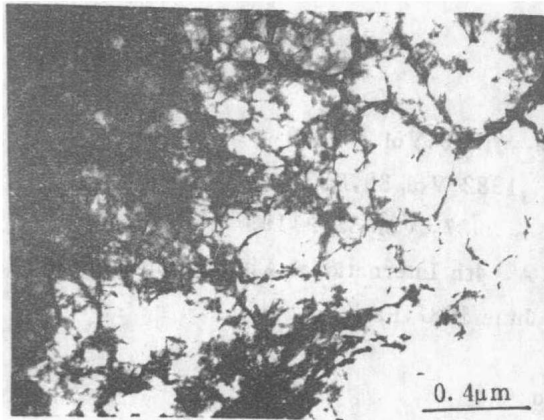


图9(a),5%预变形,TEM 电子束方向 11[112] α

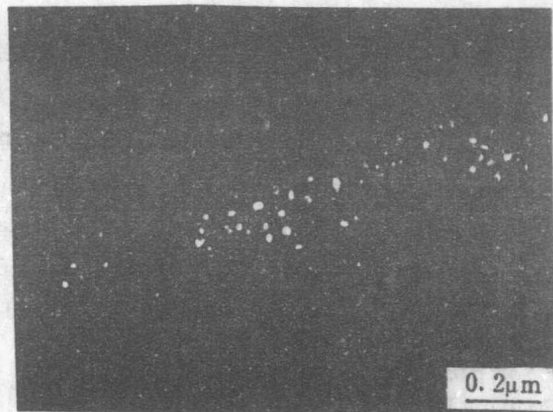


图9(b) 5%预变形,TEM, δ' 的中心暗场,
电子束方向 11[001] α

当 $170^{\circ}\text{C}/35\text{h}$ 欠时效后再进行 $240^{\circ}\text{C}/10\text{min} + 100^{\circ}\text{C}/10^4\text{min}$ 时效时,则 $240^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ 短时效可使 $170^{\circ}\text{C}/35\text{h}$ 时效析出的 δ' 相发生部份溶解,而且有利于 S' 相的长大。然后再进行 100°C 长时间(10^4min)时效,则析出更为细小弥散的强化相 δ' 。此组织状态可获得较高的抗拉强度和屈服强度并具有一定塑性,但同样容易引起大量 δ' 被位错运动切割而导致共面滑移,因而对韧性不利。

4 结 论

1. Al—Li 合金采用不同时效制度和时效前的预变形可控制强化相 δ' , T_1 , S' 等的数量、尺寸与分布, 从而控制其强度和塑韧性。

2. 8090Al—Li 合金经 190°C/17h 时效达到峰时效状态, 析出 δ' , S' 和 T_1 等强化相, 具有很高强度和一定塑性。但峰值时效态下易于产生 δ' 无沉淀带, 即在晶界和晶界三交叉点处易于导致应力集中与应变局部化, 导致晶间低能断裂, 故对有一定韧性要求的构件不宜采用。

3. 时效前预拉伸 5% 后可提高 170°C/35h 欠时效态的屈服强度, 因预变形促进了细小 δ' 和 S' 相的析出具有弥散强化作用。

4. 采用 170°C/35h + 240°C/10min + 100°C/10⁴min 三段时效, 其 σ_b , $\sigma_{0.2}$ 与 190°C/17h 峰值时效态相当, 但可减轻 δ' PFZS 的形成, 因而对改善塑韧性有利。

5. 上述三段时效前施以 5% 预变形则强塑韧性反而有所降低, 可归因于析出了过多的细小 δ' 相而造成大量共面滑移和严重应变局部化所致。

致 谢

吴雨虹和施琦参加了部份试验研究工作。对王承德和徐彤工程师在金相分析和力学性能测试方面, 蒋为吉工程师在 TEM 分析方面给予的帮助和支持表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 Rao K. T. V. R. O. Ritchie. Mater. Sci. Technol., 1989, Vol. 5 P882
- 2 Sanders, T. H. Starke, E. A. Jr. Acta Metall., 1982, Vol. 30, P927
- 3 Vasudevan, A. K. Doherty, R. D. Acta Metall., 1987, Vol. 35, P1193
- 4 Cassada, W. A. Shiflet, G. J. Starke, Jr., E. A. 4th International Aluminium Lithium Conference, eds. Champier G. et. al., 10—12 June 1987, Paris. (France), PC3—397
- 5 Miller, W. S. White, J. et. al., ibid PC3—139.
- 6 Gregson, P. J. Flower, H. M. Aluminium Technology'86, P423
- 7 Christodoulou, L. et. al., Aluminium—Lithium Alloys, eds. E. A. Starke, Jr. H. H. Sanders, Jr., TMS—AIME, 1984, 561
- 8 Lee, E. W. et. al., Scripta Metall., 1988, Vol. 22, P. 53.
- 9 Blankenship, C. P. Jr. E. A. Starke, Jr., Metall. Trans. A, 1993, Vol. 24A, P833.
- 10 White, J. et. al., ibid[4], PC3—425.
- 11 Lavernia, E. J. et. al., J. Mater. Sci., 1990, Vol. 25, P1137

铝锂合金中间形变热处理与稀土微合金化的交互作用*

马 勤 陈 铮 魏建锋 何 明

(西安市 西北工业大学材料系 710072)

摘 要 本文针对两种不同铈含量的 2090Al-Li 合金研究了铈含量与中间形变热处理 (ITMT) 工艺参数的交互作用及其综合效应。实验表明: 低的铈含量、较高的轧前过时效温度、以及较大的温轧变形度易获得细小的等轴再结晶组织; 反之, 则获得完全未再结晶组织。这两种组织均有良好的强塑性配合, 断口特征前者表现为沿晶断裂并伴有明显的晶内撕裂棱, 而后者则是典型的分层穿晶断口。文中从 T_2 相粒子的角度探讨了微量元素 Ce 及 ITMT 工艺参数对晶粒结构及其断裂特征的作用机制和响应关系。

关键词 铝锂合金 铈 中间形变热处理 晶粒结构 拉伸性能 断裂特征

1 前 言

铝锂合金的组织控制与性能优化国内外已有广泛的研究。但因其某些本征特点, 加工工艺参数和微观组织结构对其力学行为的影响规律与普通铝合金不完全相同, 很难用经典理论予以圆满解释。中间形变热处理 (ITMT) 与微合金化是控制铝锂合金显微结构的重要手段, 目前研究多在单独考察 ITMT 工艺参数及其改型方法或微量元素的作用方面^[1,2], 两者交互作用的研究报导尚不多见。然而, 由于微量元素的加入, 将影响合金的工艺行为, 甚至使其作用机理产生相应的变化, 故探明微量元素与工艺参数之间的交互作用及其综合效应, 对阐释铝锂合金的本征特点及其改善力学性能, 具有重要的理论意义与实用价值。本文针对含铈 2090 铝锂合金, 采用四步法 ITMT 工艺, 较系统地研究了铈含量、过时效、轧制制度以及再结晶处理工艺参数对晶粒结构、拉伸性能及其断裂特征的影响规律, 重点探讨了铈含量与 ITMT 各工艺参数之间的交互作用及其综合效应, 以期为该合金的推广应用提供理论基础和试验依据。

2 实验材料及方法

实验合金在真空感应炉中熔炼, 在氩气保护下精炼并浇注。铸锭化学成分 (wt%) 分析为: 高铈合金 Al-2.43Li-2.88Cu-0.12Zr-0.16Ce; 低铈合金为 Al-2.41Li-2.82Cu-0.11Zr-0.02Ce。两种合金中杂质 Fe、Si 含量 (wt%) 分别为 0.09 和 0.07, Na、K 含量 (wt%) 均小于 0.017。

铸锭先经 $450 \pm 5^\circ\text{C} / 10\text{h} + 500 \pm 5^\circ\text{C} / 10\text{h} + 525 \pm 5^\circ\text{C} / 6\text{h}$ 空冷的三级均匀化处理, 铸

* 国家航空工业总公司资助课题

面后热轧成 5~8mm 厚的板坯。中间形变热处理采用四步法 RI-ITMT 工艺^[3]。板坯先经 530℃ 0.5h 固溶处理标准化, 随后经过四个单变量工艺试验, 选择出最佳工艺如表 1 所示。拉伸试样先经 4% 预应变拉伸后进行 24h 165℃ 峰时效处理。板材最终厚度为 1.2mm。

拉伸试样取自板材的轧向 (L), 尺寸为厚 1.2mm, 宽 10mm, 标距长 30mm, 拉伸试验在 Instron 196 电子拉伸机上进行, 拉伸断口在日立×650 型扫描电镜下观察形貌。金相试样磨面为板材的 L-S 面, 再结晶百分数测定视场取自板材厚度的中心, 在金相照片上用数点法进行, 晶粒尺寸参照文献[4]的方法测定, 用 philips-EM400 型透射电镜观察了各状态的显微组织。

表 1 ITMT 最佳工艺参数

	完全未再结晶组织	细等轴再结晶组织
铈含量 wt%	0.16	0.02
过时效制度	8h / 275℃ 空冷	8h 400℃ 空冷
终轧制度	200℃ 轧制, 总压下量 67.5%	300℃ 轧制, 总压下量 85%
再结晶制度	0.5h / 530℃ 水淬	0.5h 510℃ 水淬

3 实验结果与讨论

3.1 显微组织

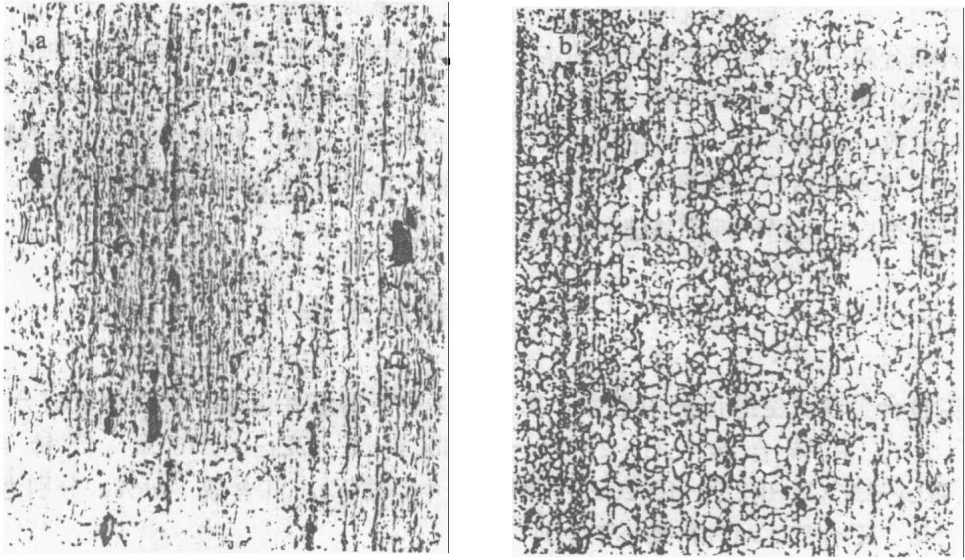


图 1 两类合金不同工艺条件下的晶粒结构 X200

- a) 高铈合金: 8h / 250℃ 时效+67.5% 200℃ 轧制+0.5h 530℃ 水淬
- b) 低铈合金: 8h / 400℃ 时效+85% 300℃ 轧制+0.5h 510℃ 水淬