

Al-Li 合金的合金化及组织研究进展*

尹登峰 余志明 陶 颖 孟力平 伍汰沙

(中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要 综述了 Al-Li 合金的合金化及组织的研究进展, 详细阐述了不同体系如 Al-Li-Cu、Al-Li-Mg 系合金的成分与微结构之关系, 评述了 Al-Li 合金中微合金组元如 Zr、Ag、RE 等微合金化的发展趋势。

关键词 Al-Li 合金 合金化 组织 研究进展

Research Progress in Effects of Elements on Microstructure of Aluminum-Lithium Alloys

YIN Dengfeng YU Zhiming TAO Ying MENG Liping WU Taisha

(College of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract Research progress in effects of elements on microstructure of aluminum-lithium alloys is presented. The relations of compositions and microstructure of different Al-Li-Cu, Al-Li-Mg alloys are detailed. The development prospects for trace elements including Zr, Ag, RE in aluminum-lithium alloys research are summed up.

Key words Al-Li alloy, effects of elements, microstructure, research and development

0 引言

目前, 国外注册的 Al-Li 合金牌号已达 30 余种, 大体上可分为 Al-Li-Cu 和 Al-Li-Mg 两个体系。而 Al-Li-Cu 系又可以锂含量的多少大致分为以提高性能如强度为目的的低锂含量合金如 Weldalite™049 和以降低密度为主要目的的高锂含量合金如 8090、2091 等。Al-Li 合金的研究与开发可追溯到 20 世纪 30 年代, 70 年代进入发展高潮, 现在, 国外 Al-Li 合金在航天航空领域的应用已进入实用阶段^[1]。但其合金化研究和新型合金的研究与开发工作仍在不断进行。只有深刻理解 Al-Li 合金强韧性与其内部结构的关系, 才能有目的、有针对性地改变其内部微结构从而有效地改进合金的性能。因此, 本文将介绍 Al-Li 合金的合金化及组织研究进展。

1 Al-Li 合金的组织

表 1、表 2 分别列出了 Al-Li 基合金在各个不同热处理状态下的各种析出相及其基本构造和形态特征。

表 1 铝锂系合金中可能出现的析出相

时效状态 合金	淬火 状态	欠时效态	峰时效态	过时效态
Al-Li 系	δ	δ	δ	(δ'), δ
Al-Li-Zr 系	α', δ	α', δ	α', δ	α', (δ'), δ
Al-Li-Cu 系	δ	T ₁ , δ', θ', T _B , T ₁	δ', T _B	(δ'), T ₁ , T ₂ , δ
Al-Li-Cu 系	α', δ	α', θ', T ₁ , T ₂ , δ	α', δ', T ₁ , T ₂	α', (δ'), T ₁ , T ₂ , δ
Al-Li-Mg	δ	δ	δ	(δ'), T ₁ , δ
Al-Li-Mg-Cu-Zr 系	α', δ	α', δ	α', δ', S'	α', (δ'), S', δ, S
Al-Li-Cu-Mg-Zr 系	α', δ	α', δ	α', S', δ	α', (δ'), S', T ₁ , δ, S

2 Al-Li 合金的合金化

2.1 Al-Li 二元合金

Li 在铝中的最大固溶度 600℃ 时约为 4.2wt%, 室温下则较小。由于 Li 在铝中的溶解度变化很大, 时效时有 δ' (Al₃Li) 亚稳相析出而产生强烈的时效硬化现象, Al-Li 二元合金的析出过程为:

过饱和固溶体 → 过渡相 δ' (Al₃Li) → 平衡相 δ (AlLi)

δ' 相是 Al-Li 二元合金中的主要强化相, 它具有有序的 Li₂(Cu₃Au) 超点阵结构, 与基体错配度非常小, 其错配度随成分比不同和热处理温度变化在 0.025%~0.33% 之间变化^[2]。由于与基体错配度小, 故 δ' 相析出动力大, 再加上 δ' 相的表面能也很小 ($\sigma = 0.014 \text{ J/m}^2$)^[3], 且 Li 与空位结合能较高等因素, 使 δ' 相易于形成, 从过饱和固溶体中析出非常快, 即使液体急冷也不能抑制 δ' 相的形成。

时效初期的 δ' 相析出形状不规则, 随时效时间延长而逐渐成为球形, 并且不断粗化, 其粗化速率遵从 Lifshitz-Wagner 动力学规则: $\bar{r} \propto t^{\frac{1}{3}}$ (其中 $\bar{r}$ 为粒子半径, t 为时效时间)。δ' 相粒子的粗化与下列因素有关: ① Al 基体-δ' 界面能; ② Li 在 Al 中的扩散系数 D_{Li} ; ③ Li 在 Al 中的平衡固溶度。

Al-Li 二元合金主要靠 δ' 相析出产生的时效强化。而与基体完全共格的 δ 相容易产生共面滑移, 使位错在该滑移面与晶界的交叉处堆积, 从而引起应力集中, 诱发裂纹萌生并使裂纹沿晶界或滑移面迅速扩展, 引起脆性断裂, 导致 Al-Li 合金韧性下降^[4]。

影响 Al-Li 二元合金强韧性的因素还包括晶界不均匀析出粗大的平衡相 δ 及晶界存在的无析出带 (PFZ)。大的平衡相在晶界析出, 本身不仅对合金的变形和断裂行为产生不利影响, 而且将导致晶界附近 Li 原子的贫乏, 从而沿晶界形成无脱溶带 (PFZ)。而无脱溶带的强度低于晶内, 因此合金受力产生塑性变

* 国家“十五”重点攻关计划项目基金资助 (41312020205)

尹登峰: 男, 博士, 副教授 Tel: 0731-8879341 E-mail: ydfchh@mail.csu.edu.cn

形时将优先在沿晶界的无沉淀带发生断裂^[5],从而导致 Al-Li 合金的强韧性下降。

表 2 铝锂合金中主要析出相的构造和形态

析出相		结晶构造	晶格常数(nm)			析出形态
			a	b	c	
亚稳相	δ'(Al ₃ Li)	LI ₂ 型	0.401~0.4038			共格,不定型→球形
	α'(Al ₃ Zr)	LI ₂ 型	0.405			共格,球形→棒状
	θ'(Al ₂ Cu)	正方晶	0.404~0.408		0.58	部分共格,晶癖面//[100] _m , 板条状[007] _p /[100] _m
	T' ₁	Pt ₂ Mo 型斜方晶	0.2876	0.86	0.406	晶癖面//[111] _m , (010) _p /[(110) _m 板条状
	T' _B					板状
	T' ₂	正方晶				晶癖面//[100],板状
	S'(Al ₂ CuMg)	斜方晶	0.404	0.925	0.718	[100] _s /[100] _s ,[010] _s /[021] _a , 针状→板状
稳定相	δ(AlLi)	NaTl(B ₃₂)型	0.638			块状
	β(Al ₃ Zr)	DO ₂₃ 型	0.4315		1.693	
	T1(Al ₂ CuLi)	六方型	0.497		0.935	(11 $\bar{2}$ 0)/[(2 $\bar{1}$ 1) _m (0001) _p /[(111) _m , (10 $\bar{1}$ 0),板条状
	TB(Al _{7.5} Cu ₄ Li)	CaF ₂ 型	0.538			[100] _p /[110] _m , [001] _p /[001] _m , 板条状
	T2(Al ₆ CuLi ₃)	六方型	1.3914			块状
	T(Al ₂ MgLi)	六方型	2.02			棒状

2.2 Al-Li-Zr 系合金

此系合金中除了析出 δ'相、δ相外,还析出一种与 δ'相同为 LI₂ 型结构的亚稳相 β'(Al₃Zr),呈球形,与基体完全或部分共格,它与基体的错配度约为 0.3%~0.6%,在双束条件下会出现典型的共格应变衬度,呈半边豆瓣状。β'相能阻碍亚晶界迁移和合并,抑制再结晶和晶粒长大,细化晶粒^[6]。同时,有研究表明,δ'相能优先在 β'相界面上形核长大,形成以 β'相为核心,δ'相包在周围的复合结构相^[7],这种 β'/δ'复合相的中心硬度较高,合金变形时,位错不容易切过,因而可有效地抑制局部平面滑移,改善合金塑性。此外,由于 Al₃Zr 的弥散分布更为均匀,在一定程度上改善了 δ'相的析出特征,使 δ'相分布更为均匀。由于 β'相相当稳定,高温时(500℃)仍能使合金保持细晶状态,为材料超塑性的发展提供了有利条件。但是,Zr 的含量不宜过高,否则将使晶界出现含 Zr 的粗大析出物,破坏晶界性能,并增大合金密度,所以 Al-Li 合金中 Zr 含量一般为 0.1~0.2wt%。

2.3 Al-Li-Cu 系合金

Cu 在铝中的最大固溶度为 5.65wt%。由于 Cu 与 Li 结合形成析出相,从而改变了二元 Al-Li 合金的析出顺序,析出顺序与含铜量有关,在很大程度上取决于 Cu/Li 比^[8]。Al-Li-Cu 合金析出过程见表 3。

Al-Li 合金中加 Cu 有两方面的作用:一是导致 δ'相层错能升高,从而有利于位错从切过机制转变为绕过机制;二是能促进 T1 相及 θ'相析出,提高合金强度。T1 相是在{111}基体晶面上形成的六角形板条相。T1 相可在 a/2<110>位错分解而成的 a/6<112>肖克莱不全位错上形核长大,或者在基体与 G. P. 区的界面上形核长大(取决于过饱和固溶度的大小)。T1 相具有很强的强化效果,不易被位错切过,从而提高 Al-Li 合金的强度^[9]。θ'相有一定的强化作用,但过时效时,由于 Li 原子的溶入,会转化成 T2(Al₆CuLi₃)、TB(Al_{7.5}Cu₄Li)等晶间平衡相,导致合金强度下降。

表 3 Al-Li-Cu 合金的析出过程

Cu 含量 (wt%)	析出过程	主要强化相
≥5	过饱和 {G. P. 区, θ'→θ'→θ(Al ₂ Cu) 固溶体 {δ'→δ	G. P. 区, θ', δ'
2~5	过饱和固溶体→G. P. 区+δ' →T1+δ'→T1	G. P. 区, T1, δ'
<2	过饱和固溶体 {δ'→δ T1	δ', T1

对中高铜 Al-Li 合金,强化主要是由于 G. P. 区和 δ'相的联合析出和时效后期的 T1 相析出。低铜合金由于 T1 相析出的体积百分数减少及 G. P. 区缺乏的原因,时效峰值强度不如高铜合金高。在低铜合金中,还存在着 T2 相在晶界形核长大,增加了显微孔洞的形成,从而加强了亚晶间断裂过程。

2.4 Al-Li-Mg 系合金

Mg 在 Al 中有较大的固溶度(14.9%, 451℃),能产生固溶强化。它可降低合金密度,但同时也降低了弹性模量,故对刚度没有影响。Al-Li-Mg 系合金的析出过程为:

过饱和固溶体 { δ'→δ
δ'→T(Al₂MgLi)

Mg 的加入使 Al-Li 合金溶解度曲线上移,降低了 Li 在基体中的固溶度,从而在时效初期阶段促进了 δ'共格强化相的析出,增加了 δ'相的体积分数和锂的沉淀强化作用。有研究表明,每加入 1wt% 的 Mg 就能使合金的强度提高约 50MPa^[10]。Mg 能促进 T 相析出,抑制 δ 相析出。T 相是一种棒状平衡相,与基体不共格,一般是过时效的产物,也可在淬火后的人工时效过程中于晶界或亚晶界上非均匀形核。Mg 含量越高,越易在晶界处析出 T 相,同时,由于 T 相析出消耗了 Li,导致晶界附近出现无脱溶带 PFZ,从而降低了合金的强韧性。

2.5 Al-Li-Cu-Mg-Zr 系合金

Al-Li-Cu-Mg-Zr 系合金的析出过程比较复杂,不同的 Cu、Mg 含量都会影响时效的析出过程。但该系合金的沉淀析出以及析出相大致可以认为是相当于 Al-Li-Cu、Al-Li-Zr、Al-Cu-Mg 系合金的混合析出。时效过程中可能出现的析出物有: δ' 、 β' 、T1、T2、S'、S、 δ 相等。

Mg 和 Cu 的同时加入,促进了针状亚稳相 S' (Al_2CuMg) 的形成。细小的、均匀分布的 S' 相与 T1 相一样难以被位错切过,从而能有效地分散滑移,促进变形均匀进行而提高合金的强度和塑性。另外, S' 相在晶界附近析出能减窄或消除 PFZ^[11]。S' 相和 T1 相都易在位错等缺陷处优先形核长大,因此,时效前的预变形对该系合金的性能有比较大的影响。因为预变形能引入大量的位错从而促进 T1、S' 相的均匀析出。同时,有人发现预变形不仅能减少晶间沉淀的数量,还能减小晶间沉淀物的尺寸。Tosten 等^[12]研究表明,不进行预变形,则有利于晶界沉淀和 PFZ 的形成,从而导致晶界处应力集中,裂纹沿粗大的晶界析出物形成而导致开裂。这说明,在 Al-Li-Cu-Mg-Zr 系合金中,时效前的预变形是优化合金性能的重要手段。

采用通常的热处理制度, δ' 相在固溶处理后即开始出现,在时效过程中相的体积分数增加,同时出现 δ'/β' 复合相;随时间的延长, S' 相、T1 相在位错缺陷处平行析出。

2.6 Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr 系合金

在铝锂合金中加入微量银的研究始于 20 世纪 80 年代。Polmear 等^[13]通过在 Al-4.0Cu-0.3Mg-0.4Ag 合金中加入不同含量的 Li 研究 Li 对该合金的影响,结果表明:当 Li 的含量为 1% 时, 200℃ 时效可使其峰值强度由不含 Li 的 143 D. P. N 提高到 195 D. P. N。但继续增加 Li 的含量,其峰值硬度反而下降。借鉴 Polmear 等的研究成果,美国 Martin Marietta 实验室在 Pickens 博士的领导下成功地开发了以 Al-Li-Cu 合金为基础的新型 Al-Li 合金——Weldalite™049 合金,并申请了专利^[14]。

049 合金的 Cu 成分与 2219 合金相近,但由于微量 Mg 和 Ag 的共同加入促进了多种沉淀相特别是 T1 相的细小弥散析出,从而大大提高了合金的时效强度。Gayle 等^[15]指出, 049 合金以多种分布均匀细小的强化相共同强化,其强化相除 S'、 δ' 、T1 及 β' 相之外,还有一种未知的板条状析出物沿 $\{110\}$ 析出。

Huang 和 Ardell^[16]以充分的实验表明,板条状的强化相 T1 相是比 δ' 相更有效力的强化相,指出 T1 相也是 Al-Cu-Li 系合金中最为有效的强化相。T1 相与 S' 相一样,与基体保持半共格关系,其临界形核功较高,一般很难均匀形核析出。T1 相的非均匀形核是以堆垛层错进行的。Noble 等^[17]利用高分辨电镜、透射电镜技术详细研究了 T1 相的结构和其非均匀形核长大过程。提出 T1 相形核生长机制必须满足下列特征:① T1 相临界形核的原子层厚度为 5 层 (0001) 面;② 边界层总是富 Al 的 C 层,因此新产生的 T1 相堆垛次序为 CBABC;③ T1 相片层上的生长凸起含有 4 层原子面,凸起的堆垛顺序为 CBAB, T1 与基体共格的界面层总是 C 层;④ T1 相的每片层和片层上的凸起总是夹在 $1/6\langle 112 \rangle$ 不全位错之间, T1 相片层的形成和生产由这些不全位错的运动所控制,不全位错的运动使 Al 基体面心立方堆垛转变为 T1 相的密排六方堆垛。合金中的 $1/2\langle 110 \rangle$ 位错在 $\{111\}$ 晶面上分解为 $1/6\langle 211 \rangle$ 肖克莱不全位错,即 $1/2\langle 110 \rangle \rightarrow 1/6[\bar{2}11] + 1/6[\bar{1}2\bar{1}]$, Cu、Li 原子则在位错反应产生的 $\{111\}$ 面层错上富集而生成 T1 相。T1 相类似于 Al-Cu-Ag-Mg 合金中曾出现的 Ω 相^[18], Ω 相与 T1 不易区分,它们都是六角形板状析

出相,惯习面及位向关系相同,不能在电镜下从形貌上加以区别。此外,它们的晶体结构相似,衍射花样也难以区分。正因为如此,在对 049 合金强化相的研究中, T. J. Langan 等^[19]没有排除 Ω 相存在的可能性,而将出现在 $\{111\}\alpha$ 上的板条状析出物称为类 T1 相。

3 展望

除上述 Al-Li 合金的合金化及组织的研究进展外,俄罗斯、美国和我国在利用稀土微合金化方法改善 Al-Li 合金性能上也取得重要进展。俄罗斯系统地研究了 16 种稀土元素在 Al-Li 合金中的作用,证明 Sc、Ce、Y 是 Al-Li 合金中最有效果的稀土元素,发展出一系列含 Sc 的 Al-Li 合金。从微合金化效果而言, Sc 是其它元素不可取代的,但其价格极高,仅因加 Sc 就使合金成本增加 1 倍。此外, Sc 在 Al-Li 合金中微合金化还有它的局限性,即在高 Cu 含量 Al-Li 合金中易形成有害 W ($\text{Al}_{3-8}\text{Cu}_{2-4}\text{Sc}$) 相,不利于有效地发挥添加 Sc 合金化的潜在优势^[6]。而 Ce 的价格便宜,一般添加量为 0.04~0.16wt%, 利用 Ce 微合金化,不仅可改善合金性能,且对成本影响很小。

迄今为止,就添加微量 Ce 在诸如 8090、2090、1450 等 Al-Li 合金中的作用而言,一般认为,有如下几方面^[4,8]:①微量 Ce 能细化并弥散化 T1 (Al_2CuLi) 相,既能使 T1 相在晶内均匀析出,又能使晶界或亚晶界 T1 相析出的尺寸较小,从而既能增强 T1 相抑制共面滑移的能力,又能减少其本身造成的微观应力集中程度。②微量 Ce 能使 δ' 相的晶界无析出带 (PFZ) 变窄。③微量 Ce 可使 Na、K 等杂质向晶界迁移的过程变慢,相对降低了晶界上碱金属杂质的浓度。同时, Ce 有细化晶粒作用从而相对增加了金属中晶界的面积,也相应地降低了单位面积晶界上的 Na、K 等碱金属杂质含量。④微量 Ce 能使 Al-Li 合金内、外初化水平同时提高从而改善合金的断裂韧性。

总之, Al-Li 合金的合金化研究仍在不断发展中,而微合金化研究是目前研究的热点。我国在这方面有很好的基础,有多个研究团体,希望国家能增大投入,研究开发具有我国知识产权的牌号合金,为我国航天航空的发展选材奠定良好的基础。

参考文献

- 1 尹登峰, 郑子樵. 材料导报, 2003, 17(2): 18
- 2 Sainford P, Guyot P. Al-Li II. Inst Metall, 1986: 420
- 3 Ballmann S F, Williams D B. Scr Metall, 1984, 18: 611
- 4 陈铮. 材料导报, 1999, 13(2): 1
- 5 Starke E A Jr, Sanders Jr T H. J Metals, 1981, 4: 24
- 6 尹登峰, 郑子樵, 等. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 611
- 7 Gayle F W, Vandersande J B. Al-Li II. Metall Soc AIME, 1983: 376
- 8 孟亮. 航空学报, 1998, 19(2): 129
- 9 Gregson P J, Flower H M. Acta Met, 1985, 33: 527
- 10 Dinsdale K, Harris S J, Noble B. Al-Li I. Inst Metall Soc AIME, 1981: 219
- 11 Crooks R E, Starke Jr E A. Metall Trans, 1984, 15A: 1367
- 12 Tosten M H, et al. Mat J Sci Lett, 1987, 6: 51
- 13 Polmear I J, Chester R J. Scr Metall, 1989, 23: 1213
- 14 Pickens J R, et al. Al-Li II. MCEP Birmingham, 1989: 1397
- 15 Gayle F W, et al. Scr Metall, 1984, 18: 473
- 16 Huang J C, Ardell A J. Acta Metall, 1988, 36: 2995
- 17 Noble B, Thompson G E. Metall Sci J, 1992, 6: 167
- 18 Chang Y C, Howe J M. Metall Trans, 1993, 24A: 1461
- 19 Langan T J, Pickens J R. Al-Li V. MCEP Birmingham, 1989: 691

(责任编辑 张 明)

作者: [尹登峰](#), [余志明](#), [陶颖](#), [孟力平](#), [伍汰沙](#)
作者单位: [中南大学材料科学与工程学院, 长沙, 410083](#)
刊名: [材料导报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [MATERIALS REVIEW](#)
年, 卷(期): 2005, 19(2)
被引用次数: 1次

参考文献(19条)

1. [尹登峰](#), [郑子樵](#) [铝锂合金研究开发的历史与现状](#) [期刊论文] - [材料导报](#) 2003 (02)
2. [SainfordP](#), [Guyot P](#) [查看详情](#) 1986
3. [allmannSF](#), [Williams D B](#) [查看详情](#) 1984
4. [陈铮](#) [查看详情](#) 1999 (02)
5. [tarkeEAJr](#), [Sanders Jr T H](#) [查看详情](#) 1981
6. [尹登峰](#), [郑子樵](#) [微量Sc对2195铝锂合金应变时效态的显微组织和力学性能的影响](#) [期刊论文] - [中国有色金属学报](#) 2003 (03)
7. [GayleFW](#), [Vandersande J B](#). [Al-Li II](#) [查看详情](#) 1983
8. [孟亮](#) [查看详情](#) 1998 (02)
9. [GregsonPJ](#), [Flower H M](#) [查看详情](#) 1985
10. [DinsdaleK](#), [Harris S J](#), [Noble B](#) [Al-Li I](#) 1981
11. [CrooksRE](#), [Starke Jr E A](#) [查看详情](#) 1984
12. [TostenMH](#) [查看详情](#) 1987 (06)
13. [PolmearIJ](#), [Chester R J](#) [查看详情](#) 1989
14. [PickensJR](#) [查看详情](#) 1989
15. [GayleFW](#) [查看详情](#) 1984
16. [HuangJC](#), [Ardell A J](#) [查看详情](#) 1988
17. [Nole](#), [Thompson G E](#) [查看详情](#) 1992
18. [ChangYC](#), [Howe J M](#) [查看详情](#) 1993
19. [LanganTJ](#), [Pickens J R](#) [查看详情](#) 1989

本文读者也读过(10条)

1. [尹登峰](#) [进一步加强管理确保电力企业安全生产](#) [期刊论文] - [中国新技术新产品](#) 2009 (8)
2. [高洪林](#), [吴国元](#), [GA Honglin](#), [WU Guoyuan](#) [Al-Li合金的研究进展](#) [期刊论文] - [材料导报](#) 2007, 21 (6)
3. [王芝秀](#), [李海](#), [郑子樵](#), [Wang Zhixiu](#), [Li Hai](#), [Zheng Ziqiao](#) [少量Ag对低Cu/Mg比的Al-Mg-Cu-Li合金组织与性能的影响](#) [期刊论文] - [稀有金属材料与工程](#) 2006, 35 (z2)
4. [陈志国](#), [郑子樵](#), [王芝秀](#), [李世晨](#) [锂对低Cu/Mg比Al-Cu-Mg-Ag合金时效特性的影响](#) [期刊论文] - [材料研究学报](#) 2004, 18 (5)
5. [肖代红](#), [王健农](#), [陈世朴](#), [杨海龙](#), [丁冬雁](#) [Ag合金化对热挤压前后耐热Al-Cu-Mg合金组织和性能的影响](#) [期刊论文] - [材料开发与应用](#) 2002, 17 (6)
6. [魏修宇](#), [郑子樵](#), [陈小珍](#), [李世晨](#), [WEI Xiu-yu](#), [ZHENG Zi-qiao](#), [CHEN Xiao-zhen](#), [LI Shi-chen](#) [ML377铝锂合金热稳定性研究](#) [期刊论文] - [材料热处理学报](#) 2008, 29 (1)
7. [黄丽](#), [程忠红](#), [董文博](#) [水相中对叔辛酚在紫外光作用下的降解研究](#) [会议论文] - 2008

8. [周兆锋](#), [甘卫平](#) [Al-Li合金强韧化机理及途径](#)[期刊论文]-[轻合金加工技术](#)2003, 31(6)
9. [吕艳阳](#), [曹书勤](#), [LV Yan-yang](#), [CAO Shu-qin](#) [表面活性剂增敏邻菲罗啉光度法测铁的研究](#)[期刊论文]-[化学试剂](#)2005, 27(2)
10. [齐登福](#) [链霉素分光光度法测铁](#)[期刊论文]-[山东师范大学学报\(自然科学版\)](#)2002, 17(4)

引证文献(1条)

1. [林顺岩](#), [林君](#), [田士](#) [铝合金新材料的研制与发展方向](#)[期刊论文]-[铝加工](#) 2007(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_cldb200502025.aspx