

# 杂质及 Ce 对 8090 Al-Li 合金内、外韧化水平的影响\*

孟亮 郑修麟

(西北工业大学, 西安 710072)

**摘要** 本文研究了杂质及 Ce 对 8090Al-Li 合金内、外韧化水平的影响. 结果表明, Fe, Si 和 Na, K 杂质有一定外韧化效果, 但严重降低内韧化水平, 在含较多杂质的材料中添加微量 Ce, 能够提高内韧化水平, 但却降低外韧化水平. 增加 Ce 含量, 则使内、外韧化水平同时提高而明显地改善断裂韧性.

**关键词** Al-Li 合金, 杂质, 稀土元素, 韧化

由于 Al-Li 合金自身的微观组织特点, 使得其晶界强度一般低于晶内强度, 裂纹易沿晶扩展<sup>[1,2]</sup>. 这种沿晶断裂对 Al-Li 合金的内、外韧化水平均能形成显著的影响. 材料的断裂韧性是其内、外韧化水平的综合反映, 但目前尚未出现单独区分内、外韧化水平的有效方法, 因而限制了对 Al-Li 合金断裂韧性的深入分析.

杂质及 Ce 能够对 Al-Li 合金的断裂韧性造成明显影响<sup>[3-6]</sup>. 在研制新型 Al-Li 合金时, 已采用了微合金化抑制杂质危害的方法<sup>[7]</sup>. 在此基础上, 本文研究杂质及 Ce 对 8090Al-Li 合金内、外韧化水平的影响.

采用有效宽度为 50 mm、T-L 位向的紧凑拉伸试件, 按 HB5261-83 测定了裂纹扩展阻力曲线, 并由其求得平面应力断裂韧性  $K_{IC}$  值. 用网格法测定了各试验材料的再结晶体积百分数.

## 1 实验方法及参数的建立

### 1.1 实验材料及方法

试验材料为 2.0 mm 厚的板材, 主要元素含量按 8090Al-Li 合金名义成分设计, 在某些试验材料中添加了 Ce, 或者改变了普通杂质 Fe, Si 和碱金属杂质 Na, K 的含量, 其具体化学成分见表 1. 试验材料的热处理状态为 525 °C 固溶水冷, 4% 预应变, 190 °C 时效 20 h.

### 1.2 韧化水平变化参量的建立

在瞬时拉伸载荷作用下, 材料的断裂抗力主要取决于组织内部特性. 沿晶分层及二次裂纹对瞬时拉伸性能无明显影响. 因此, 材料的拉伸性能与其内韧化水平密切相关. 由于杂质及 Ce 元素造成试验材料的  $\sigma_{0.2}$  变化不超过  $\pm 10\%$  (见表 1), 则其内韧化水平的变化主要与拉伸塑性的变化有关. 在此情况下, 对于一般具有较高强度的铝合金, 其断裂韧性可用下式估算<sup>[8]</sup>

\* 收到初稿日期: 1996-08-26, 收到修改稿日期: 1996-12-02

本文通讯联系人: 孟亮, 副教授, 西安(710072)西北工业大学材料科学工程系

表 1 试验材料的化学成分和拉伸性能

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %) and tensile properties of the materials tested

Alloy	Al	Li	Cu	Mg	Zr	Ce	Fe+Si	Na+K	$\sigma_b$ , MPa	$\sigma_{0.2}$ , MPa	$\delta$ , %
B1	Bal.	2.38	1.25	1.10	0.10	-	0.07	0.0030	468	432	6.8
D1	Bal.	2.59	1.49	1.09	0.11	-	0.24	0.0042	482	445	3.2
D2	Bal.	2.29	1.46	1.06	0.10	0.09	0.24	0.0029	488	450	5.0
D3	Bal.	2.44	1.42	1.07	0.11	0.28	0.25	0.0035	460	422	5.7
F1	Bal.	2.50	1.23	0.93	0.08	-	0.08	0.0091	496	445	2.5
F2	Bal.	2.49	1.16	1.09	0.09	0.05	0.08	0.013	506	447	5.7
F3	Bal.	2.22	1.16	0.89	0.08	0.05	0.10	0.023	411	410	0.5

$$K_{Ic} = 0.032E(\pi\rho_c)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中  $E$  为弹性模量,  $\rho_c$  为与裂尖前沿组织结构有关的参量, 在用于定量计算时,  $\rho_c$  近似等于均匀伸长率 (但应以 mm 为量纲)<sup>[8]</sup>. 因 8090 合金为低塑性材料 (尤其含较多杂质时), 拉伸过程中试件几乎无颈缩, 可认为其  $\delta$  近似等于均匀伸长率, 或者近似等于  $\rho_c$  (仍以 mm 为量纲), 则内韧化水平所体现的断裂韧性可由下式估算

$$K'_c = \alpha \cdot \sqrt{\delta} \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为常数. 若材料的延伸率原本为  $\delta_1$ , 杂质及 Ce 含量的变化引起延伸率变化到  $\delta_2$ , 由其内韧化水平变化前后体现的断裂韧性相应为  $K'_{c1}$  及  $K'_{c2}$ , 则内韧化水平的变化率为

$$k_{intr} = \left[ \frac{K'_{c2} - K'_{c1}}{K'_{c1}} \right] \times 100\% = \left[ \left( \frac{\delta_2}{\delta_1} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \times 100\% \quad (3)$$

实测的断裂韧性应是材料内、外韧化水平的综合反映. 设杂质及 Ce 含量变化前后材料实测断裂韧性分别为  $K_{c1}$  和  $K_{c2}$ , 则实测断裂韧性的变化率为

$$k_{test} = \left[ \frac{K_{c2} - K_{c1}}{K_{c1}} \right] \times 100\% = \left[ \frac{K_{c2}}{K_{c1}} - 1 \right] \times 100\% \quad (4)$$

因而, 杂质及 Ce 含量变化引起材料外韧化水平的变化率为

$$k_{extr} = k_{test} - k_{intr} = \left[ \frac{K_{c2}}{K_{c1}} - \left( \frac{\delta_2}{\delta_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \times 100\% \quad (5)$$

## 2 实验结果

板材的拉伸性能见表 1, 其它试验结果及计算值见表 2. 表 2 中每组一对试验材料, 前者为参照材料, 可由其求得  $K_{c1}$ ,  $K'_{c1}$ , 后者为某类杂质或 Ce 含量变化后的材料, 可由其求得  $K_{c2}$ ,  $K'_{c2}$ . 为便于分析再结晶程度的作用, 将再结晶体积分数测量结果 (%) 也一同列于表 2 中.

材料中无论是 Fe, Si 还是 Na, K 的含量升高, 均引起  $K_c$  值的降低, 即  $k_{test} < 0$ , 其主要原因是造成了内韧化水平的下降 ( $k_{intr} < 0$ ), 并以 Na, K 对内韧化的危害为甚. 杂质使得延伸率成倍下降, 但却未使  $K_c$  有如此大幅度的下降, 主要是由于杂质尤其是 Na, K 可造成一定的

外韧化效应, 在使内韧化水平显著下降的同时, 又使外韧化水平上升 ( $k_{\text{extr}} > 0$ ), 部分补偿了因内韧化水平下降而对  $K_c$  造成的损害。

表 2 试验材料韧化水平变化率试验结果及计算值

Table 2 Test results and evaluations on variability of intrinsic and extrinsic toughening levels for the materials tested

Group	Alloy	Fe+Si %	Na+K %	Ce %	$\delta$ %	$K_c$ MPa $\sqrt{m}$	$k_{\text{test}}$ %	$k_{\text{intr}}$ %	$k_{\text{extr}}$ %	$V_{\text{recryst}}$ %
1	B1	0.07	0.0030		6.8	37.8				42
	D1	0.24	0.0042		3.2	28.6	-24	-31	7	56
2	B1	0.07	0.0030		6.8	37.8				42
	F1	0.08	0.0091		2.5	32.3	-15	-39	24	68
3	F2	0.08	0.013	0.05	5.7	34.8				38
	F3	0.10	0.023	0.05	0.5	28.0	-20	-70	50	52
4	F1	0.08	0.0091		2.5	32.3				68
	F2	0.08	0.013	0.05	5.7	34.8	8	51	-43	38
5	D1	0.24	0.0042		3.2	28.6				56
	D2	0.24	0.0029	0.09	5.0	29.2	2	25	-23	50
6	D1	0.24	0.0042		3.2	28.6				56
	D3	0.25	0.0035	0.28	5.7	41.5	45	34	11	42

Ce 在含较多杂质材料 (F1, F2 为含较多 Na, K 杂质材料, D1, D2 和 D3 为含较多 Fe, Si 杂质材料) 中的微合金化作用与杂质的作用相反, 可显著提高材料的内韧化水平, 但等于或低于 0.09% 的 Ce 含量却使外韧化水平下降, 综合效应使材料  $K_c$  值变化不大或略有上升. 当在含较多 Fe, Si 杂质的材料中添加 0.28% Ce 后, 不但提高内韧化水平, 同时又能提高外韧化水平, 综合效应使  $k_{\text{test}}$  值较高, 即明显改善了断裂韧性。

### 3 讨 论

对于高塑性材料, 其断裂韧性主要取决于内韧化水平. 对于 Al-Li 合金, 塑性仍处于较低水平, 外韧化水平的变化对断裂韧性便显示了不可忽视的作用。

材料的内、外韧化水平均与微观组织形态密切相关. 由于杂质易生成脆性化合物粒子, 促进  $\delta'$ -PFZ 形成及生成晶界液相等原因<sup>[5, 7, 9, 10]</sup>, 使沿晶脆断比例增加, 降低材料内部组织的断裂抗力而造成内韧化水平的下降. 但是, 在杂质含量较多材料的非再结晶区或仍具有扁平状晶粒的“原位”再结晶区, 由杂质作用弱化的晶界更易形成沿晶分层 (见图 1a). 另外, 杂质一般会提高再结晶程度 (见表 2), 使已被杂质弱化的大角晶界或亚晶界增多, 易形成沿晶二次裂纹, 同时主裂纹扩展路径也比较曲折, 形成比较粗糙的断面 (见图 1b). 因此, 由于杂质作用而存在的未再结晶区的沿晶分层、已再结晶区的二次裂纹分枝及粗糙的断面等使沿晶断裂比例增加, 这些因素有提高外韧化水平的效应。

Ce 具有细化组织, 抑制沿晶析出, 阻碍  $\delta'$ -PFZ 形成和减缓杂质向晶界偏聚等有益的合金化作用<sup>[3-7]</sup>, 使晶界强化. 另外, Ce 使再结晶百分数下降 (见表 2), 可减少弱化的再结晶晶界. 因此, 在含较多 Fe, Si 杂质的合金中添加 0.09% Ce 和在含较多 Na, K 杂质的合金中添

加 0.05%Ce, 会使沿晶分层及粗大的二次裂纹减少 (见图 1c), 断面粗糙度也有所下降 (见图 1d), 这些因素虽使得材料内韧化水平上升, 但却同时降低了外韧化水平, 综合效应使  $K_c$  变化不大 (或略有升高)。

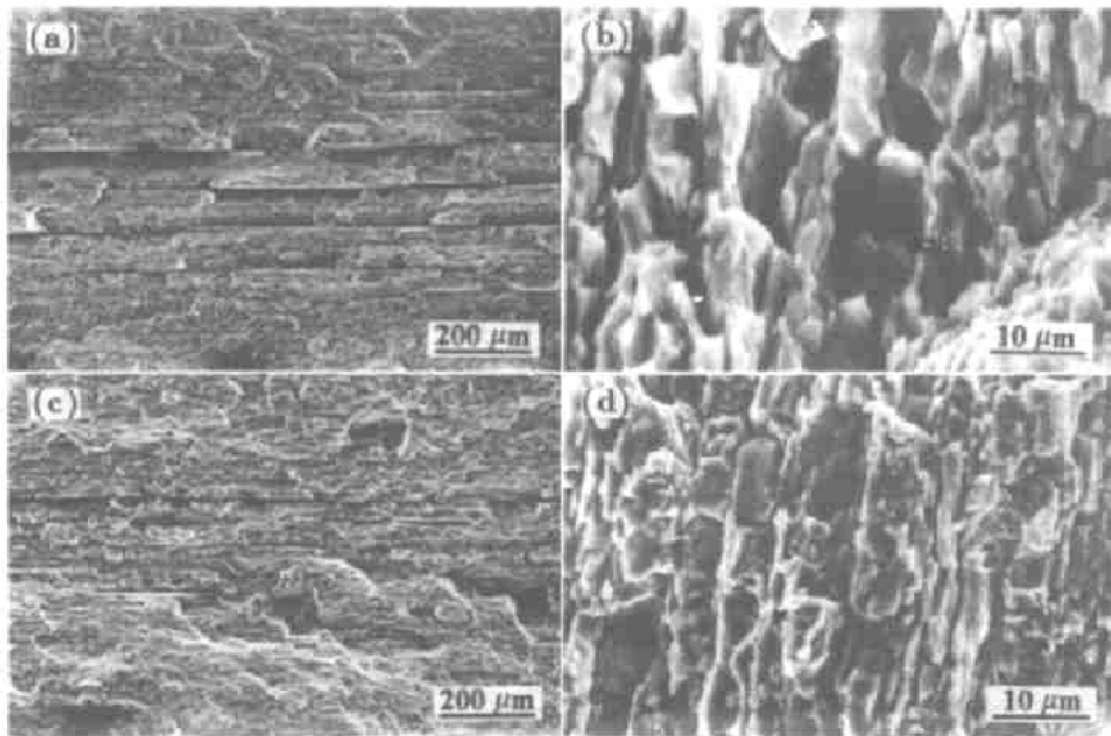


图 1 有关试验材料的裂纹扩展阻力试样断口形貌

Fig.1 Fracture surface morphologies of CT specimens for some materials tested

- (a) alloy F3, intergranular delaminations in unrecrystallized zones
- (b) alloy F3, intergranular secondary cracks and rougher fracture surface in recrystallized zones
- (c) alloy F2, few intergranular delaminations in unrecrystallized zones
- (d) alloy F2, less secondary cracks and more even fracture in recrystallized zones

当材料中含较多 Ce (如 0.28%) 时, 除仍具有 Ce 微合金化造成内韧化水平上升的效果外, 外韧化水平也同时上升, 在良好的内、外韧化效果综合作用下,  $K_c$  有较明显的提高. 至于其外韧化水平提高的原因, 可能是由于超过  $\alpha$  基体固溶度较多的 Ce 能形成一定数量的含 Ce 化合物粒子, 这些粒子对轧制变形及热处理过程中组织的变化、结构的分布及断裂过程产生了某种影响, 进一步的原因尚需研究.

## 4 结 论

(1) Fe, Si 和 Na, K 杂质在 8090Al-Li 合金中虽可提高外韧化水平, 但严重降低内韧化水平, 因而危害了断裂韧性.

(2) 在含较多杂质的 8090 合金中添加 Ce, 能够提高内韧化水平. 当 Ce 含量较低时, 由于外韧化水平下降抵消了内韧化水平上升的效果, 使断裂韧性仅能得到较小程度的改善; 当 Ce 含量较高时, 能同时提高材料内、外韧化水平而使断裂韧性得到明显改善.

## 参 考 文 献

- 1 Lynch S P. *Mater Sci Eng*, 1991; A136: 45
- 2 Blankenship C P, Starke E A. *Metall Trans*, 1993; 24A: 833
- 3 孟 亮, 张宝昌, 梁 英, 张卫中, 田普科. 金属学报, 1992; 28: A121
- 4 孟 亮, 耿东生, 郑修麟. 金属学报, 1995; 31: A40
- 5 Meng L, Zheng X L. *Scr Metall Mater*, 1995; 33: 27
- 6 Meng L, Zheng X L, Tian L. *Mater Sci Eng*, 1995; A196: 191
- 7 孟 亮. 西北工业大学学报, 1993; 11: 389
- 8 Zheng X L. *Eng Fract Mech*, 1989; 33: 685
- 9 Liu Y L, Hu Z Q, Zhang Y, Shi C X. *Metall Trans*, 1993; 24B: 857
- 10 Webster D. *Metall Trans*, 1987; 18A: 2181

**EFFECT OF IMPURITIES AND Ce ADDITION ON  
INTRINSIC AND EXTRINSIC TOUGHENING  
LEVELS OF 8090 Al-Li ALLOY**

*MENG Liang, ZHENG Xiulin (Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)*  
(Manuscript received 1996-08-26, in revised form 1996-12-02)

**ABSTRACT** The variability of intrinsic and extrinsic toughening levels has been derived for 8090 Al-Li alloy. The tensile properties and plane stress fracture toughness have been determined for alloy 8090 sheets with various contents of impurities and Ce addition. Impurities Fe, Si and Na, K show an evident behavior to decrease the intrinsic toughening level and the fracture toughness even though the impurities could produce the extrinsic toughening efficiency to a certain degree. The intrinsic toughening level could be enhanced but the extrinsic toughening level is reduced by adding minor Ce element into alloy 8090 containing higher concentration of impurities. The intrinsic and extrinsic toughening levels are increased and the fracture toughness improved when the alloy containing higher concentration of impurities is modified by a fixed Ce content.

**KEY WORDS** Al-Li based alloy, impurity, rare earth addition, toughening

---

*Correspondent: MENG Liang, associate professor, College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*