

17 1089-1093

# 应力幅对 LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳 应变电流响应的影响\*

张波<sup>1)</sup> 李劲<sup>2)</sup> 韩恩厚<sup>1)</sup> 柯伟<sup>1)</sup>

1) 中国科学院金属腐蚀与防护研究所金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110015  
2) 复旦大学材料科学系, 上海 200433

74142.21  
74174.34

**摘要** 研究了 LY12CZ 铝合金在应力控制下于 3.5% NaCl 溶液中恒电位下, 应力幅对腐蚀疲劳 (CF) 应变电流行为的影响以及应变电流与腐蚀疲劳损伤相对应的关系. 结果表明: 应变电流能反映 CF 不同阶段的损伤行为. 应变电流的波型随 CF 过程所发生的变化主要表现在应变电流的波幅、波峰数及其与应力波的相位差上. 不同应力幅下的应变电流行为的差异主要表现在: 高应力幅下, 在一个循环周次内, 瞬变电流在整个腐蚀疲劳过程中均出现两个波峰; 而低应力幅下, 腐蚀疲劳初始阶段和裂纹扩展最后阶段均只出现一个波峰. 长距显微镜 (QRMS) 的动态观测表明, 高应力幅下产生的表面裂纹数明显多于低应力幅下的表面裂纹数, 从而使得高应力幅下的最大峰值电流密度 ( $J_m$ ) 和应变电流波幅均比低应力幅下的要高.

**关键词** 腐蚀疲劳, LY12CZ 铝合金, 应变电流, 应力幅

**中图分类号** TG111.8, TG174.34 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2000)10-1089-05

## INFLUENCES OF STRESS AMPLITUDE ON THE TRANSIENT CURRENT BEHAVIOR FOR LY12CZ ALUMINUM ALLOY DURING CORROSION FATIGUE

ZHANG Bo<sup>1)</sup>, LI Jin<sup>2)</sup>, HAN Enhou<sup>1)</sup>, KE Wei<sup>1)</sup>

1) State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Corrosion and Protection of Metals, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

2) Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433

Correspondent: ZHANG Bo, assistant professor, Tel: (024)23893597, Fax: (024)23894149,  
E-mail: bzhang@icpm.syb.ac.cn

Manuscript received 2000-01-20, in revised form 2000-03-31

**ABSTRACT** Influences of stress amplitude on the transient current behavior during corrosion fatigue for LY12CZ aluminum alloy in 3.5% NaCl at constant potential under the load control condition have been studied. The results indicated that as the cycling processed the transient current amplitude the number of the current peak will change, which could provide valuable information of the damage at different stages of corrosion fatigue. At the high stress amplitude there are two current peaks in each fatigue cycle during the whole cycling. However at the low stress amplitude there is only one current peak in each fatigue cycle at the saturated stage and the high crack propagation stage although there are two peaks at the crack initiation stage. The Questar Remote Measurement System (QRMS) observations show that there are more cracks on the surface at high stress amplitude as comparison to low stress amplitude, which agrees well with the higher current density and amplitude at relatively high stress amplitude recorded during corrosion fatigue.

**KEY WORDS** corrosion fatigue, LY12CZ aluminum alloy, transient current, stress amplitude

\* 国家重点基础研究专项经费 G19990650 和中国科学院百人计划资助项目

收到初稿日期: 2000-01-20, 收到修改稿日期: 2000-03-31

作者简介: 张波, 男, 1971 年生, 助理研究员, 硕士

自从 Hoar 等采用连续金属应变方法研究应力腐蚀开裂过程以来, 已有不少文献报道了应用应变电极技术来研究应力腐蚀<sup>[1,2]</sup>和腐蚀疲劳<sup>[3-7]</sup>, 然而大多数文献是在比较大的应变幅控制下对金属材料的腐蚀疲劳进行研究的, 因此具有一定的局限性. Pyle 等人<sup>[3]</sup>应用很大的

应变幅对 18-8 不锈钢在 3.7 mol/L  $H_2SO_4$  溶液中不同电位下的腐蚀疲劳应变电流行为进行了研究, 表明塑性应变促进了表面金属原子的溶解: Magnin 等<sup>[4]</sup>, Wang 等<sup>[5,6]</sup> 及 Li 等<sup>[7]</sup> 发展了应用应变电流技术来研究腐蚀疲劳的方法, 然而这方面的研究还是十分有限的. 研究表明, 应变电流的行为与应变幅、应变速率和膜钝化速率有关, 因而它的行为决定于所研究的体系和实验条件. 目前, 应用应变电极技术对铝合金的腐蚀疲劳损伤行为与应变电流波形间关系的研究尚未见报道.

本工作应用应变电极技术研究了在应力控制下 LY12CZ 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中, 恒电位下的腐蚀疲劳应变电流行为及其对应的腐蚀疲劳损伤过程. 腐蚀疲劳 (CF) 损伤机制与外加电位、应力幅及频率等因素有关. 本文主要研究恒电位下应力幅对应变电流行为响应的规律, 以期得出应变电流行为和不同阶段的腐蚀疲劳损伤过程相对应的规律.

## 1 实验方法

实验所用材料为 LY12CZ 铝合金, 其成分 (质量分数, %) 为: Cu 4.36, Mg 1.49, Mn 0.46, Fe 0.25, Si 0.14, Zn 0.07, Ti 0.01, Cr < 0.01, 余为 Al. 其轧向试样机械性能为:  $\sigma_y = 347$  MPa,  $\sigma_s = 460$  MPa,  $\delta = 17.5\%$ . 板状材料沿轧向加工成中间标距为 10 mm 的疲劳试样, 标距宽为 15 mm, 厚为 2 mm.

疲劳实验在岛津 EHF-EB10-20L 电液伺服疲劳机上进行. 载荷为应力控制, 波型为正弦波. 应力比  $R = 0.1$ . 极化曲线和恒电位 CF 过程中的极化电流测量采用 EG & G 公司的 Model 263. CF 过程的应变电流及应力波型记录采用 Yokogawa 3024 X-Y 双笔记录仪. 实验前将试样用金刚石砂纸预磨至 800 号, 经蒸馏水清洗—酒精除油—蒸馏水清洗后, 三面用树脂和硅胶涂封, 露出一面约为  $0.5\text{ cm}^2$  的窗口, 再放于干燥器中备用. 实验开始前, 试样先在  $-780\text{ mV}(vs\text{ SCE})$  (自腐蚀电位为  $-730\text{ mV}(vs\text{ SCE})$ ) 的电位下约稳定 1 h. 实验中选择的外加恒定电位  $E$  为  $-780\text{ mV}(vs\text{ SCE})$ , 最大应力  $\sigma_{max}$  分别为 150 和 300 MPa, 频率  $f$  选为 2 Hz. 电化学控制采用三电极系统, 参比电极与辅助电极分别为饱和甘汞电极与铂丝.

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 不同应力幅下应变电流波形的演化过程

不同应力幅下腐蚀疲劳应变电流演化行为如图 1 所示. 为了更好地描述实验现象, 本文将电流的波峰和波谷分别定义如下:  $I_T$  和  $I_U$  分别表示由加载及卸载过程所引起的应变电流波峰,  $I_{T-U}$  表示加载和卸载波峰之间的波谷,  $I_{U-T}$  表示卸载和加载波峰之间的波谷. 图 2 为其示意图.

由图 1a 可以看出, 高应力幅下, 在整个腐蚀疲劳过

程中应变电流在一个循环周次 ( $N$ ) 内均出现两个波峰, 分别对应最大和最小应力, 其相位随着疲劳的进行变化不大. 随着循环的进行,  $I_T$ ,  $I_U$ ,  $I_{T-U}$  和  $I_{U-T}$  均逐渐增加,  $I_T$  和  $I_{T-U}$  以及  $I_U$  和  $I_{U-T}$  的差值也随着循环的进行而增加. 在疲劳初始阶段,  $I_T > I_U$ ,  $I_{T-U} > I_{U-T}$ ;  $N \approx 15 \times 10^3$  cyc 之后, 它们之间的关系发生了转变, 即  $I_T < I_U$ ,  $I_{T-U} < I_{U-T}$ ; 而在试样快断裂前, 它们之间的关系再次转变为:  $I_T > I_U$ ,  $I_{T-U} > I_{U-T}$ .

由图 1b 可知, 在低的应力幅下, 应变电流的行为与高应力幅下的结果有较大差异, 特别是在疲劳的初始阶段和裂纹的快速扩展阶段. 疲劳循环的初始阶段, 应变电流在一个循环周次内只出现一个波峰; 在  $N \approx 340 \times 10^3$  cyc 时, 在一个循环周次内能清楚地看到两个波峰; 当  $N = 480 \times 10^3$  cyc 时, 一个循环周次内又只出现一个波峰, 且电流波峰与应力波峰同相.

Li 等<sup>[7]</sup> 的研究表明, 腐蚀疲劳应变电流的行为与疲劳加载过程中的弹性和塑性形变有关. 他认为, 弹性形变对瞬变电流的影响可能与电极表面电双层的充放电以及弹性形变改变了表面原子的状态有关, 因而应变电流的波形与弹性应变波形有一一对应的关系, 即在一个循环周次内只有一个电流波峰; 而塑性形变会导致金属表面局部活性溶解. 腐蚀疲劳实验中弹性形变和塑性形变同时存在, 它们将同时影响应变电极的应变电流的行为, 因此弹性形变和塑性形变之间的相对大小也会对应变电流行为产生很大的影响.

应力控制下 LY12CZ 铝合金在 NaCl 溶液中的腐蚀疲劳应变电流行为如前所述, 较为复杂. 首先, 由于铝合金基体中弥散着大量的强化相, 因而即使应力控制在弹性极限以下, 试样表面也会出现局部塑性形变. 在高应力幅 (其最大应力  $\sigma_{max} = 300$  MPa) 控制下, 应变电流在一个循环周次内出现的两个波峰很可能与这种局部的塑性形变 (由于循环的不可逆性使得拉伸和卸载阶段均存在局部塑性形变) 有关. 在低应力幅 (其最大应力  $\sigma_{max} = 150$  MPa) 控制下, 在疲劳循环的初始阶段, 由于弹性形变起主导作用 (局部塑性形变量相对较小), 应变电流在一个循环周次内只出现一个波峰. 当然由于少量的塑性形变的影响, 使得应变电流波形出现一定的变形 (图 1b). 随着循环的进行, 点蚀的形成和长大以及裂纹从点蚀坑处萌生和扩展相继发生, 因而弹性形变的主导作用被打破, 图 1b 所示的  $N = 340 \times 10^3$  cyc 应变电流出现两个波峰就清楚地表明, 疲劳过程形成的局部塑性形变开始起主导作用. 在最后断裂阶段, 由于裂尖相对较大的局部阳极溶解掩盖了弹性和塑性形变所产生的应变电流, 而且由于这种溶解与应力成对应关系, 因而在裂纹快速扩展阶段应变电流只出现一个大的波峰.

由以上分析可知, CF 初始阶段的应变电流是弹性变

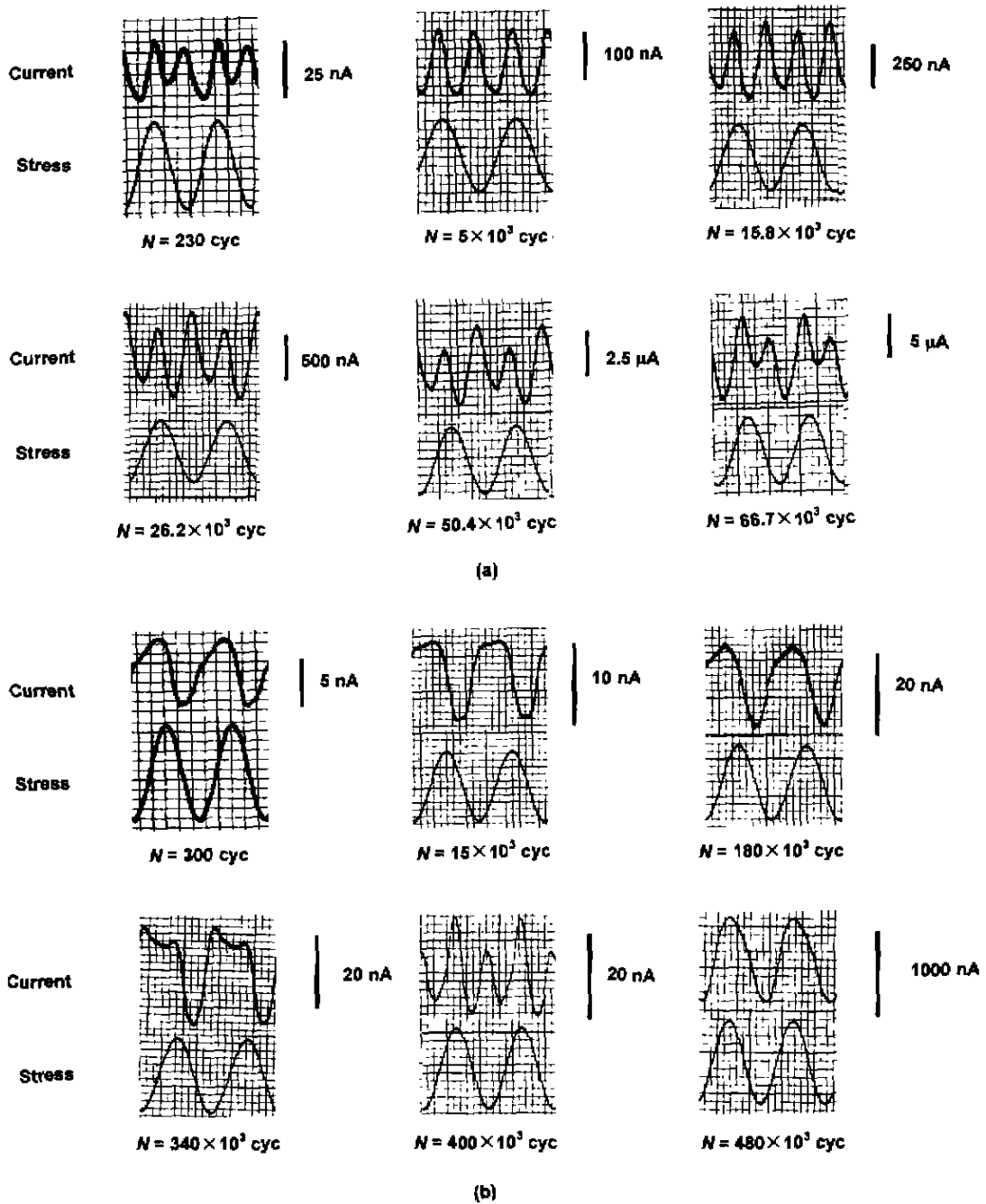


图 1 腐蚀疲劳中的应变电流波形与应力波形

Fig.1 Chart of transient current wave and stress wave during corrosion fatigue test

(a)  $\sigma_{max}=300$  MPa (b)  $\sigma_{max}=150$  MPa

形和塑性变形的综合结果, 不同应力幅下的应变电流行为的差异可归因于弹性形变和塑性形变相对大小的差异. 随着循环的进行, 点蚀的长大和形成以及由此引起的裂纹萌生和扩展均将使得弹塑性形变的相对大小发生变化, 因而通过研究和分析应变电流的变化, 就有可能对腐蚀疲劳的损伤(如裂纹的萌生等)进行监测. 在较低应力幅的控制下, 疲劳循环过程中应变电流两个波峰的逐渐形成和消失

就反映了裂纹的萌生和扩展的信息; 在较高的应力幅控制下, 疲劳循环不同阶段加载和卸载过程中的塑性形变量存在着差异, 这一差异从应变电流波形上也能得到反应. 如前所述,  $I_T$  和  $I_U$  以及  $I_{T-U}$  和  $I_{U-T}$  之间的相对大小发生的两次转变, 就与加载和卸载所产生的塑性形变量的相对大小变化有关, 而这一变化可能对应着裂纹的萌生和扩展. 当然, 除了应力幅外, 应变电流的行为还决定于频

率、电位以及所研究的材料 / 环境体系. 故有必要在不同条件下分别研究其所对应的 CF 损伤的规律.

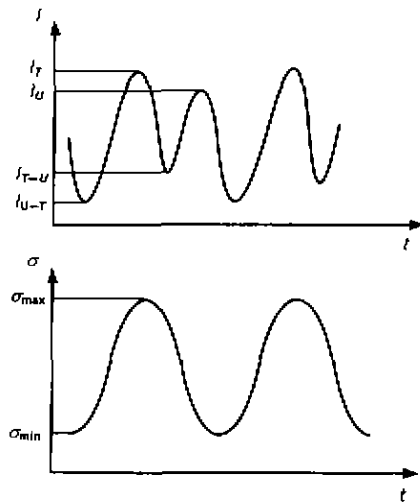


图 2 应变电流与应力波形关系示意图

Fig.2 Schematic diagram showing the correspondence between transient current ( $J$ ) and stress ( $\sigma$ )

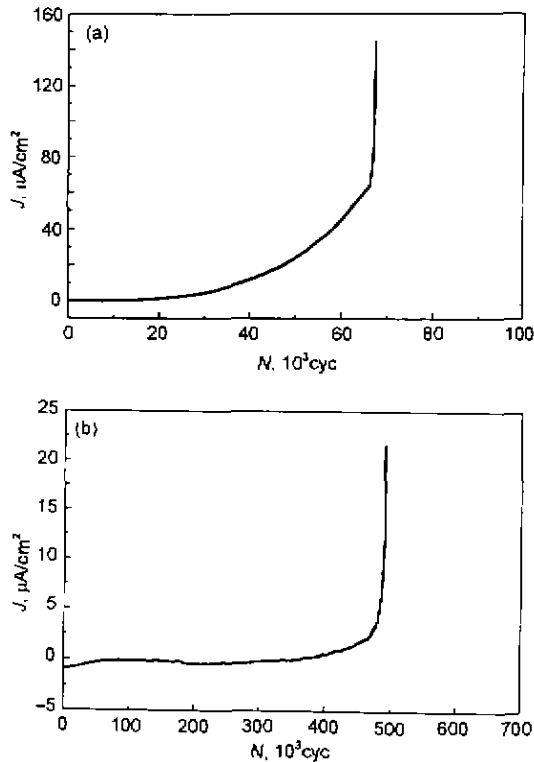


图 3 恒电位下腐蚀疲劳最大极化电流密度随循环数的变化  
Fig.3 The evolutions of the maximum polarization current density ( $J$ ) with the number of cycles ( $N$ ) ( $E = -780$  mV (vs SCE),  $R=0.1$ ,  $f=2$  Hz)  
(a)  $\sigma_{max} = 300$  MPa  
(b)  $\sigma_{max} = 150$  MPa

2.2 不同应力幅下最大应变峰值电流密度的演化过程

LY12CZ 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中恒电位下的腐蚀疲劳最大应变峰值电流密度 ( $J$ ) 随循环周次  $N$  的变化如图 3 所示. 从图可以看出, 随着循环的进行, 高、低应力幅下的  $J$  演化过程存在着较大差异. 在高应力幅下 (图 3a),  $J$  的演化过程可分为疲劳循环饱和、裂纹萌生和扩展以及裂纹失稳扩展三个阶段; 在低应力幅下 (图 3b),  $J$  的演化依然存在着以上三个阶段, 所不同的是第一、二两阶段不易区分. 同时, 低应力幅下的  $J$  在上述三个阶段的典型值比高应力幅下的要低.

不同应力幅下,  $J$  的差异与试样在循环加载过程中表面的形变和损伤程度有关. 高应力幅下, 伴随滑移带的形成以及表面晶粒的变形, 其表面的畸变程度比低应力幅下的要显著, 随着疲劳的进行, 这种趋势的逐渐加深以及由此而引发的裂纹萌生和扩展, 均将导致这种差异的加大; 低应力幅下, 材料的形变主要以弹性形变为主, 表面畸变很小, 相对来说极化电流的变化比较缓慢. SEM(图 4a) 和 QRMS 的观察 (图 4b) 表明, 在高应力幅下, 经一定的循环周次后, 试样表面的裂纹数比低应力幅下的要多.

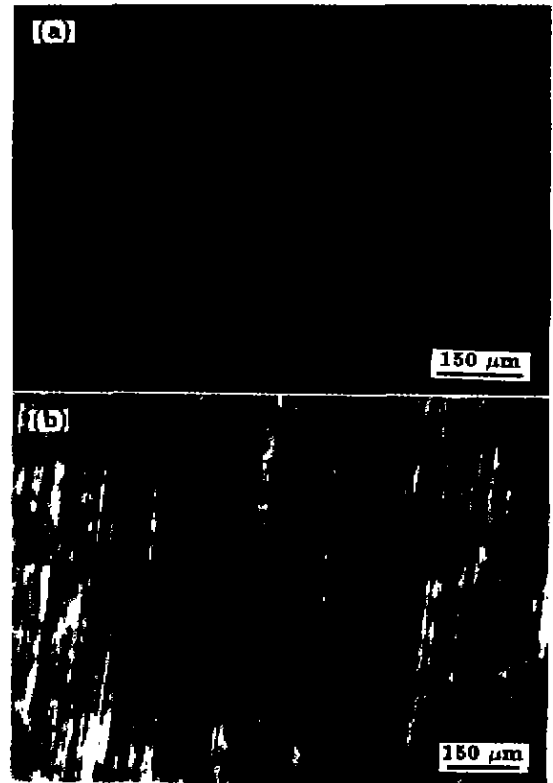


图 4 试样表面裂纹的 SEM(扫描电子显微镜) 和 QRMS(长距离显微镜) 照片  
Fig.4 Cracks on the surface showed in photomicrographs by SEM and QRMS ( $E=-780$  mV,  $N/N_f=70\%$ )  
(a) SEM photo,  $\sigma_{max}=300$  MPa  
(b) QRMS photo,  $\sigma_{max}=150$  MPa

这正是在不同应力幅下电流密度  $J$  值存在着差异的主要原因。

### 3 结论

对 LY12CZ 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中恒电位下 (-780 mV(vs SCE)) 不同应力幅对腐蚀疲劳 (CF) 应变电流影响的研究表明:

(1) 高应力幅下, 在一个循环周次内, 瞬变电流在整个腐蚀疲劳过程中均出现两个波峰; 而低应力幅下, 腐蚀疲劳初始阶段和裂纹扩展最后阶段均只出现一个波峰。分析表明, 不同应变幅下弹塑性形变相对大小的差异是产生这一结果的主要原因。应变电流主要来自以下两个部分: 弹性形变产生的瞬变电流和塑性形变产生的瞬变电流。对本文研究的体系来说, 应变电流是这两种瞬变电流的叠加结果。

(2) 高应力幅下的表面裂纹数比低应力幅下的表面裂纹数要多。

(3) 应力控制下的腐蚀疲劳实验表明, 应变电流能够反应腐蚀疲劳的损伤信息 (如裂纹的萌生)。

### 参考文献

- [1] Hoar T P, West J M. *Nature*, 1962; 181: 835
- [2] Hoar T P, Galvele J R. *Corros Sci*, 1970; 10: 213
- [3] Pyle T, Rollins V, Howard D. *J Electrochem Soc*, 1975; 122: 1445
- [4] Magnin T, Coudreuse L. *Acta Metall*, 1987; 35: 2105
- [5] Wang J Q, Wang Z G, Ma M Y, Zhu Z Y. *Steel Res*, 1992; 63: 453
- [6] Wang J Q, Li J, Wang Z F, Ke W, Wang Z G. *Scr Metall Mater*, 1993; 29: 1415
- [7] Li Y F, Farrington G C, Laird C. *Acta Metall Mater*, 1993; 41: 693