科 学 通 报
第 39 卷 第 2 期 CHINESE SCIENCE BULLETIN 1994 年 1 月

脆断微裂纹形核的原位观察*

张 跃 王燕斌 褚武扬 肖纪美
(北京科技大学材料物理系,北京 100083)

关键词 金属间化合物、纳米级微裂纹、无位错区

Rice 和 Thomson 及其支持者认为脆断裂纹扩展时不会发射位错[1]. 对 Si 和 Fe-Si,解理裂纹扩展前能发射一些位错[2—4],故 Argon 认为 Si 的韧脆转变取决于裂尖发出位错的多少[2]. 而 Chiao 认为,如裂尖发出的位错不能运动离开就导致脆断[3]. Gerberich 等认为随裂尖发射位错,有效应力场强度因子增加,当它达到临界值时就导致解理扩展,称之为"塑性诱发解理"[4]. 总之,他们均认为解理裂纹是连续扩展的,裂尖发射位错就导致钝化,裂纹解理扩展前不发射或只发射极少量位错.

我们对韧性材料的研究发现,裂尖发出位错并形成无位错区(DFZ)之后并不钝化;纳米级微裂纹在DFZ中不连续形核,并随后通过位错运动而钝化形成空洞,导致韧断[1]. 对脆性材

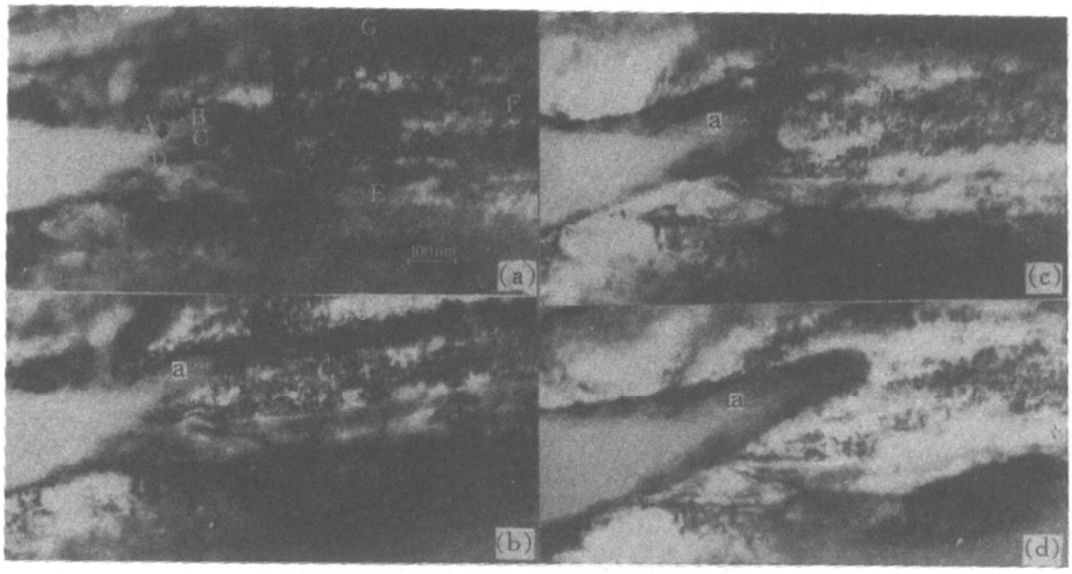

图 1 Ti-24Al-11Nb TEM 明场象
显示脆性裂纹前端的无位错区(DFZ)及其中纳米级微裂纹的形核和扩展
(a)A 是裂尖,ABCD 是 DFZ,ABCDEFGA 是塑性区;
(b)DFZ 中形成微裂纹 a,同时 DFZ 扩大且塑性区也有改变; (c),(d)DFZ 中的微裂纹 a 不断长大

1993-02-26 收稿,1993-08-30 收修改稿.
* 国家自然科学基金资助项目.

料，是否也存在 DFZ？解理微裂纹是否也优先在 DFZ 中不连续形核？这些问题也是研究材料脆断及韧-脆转变机理的关键. 因为 TiAl 和 Ti_3Al 型(如 Ti-24Al-11Nb)金属间化合物解理扩展时阻力不断增大[5]，故有可能在透射电镜中跟踪观察位错发射及微裂纹的形核过程.

采用 Ti-24Al-11Nb(原子%)金属间化合物薄膜试样在透射电镜(TEM)中进行原位拉伸. 实验发现，拉伸时从裂尖能发射出大量位错，平衡时能形成无位错区(DFZ)，这时裂尖并不钝化，如图 1(a)所示. 这个无位错区是个畸变量极大($\varepsilon\approx0.1$)的非线弹性区. 因裂纹很尖，当载荷较大时 DFZ 中应力可等于原子键合力，从而在 DFZ 中形成一个纳米级微裂纹，如图 1(b)所示. 微裂纹一旦形核，原来的平衡组态被破坏，即使保持恒位移，位错也能发射和运动，例如图 1(b)的 DFZ 比图 1(a)更长更宽. 与此同时，这个纳米级微裂纹不断长大，如图 1(c)和图 1(d)所示，它最终能和主裂纹连接，导致解理断裂.



图 2 裂尖前方的无位错区和位错塞积群
A 是裂尖，AB 是无位错区，BC 是反塞积位错

图 1 表明，脆性裂纹前端有时能发出多组位错，从而形成一个封闭的无位错区，外面是由塞积位错构成的塑性区，最外面是线弹性区. 一般情况下，平衡时裂尖位错成反塞积并形成一个 DFZ，如图 2 所示. 纳米级微裂纹在 DFZ 中形核，长大，最后和主裂纹相连如图 3 所示.

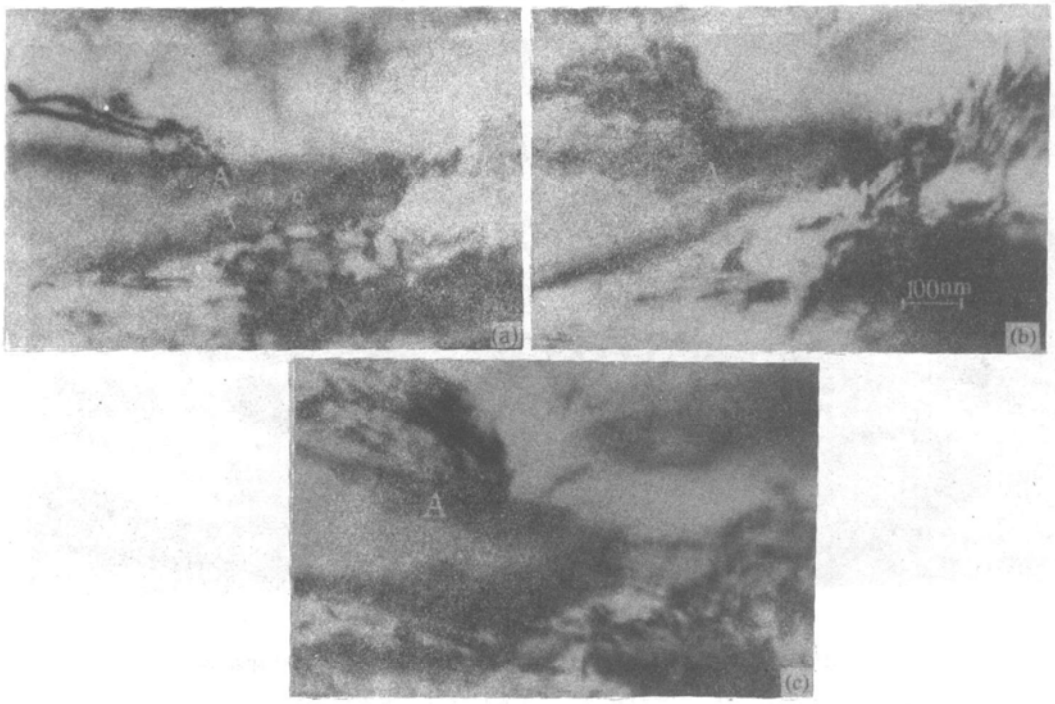

图 3 脆性材料中微裂纹的形核和扩展
(a)A 是裂尖，微裂纹 ab 在 DFZ 中形核，(b)微裂纹 ab 长大并展宽，(c)微裂纹最后与主裂纹连接

由此可知，和韧性材料一样，对脆性的金属间化合物同样能发射大量位错(高达 400—600 个)，并形成无位错区，这时裂尖并不钝化. 正由于裂尖不钝化. 而DFZ又是一个非线弹性区，

故按非线弹性断裂力学可以算出，当外加应力较大时 DFZ 中的应力可等于原子键合力，从而导致纳米级微裂纹的形核. 但是，对脆性材料，随着位错的不断发射和运动，这种纳米级微裂纹并不象韧性材料那样钝化成孔洞，而是解理扩展并和主裂纹连接. 因此，韧脆的区别并不在于裂尖是否能发射位错，以及发出位错的多少，或发射位错后裂尖能否钝化. 韧脆的不同就在于：无位错区中形成的纳米级微裂纹在恒位移条件下，是转化成微孔洞，还是解理扩展.

参　考　文　献

[1] Lin, I. H., Thomson, R., *Acta Metall.*, 1986, **34**:187.
[2] Argon, A. S., *Acta Metall.*, 1987, **35**:185.
[3] Chiao, Y. H., Clark, D. R., *Acta Met. Mater.*, 1989, **37**:203.
[4] March, P. G., Gerberich, W. W. *et al.*, *Acta Met. Mater.*, 1990, **40**:2883.
[5] Chu, W. Y., Thompson, A. W., *Metall. Trans. A*, 1992, **23A**:1299.