科 学 通 报
第 42 卷 第 7 期 Chinese Science Bulletin 1997 年 4 月

【研究简报】

吸附促进位错发射、增殖和运动的 TEM 观察

宿彦京 王燕斌 褚武扬
(北京科技大学材料物理系, 北京 100083)

关键词 铝 液体金属脆 吸附 TEM

由液体金属脆断的断裂韧性 $K_{IC}(L)$可算出裂纹扩展的阻力 $R=(1-\nu^2)K_{IC}^2(L)/E$, 它比材料的表面能 γ 大 1～3 个数量级[1]. 因而不能用 Griffith 脆性断裂理论 $R=2\gamma$ 来描述, 只能用 Orowan 理论, 即 $R=2\gamma_{eff}=2\gamma+\gamma_p$, 其中 γ_p 为局部塑性变形功. 对于液体金属脆, 实验测出塑性变形功 $\gamma_p=(10\sim1\,000)\gamma$[1]. 这表明, 液体金属吸附而导致脆断的过程伴随大量的局部塑性变形, 而且断裂能主要消耗在局部塑性变形上.

Lynch 对液体金属脆断断口的观察和分析后认为[2], 液体金属脆的本质是吸附促进局部塑性变形(即促进位错发射、增殖和运动)的结果. 这个看法在十多年前就已提出, 但由于缺乏有力的实验证据而未被广泛认同.

研究位错发射、增殖和运动最直接的方法是在透射电子显微镜(TEM)中原位拉伸. 但由于无法把液体金属引入 TEM, 故不能在 TEM 中直接研究液体金属吸附对位错发射和运动的影响. 我们设计了一种专门的 TEM 恒位移加载台[3], 可在 TEM 中原位观察液体金属吸附前后加载裂纹前方位错组态的变化, 从而研究液体金属吸附对位错发射、增值和运动的影响.

越来越严重, 应力集中越来越加剧, 最后导致沿晶界的脆性断裂. 而脆性断裂方式是高质量的聚能射流所不希望的.

除了滑移理论之外, 一些专家学者还提出了动态再结晶理论和剩余强度理论, 对聚能射流的超塑性能进行了解释[3,4], 但目前尚未得到很成熟的研究结果.

致谢 本工作为中国工程物理研究院冲击物理与爆炸物理国家重点实验室基金资助项目.

参 考 文 献

1 Lichtenberger A, Zernow L. Increase of jet ductility with cold pressed liners and recovery of jet fragments. In: Murphy M ed. The Proceedings of 14th Inter Symp on Ballistics, Quebec, Canada, 26—29, Sep 1993, 91～100
2 余宗森, 田中卓. 金属物理. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 121～133
3 Meyers M A, Meyer L W. Beatty J, et al. High strain, high-strain-rate deformation of copper. In: Shock-wave and High-stain-rate Phenamena in Materials, 1992. 529
4 Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations. J Appl Phys, 1987, 61(5): 1 816～1 825

(1996-04-15 收稿, 1996-09-04 收修改稿)

1　实验过程

实验所用材料为铝单晶，电镜样品制备先用线切割成 0.2 mm 厚的薄片，机械减薄至 0.1 mm 左右，在 26% HNO_3 + 74% CH_3OH 的溶液中电解减薄至穿孔，再经离子轰击清洁试样表面并除去电解减薄过程中可能进入试样的氢.

电镜薄膜试样安装在自制的 TEM 恒位移加载台上[3]，通过螺钉给试样加载到用 TEM 可以观察到孔边出现裂纹为止. 把已加载的试样放在干燥器中预蠕变 20～24 h 后在 TEM 中检查裂尖前方的位错组态，然后再在 TEM 中蠕变 0.5～1 h，确认裂尖前方位错组态不再发生变化后就表明该试样的室温蠕变已经停止. 因此在放入室温液体金属气氛中之后，如果位错组态发生变化，就是由于液体金属吸附引起的.

加入 3%Ga(原子百分数，下同)后，Hg 的蒸气压明显升高. 室温时，铝在 Hg + 3%Ga 的气氛中表现出明显的液体金属脆[4]，故我们选用 Hg + 3%Ga 合金作为液体金属介质. 将预蠕变后的试样连同加载台放在装在密闭容器中的 Hg + 3%Ga 的上方，让 Hg 蒸气吸附在 TEM 试样以及裂纹表面. 经过一定时间后把装在加载台上的试样放入 TEM，观察在 Hg 蒸气中放置后裂尖前方位错组态的变化.

2　结果与讨论

图 1(a) 为 1 号试样预蠕变 24 h 后的 TEM 照片，裂尖 A 的前方存在一个无位错区 abc，在 de和 fg 处存在很多位错，这种位错组态在 TEM 中保持 1 h 的过程中虽有电子束的轰击温度升高，但裂尖前方位错组态没有任何变化. 把试样取出放在装在密闭容器内的液体金属(Hg + 3%Ga)上方，让 Hg 蒸气吸附在试样和裂纹表面上，分别经过 10 min，40 min 和 1 h 后，放入 TEM 中检查，结果发现裂尖前方位错组态未发生变化，如图 1(b). 试样继续放在液体金属上方 12 h 后再检查，结果发现裂尖位错组态已有明显变化，如图 1(c). 与图 1(a)或图 1(b)相比，可以看出图 1(a)上的无位错区 abc 已扩大至 ab′c′. 这表明，Hg 原子吸附后，abc 这一列位错已向前或上下运动了一段距离. 另外，原位错列 de 和 fg 已运动离开了视场，而在 hi 处则新产生了一列位错. 由于图 1(a)和图 1(b)的位错组态相同，这就表明，室温热激活不会使已达到稳态的位错组态再发生变化. 另外，也表明试样在取出或放入 TEM 的操作本身亦不会引起

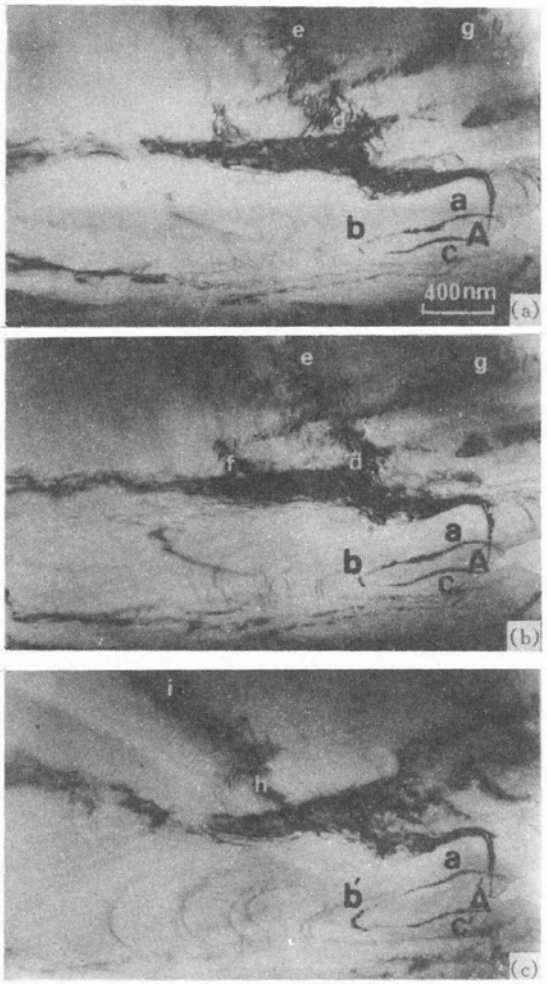


图 1　液体金属吸附促进位错增殖和运动
(a)加载后预蠕变 24 h；(b)加载试样放在 Hg + 3%Ga 上方 1 h；(c)试样继续放在 Hg + 3%Ga 上方 12 h

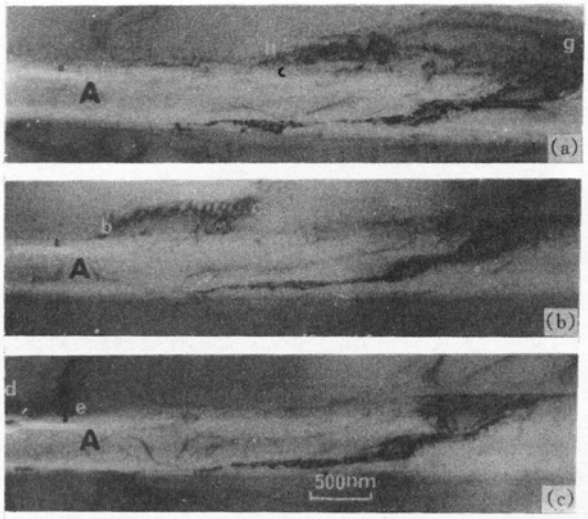


图2 液体金属吸附促进位错的发射

(a)加载后预蠕变20 h;(b)加载试样放在50℃的Hg+3%Ga上方40 min;(c)试样继续放在50℃的Hg+3%Ga上方20 min

位错组态的变化. 因此, 图1(c)上位错组态的变化完全是由于裂尖吸附Hg原子后造成的,即裂纹表面吸附金属原子后(吸附量应该超过某一临界值)能促进位错的发射、增殖和运动. 为了增加Hg的蒸发量,将液体金属(Hg+3%Ga)加热至50℃. 预蠕变20 h后的2号试样放置在它的上方(试样所在位置处的温度低于50℃, 此温度远低于TEM中电子束辐照引起的局部温升), 结果发现很短的时间内加载裂纹前的位错组态就能发生变化. 图2(a)为预蠕变20 h和再在TEM中蠕变0.5 h后裂尖前的位错组态. A为裂尖, 在hg处有很多位错. 图2(b)为在Hg蒸气中放置40 min后的位错组态. 和图2(a)相比可见, 裂尖吸附Hg原子后, 在bc处产生了一列新位错, 由于这列位错位于裂尖前方, 所以它显然是由裂尖A发出的;与此同时,hg处的大量位错已基本滑出视场(图2(b)). 继续在Hg蒸气中放置20 min后裂尖前方的位错组态如图2(c)所示. 可以看出,图2(b)中的bc位错列已运动离开视场;与此同时,在de处又出现了一列新位错. 因为de位错列平行于裂纹且在裂尖的后方, 它显然不是从裂尖发出,而是从裂纹上方的位错源增殖产生的. 这就进一步表明, Hg在裂尖的化学吸附能促进位错的发射、增殖和运动.

关于液体金属在裂尖吸附后能促进位错发射、增殖和运动的机理目前还不清楚,这可能和吸附降低表面能(或原子运动)有关, 需要进一步研究.

3 结论

液体金属Hg吸附在铝的加载裂纹表面后能促进位错的发射、增殖和运动, 即液体金属吸附能促进局部塑性变形.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号:59671042)资助项目.

参 考 文 献

1 Stoloff N S, Johnsyon T L. Crack propagation in a liquid metal evironment. Acta Metall, 1963, 11: 251

2 Lynch S P. Liquid-metall embrittlement in an Al 6%Zn 3%Mg alloy. Acta Metall, 1988, 36: 2 639

3 Gu Biao, Zhang Jingwu, Wan Farong et al. The in-situ TEM observation of corrosion facilitated dislocation emission, multiplication and motion for brass. Scripta Metall, 1995, 32(4):637

4 Westwood A R C, Preese C M, Kamdar M H. Fracture, Vol 3. New York: Academic Press, 1971. 589~644

(1996-05-23收稿, 1996-09-11收修改稿)