

TiAl 合金 PST 晶体断裂过程原位 TEM 观察^①

陈明伟 林栋梁 陈 达 汪德宁

(上海交通大学材料科学系, 上海 200030)

摘 要 利用 TEM 原位应变观察技术研究了 TiAl 合金 PST 晶体中裂纹扩展过程。发现界面与裂纹的交互作用与界面类型有关, 不对称的伪孪晶界面(γ/γ_p)对裂纹扩展的阻碍最强烈。片层界面以及二次裂纹导致的裂纹分叉是层状组织韧化 TiAl 合金的重要原因。当裂纹与片层界面的夹角不同时, γ 相所表现的两种截然不同的断裂方式表明在 TiAl 合金的脆性本质中包含有位错动力学的因素。

关键词 TiAl 合金 PST 晶体 裂纹扩展 位错动力学

层状组织能够显著地提高 TiAl 合金的韧性, 因而有不少有关韧化的机理论面世^[1-3], 但这些机理都是基于 SEM 下断口形貌的观察而提出的, 对诸如裂纹扩展的细致过程、界面类型对裂纹扩展的影响等深入的问题尚不清楚。作者的前期研究^[4]曾发现层状组织的韧化效应与裂纹和片层界面的夹角有关, 其原因在于裂纹及前端的滑移带与片层界面的交互作用, 但更深入的机理尚未澄清。

由于 PST 晶体具有单一的片层组织, 晶体的位向易于确定, 且片层较宽, 因而有利于深入研究裂纹与层状组织的交互作用; 但对 PST 晶体的断裂机理的认识却不十分清楚。最近, Yamaguchi 课题组对 PST 晶体断裂行为进行了研究^[5], 发现裂纹与片层界面的夹角不同, PST 晶体的断裂方式有显著的差异。当裂纹垂直片层界面时, 在主裂纹前端总有由于片层界面剥离 (delamination of lamellar boundaries) 而形成的微裂纹, 裂纹通过主裂纹与微裂纹的连接而扩展, 并认为界面的剥离是由于裂纹前端三向应力场造成的。当裂纹平行于片层界面时, 裂纹沿片层界面方向以解理的方式快速扩展, 此时缺口试样的断裂强度仅为光滑试样的 5%, 且断口几乎没有塑性变形痕迹。因而有关微裂纹形成机理、缺口敏感性的本质

等问题也需要进行深入研究。本文报导了作者采用原位应变 TEM 技术对 PST 晶体裂纹扩展过程、裂纹与片层界面的交互作用以及微裂纹形核的观察结果。

1 试验方法

TiAl 合金 PST 晶体的成分 (摩尔分数, %) 为: Ti-49.3Al, 冶炼及晶体定向同文献 [5]。TEM 下拉伸试样的膜面垂直于片层界面, 晶面指数为 110, 拉伸轴与片层界面的夹角大致为 0° 、 90° 。试样经机械减薄后进行电解双喷减薄, 电解液为 10% 高氯酸酒精溶液, 电解温度低于 20°C 。观察电镜为带拉伸附件的 H-800 型透射电镜, 加速电压为 200 kV。

2 试验结果

当裂纹与片层界面垂直或有一定的夹角时, 裂纹与片层界面之间存在强烈的交互作用。图 1 是与片层界面有一定夹角的裂纹越过几个片层界面的过程, 在图 1(a) 中裂纹刚刚越过一个孪晶界面并在 γ/γ_p 界面前钝化后沿界面有所扩展 (裂纹的扩展过程如箭头所示)。由

① 国家自然科学基金资助项目
博士

收稿日期: 1996-07-12; 修回日期: 1996-10-07

陈明伟, 男, 30 岁, 副教授,

于解理面的对称分布,裂纹越过孪晶界面时发生分叉或扭折(kink),分叉后的裂纹已不处于最大正应力面上,因而裂尖应力分布不对称,在某一滑移面上剪切应力增大,使裂尖锐化,最终裂纹以非解理的方式扩展,当裂纹遇到 γ/γ_P 界面时,由于界面两侧晶体不对称,解理方式的扩展能完全被抑制住,且在剪应力的作用下沿界面分叉,由于应力状态决定裂纹的扩展方向,裂纹最终由界面向晶内扩展(图1(b))。随后的扩展过程(图1(c) - (d))几乎是上述过程的多次重复。由于片层太细,界面的类型难以区分,但从这一区域的选区衍射谱看,这中间没有 α_2 相。当裂纹扩展到图1(c)时,裂纹并没有继续向下扩展而是沿箭头方向扩展,经观察发现在裂纹上方不远处出现一个微裂纹,选区衍射分析证明微裂纹在 α_2/γ 界面处萌生。

裂纹在 α_2 相内均以脆性解理方式扩展,解理面为 $\{1010\}$ 。大量的观察证实主裂纹前端

的微裂纹总是在 α_2/γ 界面萌生,因此 α_2/γ 界面对裂纹的扩展并无直接的阻碍。相当多的研究者观察到易于产生微裂纹是片层组织的特征,但微裂纹产生的位置和机理却不十分清楚。作者前期工作^[4]曾发现微裂纹的萌生是位错与片层界面交互作用的结果, α_2/γ 界面严重阻碍位错滑移和孪生的进行^[5],且由于滑移系的限制, α_2 相变形及协调变形的能力均很差,因而 α_2/γ 界面与位错、孪晶的交互作用产生的局部应力集中是微裂纹萌生的原因。

微裂纹的出现对裂纹扩展方式有重大的影响。图2(a)是一个 γ 变体内沿形变孪晶面扩展的裂纹,在图2(b)时裂纹发生分叉,低倍下(图2(c))可看到,在主裂纹的前方出现了二次裂纹,仔细分析二次裂纹是在 α_2/γ 界面处萌生的(图中箭头所指),图2(d)是对应的选区衍射谱。二次裂纹的出现使裂纹偏离了解理面,断裂方式由解理转换成韧断。

当裂纹与片层界面有一定的夹角时, γ 相

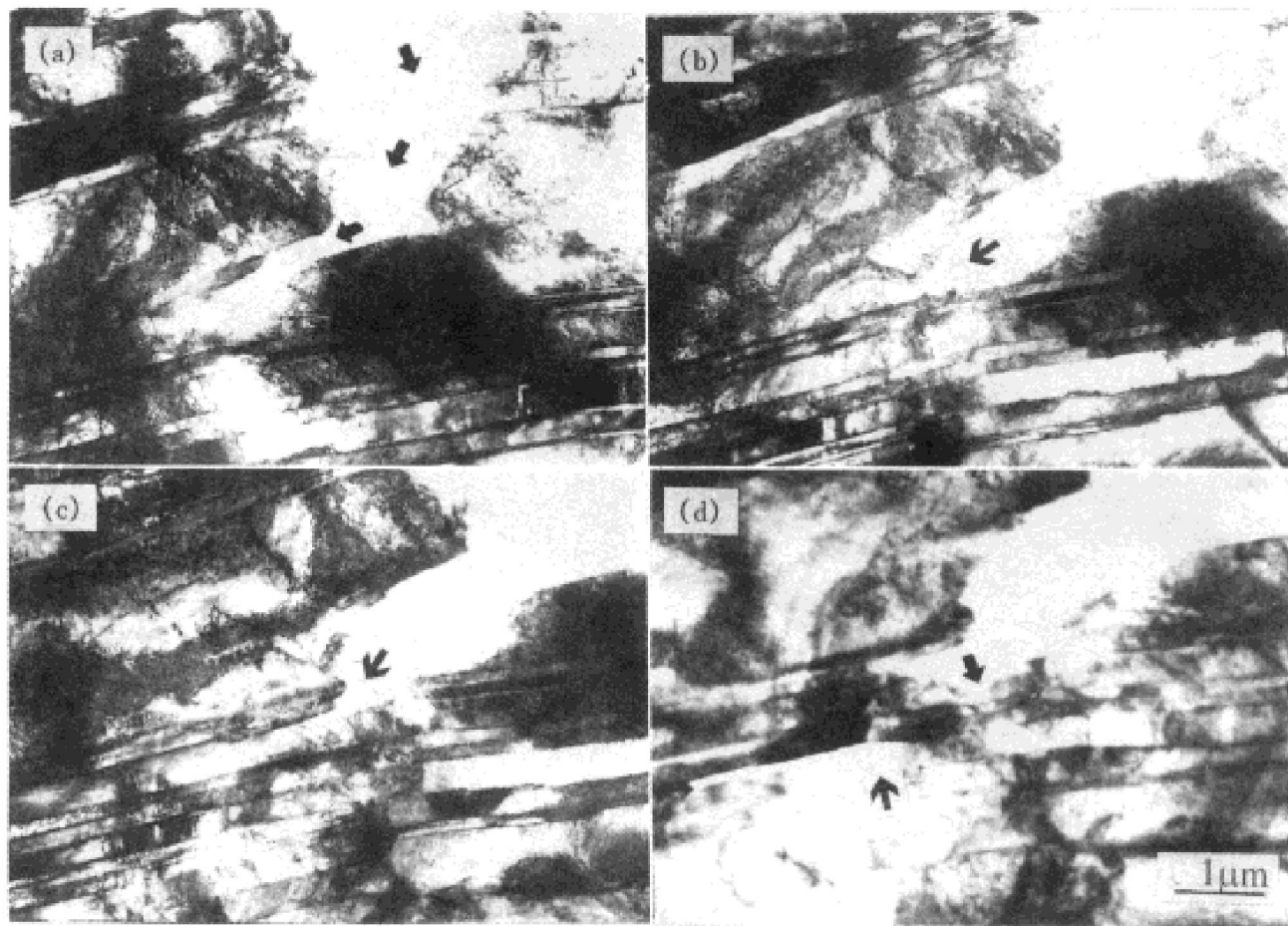


图1 与片层界面有一定夹角裂纹的扩展过程

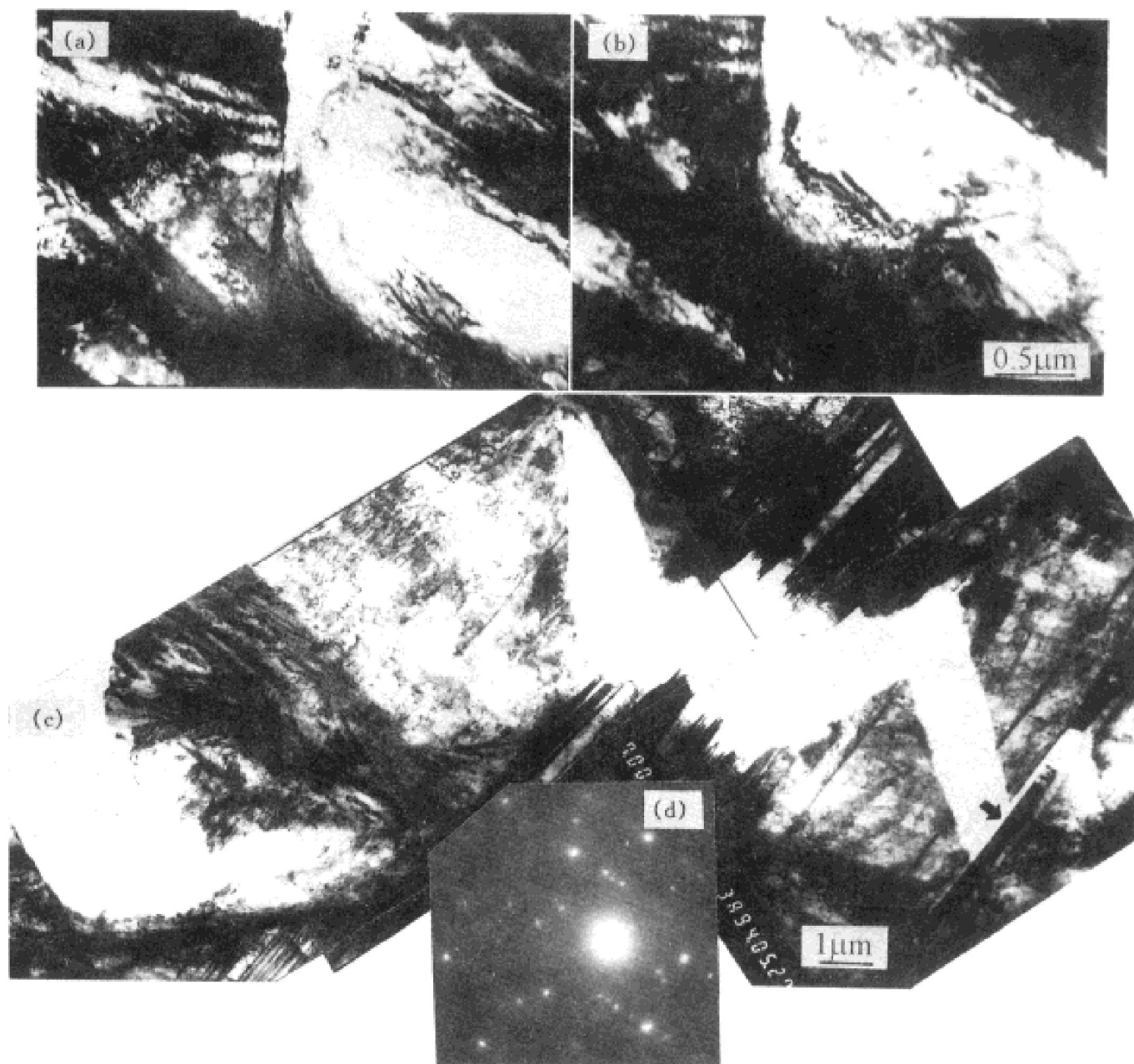


图2 二次裂纹导致主裂纹分叉

(a)、(b) —主裂纹扩展过程; (c) —低倍像; (d) —箭头所指处的选区衍射谱

体现出的良好韧性与裂尖易被钝化有关。图3显示 γ 相内一个裂纹刚刚穿越孪晶界面,裂尖通过孪生和发射位错得到了钝化。而当裂纹平行于片层界面时,却以解理的方式快速扩展,裂尖没有明显的钝化(图4(a)),并且可观察到裂纹总是倾向于在 γ 相内扩展(即使裂纹是在两相界面萌生的),这与作者在多晶TiAl中观察的结果相同^[4]。当加载速度很低或断续时,裂纹缓慢扩展,此时裂尖有所钝化,并在相邻的 α_2/γ 界面有微裂纹产生(图4(b)),主裂纹

与微裂纹以剪切带方式连接^[1]。

Chan 及合作者近几年就层状组织的韧化机理进行了大量的研究并提出了剪切带韧化机制^[1, 2]。但作者^[4]及其他研究者^[3]均发现剪切带韧化机制有一定的局限性。从裂纹扩展过程可看到一个重要的现象,层状组织或二次裂纹促使裂纹分叉,使裂纹偏离解理面以韧断的方式扩展。在弹塑性断裂力学中,裂纹的分叉是一个复杂的非线性问题,一方面裂纹的分叉将导致裂纹尖端应力场的改变,使I型裂纹变成

混合型裂纹,增加了裂纹尖端剪切应力的分量,使裂尖易于钝化,从而增加裂纹扩展的能量耗散^[7, 8]。另一方面,随机出现的二次裂纹使主裂纹偏离解理面,也将增加裂纹扩展所需的能量。

裂纹平行于片层界面与有一定夹角时所表现出的截然不同的断裂方式,以及加载速率对断裂方式的影响表明在 γ 相韧脆本质中包含有位错动力学因素。近年来对材料韧脆本质的认识中位错速度的重要性越来越引起人们的重视^[9-11],但现有的理论都是讨论静态或准静

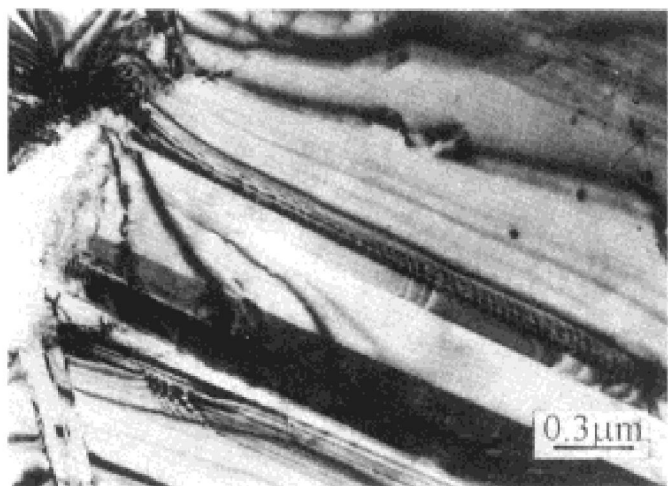


图3 裂尖通过孪生和发射位错而钝化

态裂纹的屏蔽、应力场松弛等问题,而对动态扩展中的裂纹却很少涉及。我们认为在材料的韧脆行为中存在着位错在裂纹尖端形核、发射以及在裂纹前端的运动速度与裂纹扩展速度的竞争。当裂尖有能力自动发射位错,或裂纹前端已存在的位错是可动的,且裂纹的扩展速度较慢时,位错对裂纹的屏蔽,对裂尖的钝化都能充分发挥作用;反之,裂纹扩展速度较快时,这些效应都体现不出来。除加载速度、材料的特性外,界面对裂纹的阻碍、二次裂纹使主裂纹扩展方向的改变也是控制裂纹扩展速度的重要因素。另一方面,如果位错的可动性非常好,在裂纹前端的运动速度总是大于裂纹的扩展速度,这种情况下材料的断裂方式与裂纹的扩展速度无关。对于大多数的金属间化合物,由于共价键以及其它因素的影响,位错的可动性较差,因而裂纹扩展速度与断裂方式之间有密切的关系,能够有效降低裂纹扩展速度的因素都有韧化的效应。

4 结论

(1) 微裂纹总是在 α_2/γ 界面萌生,这与界面处的局部应力集中以及 α_2 相协调变形能

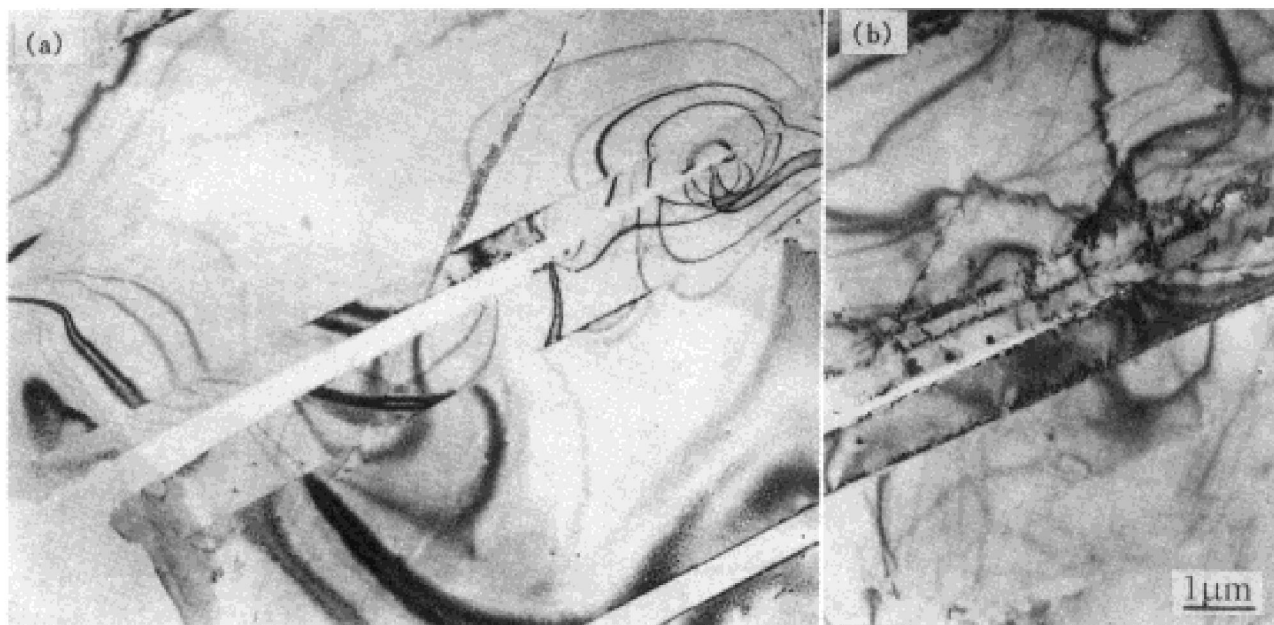


图4 裂纹沿平行于片层方向快速扩展(a)以及 α_2/γ 界面处的微裂纹(b)

力较差有关。

(2) 片层界面及二次裂纹引起的裂纹分叉是层状组织韧化 TiAl 合金的重要因素。

(3) 裂纹与片层界面夹角不同时 γ 相所表现出的不同断裂方式表明 γ 相的脆性本质与位错动力学有关。

参考文献

- 1 Chan K S. Metall Trans A, 1991, 22: 2021.
- 2 Deve H E, Evans A G. Acta Metall, 1991, 29: 1171.
- 3 Davidson D L, Campbell J B. Metall Trans A, 1993, 24: 1555.
- 4 陈明伟, 林栋梁, 陈 达等. 金属学报, 1994, 9: A421.
- 5 Yokoshima S, Yamaguchi M. Acta Metall, 1996, 44: 873.
- 6 Lin T L, Chen M. In: Proceedings of International Symposium on Gamma Titanium Aluminides, TMS, 1995: 323.
- 7 Nayashi K, Nemat-Nasser S. J Appl Mech, 1981, 48: 520.
- 8 Hutchinson J W, Suo Z. In: Hutchinson J W, Wu T eds, Advances in Applied Mechanics, Vol 28, 1991.
- 9 Bred M, Haasen P. Acta Metall, 1988, 36: 2003.
- 10 Hirsch P B, Roberts S G. Phil Mag A, 1991, 64: 55.
- 11 哈宽富, 王秀华. 金属学报, 1993, 11: A520.

IN SITU STRAINING TEM OBSERVATION OF FRACTURE PROCESSES IN POLYSYNTHETICALLY TWINNED CRYSTALS OF TiAl

Chen Mingwei, Lin Dongliang, Chen Da, Wang Dé'ning

Department of Materials Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

ABSTRACT Crack propagation processes in polysynthetically twinned (PST) crystals of TiAl were investigated by *in-situ* TEM observation. It was found that the influence of lamellar boundaries on the fracture behaviors is connected with the type of interfaces, in which the asymmetrical γ/γ_p interface is the largest inhibition to crack growth. The crack kinks which result from lamellar interfaces and second microcracks play a dominant role on that TiAl alloys are toughened by lamellar structure. As the angle between tensile axis and lamellar interface varies, that two kinds of different fracture modes existed in γ phase indicates that dislocation dynamics may be an important reason on embrittlement of TiAl alloys.

Key words PST crystals of TiAl crack propagation dislocation dynamics

(编辑 彭超群)