

加载速度对 TiAl 基合金缺口弯曲断裂机制的影响

曹 睿¹, 雷明霞¹, 陈剑虹¹, 张 继²

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

(2. 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 主要就加载速度对 TiAl 基合金 2 种组织缺口弯曲断裂机制的影响进行了详细研究。研究表明: 在缺口弯曲试验中, 裂纹沿着局限于缺口根部中心线上的高应力区起裂并扩展; 全层组织断裂韧性随加载速度的变快而增加, 而双态组织断裂韧性随加载速率的增大几乎没有变化, 这主要是由于在不同加载速度下全层组织在加载速度快和慢时的断裂过程不同, 双态组织则是相同的; 全层组织试样具有较差的拉伸性能, 但是具有较高的断裂韧性, 这是由于 2 种试验时的断裂机制不同。在拉伸试验时大层团晶粒引起严重的损伤和低的强度; 然而在 3PB 试验中大层团形成更大的分叉裂纹以及形成穿过主裂纹扩展的更大阻碍物。

关键词: TiAl 基合金; 加载速率; 缺口韧性; 断裂机制

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2008)07-1257-04

TiAl 基合金由于具有较高的强度、较好的高温性能, 而成为航空工业和汽车工业的重要候选材料之一, γ -TiAl 金属间化合物又可作为交通工具涡轮增压器和航空用首选材料, 因此, TiAl 金属间化合物具有十分广阔的应用前景^[1~3]。但是难以克服的室温脆性限制了它的发展, 为了解决这个问题, 材料界对其力学性能与显微组织的关系进行了大量的研究。文献[4]指出, 随着裂纹面密度的增加, 断裂载荷逐渐降低; 晶粒尺寸越大, 微裂纹面密度越大, 表观塑性应变越大, 断裂应力越低。Zheng^[5]的研究指出: 具有小晶粒、厚层片显微组织的全层 TiAl 合金在较低的应变速率下有较好的塑性。王瑜等人^[6]的研究表明: 应变率由低到高变化时, TiAl 基合金的拉伸断裂方式未发生明显的变化, 都是以穿晶解理(包括穿层解理和沿层片面开裂)为主, 局部区域出现沿晶开裂。而应变率对 TiAl 基合金的断裂机制有着重要的作用。在实际应用场合下, 发动机涡轮叶片在发动机启动到加速和停止的过程中, 加载速度的变化对其性能的影响不容忽视^[6]。本实验在以前关于断裂机制、韧化机制、裂纹扩展阻力以及损伤对断裂行为影响的基础^[7~10]上, 着重就加载速度对 TiAl 基合金缺口弯曲断裂机制进行了详细的研究。

1 实 验

收稿日期: 2007-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(50471109); 甘肃省自然科学基金(3ZS061-A25-037)

作者简介: 曹 睿, 女, 1977 年生, 博士, 兰州理工大学材料学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973529, E-mail: caorui@lut.cn

本实验所用材料是由北京钢铁研究总院提供的具有全层(FL)和双态(DP)微观组织结构的 TiAl 基合金, 其名义成分为 Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr, 其组织结构如图 1 所示。试样是由圆饼铸锭经线切割机加工而成, 缺口前端的半径为 87.5 μm 。三点弯曲(3PB)试样尺寸如图 2 所示。试样的高度 W 和宽度 B 相同, 均为 6 mm。

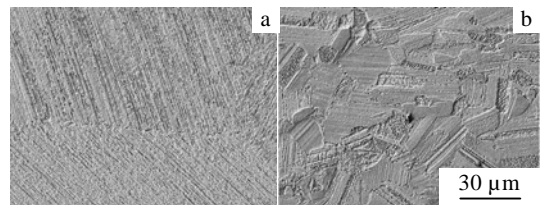


图 1 TiAl 基合金显微组织

Fig.1 Microstructures of TiAl-based alloy: (a) full layer (FL) and (b) double phase (DP)

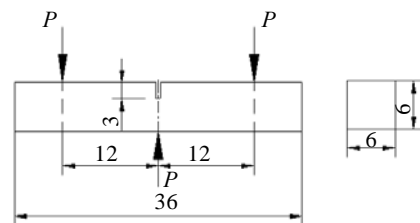


图 2 3PB 弯曲试样几何尺寸

Fig.2 Shapes and dimensions of the specimens for 3 points bending

在室温下空气介质中，在 Instron 1341 试验机上进行 3PB 弯曲试验，加载速度分别为 0.000 75、0.0075、0.75、7.5、15 mm/min，试验机自动记录载荷-位移曲线，断裂载荷 P_{max} 、 P_q 是由试验机记录的数据及载荷位移曲线求得。缺口试样的断裂韧性 $K_{IC(n)}$ 和最大应力强度因子 K_{max} 的计算根据标准 GB 4161-84 来求解。由于是缺口试样的断裂韧性，与一般预制疲劳裂纹试样的断裂韧性 K_{IC} 相区别，所以这里用 $K_{IC(n)}$ 来表示缺口试样的断裂韧性。

2 结果与讨论

图 3 为 3PB 试验样的 K_{max} 和 $K_{IC(n)}$ 与加载速度之间的关系。

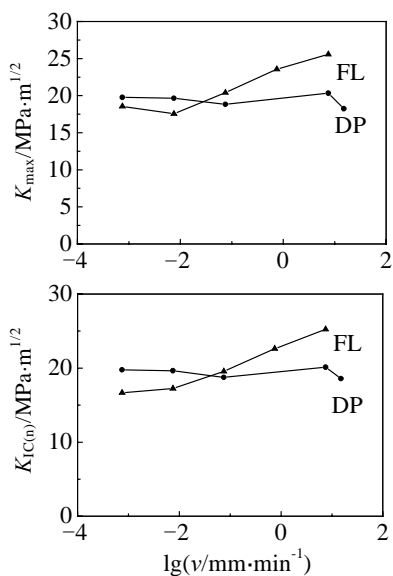


图 3 3PB 试验样的 K_{max} 和 $K_{IC(n)}$ 与加载速度之间的关系
Fig.3 Relationships between the loading rate and fracture parameters in 3PB tests

由图 3 可知，全层组织在位移加载三点弯曲试验中，最大断裂韧性 K_{max} 和缺口断裂韧性 $K_{IC(n)}$ 均随位移速度的增大而增加，偏离点载荷 P_{offset} 在位移速度为 0.000 75~0.75 mm/min 和 7.5~15 mm/min 时有明显差别。这说明位移加载速度对全层组织断裂韧性有明显的影响，在本研究的速度范围(0.000 75~15 mm/min)之内，全层组织缺口断裂韧性 $K_{IC(n)}$ 随加载速度的增加基本呈线性关系。

观察 $v=0.000 75$ mm/min 的试样断口，如图 4a。箭头所示的区域为缺口根部，在缺口根部附近分布大量的沿层断裂面。显然，一开始沿不同方向的沿层面开裂，裂纹在较低载荷下就扩展较长，所以位移变快，

载荷-位移曲线发生偏离， P_{offset} 的值达到 511.3 N。再者，由于加载速度慢，在较短裂纹引起较慢变形时就平衡了位移速度，即位移加载速度等于试件变形速度这一条件。而在载荷下降的过程中，裂纹仍然扩展，即裂纹扩展引起的刚度下降补偿了载荷的下降，裂纹可以在载荷下降时仍然扩展，最终断裂载荷达到 741 N。将所有的沿层裂纹面由黑线所包围，这些裂纹可以看作是在断裂前的弯曲过程中产生的；剩余表现出穿层裂纹面的面积可看作是在最终断裂时产生的裂纹形成。

加载速度为 15 mm/min 时的试样断口如图 4b 所示。由图可得出：①在缺口根部附近几乎全部是穿层断裂，没有明显方向性的解理裂纹失稳传播迹象；②整个断口沿层断裂面很少；③晶粒尺寸很大，约 1000 μm ，但这是逐步扩展的断裂过程，而不是 Griffith 型裂纹的起裂失稳扩展，所以晶粒大小并不起决定 σ_f 的作用；④由于速度大，沿层裂纹来不及充分形成，故裂纹沿正应力最大的方向传播。这个试样在这个加载速度下最终的断裂应力为 1375 N。最快速度加载和最慢速度加载断裂应力的这种巨大差异可以由断口上沿层面的比例来说明，在图 4a 中沿层面的比例远高于图 4b 中沿层面的比例，即在断裂前加载速度较慢时产生更多的沿层裂纹。

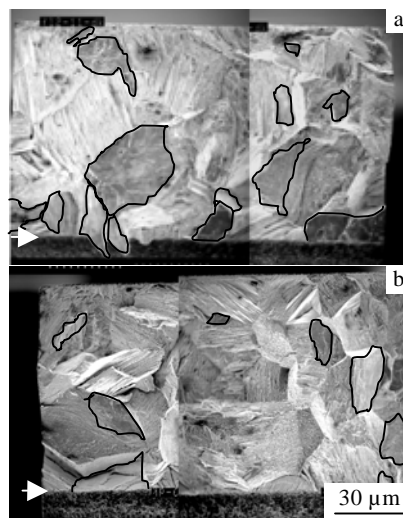


图 4 全层组织(FL)3PB 试样的断口形貌
Fig.4 Fracture surface of FL microstructure in 3PB tests: (a) $v=0.000 75$ mm/min and (b) $v=15$ mm/min

观察双态组织各试样断口形貌，如图 5 所示。发现以下特征：(1)断口特征为准解理，断裂小面尺寸不大，约 30 μm 左右，由于晶粒尺寸不均也有些断裂小面尺寸达到 80 μm ，断裂小面周围是撕裂脊，中间为

解理状；(2)裂纹扩展过程中出现分层现象，说明沿层强度低，使整个断口很不平整，可能是偏析造成薄弱层，使断口分不同层次，大片大片断开；(3)裂纹没有明显的方向性失稳扩展的迹象，断裂小面也没有明显的方向性；(4)各加载速度下试样的断口特征基本相似。通过以上观察分析可见，双态组织断裂机制随加载速度的变化没有明显不同。主要原因是：从宏观上看尺寸较小的晶粒是随机分布的，产生的微裂纹对裂纹扩展的影响不大； γ 相的分布和晶粒尺寸很不均匀，并且有偏析造成的薄弱面使断口分层，所以材料性能较差。因此，位移加载速度对双态组织断裂性能影响不明显。

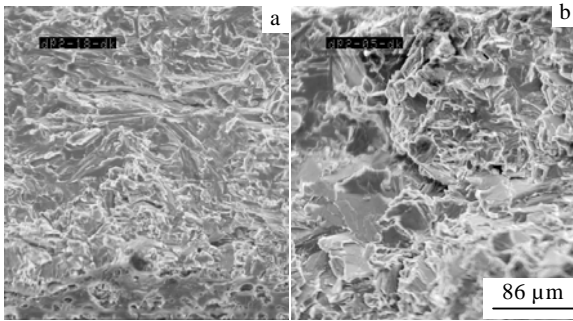


图 5 双态组织(DP)3PB 试样的断口形貌
Fig.5 Fracture surface of DP microstructure in 3PB tests
(a) $v=0.00075$ mm/min) and (b) $v=7.5$ mm/min

全层组织在加载速度快和慢时的断裂过程不同，双态组织则是相同的。①在最快加载速度时，微裂纹没有足够的时间起裂并扩展，裂纹走向的示意图如图 6a 所示。由于加载速度很快，所以裂纹在较高载荷下才能产生，一旦裂纹产生，在加载过程中积累很大能量使得载荷-位移曲线偏离最大载荷，然而由于加载速度很快，裂纹扩展的速度与加载的位移速度很难达到平衡，因此没有明显的裂纹扩展过程，一旦达到平衡，试件也就断裂了，即快速加载时裂纹在应力最大的方向上扩展，缺口前沿断面整齐，最大载荷 P_{max} 值高。加载速度小时，在缺口前沿不同方向的沿层薄弱面处开裂，断口上沿层断裂面大，并且整个断面凹凸不平，没有方向性，使得裂纹在较小载荷下达到较长裂纹，使试件弯曲加快，较早达到最大值，最大载荷 P_{max} 值反而要小；②加载速度非常慢时，可以发现裂纹在很小外加载荷下沿着强度最低的层间方向产生很多裂纹，并且这些微裂纹有足够的时间起裂并扩展，裂纹走向的示意图如图 6b 所示。所以在很小载荷下微裂纹的长度较长，较快的裂纹扩展速度使得在最大载荷时两者达到平衡，然而在继续加载过程中尽管试样的承

载能力降低了，裂纹仍然能进行扩展，这就是说，由裂纹扩展引起刚度的下降能补偿载荷的下降，因此在载荷下降的同时裂纹仍然能够扩展，这说明，位移加载速度对全层组织断裂性能影响明显。但位移加载速度对双态组织断裂性能几乎没有影响，这主要取决于双态组织的晶粒尺寸较细小，更多的微裂纹容易产生在晶粒边界，这些微裂纹在尺寸上也很小，并不影响裂纹的扩展过程，所以裂纹扩展仍然沿着主应力最大的方向。

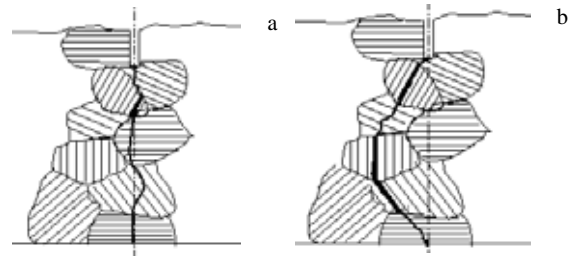


图 6 全层组织试样断裂路径示意图
Fig.6 Schematic fracture path of FL microstructure at (a) higher loading speed and (b) lower loading speed

由图 3 可知，全层组织试样有较高的缺口断裂韧性，并且在较高速度加载时这种规律表现得非常明显。对于细小晶粒尺寸的双态组织试样在较高加载速度下，主裂纹仍然选取沿着缺口中心平面的路径起裂并扩展；在较慢速度时，主裂纹能够穿过许多沿层裂纹而绕过一些取向不利的层团，但绕过路径短，所需要的能量小，示意图如图 7a 所示。对于晶粒尺寸较大的全层组织试样来说，在较慢加载速度时，主裂纹宁愿选取更加曲折的路径 1，即选取更多方向有利的沿层或者沿晶起裂并扩展，不愿选取穿过大量穿层裂纹的路径 2，示意图如图 7b 所示。在较快加载速度时则选取

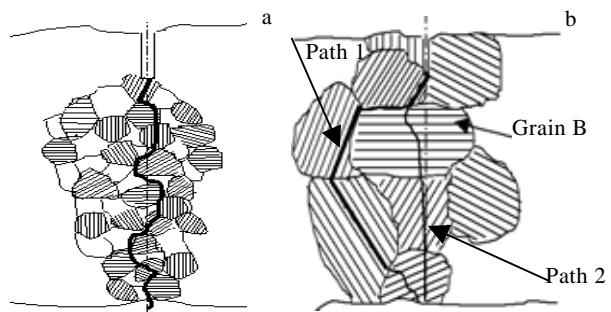


图 7 双态组织和全层组织试样裂纹扩展路径示意图
Fig.7 Schematic crack propagation path of DP and FL microstructure: (a) DP and (b) FL

路径 2, 这也就决定了在较快加载速度时断裂面上有较少的沿层裂纹面 (如图 4b)。在全层组织中出现较好缺口断裂韧性的另一个原因实质上就是在全层组织中扩展的主裂纹有更加曲折的裂纹尖端。沿层裂纹以各种不同的取向存在于缺口根部附近的区域, 主裂纹尖端存在很多严重的分叉及沿层间偏转的裂纹, 这些裂纹的存在使得驱动力也就大大降低, 所以说主裂纹尖端的分叉及沿层间偏转是全层组织的主要强化机制之一^[9]。根据文献[10]的研究发现, 这 2 种组织的 TiAl 合金的拉伸性能与断裂韧性仍然存在相反的关系, 全层组织试样具有较差的拉伸性能, 但是具有较高的断裂韧性, 这是由于 2 种试验时的断裂机制不同。在拉伸试验时大层团晶粒引起严重的损伤和低的强度; 然而在 3PB 试验中大层团形成更大的分叉裂纹以及形成穿过主裂纹扩展的更大阻碍物。

3 结 论

1) 当加载速度在 0.000 75~15 mm/min 之间时, 全层组织断裂韧性随加载速度的变快而增加, 而双态组织断裂韧性随加载速度的增大几乎没有变化。

2) 裂纹沿着局限于缺口根部中心线上的高应力区起裂并扩展。

3) 全层组织试样具有较差的拉伸性能, 但是具有较高的断裂韧性

参考文献 References

- [1] Wang Tianguo(王天国) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2006, 23(4): 1
- [2] Toshimitsu Tetsui. *Materials Science and Engineering*[J], 2002, A329~331: 582
- [3] Chan K S, Kim Y M. *Metall Trans A* [J], 1992, 23A(6): 1663
- [4] Sun Zhipeng(孙志鹏) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(2): 196
- [5] Zheng R T, Zhang Y G, Chen C Q. *J Mater Sci*[J], 2004, 39: 1721
- [6] Wang Yu(王 瑜) *et al.* *Journal of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报) [J], 1999, 33(2): 165
- [7] Chen J H *et al.* *Metall Mater Trans A*[J], 2004, 35A(2): 439
- [8] Cao R *et al.* *Materials Science and Engineering* [J], 2006, 420A(1~2): 122
- [9] Cao Rui(曹 睿) *et al.* *Materials Science and Engineering*(材料科学与工程学报)[J], 2004, (5): 674
- [10] Lei Mingxia(雷明霞) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(11): 1730

Effect of Loading Speed on the Notch Bending Fracture Mechanism of TiAl-Based Alloys

Cao Rui¹, Lei Mingxia¹, Chen Jianhong¹, Zhang Ji²

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract: Based on the results of notch 3 point bending (3PB) tests with various loading speeds and the observation of fracture surfaces, the effects of loading speed on the damage and fracture mechanisms of fully lamellar (FL) and duplex phase (DP) TiAl alloys are studied. It is shown that the main crack propagates by the stretching of a bifurcated crack through the strip with high normal stress, which is narrowly constrained near the centerline. With loading speed decreasing, the notch fracture toughness of FL specimens decreases, and the notch fracture toughness of DP alloy is nearly the same, because the fracture process in FL specimens is different at the different loading speeds, however, the fracture process in DP specimens is the same. The coarse FL TiAl alloy specimen has a poorer tensile strength but a higher fracture toughness due to the different fracture mechanisms for the tensile test and 3PB notched test. The large lamellar grains cause a heavy damage and a low strength for the tensile tested specimen, however a large bifurcated crack and a bigger obstacle to be bypassed by the main crack for the fracture toughness test.

Key words: TiAl-based alloys; loading speed; notch fracture toughness; fracture mechanism

Biography: Cao Rui, Ph.D., College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973529, E-mail: caorui@lut.cn