

双态组织高 Nb-TiAl 合金的缺口敏感性

许正芳¹, 徐向俊², 林均品³

(1. 宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 200940)

(2. 中原工学院, 河南 郑州 450007)

(3. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 通过对圆棒状缺口试样和无缺口光滑试样进行单向拉伸试验, 研究了双态组织高 Nb-TiAl 合金的缺口敏感性。研究表明, 缺口根半径 $R \geq 0.5$ mm 的 U 型试样和缺口角度 60° 、 $R \geq 1$ mm 的 V 型试样的抗拉强度 R_{mN} 都大于光滑试样的抗拉强度 R_m , 缺口敏感度 NSR 均大于 1, 合金对缺口不敏感。当缺口类型相同时, 缺口敏感性随缺口根半径 R 的减小而增大; V 型缺口敏感性大于 U 型缺口; 对于 V 型缺口试样, 当 $R = 0.5$ mm 时, 其 NSR 在 0.98 ~ 1.03 之间, R_{mN} 在 R_m 附近波动, 易出现缺口敏感。

关键词: 高 Nb-TiAl 合金; 双态组织; 缺口敏感性

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2020)03-006-04

Notch Sensitivity of High Nb Containing TiAl Alloy with Duplex Microstructure

Xu Zhengfang¹, Xu Xiangjun², Lin Junpin³

(1. Baosteel Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

(2. Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

(3. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The notch sensitivity of a high Nb containing TiAl alloy with duplex microstructure has been studied by monotonic tensile testing using round club-shaped notched and unnotched samples. The results show that the alloy doesn't exist notch sensitivity for the specimens with U-shape notch of root radius more than 0.5 mm and those with 60° V-shape notch of root radius more than 1 mm. The strength of the notched specimens (R_{mN}) is higher than that of the unnotched specimens (R_m) that the mean coefficient of notch sensitivity (NSR) is larger than 1. The notch sensitivity increases as the reduction of the root radius with the same notch shape. The V-shape notch is more sensitive than the U-shape, and the NSR of the V-shape notch of root radius 0.5 mm fluctuates from 0.98 to 1.03, that is R_{mN} approximates to R_m and easier to cause notch sensitivity.

Key words: high Nb containing TiAl alloy; duplex microstructure; notch sensitivity

在设计工程结构件时, 难免会存在一些几何不连续处, 如连接孔、结构沟槽或弯角等, 从材料力学角度来看, 可将这些几何不连续处视为缺口。在工作服役过程中, 应力通常会集中在这些缺口根部并容易诱发裂纹, 导致结构件提前失效。高 Nb-TiAl

合金因具有优越的高温抗氧化性能以及瞬时高温强度, 已成为高温高性能金属间化合物的重要发展方向之一, 被认为是一种理想的航空航天用高温结构材料, 主要用作航天飞机蒙皮、结构件和涡轮发动机叶片等^[1-4]。Kim 等^[5]研究认为, 大量难熔 Nb 元素的加入和 Al 含量的降低会使 TiAl 合金的缺口敏感性升高。从保证航空材料应用时的安全性角度考虑, 研究高 Nb-TiAl 合金的缺口敏感性具有重要的现实意义。

收稿日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51831001, 51671016);
河南省自然科学基金项目(162300410342)

通信作者: 许正芳(1982—), 女, 工程师。

1 实验

采用真空自耗 + 真空自耗凝壳复合熔炼工艺制备高 Nb-TiAl 合金铸锭，其名义化学成分为 Ti-45Al-(8 ~ 9)Nb-(W、B、Y) (原子分数, $x/\%$)。铸锭经 1 250 °C/140 MPa/4 h 热等静压处理，再经 3 次等温锻造热加工获得锻态高 Nb-TiAl 合金坯料，其组织为细小均匀的双态组织，如图 1 所示。

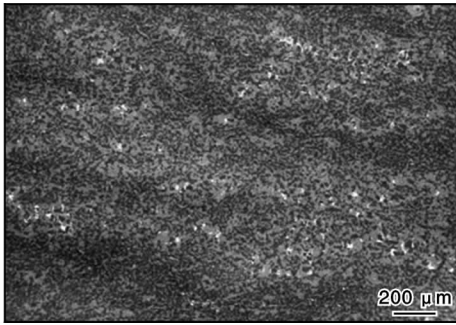


图 1 锻态高 Nb-TiAl 合金坯料的显微组织

Fig. 1 Microstructure of as-forged high Nb containing TiAl alloy billet

以锻态高 Nb-TiAl 合金坯料为研究对象进行拉伸试验，结合 ANSYS 有限元模拟，分析其缺口强化机理。从缺口类型和缺口根部半径两方面讨论合金对缺口的敏感性。金属材料对缺口敏感性的指标^[6]以缺口试样的抗拉强度 R_{mN} 与无缺口光滑试样的抗拉强度 R_m 的比值来衡量，称为缺口敏感度，并用 NSR (notch sensitivity ratio) 表示，如式(1)所示：

$$NSR = R_{mN} / R_m \quad (1)$$

NSR 越大，缺口敏感性越小。当 $NSR \geq 1$ 时，表明材料对缺口不敏感；当 $NSR < 1$ 时，表明材料对缺口敏感。

采用机械加工制备 V 型和 U 型 2 种形状的圆棒试样，如图 2 所示。试样缺口根部半径 R 分别为

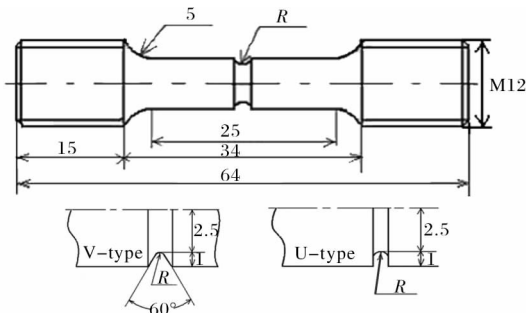


图 2 缺口拉伸试样的几何尺寸

Fig. 2 Geometrical dimensions of notch tensile specimens

2、1、0.5 mm，缺口处直径为 5 mm，缺口外平直部分直径为 7 mm。用金相干磨砂纸进行打磨以消除加工试样表面的加工缺陷。无缺口试样和图 2 所示缺口试样几何外形相似，不同之处在于拉伸变形段为直径 7 mm 的光滑区域。按照 HB5214—1996 标准在室温下进行缺口拉伸测试，拉伸设备为 MTS-809 型材料试验机，应变速率为 10^{-3} s^{-1} 。采用扫描电镜观察拉伸试样的断口形貌。

2 结果与分析

2.1 拉伸性能

表 1 为高 Nb-TiAl 合金光滑试样和缺口试样的拉伸强度、延伸率以及缺口敏感度。从表 1 来看，对于 V 型缺口试样，当缺口角度为 60°、半径 $R \geq 1 \text{ mm}$ 时，其抗拉强度 R_{mN} 大于光滑试样的抗拉强度 R_m ，缺口敏感度 NSR 大于 1，对缺口不敏感； $R = 0.5 \text{ mm}$ 时，V 型缺口试样的抗拉强度 R_{mN} 在光滑试样的抗拉强度 R_m 附近浮动， $NSR = 0.98 \sim 1.03$ ，可见高 Nb-TiAl 合金 V 型缺口试样在 $R = 0.5 \text{ mm}$ 时产生缺口敏感性。U 型缺口试样在半径 $R \geq 0.5 \text{ mm}$ 时， NSR 均大于 1，对缺口不敏感。U 型缺口试样在 $R = 1 \text{ mm}$ 时，其 NSR 已与 $R = 2 \text{ mm}$ 的 V 型缺口试样相当，因此未对 $R = 2 \text{ mm}$ 的 U 型缺口试样进行拉伸测试。

表 1 高 Nb-TiAl 合金的拉伸试验结果

Table 1 Tensile test results of high Nb containing TiAl alloy

Notch type	Root radius	$R_m, R_{mN}/\text{MPa}$	$A/\%$	NSR
Unnotched	-	880.5	2.2	-
V-shape	$R = 2 \text{ mm}$	1 050.5		1.19
		1 033.2	Yield	1.17
		1 055.8		1.20
V-shape	$R = 1 \text{ mm}$	983.5		1.12
		983.0	Yield	1.12
		982.0		1.12
V-shape	$R = 0.5 \text{ mm}$	903.3		1.03
		866.7	0	0.98
		880.0		1.00
U-shape	$R = 1 \text{ mm}$	1 044.2		1.19
		1 015.3	Yield	1.15
		1 012.5		1.15
U-shape	$R = 0.5 \text{ mm}$	984.5		1.12
		952.3	0	1.09
		941.1		1.07

从表 1 可见, 当缺口类型相同时, 随缺口根部半径的减小缺口敏感性增大; 在相同的缺口半径条件下, V 型缺口试样的抗拉强度低于 U 型缺口试样, 其缺口敏感性相对较大。V 型缺口试样在 $R = 0.5$ mm 时可产生缺口敏感。

2.2 断口形貌

图 3 和图 4 分别为高 Nb-TiAl 合金无缺口试样和缺口试样拉伸后的断口形貌。对比分析缺口试样和光

滑试样的断口形貌, 发现缺口的存在并没有改变合金的断裂模式, 仍然以穿晶解理为主要断裂模式。不同之处在于光滑试样裂纹从边上某一部位萌生然后向其他地方扩展, 整个断裂面光滑平整; 缺口试样裂纹从四周萌生, 然后向中间扩展, 四周断口呈阶梯状, 整个断裂面凹凸起伏较大, 裂纹萌生之处均为穿晶解理断裂。从缺口试样的断口形貌(图 4c)可以看出, 有缺口存在时拉伸断口更容易萌生二次微裂纹。

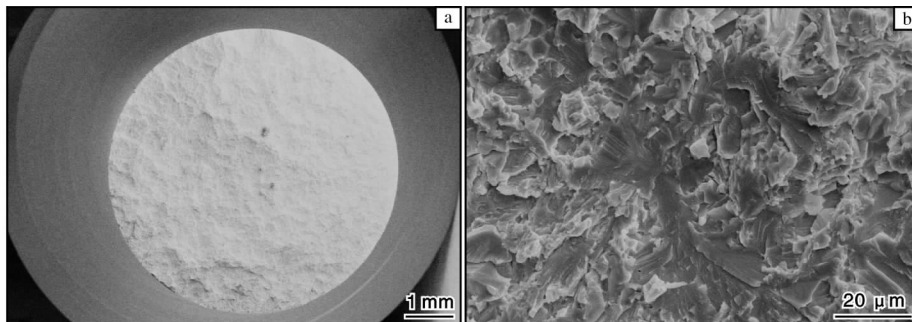


图 3 高 Nb-TiAl 合金无缺口试样的断口形貌

Fig. 3 Fracture morphologies of unnotched specimen of high Nb containing TiAl alloy:
(a) macromorphology; (b) micromorphology

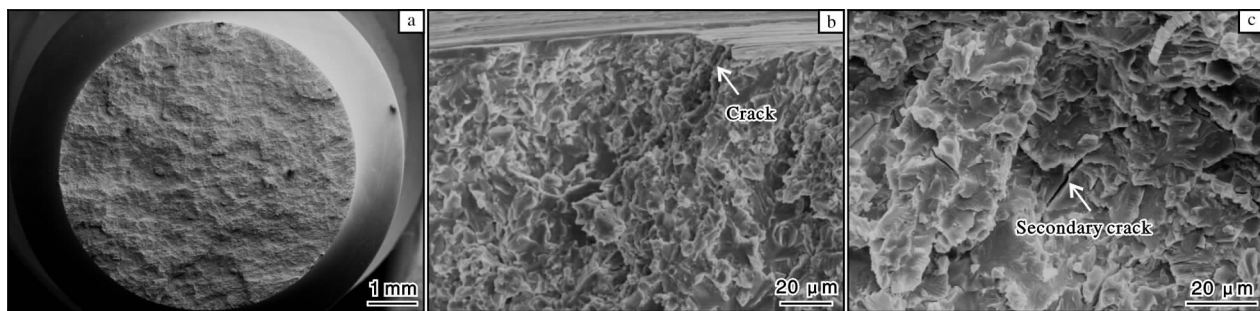


图 4 高 Nb-TiAl 合金缺口试样的典型断口形貌

Fig. 4 Typical fracture morphologies of notched specimen of high Nb containing TiAl alloy:
(a) macromorphology; (b, c) micromorphologies

2.3 ANSYS 有限元模拟

采用 ANSYS 有限元分析软件计算了高 Nb-TiAl 合金 U 型试样和 V 型试样缺口根部的应力集中系数 K_t 。计算结果显示, 对于 V 型缺口试样, 根部半径为 2 mm 时, 应力集中系数很小, 为 1.066; 根部半径为 1 mm 时, 应力集中系数为 1.50, 缺口根部存在较大的应力集中; 根部半径为 0.5 mm 时, 应力集中系数为 1.96, 应力集中十分明显。显然, 随着缺口根部半径的减小, 应力集中系数增大, 则缺口敏感度 NSR 减小, 缺口敏感性增大, 试样易于断裂, 当 $R = 0.5$ mm 时应力集中已很大, 可能会出现缺口敏感。结合表 1 数据可知, 在 $R = 0.5$ mm 时, V 型

缺口试样出现了对缺口敏感的情况, 因此在设计缺口零部件时要考虑到缺口尺寸对使用安全性的影响, 在设计含有 V 型缺口的零部件时缺口根部半径要满足 $R \geq 1$ mm 的条件。对于 U 型缺口零部件, 在 $R \geq 0.5$ mm 时, 其缺口敏感度 NSR 均大于 1, 对缺口不敏感。

2.4 分析与讨论

对于脆性材料或低塑性材料进行缺口试样拉伸时, 很难通过缺口根部极为有限的塑性变形使应力重新分布, 往往由弹性变形直接过渡到断裂。本实验中双态组织高 Nb-TiAl 合金室温拉伸延伸率约为 2.2%, 属于半脆性材料的范畴, 所以应该对缺口敏

感, 而实验结果却并非如此。V 型缺口试样在 $R \geq 1$ mm 时, 缺口敏感度 NSR 均大于 1, 对缺口不敏感, $R = 0.5$ mm 为产生缺口敏感临界值; U 型缺口试样在 $R = 0.5$ mm 时已对缺口不敏感。对于这样的实验结果即高 Nb-TiAl 合金试样对缺口不敏感, 其机理可从缺口试样断口形貌进行分析。高 Nb-TiAl 合金的断裂机制是解理断裂, 而解理断裂形成裂纹前材料要产生一定的塑性变形, 可以推断缺口试样根部发生了一定程度的塑性变形, 而塑性变形强化了晶粒, 使应力重新分布, 在进一步变形时引起解理应力的提高, 从而使缺口敏感度 NSR 大于 1。已有研究表明^[7], 在 TiAl 合金中只要产生 0.8% 的塑性变形就足以使应力集中系数为 2.4 的缺口试样应力重新分布, 而本实验中合金室温塑性延伸率达到了 2.2%, 根据有限元模拟结果, 半径 $R = 0.5$ mm 时缺口根部应力集中系数才达到 2%, 所以晶粒协调变形的能力变强, 从而导致合金对缺口不敏感。

正如 Milke 等人^[8]对 TiAl 合金的缺口敏感性研究结果一样, 在双态组织高 Nb-TiAl 合金中, 有相当数量的 γ 晶粒, 由于材料化学成分、相分布和晶粒间取向的不同, 造成合金应力分布不均匀, 局部产生了应力集中, 从而导致各个晶粒的塑性应变和名义应力存在很大的差别, 这些承受大应力和大应变的晶粒就像材料中的缺陷一样, 裂纹将首先从这些地方开始萌生, 从而大大降低合金宏观解理所需的应力和应变, 导致材料过早失效。对于相同的宏观应变, 在一个小体积变形区域内所包含的这种承受大变形和大应力的晶粒一般比一个大体积变形区域内的少, 因此所测量的小体积的强度比大体积的强度高。由于缺口试样变形主要集中在缺口根部区域, 而光滑试样在整个标距范围均为变形区域, 所以缺口试样的变形体积较光滑试样的小, 所测得的缺口试样的名义应力高于光滑试样, 从而使合金表现为对缺口不敏感。

金属材料的缺口敏感性除与材料本身性能、应力状态(加载方式)有关外, 还与缺口形状、尺寸和实验温度有关。缺口根部半径越小、缺口越深, 材料对缺口的敏感性越大。缺口的存在主要是增加了缺口前端或裂纹尖端的应力, 使其提前达到晶粒开裂所需的应力, 导致裂纹提前开裂扩展, 但是并没有改变其断裂模式。对于高 Nb-TiAl 合金, 在进行缺口试样拉伸时, 很难通过缺口根部极为有限的塑

性变形使应力重新分布, 往往直接由弹性变形过渡到断裂。

3 结 论

(1) 双态组织高 Nb-TiAl 合金 V 型缺口试样在缺口角度为 60° 、缺口根部半径 $R \geq 1$ mm 时和 U 型缺口试样在 $R \geq 0.5$ mm 时, 对缺口不敏感。

(2) 当缺口类型相同时, 随着缺口根部半径的减小, 缺口敏感性增大; 在相同的缺口根部半径条件下, V 型缺口比 U 型缺口敏感性大, V 型缺口试样在 $R = 0.5$ mm 时, NSR 在 0.98 ~ 1.03 之间, 易于出现缺口敏感。

(3) 缺口的存在并没有改变高 Nb-TiAl 合金试样的断裂模式, 但对于缺口试样, 裂纹是从四周萌生, 然后向中间扩展, 四周断口呈阶梯状, 整个断裂面凹凸起伏较大。

参考文献

- [1] 陈国良, 林均品. 有序金属间化合物结构材料物理金属学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 337 - 340.
- [2] Appel F, Oehring M. γ -titanium aluminide alloys: alloy design and properties[M]//Darolia R, Lewandowski J, Liu C T, et al. Structural Intermetallics. Warrendale, PA: TMS, 1999: 371 - 372.
- [3] Zhang W J, Chen G L, Appel F, et al. A preliminary study on the creep behavior of Ti-45Al-10Nb alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 315(1-2): 250 - 253.
- [4] 刘自成, 李书江, 张卫军, 等. Nb 和 Al 对 γ -TiAl 基金合金高温强度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 470 - 474.
- [5] Kim Y W. Role of niobium in the progress of gamma alloy development//Kim Y W, Carneiro T. Niobium for High Temperature Applications [M]. Warrendale, PA: TMS, 2004: 125 - 137.
- [6] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 60 - 61.
- [7] Knaut D A, Beuth J L, Milke J G. Modeling and measurement of the notched strength of gamma titanium aluminides under monotonic loading [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 1999, 30(4): 949 - 959.
- [8] Milke J G, Beuth J L, Biery N E, et al. The effect of constraint-induced normal stress on the failure of notched TiAl components [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(2): 417 - 426.