

应变速率和温度对 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金拉伸性能的影响

刘先斌 张志刚 汤林志 宫声凯

(北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100083)

文 摘 研究了温度和应变速率对 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金的拉伸性能的影响。研究表明:在同一应变速率 (1.67×10^{-4} /s) 下,随着温度的升高,材料的塑性增加;在韧脆转变温度 (BDTT) 923 K 以上,随着应变速率的降低,合金的拉伸断口韧窝密集程度增大,合金塑性断裂的趋势越明显,且屈服强度随应变速率的降低而下降。

关键词 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金, 温度, 应变速率, 塑性断裂, 脆性断裂

Influence of Temperature and Tensile Rate on Performance of NiAl-30Cr-4Mo Eutectic Alloy

Liu Xianbin Zhang Zhigang Tang Linzhi Gong Shengkai

(School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract In this study, the tensile performance of the NiAl-30Cr-4Mo eutectic alloys under the different temperature and the different strain has been studied. The investigation has indicated that With the identical strain rate (1.67×10^{-4} /s), the plasticity of the materials increases as the temperature ascending. The brittle-ductile transition temperature (BDTT) of the alloy is about 923 K. Above 923 K, the fracture surface is characterized by the presence of dimple-like structures. As the falling strain rate, the dimple denseness of the fracture is much more, the trend of the ductile dimple rupture is more obvious, and the yield strength is also declining.

Key words NiAl-30Cr-4Mo eutectic alloys, Temperature, Strain rate, Plastic rupture, Brittle rupture

0 引言

B2 结构金属间化合物 NiAl 具有高熔点、低密度、良好的抗氧化性能以及热导率大等优良性能, 将可能成为新一代燃气涡轮发动机用的高温结构材料。然而, 室温脆性和高温强度限制了该材料的实用化, 研究解决 NiAl 金属间化合物基合金的室温脆性与高温强度问题是关系到该类材料能否应用的关键。为此, 人们就 NiAl 金属间化合物的强韧化机理^[1~6], 超塑性机理^[7~11] 以及各种断裂机理^[12~13] 进行了大量的研究工作。由于 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金^[13] 可以获得由 NiAl 相和 Cr(Mo) 相组成的全片层组织而受到关注, 研究其韧脆转变温度以及应变速率与温度对其性能的影响, 对于进一步改善其强韧化具有促进作用。本文以 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金为研究对

象, 研究了温度和应变速率对其拉伸性能的影响, 并探讨了其在不同条件下的断裂机理。

1 实验

合金是由质量分数是 99.5%、99.9%、99.9%、99.9% 的 NiAlCrMo, 按照一定原子分数 (33/33/30/4) 配比进行感应熔炼, 采用氧化镁中性坩锅, 以外径 38 mm, 内径 35 mm, 高度为 200 mm 的石英管为铸模在真空中进行浇铸成棒材。

使用线切割方法从合金锭子上加工成拉伸板状试样, 平行段尺寸为 2 mm × 3 mm × 10 mm。用 800# 砂纸磨光板状试样后, 在 MTS810 微机控制电子万能试验机上 (最大载荷 100 kN) 上进行室温和高温拉伸性能测试, 加载速率为 0.01 ~ 0.5 mm/min。采用 JSM-5600HV/LV 型扫描电子显微镜做微观组织和

收稿日期: 2007-09-30

作者简介: 刘先斌, 1983 年出生, 硕士研究生, 主要从事镍铝金属间化合物的研究

宇航材料工艺 2007 年 第 6 期

— 105 —

拉伸断口分析。

2 结果分析与讨论

2.1 微观组织和相成分分析

图 1 为 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金的扫描电镜背散射图像,从图中可以看出 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金由多晶的共晶胞组成,共晶胞由交替生长的片层状 NiAl 相(图 1 中的黑相)和片层状 Mo 合金化的 Cr 相(图 1 中的白相)组成。两相沿共晶胞的芯部呈放射状向共晶胞的边界方向生长。在共晶胞的芯部,片层比较细小,而随着往外的放射状生长,片层的宽度逐渐增大,在共晶胞的边界处最粗大,这使得共晶胞呈“菊花”状。分别对黑色的 NiAl 的固溶体相和白色的 Cr 的固溶体相进行微区的 EDS 分析,其分析结果如表 1 所示。

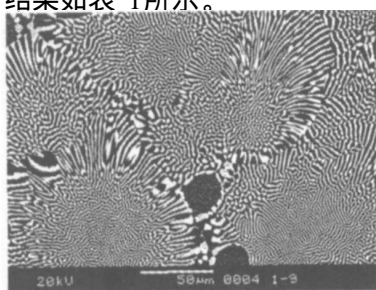


图 1 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金的扫描电镜背散射图像

Fig 1 SEM image of in-situ NiAl-30Cr-4Mo eutectic alloy

表 1 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金各相的化学成分

Tab 1 Composition of different phases in NiAl-30Cr-4Mo eutectic alloy

相	% (原子分数)			
	Ni	Al	Cr	Mo
- NiAl	52.17	42.55	5.53	0.75
Cr(Mo)	3.22	4.81	80.85	11.11

2.2 温度对 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金拉伸性能的影响

图 2 为 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金在不同温度下的拉伸曲线,拉伸速率均为 $1.67 \times 10^{-4} / \text{s}$ 。可以看出,在较低的温度(873 K)以下,合金的拉伸曲线没有塑性变形段,合金在达到屈服点前即发生断裂,在 873 K 以上,合金表现出一定的拉伸伸长率。从拉伸曲线塑性段的曲线形貌可以看出,随着温度的进一步升高,合金拉伸强度下降,伸长率增加,发生了明显的韧脆转变。

— 106 —

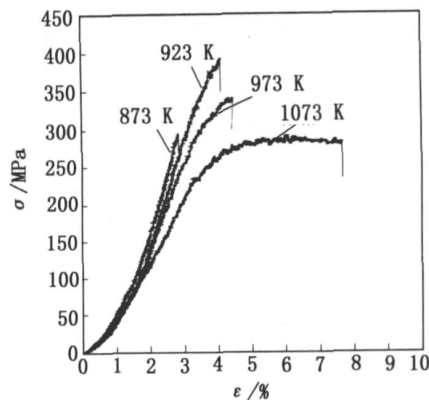


图 2 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金在不同温度下的拉伸曲线

Fig 2 Tensile diagrams for NiAl-30Cr-4Mo at different temperature

NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金在拉伸应变速率为 $1.67 \times 10^{-4} / \text{s}$ 时的拉伸伸长率与温度的关系见图 3。随着温度的升高,合金的伸长率都逐渐增加,在室温至 873 K 的区间内,拉伸伸长率逐渐升高,而到 873 K 以上,伸长率的明显增加。对于 NiAl 合金来说,低温下合金的塑性较低的主要原因是 NiAl 的滑移系不足,不能提供多晶材料大量塑性变形所需要的至少五个独立滑移系的启动。而在较高的温度下,合金中各种滑移系开始逐渐启动,合金的塑性增加,拉伸伸长率逐渐增加。

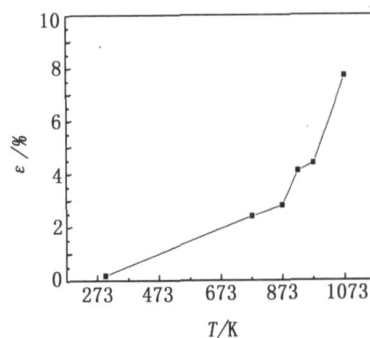


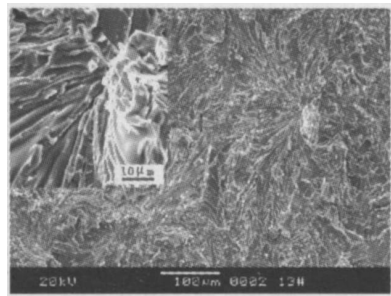
图 3 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金的伸长率与温度的关系

Fig 3 Dependence of elongation on temperature of NiAl-30Cr-4Mo alloy

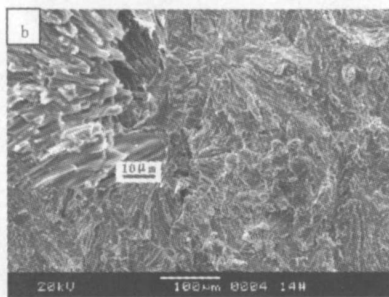
图 4 为 NiAl-30Cr-4Mo 共晶合金在 873 到 1073 K 的拉伸断口的形貌,拉伸速率均为 $1.67 \times 10^{-4} / \text{s}$ 。从图中可见,随着温度的变化,合金的拉伸断口形貌也发生明显的变化。在 923 K 以下[如图 4 (a)、(b)],合金的拉伸断口形貌没有太大的差别,试样断裂前没有表现出明显的缩颈部,其拉伸断裂均为 NiAl 相的解理断裂以及 NiAl/Cr(Mo) 相界面的剥离。随着温度的升高,合金的断口粗糙度增加,撕裂状况增加。而在 927 K 以上[如图 4 (c)、(d)],合金的断裂主要呈韧窝式的塑性断裂,在合金的断口中能

宇航材料工艺 2007 年 第 6 期

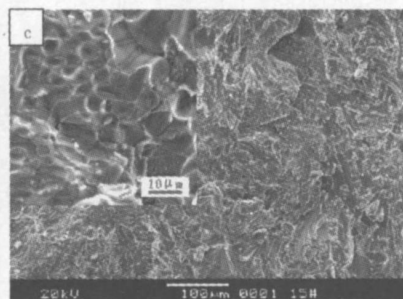
够明显的看到韧窝的出现,且随着温度的升高,合金中的韧窝越密集。与此同时,试样呈现出一定的缩颈。这与拉伸曲线基本相符,可以推断 NiAl-30Cr-4Mo共晶合金的韧脆转变温度(BDTT)在 923 K左右。



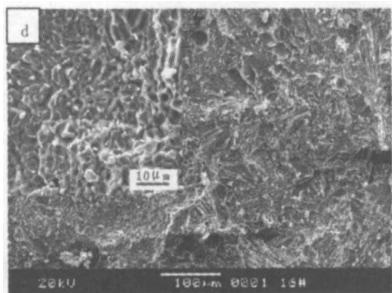
(a) 873 K



(b) 923 K



(c) 973 K



(d) 1073 K

图 4 不同温度同一应变速率拉伸断口

Fig 4 Tensile fractographs of alloys under same strain rate and different temperature

2.3 应变速率对 NiAl-30Cr-4Mo共晶合金拉伸性能的影响

图 5为在 1073 K时 NiAl-30Cr-4Mo共晶合金在不同拉伸速率下的拉伸曲线。可见,随着应变速率

率的降低,屈服强度也随之下降。当应变速率由 $8.33 \times 10^{-4} /s$ 下降到 $1.67 \times 10^{-5} /s$ 时,合金的拉伸屈服强度由 244 MPa下降到 165 MPa,下降幅度达到 33%。NiAl-30Cr-4Mo共晶合金的高温拉伸强度依赖于变形速率说明材料变形受热扩散过程的控制。

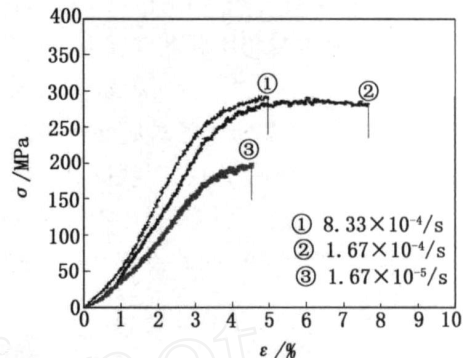
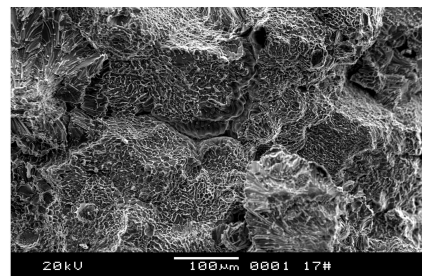


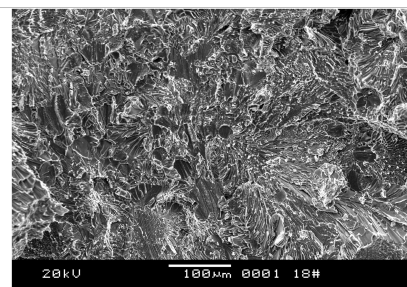
图 5 NiAl-30Cr-4Mo合金在 1073 K 不同拉伸速率下的拉伸曲线

Fig 5 Tensile diagrams for NiAl-30Cr-4Mo at different strain rate at 1073 K

在 1073 K温度时,合金变形时受位错攀移机制^[14-15]的控制。在较高的速率下,合金变形时,位错由于来不及进行受热扩散过程控制的攀移,而产生位错的塞积因而产生硬化现象,因而合金的屈服强度较大。而在较慢的变形速率下,位错在受阻时有足够的时间通过攀移来运动,这使得合金的屈服强度相对较小。



(a) $1.67 \times 10^{-5} /s$



(b) $8.33 \times 10^{-4} /s$

图 6 NiAl-30Cr-4Mo合金在 1073 K 不同应变速率下拉伸断口

Fig 6 Tensile fractographs of NiAl-30Cr-4Mo alloys under different strain rate

在BDTT以上,应变速率对合金的拉伸断裂机理也具有明显的影响。图6为1073 K时合金不同拉伸速率下的断口形貌。从图中可见,在较小的拉伸速率下,合金的拉伸断口韧窝的密集程度较大,合金的断口粗糙性较大,说明合金塑性断裂趋势明显。

应变速率对NiAl合金BDTT的影响有两类^[14~15]:一是韧脆转变过程中开动了其他的滑移系,则BDTT与应变速率无关;二是通过位错攀移和滑移来协调变形产生的应力,则BDTT对应变速率比较敏感,且此过程与位错的热激活有关。根据对本次拉伸实验结果的研究表明:该合金的断裂形貌及对应的拉伸性能明显依赖于应变速率,因此该合金的韧脆转变机理与应变速率有一定的关系。

3 结论

(1)在同一应变速率下,随着温度升高,NiAl-30Cr-4Mo共晶合金的拉伸强度先增加后降低,伸长率逐渐增加;当温度高于韧脆转变温度,断裂模式由解理断裂逐渐变为韧窝式的塑性断裂。

(2)在1073 K时,随着应变速率的降低,屈服强度也随着下降。在较小的应变速率下,合金的拉伸断口韧窝的密集程度较大,合金的断口粗糙性较大,合金塑性断裂的趋势明显。当应变速率增加至 8.33×10^{-4} /s时,拉伸断口呈现脆性断裂状。

参考文献

- 1 Liu C T, Horton J A. Effect of refractory alloying addition on mechanical properties of near-stoichiometric NiAl alloys Mater Sci Eng, 1995; A192-193: 170~178
- 2 Ishida K, Kairema P, Ueno N et al Ductility enhancement in NiAl-based alloys by microstructure control Metall Trans, 1991; A22: 441~446
- 3 Misa A, Gibala R, Noebe R D. Optimization of toughness and strength in multiphase intermetallics Intermetallics, 2001; (9): 971~978
- 4 李慧,韩萍,齐义辉等. NiAl金属间化合物的韧化方

法与机制. 辽宁工学院学报, 2006; 26(6): 394~398

- 5 Asthana R, Tiwari R, Tewari S N. Compressive properties of zone-directionally solidified NiAl and its off-eutectic alloys with chromium and tungsten Mater Sci Eng, 2002; A336: 99~109

- 6 Misra A, Wu ZL, Kush M T et al Microstructures and mechanical properties of directionally solidified NiAl-Mo and NiAl-Mo(Re) eutectic alloys Mater Sci Eng, 1997; A239-240: 75~87

- 7 Zhou W L, Guo J T, Chen R S et al Superplasticity in NiAl intermetallics macroalloyed with iron Mater Lett, 2001; (47): 30~34

- 8 Du X H, Guo J T, Zhou B D. Superplastic behavior in pseudo-eutectic NiAl-9Mo alloy. Mater Lett, 2002; (52): 442~447

- 9 Chen R S, Guo J T, Zhou J Y. Elevated temperature compressive behavior of cast NiAl-9Mo(1Hf) eutectic alloys Mater Lett, 2002; (42): 75~80

- 10 Lin Dongliang, Hu Jing, Jiang Dongmei Superplasticity of Ni-rich single phase NiAl intermetallics with large grains Intermetallics, 2005; (13): 343~349

- 11 陈荣石,郭建亭,殷为民等. NiAl基多相金属间化合物的显微组织、超塑性研究. 金属学报, 1998; (34): 1121~1125

- 12 张光业,张华,郭建亭. 多相NiAl-Cr合金的微观组织和韧脆转变行为的研究. 材料工程, 2005; (11): 24~27

- 13 Zhang Zhigang, Liu Xianbin, Gong Shengkai et al Microstructure and properties of NiAl and its eutectic alloy with Cr and Mo addition Trans Nonferrous Met, 2006; (16): 2046~2049

- 14 Ebrahimi F, Shrivastava S Crack initiation and propagation in brittle-to-ductile transition regime of NiAl single crystals Materials Science and Engineering, 1997; A239-240: 386~392

- 15 Ebrahimi F, Shrivastava S Brittle-to-ductile transition in NiAl single crystal Acta Metall Mater, 1998; (46): 149~152

(编辑 任涛)