

B元素对某Ni₃Al基高温合金的微观组织和力学性能的影响研究

孙长波¹, 吴保平², 冯秋水³, 孙嘉言³, 王福德⁴, 焦军红¹, 许庆彦³

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043; 2. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750; 3. 清华大学材料学院, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084; 4. 空军装备部驻沈阳地区第二军事代表室, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 由于Ni₃Al基高温合金具有抗蠕变强度大、耐腐蚀、抗氧化等优异的高温性能。作为多组元的金属间化合物, 合金组分的变化会直接影响到Ni₃Al基高温合金的性能表现。为优化合金成分, 获得最佳的合金性能, 研究了晶界强化元素B含量变化对Ni₃Al基高温合金组织和性能的影响。结果表明, 合理控制B元素含量, 能够增加合金的持久时间和塑性。当B元素含量在0.012%~0.021%时, 合金在1 100 °C的拉伸性能和1 050 °C/100 MPa及1 100 °C/60 MPa的持久性能达到最佳。

关键词: Ni₃Al基; 高温合金; 成分设计

Ni₃Al金属间化合物具有优异的蠕变抗性和高温强度, 是镍基高温合金中重要的强化相之一, 在航空航天领域及民用工业领域有广泛的应用前景^[1-3]。为获得理想的合金组织和更佳的合金性能表现, 研究人员往往对Ni₃Al基高温合金进行合金成分优化、制备工艺改善等相关研究, 以期能推进其在生产中的实际应用^[4]。

Ni₃Al基高温合金作为多组元的金属间化合物, 不同合金组分的添加和组分含量的控制使得Ni₃Al基高温合金具有不同的综合性能表现和应用场景。由于金属间化合物在早期研究中存在塑性差、脆性、中温强度不足等一系列问题, 限制了其实际推广应用^[5]。Aoki和Izumi^[6]通过在基体中加入0.1%晶界强化元素B, 有效地改善了Ni₃Al基高温合金室温脆性。Liu^[7]等人的研究表明B在晶界偏析有效抑制了合金的沿晶断裂。郭建亭^[8]等发现B的添加可以改善Ni₃Al基合金的塑性和屈服强度, 但当含量超过一定值时, 会降低其塑性和强度。

尽管学术界对B元素含量在室温下对Ni₃Al基高温合金的力学性能影响已有较多研究, 但在对于实际生产中B元素含量对熔模铸造铸锭的合金组织和高温负载下力学性能的影响报道较少。为了对某主要服役与航空发动机尾喷管的Ni₃Al基高温合金进行成分优化, 本文研究了0.0087%~0.035% (质量分数) 范围内, B元素含量对该合金微观组织和高温力学性能的影响规律。

1 试验材料及方法

试验采用真空二次熔炼工艺, 利用10 kg真空感应炉将配好的金属料熔炼浇注成5 kg的母合金, 然后打磨母合金的表面, 并将该打磨后的母合金进行二次熔炼浇注成形。共浇注出5组试棒, 其化学成分如表1所示。试棒的宏观形貌如图1所示, 其晶粒大小在1~3 cm。

试棒毛坯尺寸如图2a所示, 其高温拉伸试样及高温持久试样的尺寸分别如图2b、2c所示。高温拉伸性能测试在1 100 °C条件下进行, 高温持久性能分别在1 050 °C/100 MPa及1 100 °C/60 MPa条件下进行。

作者简介:

孙长波(1978-), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事熔模铸造工艺设计及计算机数值模拟技术研究工作。E-mail: sunchangbo@126.com

中图分类号: TG132.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

01-0007-04

收稿日期:

2022-03-11 收到初稿,

2022-05-15 收到修订稿。

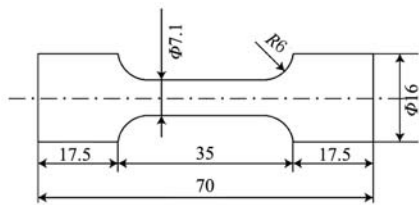
表1 不同B含量的某Ni₃Al基高温合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of the Ni₃Al alloys with different B contents

试样	B	Cr	Al	C	W	Mo	Ti	Hf	w _B /%
1#	0.008 7	7.5	8.00	0.08	1.8	4.09	0.8	0.4	
2#	0.012	7.5	8.00	0.08	1.8	4.09	0.8	0.4	
3#	0.021	7.5	8.00	0.08	1.8	4.09	0.8	0.4	
4#	0.032	7.5	8.00	0.08	1.8	4.09	0.8	0.4	
5#	0.035	7.5	8.00	0.08	1.8	4.09	0.8	0.4	

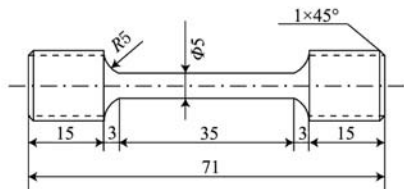


图1 试棒形状

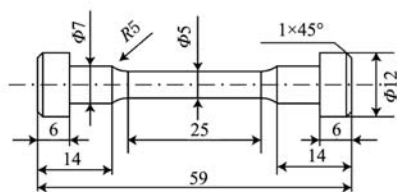
Fig. 1 Shape of the test bar



(a) 试棒毛坯



(b) 高温拉伸试样



(c) 高温持久试样

图2 试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of the test bars

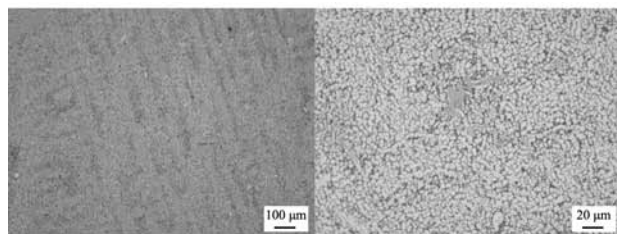
2 结果及讨论

2.1 B元素对合金组织形貌的影响

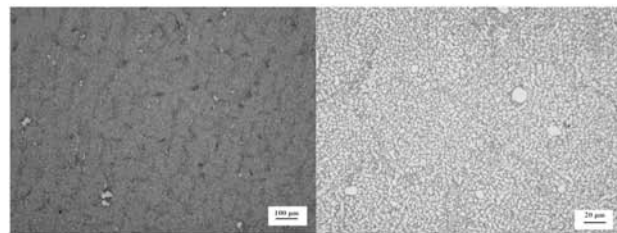
Ni₃Al金属间化合物的晶体结构为具有FCC结构的Cu₃Au型长程有序的面心立方L1₂结构。浇注后,合金的组织呈典型的枝晶形貌,合金主要析出相为:γ相、γ'相和MC。

研究了B元素含量变化对Ni₃Al基高温合金组织的影响规律,如图3所示。由图中可以看出,随着B元素

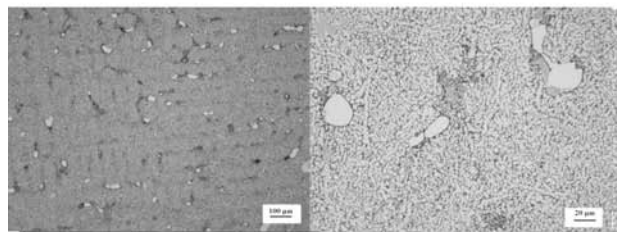
的含量增加,合金中共晶相的含量也显著增加,且γ'相的大小也随之变大。B元素在晶格为中间隙型固溶元素,B元素的引入导致了晶格畸变,随着B元素的含量增加,晶格畸变进一步加大,有可能诱导了共晶相的析出。同时,B元素大多在晶界处偏析,也有利于凝固过程中往往在枝晶间和晶界处偏聚的共晶γ'相的析出。当B含量由0.007%增加至0.04%时,共晶相的含量也由0.08%增加至1.74%,如图4所示。如果B元素的含量进一步升高至超出阈值,除在晶界处析出球状或岛



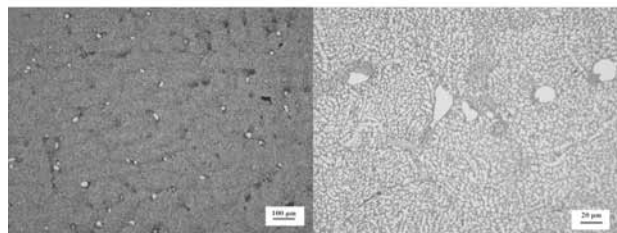
(a) 0.0087% B



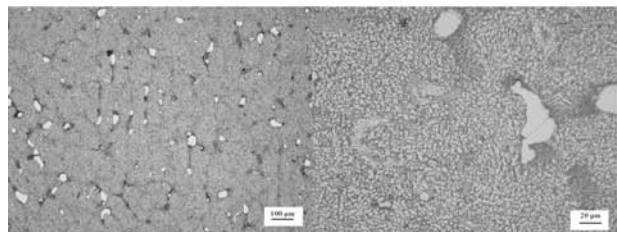
(b) 0.012% B



(c) 0.021% B



(d) 0.032% B



(e) 0.035% B

图3 不同B含量的Ni₃Al基高温合金的组织形貌以及局部放大图
Fig. 3 Microstructures of the Ni₃Al alloys with different B contents

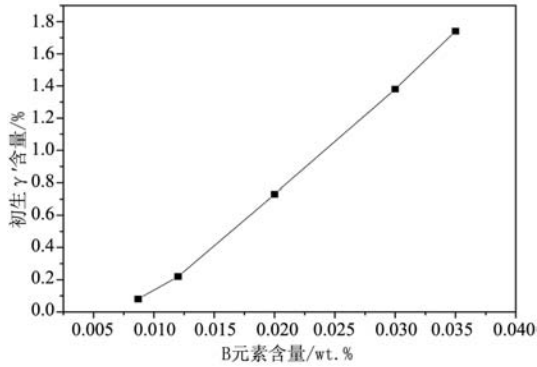


图4 不同B含量对某Ni₃Al基高温合金共晶相的含量影响
Fig. 4 Effect of different B contents on eutectic phase content of a Ni₃Al-based superalloy

状Ni₃Al共晶组织外，还可能会在Ni₃Al基体中析出共晶相硼化物，从而对合金的性能产生不利影响。

2.2 B元素对合金力学性能的影响

研究了B元素含量变化对某Ni₃Al基高温合金性能的影响规律，如表2-表4所示。图5是合金在1 100 °C下的拉伸性能趋势图，可以看出，在1 100 °C的高温下，随着B元素含量的增加，合金的抗拉强度和屈服强度降低，但合金的塑性增强，当B元素增加至0.012%时，合金的塑性达到最大。晶界是Ni₃Al合金脆性的主要原因，在晶界偏析的B元素能够降低晶粒之间的晶界能，

表2 合金在1 100 °C的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of the alloys with different B contents at 1 100 °C

B含量/%	δ_b /MPa	$\delta_{0.2}$ /MPa	δ /%	Ψ /%
0.008 7	337.5	252.5	16.0	27.8
0.012	337.5	242.5	20.5	32.8
0.021	320.0	237.5	14.5	20.0
0.032	320.0	227.5	14.0	20.5
0.035	322.5	225.0	17.3	26.8

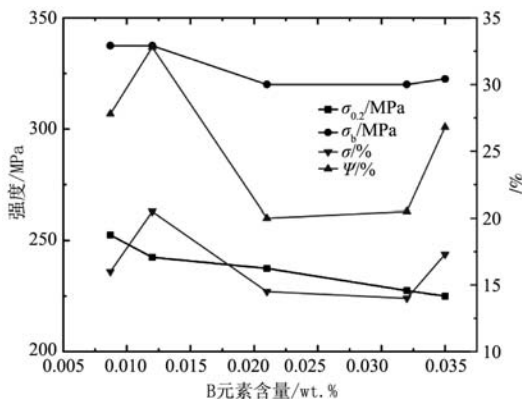


图5 合金在1 100 °C下的拉伸性能
Fig. 5 Variation curves of tensile properties of the alloys with different B contents at 1 100 °C

并增强晶界结合力；同时，B原子的加入占据了氢原子的点阵，并抑制了氢原子的扩散，因而也能实现抑制氢脆，因此，B含量的适当提高能够提高合金塑性。但若B含量过高，由于更多共晶组织的析出，反而会降低Ni₃Al合金的力学性能。

表3和表4分别为合金在1 050 °C/100 MPa和1 100 °C/60 MPa的持久性能，根据性能数据绘制趋势图，如图6和图7所示。从图6中可以看出，B元素的加入能够增加合金1 050 °C/100 MPa的持久寿命和持久塑性，但当B元素的含量大于0.032%时，合金的持久寿命开始降低。图7为合金在1 100 °C/60 MPa的持久性能趋势图，随着B元素的增加，合金的持久寿命和持久塑性增加，当B元素达到0.012%时，合金的持久寿命和持久塑性达到最大。这是由于，作为晶界强化元素的

表3 合金在1 050 °C/100 MPa的持久性能
Table 3 Stress rupture properties of the alloys with different B contents at 1 050 °C/100 MPa

B含量/%	τ /h	δ /%	Ψ /%
0.008 7	40.5	5.8	9.4
0.012	43.2	4.8	9.0
0.021	54.8	5.5	6.72
0.032	43.5	8.9	14.6
0.035	35.3	8.9	12

表4 合金在1 100 °C/60 MPa的持久性能
Table 4 Stress rupture properties of the alloys with different B contents at 1 100 °C/60 MPa

B含量/%	τ /h	δ /%	Ψ /%
0.008 7	55.45	3.45	6.3
0.012	73.05	3.7	6.05
0.021	54.6	3.7	6.7
0.032	54.6	4.9	10
0.035	59.1	4.9	11

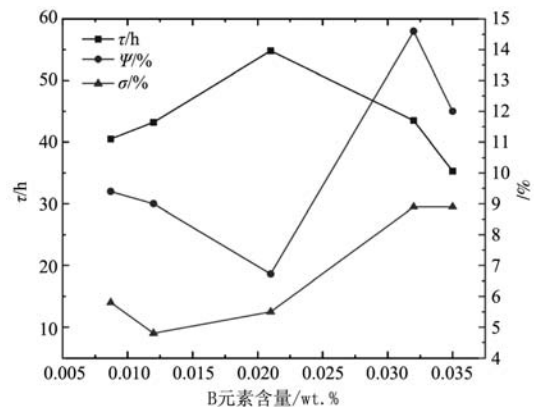


图6 合金在1 050 °C/100 MPa的持久性能
Fig. 6 Variation curves of stress rupture properties of the alloys at 1 050 °C/100 MPa

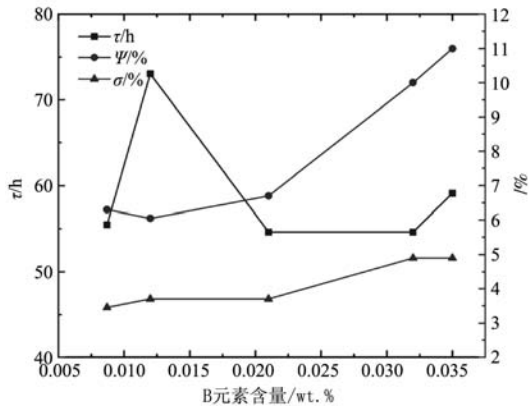


图7 合金在1 100 °C/60 MPa的持久性能

Fig. 7 Variation curves of stress rupture properties of the alloys at 1 100 °C/60 MPa

B元素的加入能够强化晶界，同时加入B元素引发的晶格畸变，导致了较高的界面错配度，使得合金在高温

参考文献:

- [1] REED R C. The superalloys: fundamentals and applications [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006: 19.
- [2] 吴静, 刘永长, 李冲, 等. 高Fe、Cr含量多相Ni₃Al基高温合金组织与性能研究进展 [J]. 金属学报, 2020, 56 (1): 21–35.
- [3] 董虹星, 贺跃辉. Ni₃Al金属间化合物的研究进展 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14 (2): 83–88.
- [4] 钟江伟. 新型Ni₃Al基JG4246A合金热加工基础研究及铸造工艺优化 [D]. 清华大学, 2020.
- [5] OCHIALI S, OYA Y, SUZUKI T. Alloying behaviour of Ni₃Al, Ni₃Ga, Ni₃Si and Ni₃Ge [J]. Acta Metallurgica, 1984, 32 (2): 289–298.
- [6] AOKI K, IZUMI O. Improvement in room temperature ductility of the Ni₃Al type intermetallic compound Ni₃Al by boron addition [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1979, 43 (12): 1190–1196.
- [7] LIU C T, WHITE C L, HORTON J A. Effect of boron on grain-boundaries in Ni₃Al [J]. Acta Metallurgica, 1985, 33 (2): 213–229.
- [8] 郭建亭, 李辉, 孙超, 等. Zr, Cr和B对Ni₃Al合金组织和力学性能的影响 [J]. 金属学报, 1989 (6): 22–29.

Research on the Influence of B Content on Microstructure and Properties of a Ni₃Al Based Superalloy

SUN Chang-bo¹, WU Bao-ping², FENG Qiu-shui³, SUN Jia-yan³, WANG Fu-de⁴, JIAO Jun-hong¹, XU Qing-yan³

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110143, Liaoning, China; 2. DEKAI Intelligent Casting Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China; 3. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology (MOE), School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Second Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Shenyang, Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract:

Ni₃Al based superalloy has excellent high temperature properties such as high creep strength, corrosion resistance and oxidation resistance. As a multi-component intermetallic compound, the change of alloy composition will directly affect the performance of the Ni₃Al-based superalloy. In order to optimize the alloy composition and obtain the best alloy properties, the effect of the content of grain boundary strengthening element B on the microstructure and properties of the Ni₃Al-based superalloy was studied. The results showed that the rupture time and plasticity of the alloy were increased by reasonably controlling the content of the B element. When the content of the B was between 0.012% and 0.021%, the tensile properties and the durability properties of the alloy at 1 100 °C and 1 050 °C /100 MPa and 1 100 °C /60 MPa were the best.

Key words: Ni₃Al-based; superalloy; composition design

持久时，持久寿命和持久塑性得到提高，但是B元素过高同样会导致共晶相显著增加，从而导致裂纹沿共晶相开裂，持久寿命降低。综上考虑，B元素控制在0.012%~0.021%，合金在1 100 °C的拉伸性能和1 050 °C /100 MPa和1 100 °C/60 MPa的持久性能达到最佳。

3 结论

(1) B元素能够显著增加合金中的共晶含量。

(2) 随着B元素含量的增加，合金的抗拉强度和屈服强度降低，但合金的塑性随着升高。

(3) 随着B元素的增加，合金的持久寿命和持久塑性显著增加，B元素含量在0.012%~0.021%时，合金在1 100 °C的拉伸性能和1 050 °C/100 MPa及1 100 °C/60 MPa的持久性能达到最佳。