

Al 含量对镍基高温合金组织和性能的影响

孙跃军¹, 尚勇¹, 刘彩琴², 张军³

(1. 辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中平能化集团 天工机械制造有限公司, 河南 平顶山 467000; 3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要:利用真空感应熔炼炉制备了不同 Al 含量的镍基合金,研究了 Al 含量对镍基合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,当 Al 含量为 9.5wt%时,合金铸态组织主要由 γ' 相和 γ 相组成;当 Al 含量超过 10.5wt%时,合金中出现 β (NiAl)相;当 Al 含量超过 13.5wt%时,合金中出现 α (Cr)相;当 Al 含量达到 17.5wt%时,合金中的 γ' 和 γ 相消失,主要由 β (NiAl)相和 α (Cr)相组成。随着 Al 含量的提高,合金的强度和伸长率呈下降趋势,断裂由穿晶向沿晶转变。

关键词:Al 含量; 镍基高温合金; β 相; 拉伸强度; 断裂

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2012)20-0079-03

Effect of Al Content on Microstructure and Properties of Ni-based Superalloy

SUN Yuejun¹, SHANG Yong¹, LIU Caiqin², ZHANG Jun³

(1. Liaoning Technical University, School of Material Science and Engineering, Fuxin 123000, China; 2. Zhongping Energy and Chemical Group, Tiangong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Pingdingshan, 467000, China; 3. Institute of Mechanics Chinese Academy of Science., Beijing 100190, China)

Abstract: Ni-based superalloys with different Al content were prepared and the microstructure and mechanical properties were investigated. The microstructure of the as-cast alloys changes with the adding of aluminum. The primary microstructure is composed of γ and γ' , when Al content is 9.5wt%. And β (NiAl) and α (Cr) phases are observed, when the Al content is higher than 10.5% and 13.5%, respectively. The γ and γ' phase disappear, when the Al content is 17.5%, then the microstructure is mainly composed of β (NiAl) and α (Cr) phase. The ultimate strength and ductility of the alloys decrease with the addition of aluminum, and the fracture mode changes from intergranular fracture into transgranular fracture.

Key words: Al content; Ni-based superalloy; β phase; tensile strength; fracture

γ' (Ni₃Al)是镍基高温合金的增强相, γ' 数量的多少对镍基合金的性能影响很大。随着镍基合金的发展,合金中 γ' 相由最初的 20%提高到 65%左右^[1]。Al 是 γ' 相形成的主要元素,其含量的多少影响着 γ' 相数量及合金的性能^[2]。目前应用的镍基合金中,Al 含量的大致范围为 7.98wt%~11.3wt%^[3]。为研究 Al 含量对镍基合金组织及性能的影响,本文选用商用镍基合金,研究了 Al 含量由 9.5wt%提高到 17.5wt%时合金的组织及性能变化,以期为镍基合金的设计与开发提供数据。

1 实验材料及方法

所用镍基合金的成分及编号见表 1。

用 DHL-400 电弧熔炼炉熔炼镍基合金铸锭;用 DK7732 型线切割机制备拉伸试样,试样尺寸见图 1。

表 1 试验用合金的成分(质量分数,%)

Tab.1 Nominal composition of the experiment alloys (wt,%)

编号	Al	Ti	W	Mo	Cr	Ta	Hf	C	Ni
1	9.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
2	10.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
3	11.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
4	12.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
5	13.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
6	14.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
7	15.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
8	16.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量
9	17.5	1	2	3.5	6	2	0.5	0.01	余量

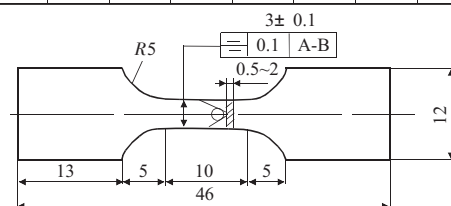


图 1 拉伸试样形状及尺寸

Fig.1 Sketch image of the tensile specimen

试样制备好后,用金相砂纸打磨到 400#,然后用

收稿日期:2012-03-28

作者简介:孙跃军(1972-),男,内蒙古赤峰人,副教授,从事金属材料强
韧化研究;E-mail:sunyuejun0001@163.com

MTS810 拉伸试验机测试合金拉伸性能，用 TEM、SEM 观察合金的微观组织和断口形貌。

2 试验结果及分析

2.1 合金铸态组织

为鉴别不同合金中的相组成，首先对合金进行 XRD 分析，结果见图 2。可看出，当 Al 含量为 9.5% 时，

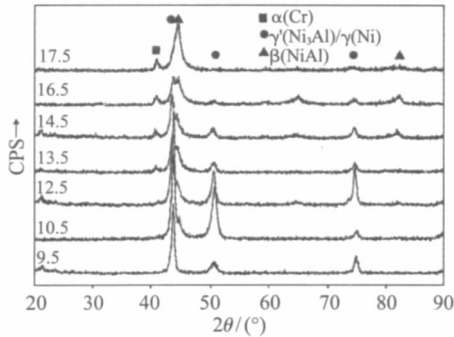


图 2 Al 含量不同时合金的 XRD 图
Fig.2 X-ray diffraction pattern of the alloys with different Al content

合金中的相主要由 γ' (Ni₃Al)和 γ (Ni 基固溶体)组成。当 Al 含量超过 10.5% 时，合金中出现 β (NiAl)相；当 Al 含量超过 13.5% 时，合金中出现 α (Cr)相；当 Al 含量达到 17.5% 时，合金中的 γ' 和 γ 相消失，主要由 β (NiAl)相和 α (Cr)相组成。

根据图 2 中的 XRD 测试结果，对典型成分合金的铸态组织进行观察与分析，不同 Al 含量时合金的铸态组织见图 3。由图 3(a)可看出，当 Al 含量为 9.5% 时，合金中的铸态微观组织主要由黑色大块状的 γ' 相和灰黑色的小块状以及编织状的 γ' 和 γ 组成，此时大块状的 γ' 数量相对较少。当 Al 含量提高时黑色大块状的 γ' 数量增多(见图 3(b))，编织状的 γ' 和 γ 数量减少。当 Al 量提高至 16.5% 时，大块状的 γ' 相转变为 β (NiAl)相(见图 3(c))，编织状的 γ' 和 γ 数量大幅度减少，且被 β 相包围，在 β 相内出现白色颗粒状 α (Cr)相。

图 4 为 α (Cr)相的 TEM 形貌。可看出， α 相的形

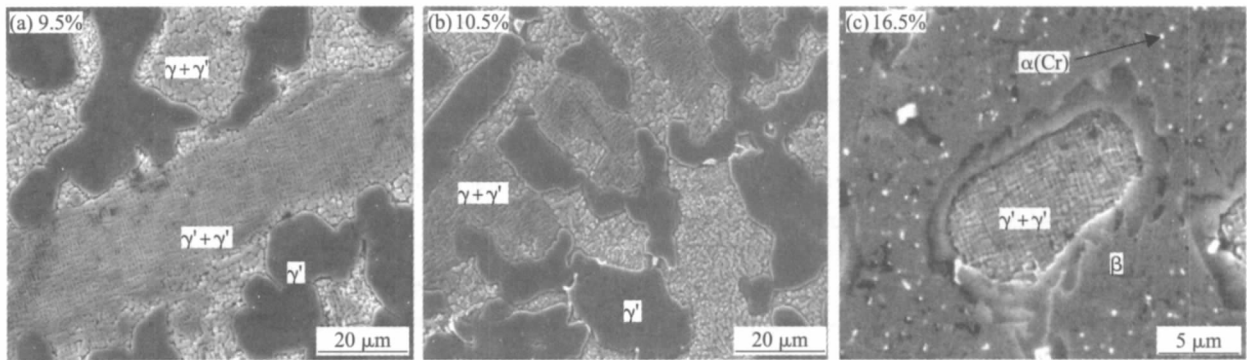


图 3 Al 含量不同时合金的铸态组织
Fig.3 Microstructure of the alloys with different Al content

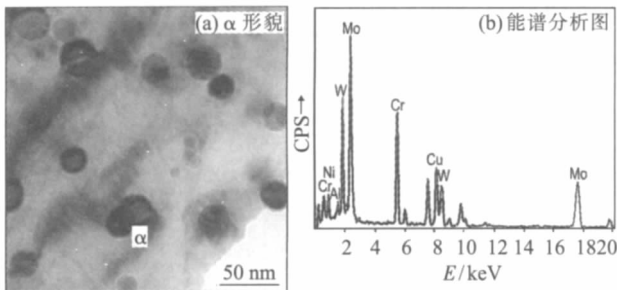


图 4 合金中 α (Cr)相的形貌
Fig.4 TEM observation of α phase in the alloys

态是椭圆形的，经 EDS 分析， α 相中的主要元素是 Mo、W 和 Cr。Lapin 等研究了 Ni-Al-Cr-Ti 合金中 α -Cr 的形成^[4]，结果表明，合金中的 α -Cr 直接由 β 相析出，形态为圆形。因此可判断，本研究中的 α -Cr 也直接由 β 相析出。

2.2 合金在温室下的拉伸性能

合金的室温拉伸性能见表 2。可看出，当 Al 含量为 9.5% 时，合金的抗拉强度为 1035 MPa，伸长率为 14.6%。随着 Al 含量的提高，合金的强度和伸长

表 2 合金在室温下的拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of the alloys at 298 K

编号	Al 含量(wt%)	抗拉强度 / MPa	伸长率 (%)
1	9.5	1035	14.6
2	10.5	951	13.5
3	11.5	938	8.5
4	12.5	896	8.5
5	13.5	512	4.5
6	14.5	492	4.3
7	15.5	219	3.0
8	16.5	106	2.0
9	17.5	80	0.9

率都呈下降趋势。当 Al 含量提高至 11.5% 时,其伸长率降低较为明显;当 Al 含量提高至 13.5% 时,其强度和延伸率急剧降低;当 Al 含量达到 17.5% 时,其强度仅为 80 MPa,伸长率接近于 0。

图 5 为不同 Al 含量合金的拉伸断裂断口形貌。

可看出,随着 Al 含量的增加,合金的断裂模式由沿晶断裂转变为穿晶断裂。Al 含量较低时,合金断口中有剪切唇存在;当 Al 含量提高时,合金断口中出现大量解理面。

根据合金微观组织和断口形貌可知,合金中 Al

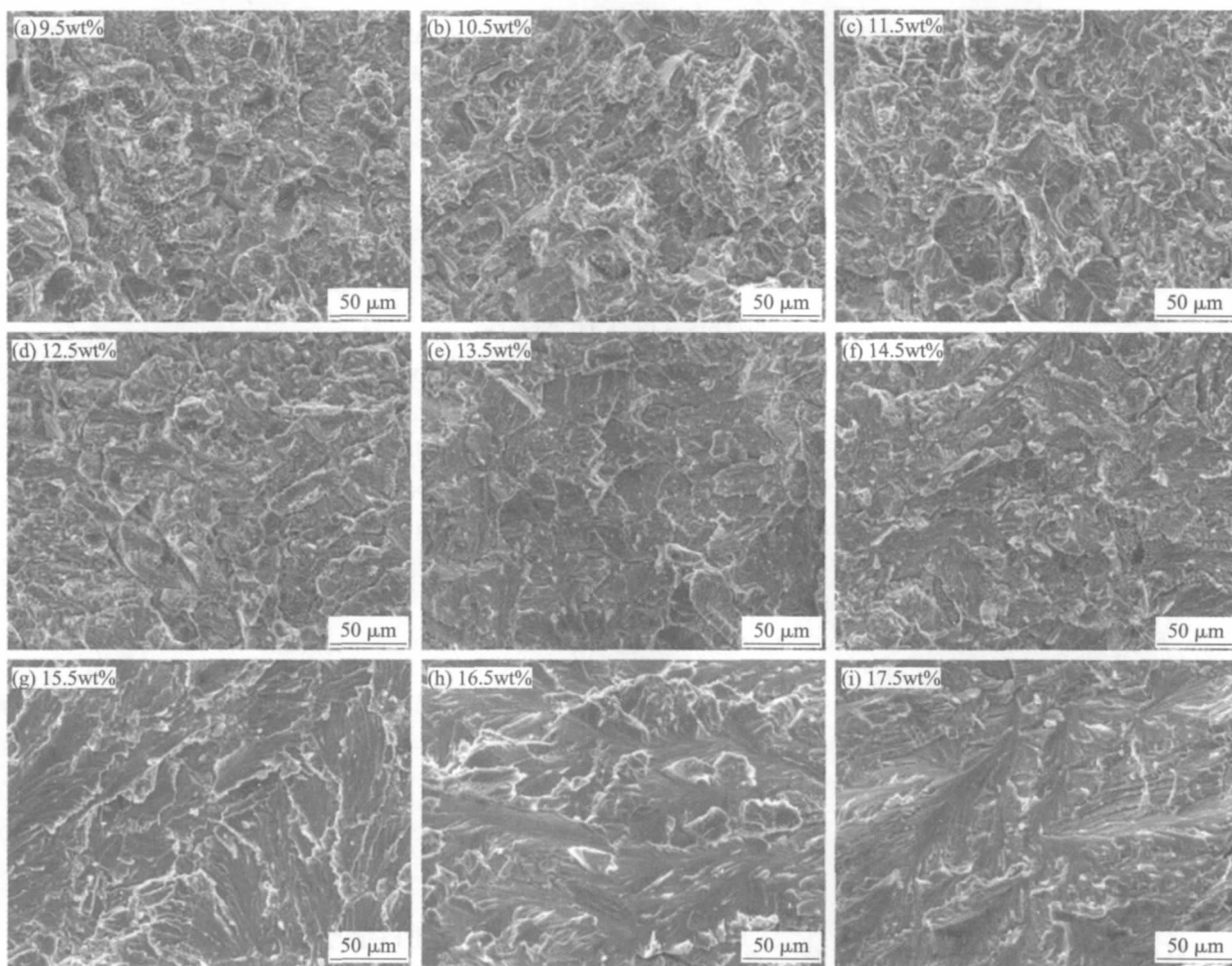


图 5 不同 Al 含量时合金的拉伸断口形貌

Fig.5 SEM micrographs showing typical features of tensile fracture surface of alloys with different Al content

含量较低时,合金的微观组织由 γ 和 γ' 相组成,均匀分布的 γ' 相有效阻碍了位错运动^[5],所以合金具有了较高的拉伸强度。在拉伸过程中,韧性较好的 γ 相对合金中的显微裂纹扩展起到有效的能量吸收作用^[6],因此合金具有较高的延展性。随着 Al 含量的增多,合金中有 β -NiAl 和 α -Cr 形成, β 相本身是脆性相,所以显微裂纹很容易在硬脆的 γ'/β 的相界面形核,并沿着 γ'/β 界面扩展,合金的延展性剧烈的下降。尽管 α -Cr 本身对合金的性能影响不大,但是在 α -Cr 形成过程中,强化 γ' 和 β 相的高熔点元素 Mo 和 W 溶解到了 α 相中,造成 γ' 和 β 相中强化元素数量减少,进而导致合金强度降低。

3 结论

(1) 对于测试合金,当 Al 含量为 9.5% 时,铸态微观结构由细小的 $\gamma+\gamma'$ 和粗大的 γ' 相组成。随着 Al 含量的增加, $\gamma+\gamma'$ 相的数量减少,粗大的 γ' 相增多。

(2) 合金中 Al 含量超过 10.5% 时,合金中出现 β (NiAl) 相,Al 含量超过 13.5% 时,合金中出现 α (Cr) 相,Al 含量达到 17.5% 时,合金主要由 β (NiAl) 相和 α (Cr) 相组成。

(3) 合金中 Al 含量增加时,合金的拉伸强度和塑性都呈下降趋势,断裂模式由穿晶断裂转变为沿晶断裂,这些都是脆性 β (NiAl) 相所致。(下转第 88 页)

于位错运动切过 C-Me 原子团偏聚区需要较高的能量随后进入贫 Me 区,位错运动阻力减小,应变所需应力陡降,在曲线上表现为这种周期性的锯齿线。

3 结论


(1) C-Me 强键共价电子数远大于原奥氏体晶胞最强键共价电子数 0.3299,约为 3 倍,在富 Me 区形成 -C-Me-C-Me- 牢固的强键区。

(2) Fe-C-Me 原子团偏聚有效地阻滞了滑移系的启动以及位错的运动,提高了 TWIP 钢的加工硬化能力;Fe-C-Me 原子团偏聚是工程应力应变曲线上出现“锯齿线”的原因所在。

(3) 30Mn25Cr10Ni2MoNbRe 的硬化过程可分为两个阶段:第一阶段为基体强化;第二阶段为孪晶界面与基本强化共同作用。

参考文献:

- [1] 米振莉. 新一代汽车用高强度高塑性 TWIP 钢的研究与开发 [D]. 北京:北京科技大学,2007.
- [2] 代永娟,米振莉,唐荻,等. Fe-Mn-C 第 TWIP 钢的组织 and 性能 [J]. 上海金属,2007,(5):132-135.


- [3] 宋开红,李春福. 单一并径大膨胀率膨胀套管用 TWIP 钢的研究 [D]. 成都:西南石油大学,2011.
- [4] Frommeyer G. Supra-ductile and high strength manganese TRIP/TWIP steels for high energy absorption purpose [J]. ISIJ. International,2003,43:438-439.
- [5] 余瑞璜. 固体与分子经验电子理论 [J]. 科学通报,1978,23(4):27-34.
- [6] 刘志林,李志林,刘伟东. 界面电子结构与界面性能[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [7] 刘志林. 合金价电子结构与成分设计[M]. 吉林:吉林科学技术出版社,1990.
- [8] 刘志林,戴天时. 低合金超高强度钢马氏体的价电子结构及期对强韧性的影响[J]. 科学通报,1990,(12):891-894.
- [9] Zhu Ruifu, Lu Yupeng, Zhang Fucheng. Valence electron structure of high manganese steel and its intrinsic property[J]. Mechanical Properties Materials Design Conference.,1990,48:629-634.
- [10] 朱瑞富,李士同,刘玉先,等. Fe-C-Mn 合金中的 C-Me 偏聚及其对相变和形变的影响 [J]. 中国科学 (E 辑),1998,27(3):193-200.
- [11] Hirsch J, Lucke K, Hatherly M. Mechanism of deformation and development of rolling textures in polycrystalline fcc metals. 111. the influence of slip in homogeneities and twinning [J]. Acta. Metall.,1988,36:2905-2927. 

(上接第 81 页)

参考文献:

- [1] Sikka V K, Deevi S C, Viswanathan S, *et al.* Advances in processing of Ni₃Al-based intermetallics and applications [J]. Intermetallics,2000,(8):1329-1337.
- [2] Mrakumo T, Koizumi Y, Kobayashi K. Creep strength of Ni-base single-crystal superalloys on the γ/γ' Tie-line [J]. Superalloys,2004,45:155-162.
- [3] Koizumi Y, Harada H. High temperature tensile properties of a series of nickel-base superalloys on γ/γ' tie-line [J]. Mater.

Sci. Eng.,1997,A223:59-63.

- [4] Lapin J, Pelachova T, Bajana O. Microstructure and mechanical properties of a directionally solidified and aged intermetallic Ni-Al-Cr-Ti alloy with $\beta-\gamma'-\gamma-\alpha$ structure [J]. Intermetallics,2000,(8):1417-1427.
- [5] Merabtine R, Devaud-Rzepski J, Trichet M F, *et al.* Two-phase intermetallic alloy Ni₃(Al,Si):microstructure and mechanical properties[J]. Intermetallics,2001,(9):1015-1020.
- [6] Xu H P, Ngan A H, Duggan B J, *et al.* Toughening of γ' -Ni₃Al by γ precipitation [J]. Materials Letters,1997,31:233-237. 

(上接第 84 页)

- [4] 张宝红,张治民,李大旭. 正挤压对铸态 AZ31 镁合金组织与性能的影响 [J]. 轻金属加工技术,2009,37(10):39-41.
- [5] Stanford N, Geng J, Chun Y B, *et al.* Effect of plate-shaped particle distributions on the deformation behavior of magnesium alloy AZ91 in tension and compression [J]. Acta. Mater., 2012,60(1):218-228.
- [6] 孙付涛,陈拂晓,杨永顺,等. 铸态 AZ31B 镁合金热压缩实验研究 [J]. 热加工工艺,2008,37(5):26-28.
- [7] Liu C L, Liu T M, Liu D J, *et al.* Effect of heat treatment on

tension-compression yield asymmetry of AZ80 magnesium alloy [J]. Mater. Design,2012,33:529-533.

- [8] Yin S M, Wang C, Diao Y, *et al.* Influence of grain size and texture on the yield asymmetry of Mg-3Al-1Zn alloy [J]. J. Mater. Sci. Technol.,2011,27(1):29-34.
- [9] Yin D L, Wang J T, Liu J Q, *et al.* On tension-compression yield asymmetry in an extruded Mg-3Al-1Zn alloy [J]. J. Alloy Comp.,2009,478:789-795.
- [10] Hosford W F, Caddell R M. Metal Forming:Mechanics and Metallurgy [M]. USA:Prentice-Hall,1983. 