

Ti 对 Nb-20Si-5Al 超高温合金性能的影响

龙文元 陈 勤
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 采用放电等离子烧结法 (SPS) 制备了 Nb-20Si-5Al-*x*Ti (*x* = 0, 18, 20, 22, 摩尔分数) 超高温合金, 研究了 Ti 加入量对 Nb-20Si-5Al 合金的室温断裂韧度和高温抗氧化性的影响。结果表明, 随着 Ti 加入量的增加, 超高温合金的相组成由 Nbss、Nb₅Si₃ 和 Al₃Nb 相转变成成为 Nbss、(Nb, Ti)₅Si₃ 和 Ti 相。Ti 能明显改善 Nb-20Si-5Al 超高温合金的断裂韧度和高温抗氧化性能, 随着 Ti 加入量的增加均先提高然后降低, 在 Ti 加入量为 20% 时, 合金断裂韧度最大, 为 7.41 MPa·m^{1/2}, 相比未加 Ti 时提高了约 56.9%, 其高温氧化速率最低, 为 0.72×10⁻⁴ g²/(cm⁴·h)。添加 Ti 元素后, 其氧化产物中出现 Ti₂Nb₁₀O₂₉、TiNb₂O₇、TiO₂ 等, 可以提高其氧化膜的致密性, 从而提高高温抗氧化性能。

关键词 放电等离子烧结; Nb-Si 超高温合金; 高温抗氧化性; 断裂韧性

中图分类号 TG146 **文献标志码** A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2021.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ti Addition on the Properties of Nb-20Si-5Al Ultrahigh Temperature Alloy

Long Wen Yuan, Chen Qin

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: Nb-20Si-5Al-*x*Ti (*x* = 0, 18, 20, 22, %) ultrahigh temperature alloys were prepared by the spark plasma sintering (SPS) technology. The effects of Ti addition on the fracture toughness and high temperature oxidation resistance of the alloys were analyzed. The results reveal that the phase composition of Nb-20Si-5Al ultrahigh temperature alloys is transformed from Nbss, (Nb, Ti)₅Si₃ and Al₃Nb to Nbss, (Nb, Ti)₅Si₃, Ti and Al₃Ti phases. The fracture toughness and high temperature oxidation resistance of alloys can be obviously improved with the addition of Ti element, which are both increased firstly and then decreased with the increase of Ti content. When the content of Ti is 20%, the fracture toughness reaches the maximum value of 7.41 MPa·m^{1/2}, which is 56.9% higher than that of one without Ti, and the high temperature oxidation rate is the lowest, which is 0.72×10⁻⁴ g²/(cm⁴·h). After adding Ti, Ti₂Nb₁₀O₂₉, TiNb₂O₇, TiO₂ and so on can be observed in the oxidation products, which improve the compactness of the oxide film, thus enhancing the oxidation resistance at high temperature.

Key Words: SPS, Nb-Si Based Ultrahigh Temperature Alloy, High Temperature Oxidation Resistance, Fracture Toughness

随着航空工业的迅速发展,航空发动机的推重比越来越高,对其叶片材料的耐高温能力要求也相应提高,

收稿日期: 2020-09-25; **修改稿收到日期:** 2020-11-05
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51271091); 江西省自然科学基金资助项目(20161BAB206107)
第一作者简介: 龙文元, 男, 1971 年出生, 教授, 南昌(330063), E-mail: longwy@nchu.edu.cn
引用格式: 龙文元, 陈勤. Ti 对 Nb-20Si-5Al 超高温合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 279-283.
LONG W Y, CHEN Q. Effect of Ti addition on the properties of Nb-20Si-5Al ultrahigh temperature alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 279-283.

[16] ZHANG Y A, ZENG X Q, LIU L F, et al. Effects of yttrium on microstructure and mechanical properties of hot-extruded Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A373 (1-2): 320-327.

[17] LEE J Y, KIM D H, LIM H K, et al. Effects of Zn/Y ratio on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloys[J]. Materials Letters, 2005, 59(29-30): 3 801-3 805.

[18] LIU J F, YANG Z Q, YE H Q. Solid-state formation of icosahedral quasicrystals at Zn₃Mg₃Y₂/Mg interfaces in a Mg-Zn-Y alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 65-69.

[19] BAE D H, LEE M H, KIM K T, et al. Application of quasicrystalline particles as a strengthening phase in Mg-Zn-Y alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 342(1-2): 445-450.

[20] SINGH A, SOMEKAWA H, MUKAI T. High temperature processing of Mg-Zn-Y alloys containing quasicrystal phase for high strength[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528 (21): 6 647-6 651.

(编辑:张正贺)

而目前大多数镍基高温合金的工作温度已接近其极限值^[1]。因此,开发能承受 1 200 ℃以上高温的新型结构材料具有重要意义。Nb-Si 基超高温合金具有高熔点、低密度、良好的高温强度和抗蠕变性,已成为最具吸引力的新一代高温结构材料,有望替代镍基高温合金应用于航空发动机的高温结构部件^[2]。但是,其高温抗氧化性能差、室温断裂韧度低等是其应用于航空发动机的高温结构部件的最大挑战。

近年来,研究发现,通过添加合金元素不仅能够改善 Nb-Si 基超高温合金的室温断裂韧度,同时还可以提高其高温抗氧化性^[3~15]。MURAYAMA Y 等^[16]研究发现,在 Nb-Si-Al 合金中添加少量 Ti 元素后,其组织组成为: Nbss、Nb₃Al、Nb₅Si₃, Ti 主要以固溶形式存在,不仅能够改善其室温断裂韧度,同时高温抗氧化性能也得到了提高,但是其高温抗蠕变性能有所降低。SUN Z P 等^[17]研究发现,添加 9% 的 Al 可以使 Nb-14Si-18Ti 合金的断裂韧度从 7.85 MPa·m^{1/2} 提高到 11.1 MPa·m^{1/2},但是 Ti 加入量进一步增加到 21% 时,其断裂韧度又降至 10.9 MPa·m^{1/2}。WANG F X 等^[18]研究发现,在 Nb-20Si-6Mo 合金中添加 Ti 元素,会降低其高温压缩性能。王高举等^[19]发现 Ti 对 Nb-Si 基合金组织中的初生(Nb,X)₅Si₃相的晶型及其含量影响较大,随着 Ti 加入量增加,初生的 α-(Nb,X)₅Si₃相会逐步转化为 γ-(Nb,X)₅Si₃相;当 Ti 加入量达到 22% 时,全部转变成 γ-(Nb,X)₅Si₃相。姜惠仁等^[20]研究认为,在 Nb-Si 合金中 Ti 可以减小合金氧化物与形成氧化物需要的金属体积比(PBR),有效地提高氧化膜的完整性,阻碍氧的扩散,从而改善其高温抗氧化性能。

综上所述,在 Nb-Si 合金中添加 Ti 元素进行合金化,采用不同的合金化方案,其对性能的影响也有所不同,而且加入量也有较大的影响。因此,本课题拟通过放电等离子烧结法(SPS)进行粉末烧结,原位合成 Nb-20Si-5Al-xTi(x=0、18、20、22,摩尔分数,下同)合金,探讨 Ti 对 Nb-20Si-5Al 超高温合金的断裂韧度和高温抗氧化性的影响机制。

1 试验材料及方法

以纯 Nb 粉(200 目,99.9%)、纯 Si 粉(300 目,99.6%)、纯 Al 粉(200 目,99.5%)和纯 Ti 粉(200 目,99.5%)为原料,按 Nb-20Si-5Al-xTi 进行复合粉体制备。

将按比例称好的 Nb 粉、Si 粉、Al 粉和 Ti 粉装入球磨罐中,然后加入适量的酒精在氩气保护下球磨混料 6 h;最后在真空下进行干燥、研磨得到 Nb-Si-Al-Ti 复

合粉体。将混合好的复合粉体装入 φ26 mm 的三高(高纯、高强、高韧)石墨模具中,在 SPS-3.20Mk II 型放电等离子烧结机中于真空气氛下进行烧结,以 100 ℃/min 的速度升温,施加 40 MPa 轴向压力,在 1 500 ℃下保温 10 min。用 D/MAX-RB 型 X 射线衍射仪(XRD)分析试样的相组成;用 JSM-5610LV 型扫描电镜(SEM)来观察试样的显微组织和断口形貌;采用 Instron-1186 电子万能试验机测试断裂韧度。氧化动力学研究采用氧化增重试验,将试样切成 3 mm×6 mm×6 mm 的块体,依次用 200、400、600、800、1000 号砂纸打磨抛光后,再用酒精、丙酮清洗干燥。氧化试验在马弗炉中进行,氧化温度为 1 250 ℃,采用电子分析天平连续称重。

2 试验分析和讨论

2.1 微观组织

Nb-20Si-5Al-xTi 合金的 XRD 分析结果和 SEM 组织分别见图 1 和图 2。可以看出,Nb-20Si-5Al 合金组织主要由白色的 Nbss 相、暗灰色的 γ-Nb₅Si₃ 相和黑色的 Al₃Nb 颗粒相组成^[21]。在 Nb-Si 化合物中以 α-Nb₅Si₃ 相最稳定,因此通常在 Nb-Si 合金中是由 Nbss 和 α-Nb₅Si₃ 相组成,但是 Al 的加入可促进合金中的 α-Nb₅Si₃ 相向 γ-Nb₅Si₃ 相转变。当加入 Ti 元素后,Nb₅Si₃ 相转变成 γ-(Nb,Ti)₅Si₃ 相,Al₃Nb 相逐渐消失。此外,还可发现黑色颗粒相中小颗粒相减少,逐渐出现大颗粒相,结合图 1 可以判断小颗粒相为 Al₃Nb 相,大颗粒相为残余 Ti 相。Ti 优先固溶在 Nbss 相中,多余的 Ti 将与 Si 反应生成 Ti₅Si₃ 相,并与 γ-Nb₅Si₃ 相固溶在一起形成 γ-(Nb,Ti)₅Si₃ 相,其他以 Ti 单质形式存在。当 Ti 含量进一步增加到 20% 和 22% 时,随着 Ti 含量的增加,黑色 Ti 颗粒相也随之增多,细小的 Al₃Nb 相消失,Al 较均匀地分布在 Nbss 相和 (Nb,Ti)₅Si₃ 相,见图 2c 和图 2d。SUN Z P 等^[17]研究也发现在 Nb-Si 合金中加入 Al 会与 Nb 形成金属间化合物,不同

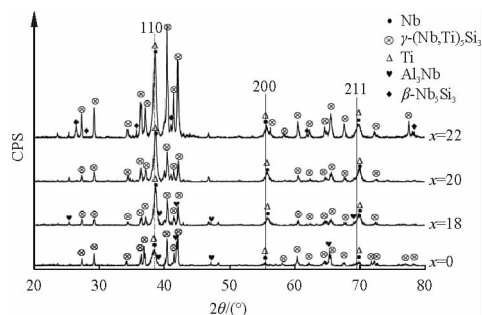


图 1 Nb-20Si-5Al-xTi 合金的 XRD 图

Fig.1 XRD patterns of Nb-20Si-5Al-xTi alloys

的是其生成相为 AlNb_3 相;当加入 18% 的 Ti 时,该金属间化合物还存在,但是当 Ti 加入量为 21% 时, AlNb_3 相消失,这与本课题的结果是一致的。当 Ti 加入量达到 22% 时,又出现了 $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 相衍射峰。由此可见,有

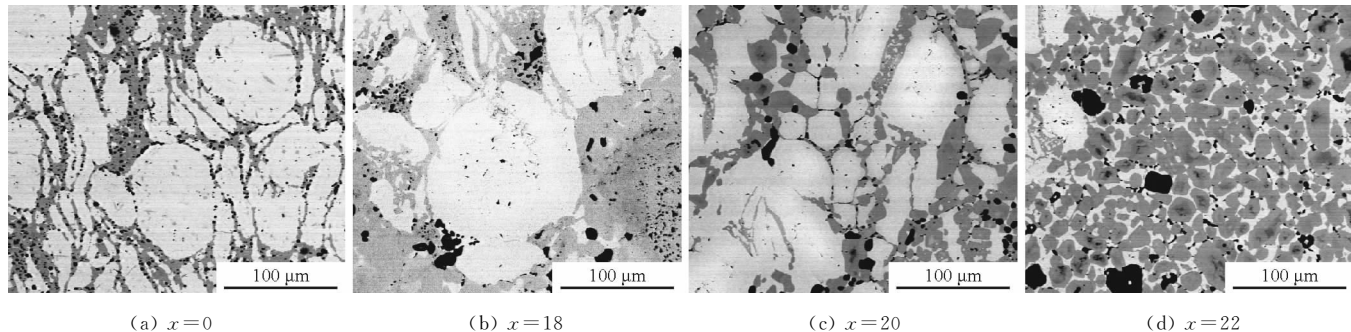


图 2 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的 SEM 显微组织

Fig.2 SEM images of microstructure of Nb-20Si-5Al- x Ti alloys

定 $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 相的作用。

2.2 断裂韧性

Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的断裂韧性测试结果见图 3。可以看出,随着 Ti 含量增加,其断裂韧性 K_{IC} 先增高后降低。当 Ti 含量低于 18% 时断裂韧性变化不明显,而高于 18% 时,断裂韧性快速提高,在 20% 时达到最大值,为 $7.41 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。当 Ti 含量继续增至 22% 时,其断裂韧性又有所降低。这是因为 Ti 首先有一部分固溶在 Nbss 基体中起到固溶强化作用;其次可以与 Si 反应合成 Ti_5Si_3 相,随着 Ti 含量增加,反应所生成的 Ti_5Si_3 相量也逐渐增加,从而可改善复合材料的断裂韧性。但当 Ti 含量为 22% 时,Ti 含量过多,Nb 含量越来越少, Ti_5Si_3 相的量不再增加,多余的 Ti 元素主要以单质 Ti 形式存在,同时还会使得一部分 $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 相转变成 $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 相转变,从而导致材料 K_{IC} 值降低。楚晓晨^[23]基于第一性原理计算研究结果,也表明 $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 相比 $\alpha\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 和 $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ 相具有更好的韧性。

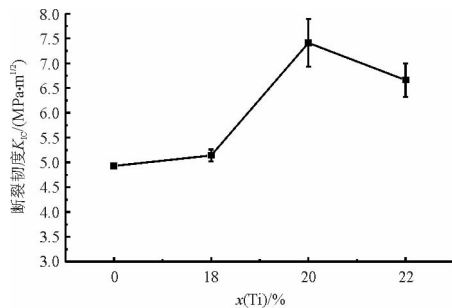


图 3 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的断裂韧性

Fig.3 The fracture toughness of Nb-20Si-5Al- x Ti alloy

图 4 为复合材料断口形貌的 SEM 图。可以看出,试样的断口形貌均以大小不一的台阶状裂纹以及河流状花纹为主,由此可见 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的断裂方式以解理断裂为主。其中,不添加 Ti 时,断口形貌存在较多呈河流状花纹状的大解理面;当 Ti 含量为 18% 时,断口形貌主要以台阶状的解理面为主,同时存在一些撕裂棱和韧窝;而当 Ti 含量增加到 20% 时,断口形貌中的撕裂棱和韧窝越来越多,其中解理面也主要以光

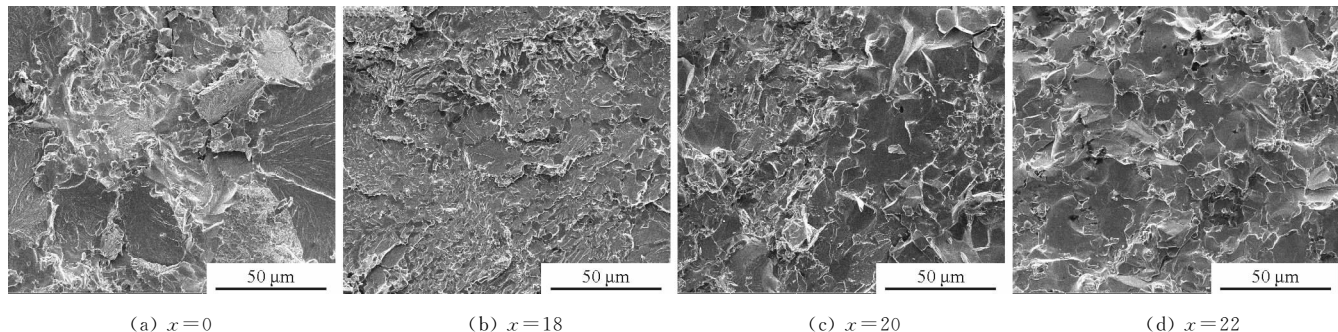


图 4 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的断口形貌

Fig.4 SEM images of fracture morphology of Nb-20Si-5Al- x Ti alloy

滑面为主,此时断裂韧性最高;Ti 含量进一步增加到 22% 时,撕裂棱和韧窝又逐渐减少,以光滑的解理面为主,断裂韧性也因此有所下降。

2.3 高温抗氧化性

Nb-20Si-5Al- x Ti 合金在 1250°C 时的氧化曲线见图 5。试样的氧化增重曲线基本上都呈抛物线规律,表

1 为合金试样在 1 250 ℃下的氧化速率(k_p),其计算如下^[24]:

$$k_p = \frac{1}{t} \left(\frac{\Delta m}{A} \right)^2$$

式中, Δm 为试样的氧化增重,g; A 为试样的表面积, cm^2 ; t 为氧化时间,h。

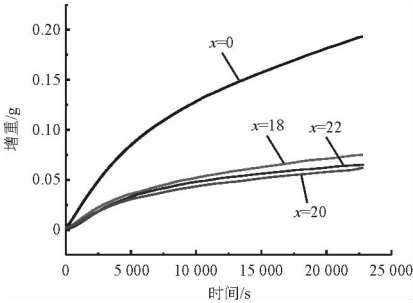


图 5 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金在 1 250 ℃氧化不同时间的曲线

Fig.5 Weight gain curves of Nb-20Si-5Al- x Ti alloy after oxidation at 1 250 ℃ for varied time

表 1 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金在 1 250 ℃下的氧化速率
Tab.1 The oxidation rate of Nb-20Si-5Al- x Ti alloy at 1 250 ℃

$x/\%$	表面积/ cm^2	增重 $\Delta m/\text{g}$	氧化速率 $k_p/$ ($10^{-4} \text{ g}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{h}^{-1}$)
0	3.56	0.192 8	7.33
18	3.34	0.070 1	1.10
20	3.02	0.051 3	0.72
22	3.62	0.068 7	0.90

从图 5 可以看出,随着 Ti 含量增加,其氧化增重先减小后增加,由此可见,其高温抗氧化性先升高后降低。其中未添加 Ti 时其氧化增重最大,即高温抗氧化性最差;当 Ti 含量达到 20%时,试样的氧化增重最小,即高温抗氧化性最好。从氧化速率的计算结果可以看出,

未添加 Ti 合金的氧化速率最大,为 $7.33 \times 10^{-4} \text{ g}^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{h})$;添加 Ti 后的氧化速率逐渐减小,当 Ti 含量达到 20%时,氧化速率达到最小值,为 $7.2 \times 10^{-5} \text{ g}^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{h})$,试样的抗氧化性能提高了约 10 倍。

图 6 为氧化 4 h 后氧化膜的 XRD 分析结果。可以看出,在未添加 Ti 元素时,其氧化膜的组成主要为 Nb_2O_5 、 $\text{AlNb}_{11}\text{O}_{29}$ 和 Al_2O_3 等。添加 Ti 元素后,其氧化膜的组成变成为 Nb_2O_5 、 $\text{Ti}_2\text{Nb}_{10}\text{O}_{29}$ 、 TiNb_2O_7 、 $\text{AlNb}_{11}\text{O}_{29}$ 、 TiO_2 、 Al_2O_3 和 SiO_2 等。图 7 为试样氧化 4 h 后表面氧化层的 SEM 形貌。可以看到,当未添加 Ti 时氧化膜不致密,并存在较多裂纹;当添加 Ti 后,加入量为 18%时,氧化膜变得更致密,裂纹也减少,从而可较好对 O 的扩散进行阻碍,提高其高温抗氧化性;当 Ti 加入量达到 20%时,氧化膜最致密,裂纹也最少,其高温抗氧化性也最好;当 Ti 含量增加到 22%时,氧化膜出现了一些小孔洞,裂纹也增多,从而使其高温抗氧化性又有所降低。

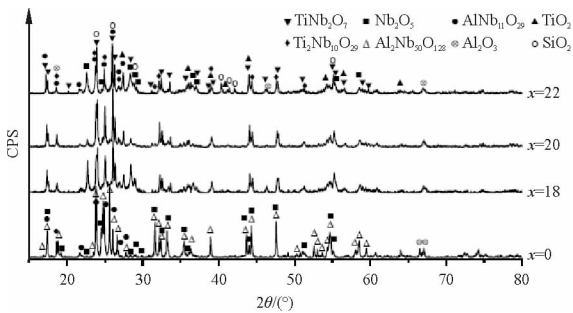
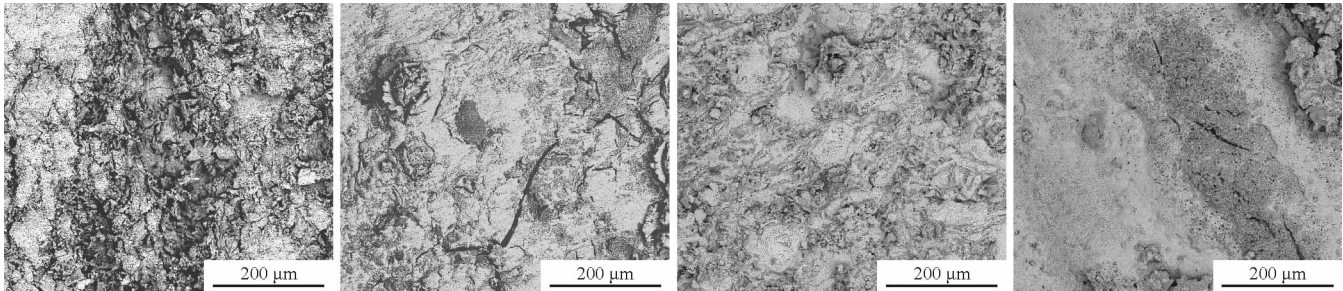


图 6 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金在 1 250 ℃氧化 4 h 后氧化膜的 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of oxide film of Nb-20Si-5Al- x Ti alloy after oxidation at 1 250 ℃ for 4 h



(a) $x=0$ (b) $x=18$ (c) $x=20$ (d) $x=22$

图 7 Nb-20Si-5Al- x Ti 合金氧化物的 SEM 图

Fig.7 SEM images of oxide in the Nb-20Si-5Al- x Ti alloy with different Ti content

3 结 论

(1)Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的 XRD 物相分析结果表明,当未添加 Ti 元素时,合金的主要相包括 Nbss、 Nb_5Si_3 以及 Al_3Nb 相;当 Ti 含量为 18%时,合金的主要相包括 Nbss、 $(\text{Nb},\text{Ti})_5\text{Si}_3$ 、Ti 以及 Al_3Nb 相;当 Ti

含量在 20%及以上时,合金的主要相包括 Nbss、 $(\text{Nb},\text{Ti})_5\text{Si}_3$ 、Ti 和 Al_3Ti 相,这是因为 Ti 元素的添加消除了 Al_3Nb 相,并且促进了 Al 元素在微观组织中均匀分布。

(2)Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的断裂韧度随着 Ti 含量的增加而增加,当 Ti 含量为 20%时达到最大值,随

后又有所降低。断裂方式以解理断裂为主,断口形貌中以河流状花纹的大解理面为主,随着 Ti 含量增加,会逐渐出现一些撕裂棱和韧窝,其中以 Ti 含量为 20% 时最多。

(3) Nb-20Si-5Al- x Ti 合金的高温抗氧化性能随着 Ti 含量的增加而提高,当 Ti 含量为 20% 时,氧化增量和氧化速率最小,即其高温抗氧化性能最好。这主要是由于 Ti 元素加入后可以使合金表面形成较致密的氧化膜,能较好地阻碍氧的进一步扩散,从而改善其高温抗氧化性能。氧化 4 h 后的氧化物主要为 Nb₂O₅、Ti₂Nb₁₀O₂₉ 和 TiNb₂O₇、AlNb₁₁O₂₉、SiO₂ 等。

参 考 文 献

- [1] 郑欣,白润,蔡晓梅,等. 新型钼合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2014,33(9):586-593.
- [2] 龙文元,夏春,陈哲,等. SPS 熔铸工艺制备 Nb/Nb₅Si₃ 原位复合材料[J]. 稀有金属材料与工程, 2010,39(8):1 427-1 430.
- [3] 李伟,杨海波,单爱党,等. Mo 对于 Nb/Nb₅Si₃ 原位复合材料室温韧性的影响[J]. 材料工程, 2004(4):31-33.
- [4] SUN Z P, GUO X P, TIAN X D, et al. Effects of B and Si on the fracture toughness of the Nb-Si alloys[J]. Intermetallics, 2014, 54: 143-147.
- [5] ESPARZA N, RANGEL V, GUTIERREZ A, et al. A comparison of the effect of Cr and Al additions on the oxidation behaviour of alloys from the Nb-Cr-Si system[J]. Materials at High Temperatures, 2016, 33(2): 105-114.
- [6] JIA L N, WENG J F, LI Z, et al. Room temperature mechanical properties and high temperature oxidation resistance of a high Cr containing Nb-Si based alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A623: 32-37.
- [7] KANG Y W, QU S Y, SONG J X, et al. Microstructure and mechanical properties of Nb-Ti-Si-Al-Hf- x Cr- y V multi-element in situ composite[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A534: 323-328.
- [8] 陈丽群,郭喜平. Cr 含量对 Nb-Ti-Si-Cr 基超高温合金组织及抗氧化性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(5): 30-36.
- [9] ZHANG S M, ZHOU J R, SHA J B. Effect of Fe additions on microstructure and mechanical properties of a multi-component Nb-16Si-22Ti-2Hf-2Al-2Cr alloy at room and high temperatures[J]. Intermetallics, 2015, 57: 146-155.
- [10] XIONG B W, CAI C C, WANG Z J, et al. Microstructures and room temperature fracture toughness of Nb/Nb₅Si₃ composites alloyed with W, Mo and W-Mo fabricated by spark plasma sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 604: 211-216.
- [11] ENYU G, SUDHANSHU S S, CARL M, et al. Effect of gallium addition on the microstructure and micromechanical properties of constituents in Nb-Si based alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 704: 89-100.
- [12] TIWARY C S, KASHYAP S, CHATTOPADHYAY K. Effect of Mg addition on microstructural, mechanical and environmental properties of Nb-Si eutectic composite[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A560: 200-207.
- [13] 曾宇翔,郭喜平,乔彦强,等. Zr 含量对 Nb-Ti-Si 基超高温合金组织及抗氧化性能的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(9):1 049-1 058.
- [14] MA C L, LI J G, TAN Y, et al. Effect of B addition on the microstructures and mechanical properties of Nb-16Si-10Mo-15W alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A384: 377-384.
- [15] CHATTOPADHYAY K, BALACHANDRAN G, MITRA R. Effect of Mo on microstructure and mechanical behaviour of as-cast Nbss-Nb₅Si₃ in situ composites[J]. Intermetallics, 2006, 14: 1 452-1 460.
- [16] MURAYAMA Y, HANADA S. High temperature strength, fracture toughness and oxidation resistance of Nb-Si-Al-Ti multiphase alloys[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2002, 3(2): 145-156.
- [17] SUN Z P, GUO J M, ZHANG C, et al. Effect of Ti and Al interaction on microstructures and mechanical properties of the Nb-Ti-Si-Al alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(7): 1 678-1 682.
- [18] WANG F X, LUO L S, XU Y J, et al. Effects of alloying on the microstructures and mechanical property of Nb-Mo-Si based in situ composites[J]. Intermetallics, 2017, 88: 6-13.
- [19] 王高举,郭喜平, Ti 含量对 Nb-Si 基超高温合金组织及相成分的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 45(2): 387-392.
- [20] 姜惠仁,牛莉叶,席文君,等. Ti 对 Nb 基合金高温抗氧化性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8): 2 044-2 049.
- [21] 龙文元,贾红梅. Ti 对 Nb-20Si-5Al 超高温合金组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(2): 90-96.
- [22] GENG J, TSAKIROPOULOS P. A study of the microstructures and oxidation of Nb-Si-Cr-Al-Mo in situ composites alloyed with Ti, Hf and Sn[J]. Intermetallics, 2007, 15: 382-395.
- [23] 楚晓晨. 基于第一性原理研究合金化对 Nb-Si 系金属间化合物性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [24] GENG J, TSAKIROPOULOS P, SHAO G. Oxidation of Nb-Si-Cr-Al in situ composites with Mo, Ti and Hf additions[J]. Mater. Sci. Eng., 2006, A441: 26-39.

(编辑:刘晨辉)

2020 年中国电动汽车销量占全球 41%

Canalys 最新研究数据显示,2020 年中国市场共出售 130 万辆电动汽车,同比增长 8%,占全球电动汽车销量的 41%。Canalys 预测,2021 年中国将售出 190 万辆电动汽车,增幅高达 51%,将占中国汽车总销量的 9%。

Canalys 副总裁 Sandy Fitzpatrick 称,电动汽车在 2020 年中国乘用车总销量中仅占 6.3%,未来将继续增长。

据中汽协发布的数据显示,2021 年 1 月,新能源汽车产销分别完成 19.4 万辆和 17.9 万辆,同比分别增长 285.8% 和 238.5%。新能源汽车连续 7 个月刷新单月销量记录。

3 月 1 日,工业和信息化部部长肖亚庆在新闻发布会介绍,我国新能源汽车产销量 6 年蝉联世界第一,累计销售 550 万辆。

(摘自压铸周刊)