

新型低密度 Nb-Ti 合金组织及性能研究

胡国林 姚草根 孙彦波 熊春晓 李启军 杨焕晨

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)



摘要: 对我国新研制的新型低密度高性能Nb-Ti合金的室温、高温性能以及焊接和旋压等工艺性能进行了研究, 并对相应的微观组织进行了分析, 优化出较佳的热处理制度。结果表明: 该铌钛合金具有优异的室温工艺性能和高温性能, 可满足航天航空发动机部件对材料性能的使用要求。

关键词: Nb-Ti 铌钛合金; 组织性能; 低密度; 焊接; 旋压

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A

Study on Microstructure and Property of Low-density Nb-Ti Alloy

Hu Guolin Yao Caogen Sun Yanbo Xiong Chunxiao Li Qijun Yang Huanchen

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract: The room temperature, high temperature properties, welding and spinning process properties of a new low-density high-performance Nb-Ti alloy newly developed in china was studied, the corresponding microstructure is analyzed, and the better heat treatment system is optimized. the results show that the Nb-Ti alloy has excellent room temperature process properties and high temperature properties, and it can meet the requirements of aerospace engine components for material properties.

Key words: Nb-Ti alloy; microstructure and property; low-density; welding; spinning

1 引言

B.c.c.结构的 β 铌钛固溶体合金具有比镍基高温合金更高的熔点、良好的室温塑性和中温强度, β 铌钛合金力学性能好,在铌中加入大量的Ti、少量的Al、Hf和Cr,可大大提高铌合金的抗氧化性能,其中铌固溶体有增韧作用,金属间化合物则可提高高温强度,低密度的Nb-Ti-Al系合金由于其低密度、易加工性和较好的抗氧化性成为引人关注的一类新铌合金^[1-2]。从高温比强度、密度、塑-脆性转变温度几个方面考虑, β 铌钛固溶体合金是最有希望成为650~1350℃使用的候选材料^[3-5]。按温度和强度要求,前苏联和美国已研发了50种已得到广泛应用的低密度铌合金,如GE公司近来研发的一系列 β 铌钛合金,在同等氧浓度下其工作温

度可以比商业铌合金提高200~400℃。我国对低密度铌合金的研究从2005年开始,最近已成功研制出一种新型 β 铌钛合金,其熔点和密度可通过调整合金成分在较大范围内变化,为合金设计提供更大的空间。根据Ti加入量的不同,这些合金的密度一般为6.2~6.9g/cm³,而高温合金的密度一般为8.1~8.6g/cm³,与高温合金部件相比,铌钛基合金部件的重量可减少15%~25%,同时利用其较高比强度,可以减小部件壁厚,则部件重量会减少更多。

一般高温合金使用最高温度约1100℃^[6],铌钎(钨)合金使用最高温度在1400℃及以上,但铌钎(钨)合金密度大(一般为8.9g/cm³左右),不适合新型航天发动机型号减重需求,对于需在1100~1400℃范围内作为结构材料的高负荷或长期工作的部件来说,由

作者简介: 胡国林(1974),高级工程师,材料加工工程专业;研究方向:有色金属材料及加工工艺。

收稿日期: 2022-02-15

于 Nb-Ti β 合金的高强度、高韧性、低密度以及较好的抗氧化性^[7-8]，能够较好地满足这些部件在此温度区间需要。因此针对新型航天发动机喷管、推力室等热端部件需求，本文对该新型低密度铌钛合金的热处理工艺、力学性能、显微组织，以及焊接和旋压成形等工艺性能进行了研究。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

采用真空自耗电弧熔炼法制备 NbTiAlCrV 合金，通过配料调整合金初始成分和配比，然后经过真空自耗电弧炉两次熔炼得到合金铸锭，并进行均匀化退火，经挤压、热轧成板材。

试验材料为再结晶状态铌钛合金板材，见表1。

表 1 铌钛合金化学成分 (wt)%							
Ti	Al	Cr	V	W	Mo	Hf	Nb
20.82	2.52	3.09	5.32	2.70	0.69	2.60	余量

2.2 实验方法

将铌钛合金板材分别在1110℃、1120℃及1140℃进行1h保温热处理，加工成拉伸试样和金相试样，使用 Olympus PMG3 光学金相显微镜进行组织观察和分析，在CMT5105 电子万能试验机和超高温力学性能试验机上依据GB/T 228—2007 测试室温、高温拉伸性能。在铌钛合金成品板材上线切割切取3mm×5mm×5mm 的小块，采用排水法测试合金密度，将铌钛合金板材加工成100mm×100mm的试块，在HDW-12 电子束焊机设备上焊接工艺性能试验，将铌钛合金板材加工成420mm×420mm的试块，在数控精密旋压设备上旋压工艺性能试验。

3 结果与分析

3.1 铌钛合金的热处理工艺

图1为铌钛合金在热处理退火温度分别为1110℃、1120℃和1140℃时保温1h后的显微组织照片。由图1分析可见，铌钛合金在1110℃已发生完全再结晶，1140℃下晶粒已明显长大，因此，从组织上来说，该合金较佳的热处理制度为1110~1120℃。

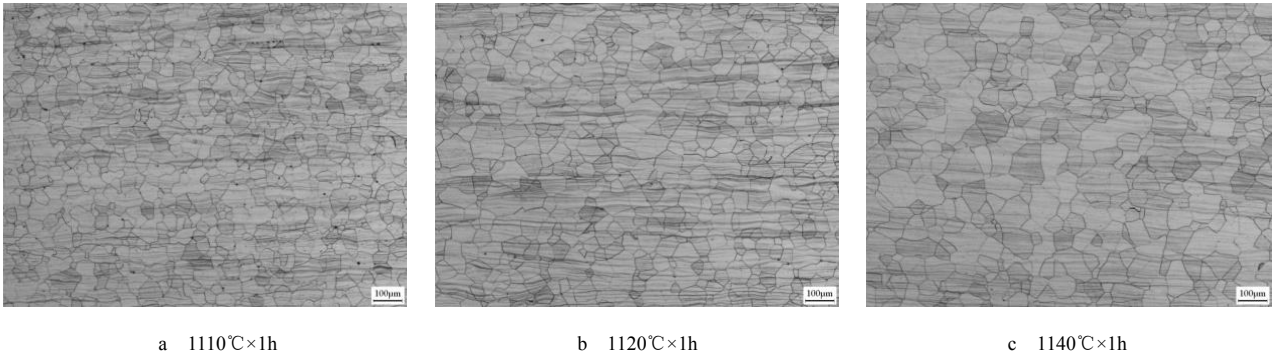


图1 Nb-Ti合金在不同热处理退火温度后的组织

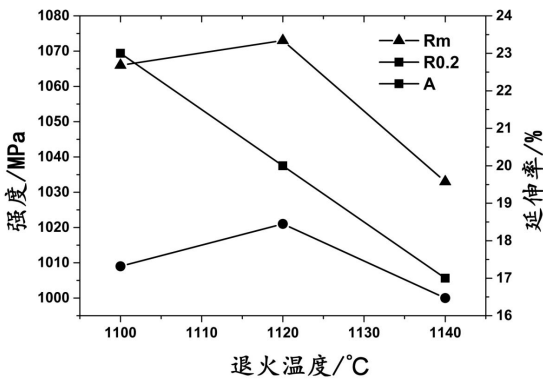


图2 Nb-Ti合金在不同热处理退火温度后的室温力学性能

图2为新型铌钛合金在不同热处理退火工艺后的室温力学性能。由图2可知，在1110~1120℃的温度范围内，随着热处理温度的提高，其强度有增高的趋势，延伸率有降低的趋势。在1120~1140℃的温度范围内，随着热处理温度的提高，其强度有降低的趋势，延伸率有降低的趋势。可见在较佳的热处理制度1110~1120℃范围内，能获得较好的室温强度和延伸率的综合性能。合金经1140℃热处理后，晶粒明显长大，是该合金板材强度和延伸率降低的主要原因。

3.2 铌钛合金的显微组织及性能

3.2.1 铌钛合金的密度

采用排水法测试铌钛合金密度，对三个试样进行

测试，结果分别为6.93g/cm³、6.94g/cm³、6.92g/cm³，可见，合金密度约为6.93g/cm³左右。相对于密度较高的高温合金部件，铌钛基合金部件的重量可有效减少，同时利用其较高比强度，可以减小部件壁厚，则部件重量减少会更多。

3.2.2 铌钛合金的显微组织

图3是退火态板材的金相组织。从图3可以看到，合金的微观组织是完全再结晶等轴晶组织，晶粒尺寸约50μm，部分晶粒内部出现了滑移线，说明该合金有可能具有较好的塑性变形能力。

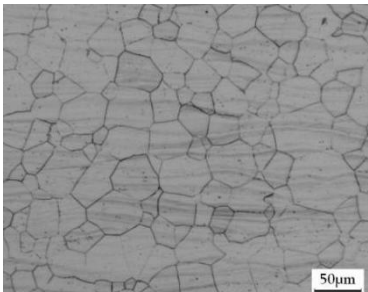


图3 室温再结晶态组织

3.2.3 铌钛合金的力学性能

表2为铌钛合金板材的室温力学性能。由表2可知，该材料室温时具有良好的塑性，适于通过旋压等塑性加工的方法成形零件。

表2 铌钛合金板材室温力学性能

<i>R</i> _m /MPa	<i>R</i> _{p0.2} /MPa	<i>A</i> /%	<i>E</i> _t /GPa	弯曲/(°)
1010	955	20.0	109	180

表3为铌钛合金板材高温力学性能。由表3可知，该新材料具有很好的高温性能，可适用在此温度范围内工作的发动机使用。

表3 铌钛合金板材高温力学性能

温度/℃	<i>R</i> _m /MPa	<i>R</i> _{p0.2} /MPa	<i>A</i> /%
1100	231	230	40.5
1200	155	155	49.0
1300	111	111	51.0

3.3 铌钛合金工艺性能研究

3.3.1 焊接性能研究

用板材进行真空电子束焊接，单道焊接完成，其焊接热输入量小，能量集中，工件不易氧化，在平板焊接试片取样做分析。铌钛合金焊缝弯曲角及微观组织见图4。可知，焊缝没有气孔、夹杂及裂纹等缺陷存在。与基材相比，焊缝组织状态一致，均匀。接头弯曲角为180°，抗拉强度1058.5MPa，强度系数达到0.94，结果表明该新材料具有良好的焊接工艺性能。

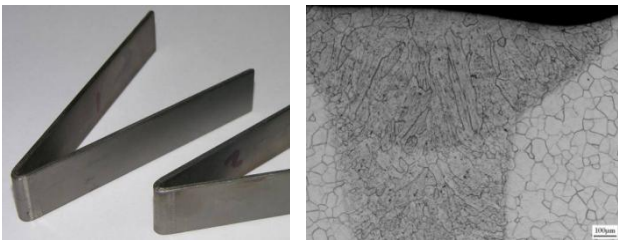
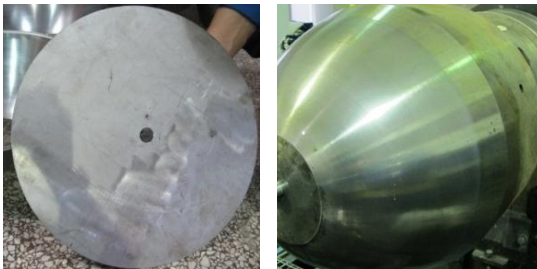


图4 铌钛合金焊缝弯曲角及微观组织

3.3.2 旋压性能研究

本试验所采用的材料为铌钛合金板材，材料厚度为3mm左右，试验用设备数控精密旋压机。用剪板机将板材裁成规格为420mm×420mm试件，用钻床在试件上打中心孔，并用车床将试件加工成圆盘，铌钛合金圆板坯及旋压芯模见图5。



a 板材 b 芯模

图5 可旋性试验板材及芯模

本试验是在数控旋压机上完成的，采用模具为Φ150~380mm的变直径曲线模进行喷管延伸段可旋性试验。旋压工艺参数如下：主轴转速70~90r/min，旋轮纵向进给速度40~60mm/min，旋轮直径为340mm，旋轮与芯模之间的间隙见表4。

表4 可旋性试验用间隙值

点序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距零件最大直径处距离/mm	80	100	118	131	142	152	167	173	178	180
间隙理论计算值/mm	2.00	1.92	1.81	1.73	1.65	1.52	1.41	1.35	1.24	1.17



图6 可旋性试验结果

表 5 可旋性试验实际间隙 mm

点序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
间隙理论计算值	1.95	1.80	1.71	1.63	1.55	1.32	1.21	1.15	1.14	1.07
实际壁厚	2.23	2.11	2.02	1.84	1.76	1.63	1.56	1.51	-	-

图6为喷管样件可旋性试验结果，可见，经过不同间隙可旋性试验，旋压出表面光滑、无起皱、鼓包、型面贴胎度好的喷管样件，获得了较好的实际间隙计算值，见表5，此时铌钛合金试件断在点序8~9之间，测量试件断裂前壁厚为1.49mm，计算得出断裂前偏离率为-14.6%左右，试件的变薄率为50%左右，此时试件型面贴胎度最好。这表明新研制的铌钛合金室温成形性能良好，在较好地控制壁厚的负偏离率（-15%）条件下^[9]，铌钛合金退火板材的极限变薄率为50%左右，能满足发动机喷管延伸段使用要求。

4 结束语

- a. 研究出了一种新型低密度(6.9g/cm³)铌钛合金，获得了较佳热处理制度。
- b. 该铌钛合金具有良好室温塑性和高温性能，可满足1100~1400℃范围内作为结构材料工作的发动机部件。
- c. 该铌钛合金具有良好的焊接、旋压性能，控制壁厚的负偏离率在-15%范围内，合金板材获得的最大极限变薄率为50%左右，能满足发动机喷管延伸段使

用要求。

参考文献

- 1 姜传海,周建威,叶长青,等. 铌及铌合金的氧化行为[J]. 机械工程材料, 2003, 27(12): 1~3
- 2 赵群. 铌基合金的抗高温氧化性研究[J]. 材料导报, 2003, 17(2): 30~31
- 3 王峰,郑欣,白润,等. 低密度NbTiAlVZr合金的微观组织和力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(11): 1972~1975
- 4 Jackson M R. In: Bose A, Dowding R J, et al. Tungsten and Refractory Metals-1994[C]. New Jersey: Metals Powder Industries Federation, 1995: 657
- 5 Buckman R W. In: Walter J L, Jackson M R, Sims C T, et al. Alloying of Refractory Metals[C]. OH: ASM, 1988: 419
- 6 周永军,王瑞丹. 镍基超合金的发展和研究现状[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2006, 23(1): 35~37
- 7 郑欣,白润,蔡晓梅,等. 新型铌合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(Z1): 586~594
- 8 王峰,郑欣,白润,等. 低密度NbTiAlCrSi合金显微组织及力学性能[J]. 稀有金属与硬质金, 2011, 39(1): 1871~1875
- 9 陈永来,李茂盛,吕宏军,等. 2195铝锂合金可旋性研究[J]. 航天制造技术, 2006(6): 28~30