

热处理对铸造 Ti-23Al-17Nb 合金组织和拉伸性能的影响

韩积亭, 程云君, 梁晓波, 张建伟, 李世琼

(钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 在 1 000 和 1 020 对铸造合金保温 3 h 后空冷, 研究不同热处理温度对铸造 Ti-23Al-17Nb(摩尔分数, %)合金组织和拉伸性能的影响。结果表明: 铸造合金为等轴晶, 晶界和晶粒内均析出呈网篮状魏氏组织的 α_2 板条; 经热处理后, 晶粒内细小的 α_2 板条充分析出, 晶界处连续的 α_2 相断开; 随着处理温度的提高, 析出的 α_2 板条数量随之减少, 板条宽度随之增加; 热处理能提高合金的抗拉强度和伸长率, 经 1 020 , 3 h, AC 热处理后试样的伸长率达到 4%, 其拉伸断口主要是由沿晶断裂和准解理断裂组成。

关键词: Ti-23Al-17Nb 合金; 热处理; 组织; 拉伸性能

中图分类号: TG292

文献标志码: A

Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of cast Ti-23Al-17Nb alloy

HAN Ji-ting, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo, ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong

(Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The cast alloy was insulated at 1 000 and 1 020 for 3 h and then air-cooled. The effect of heat treatment temperature on the microstructure and tensile properties of cast Ti-23Al-17Nb (mole fraction, %) alloy were investigated. The results show that the macrostructure of the cast alloy is equiaxed grain. The lath α_2 phase precipitated in the alloy exhibits a fine basket weave Widmanstätten microstructure. After heat treatment, the α_2 phase precipitates more than the cast alloy, and the α_2 phase in boundary is disconnected. With the increase of temperature, the quantity of the α_2 phase decreases, but its width increases. Heat treatment can improve the tensile strength and elongation of the alloy. After heat treatment at 1 020 for 3 h, AC, the elongation of sample reaches 4%. The tensile fracture consists of intergranular fracture and cleavage fracture.

Key words: Ti-23Al-17Nb alloy; heat treatment; microstructure; tensile property

Ti₃Al 基金属间化合物具有密度低, 比强度高及其它优异的高温性能, 是航空、航天飞行器理想的轻质高温结构材料^[1]。钢铁研究总院研制的 Ti-23Al-17Nb 合金是一种 Ti₃Al 基合金, 具有优良的力学性能和抗氧化性能。用以替代高温合金或耐热不锈钢, 质量减轻达 40%, 对提高航空发动机的推重比和航天发动机的有效发射载荷具有重要意义^[2-3]。现已开始为航天部门小批量供货。目前该合金主要的成型手段是冷热变形, 存在加工难度大、成本较高以及生产周期长等问

题。

近年来, 随着热等静压和特种热处理工艺在铸件中的应用, 钛合金铸件的质量和性能以及可靠性都提高较大^[4]。而铸造具有成本低, 尺寸精确, 可生产形状复杂部件的优势。因此, 发展铸造 Ti-23Al-17Nb 合金能有效降低成本, 实现结构复杂的构件的途径之一。本文作者浇注了 Ti-23Al-17Nb 合金铸棒, 进行不同温度的热处理, 研究组织变化和拉伸性能, 以期对该类合金铸件的开发和应用提供一定的依据。

1 实验

按照合金的名义成分配料,采用两次真空自耗熔炼制备母合金,再用2 kg真空感应悬浮炉浇注 $\phi 40\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 圆棒,模具选用石墨模具。取样方法为沿圆棒轴向方向,靠外壁取尺寸 $\phi 12\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的试样。选择1 000 和1 020 两个热处理温度,保温3 h后空冷。对试样轴向截面进行金相观察。侵蚀剂为2%HF+5%HNO₃+93%H₂O(体积分数)溶液。金相观察在Leica(OM)下进行。在INSTRON-1186机器上进行拉伸性能试验。用JEOL JSM-6480LV扫描电子显微镜观察断口的形貌。

2 结果与讨论

2.1 合金的金相组织

合金的铸态金相组织如图1所示。由图1(a)可知,铸态Ti-23Al-17Nb合金为等轴晶,晶粒平均尺寸约1 mm。图中还有一些颜色较深的斑点,是该区域的 α_2 板条含量比其他区域的少造成的。图1(b)所示为铸

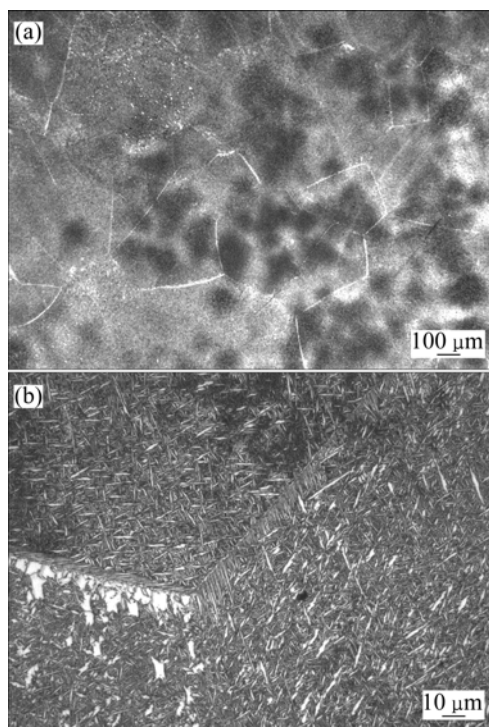


图1 合金铸态的金相组织

Fig.1 Optical structures of cast alloy: (a) Macrostructure; (b) Microstructure

态的微观组织,晶粒内部有 α_2 板条析出,也有少量的块状 α_2 相析出。组织为 $\beta/B2$ 相基体和 α_2 板条形成的网篮状魏氏组织。晶界呈现白色,主要是 α_2 相富集在晶界上,呈条状或羽毛状。

对比铸态组织和其热处理后的组织发现,经1 000 处理后, α_2 板条充分析出,数量比铸态组织的 α_2 相有所增加(见图2(a)),晶界上的 α_2 相部分断开。随着处理温度的增加,析出的 α_2 相含量相应减少,但 α_2 板条也发生粗化,晶界上更多的连续 α_2 相断开,如图2(b)所示。

参考Ti₃Al的相图^[5],该合金凝固顺序为 $L\rightarrow\beta/B2\rightarrow\alpha_2+\beta/B2$ 。由于凝固过程为固溶体的非平衡凝固,先凝固的 $\beta/B2$ 相对于合金名义成分Nb含量偏高,而Al含量低^[6]。由于 α_2 相的成分相对于名义成分Al含量偏高而Nb含量偏低,则在先凝固的 $\beta/B2$ 相中很难析出 α_2 板条,因此,在宏观组织上出现一些颜色较深的斑点。在热处理过程中,这种偏析现象并没有得到缓解。

较高的处理温度可以提供更多的能量,使得元素和相界的迁移能力增强,因此也就有更多的机会吞并其附近的细小晶粒。随着处理温度从1 000 升高到1 020 时, α_2 相含量减少,但 α_2 板条发生粗化^[7]。

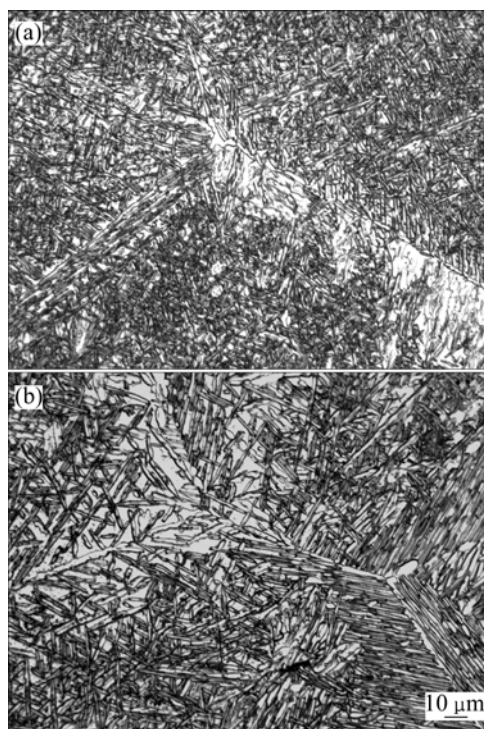


图2 不同温度处理后合金的金相组织

Fig.2 Optical microstructures of alloy after different heat treatments: (a) 1 000 °C, 3 h, AC; (b) 1 020 °C, 3 h, AC

2.2 热处理对合金拉伸性能的影响

对 3 种状态的合金进行室温拉伸试验, 结果列在表 1 中。由表 1 可以看出, 未经过热处理的合金, 强度和伸长率都要比经过热处理的合金低。而处理温度从 1 000 升到 1 020 后, 强度下降明显, 约降低 60 MPa, 塑性略有提升。

对热处理后的合金进行 650 拉伸试验, 其结果如表 2 所列。在 650 时, 合金的抗拉强度还保持在 660 MPa 以上, 而且保持稳定的塑性。两种热处理制度对高温拉伸性能的影响区别不大。

表 1 热处理合金的室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of heat treated alloy at room temperature

Heat treatment	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%
As cast	865	730	2
1 000 , 3 h, AC	965	820	3.5
1 020 , 3 h, AC	905	790	4.0

表 2 650 时合金的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of alloy at 650

Heat treatment	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%
1 000 , 3 h, AC	685	530	8.5
1 020 , 3 h, AC	710	565	8.5

铸态合金的强度和塑性都低, 这是因为合金组织为非平衡凝固组织, α_2 板条没有充分析出, 而且在晶界上富集 α_2 相。 α_2 相是脆性相, 使得晶界变弱, 导致合金的塑性下降^[8]。与热处理组织比较发现, 经 1 000

保温 3 h 空冷后, 晶粒内的板条充分析出, 由细小 α_2 板条组成的网篮状组织, 这种组织具有较高的强度和塑性^[9]。在经 1 020 热处理的组织中, α_2 板条发生粗化, 更多的晶界断开。这种组织导致合金的强度略有下降, 塑性要优于 1 000 处理组织的。

2.3 合金的断口分析

对拉伸试样断口进行扫描观察, 发现大部分断口有明显的裂纹起源区和裂纹扩展区^[10], 如图 3(a)所示, 一般裂纹起源于试样边缘, 内部气孔也会形成裂纹源。在裂纹起源区断口比较平整, 为沿晶解理断裂, 如图 3(b)所示。在裂纹扩展区域, 有沿晶断裂, 也有穿晶的准解理断裂, 局部地方出现了二次裂纹和剪切带, 如图 3(c)所示。

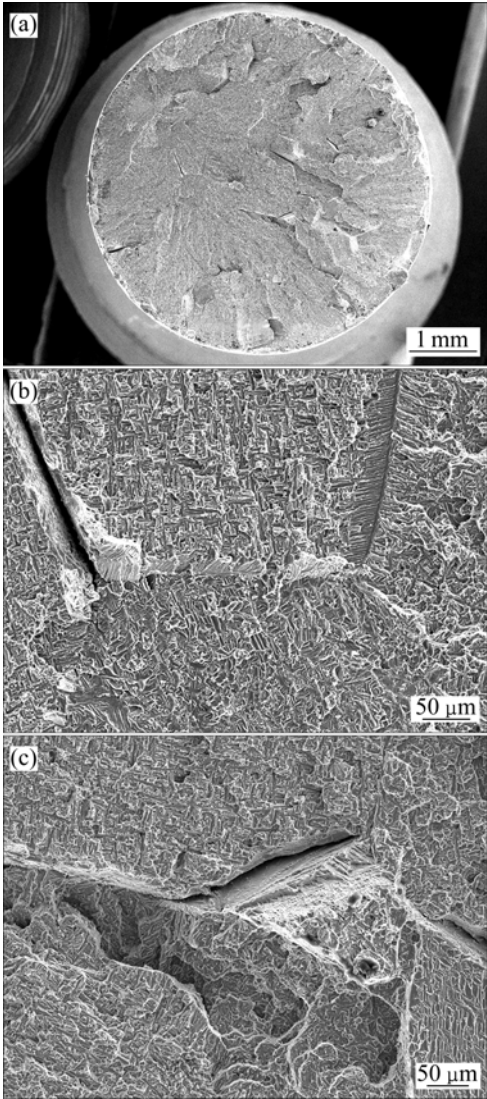


图 3 室温时试样的拉伸断口形貌
Fig.3 Tensile fracture morphologies of sample at room temperature: (a) Macro fracture morphology; (b) Intergranular cleavage fracture; (c) Secondary cracks

2.4 存在的问题

虽然铸态 Ti-23Al-17Nb 合金表现出良好的力学性能, 但合金的流动性差。提高铸造温度有利于提高流动性, 减少气孔, 获得致密的组织, 还可加入增加流动性的元素, 提高该合金的铸造性能。加入细化晶粒的元素, 可获得更好的综合性能。

3 结论

1) 铸态 Ti-23Al-17Nb 合金为网篮状魏氏组织, 经热处理后 α_2 相数量有所增加。随着热处理温度提高,

析出 α_2 相的含量有所减少,板条宽度增加,晶界 α_2 断开程度增加。

2) 热处理提高铸态 Ti-23Al-17Nb 合金强度和塑性,室温塑性可达 4%。高温强度不低于 660 MPa,塑性稳定在 8%左右。

3) 铸态 Ti-23Al-17Nb 合金拉伸性能基本达到一些航空航天部件的使用要求。但还存在一些问题,需要进一步改善。

REFERENCES:

- [1] 李世琼, 张建伟, 程云君, 梁晓波. Ti_3Al 和 Ti_2AlNb 基金属间化合物结构材料研发现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34: 104-109.
LI Shi-qiong, ZHANG Jian-wei, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo. Current status on development of Ti_3Al and Ti_2AlNb intermetallic structure materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34: 104-109.
- [2] 李世琼, 邹敦叙, 张继, 张建伟, 张志宏, 马万青, 毛勇, 苏曦, 仲增墉. Ti-Al 系金属间化合物的研究与开发[J]. 钢铁研究学院, 1999(增刊): 389.
LI Shi-qiong, ZHOU Dong-xu, ZHANG Ji, ZHANG Jian-wei, ZHANG Zhi-hong, MA Wan-qing, MAO Yong, SU Xi, ZHONG Zeng-yong. Research and development in titanium aluminum intermetallic compound alloys[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999(Supple): 389.
- [3] LI Shi-qiong, ZHANG Jian-wei. Processing of Ti-24Al-14Nb-3V alloys foils[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999(Supple 1): 40-45.
- [4] 陈玉勇, 肖树龙. 钛合金、生物医用钛合金及 TiAl 合金精密热成形技术[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 37: 16-20.
CHEN Yu-yong, XIAO Shu-long. Technology of titanium investment cast and TiAl intermetallics hot forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 37: 16-20.
- [5] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良, 郭建亭, 万晓景, 冯涤. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
ZHANG Yong-gang, HAN Ya-fang, CHEN Guo-liang, WAN Xiao-jing, FENG Di. Structure intermetallics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.
- [6] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
CUI Zhong-qi. Metallography and heat treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [7] MILLETT J C F, BROOKS J W, JONES I P. Assessment and modeling of isothermal forging of intermetallic compounds[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16: 617.
- [8] 王孟光, 孙建科, 陈志强. Ti_3Al 基金属室温塑性的改善方法[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(11): 8-12.
WANG Meng-guang, SUN Jian-ke, CHEN Zhi-qiang. Methods of improving room temperature ductility of Ti_3Al based alloys[J]. Rare Metals Letters, 2007, 26(11): 8-12.
- [9] 张建伟, 张继, 邹敦叙, 李世琼, 张志宏. 热机械处理对 Ti_3Al 基金属板条组织形貌及室温拉伸性能的影响[J]. 北京: 钢铁研究学报, 1997, 9(4): 2-29.
ZHANG Jian-wei, ZHANG Ji, ZHOU Dong-xu, LI Shi-qiong, ZHANG Zhi-hong. Effect of thermomechanical processing on the morphologies and room temperature tensile properties of lath-microstructure in Ti_3Al based alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1997, 9(4): 24-29.
- [10] 赵明汉, 张继, 冯涤. 高温合金断口分析图谱[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
ZHAO Ming-han, ZHANG Ji, FENG Di. Superalloys fracture analysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.

(编辑 龙怀中)