

TC4合金的电子束冷床熔炼研究

张英明^{1,2} 孙 军¹ 韩明臣² 周 廉² 杨建朝²

(1 西安交通大学材料科学与工程学院,西安 710049)

(2 西北有色金属研究院工程中心,西安 710016)

文 摘 由于电子束冷床熔炼的高真空引起 TC4合金中的 Al元素挥发损失,不利于控制铸锭 Al含量。本文研究了 TC4合金在 500 kW 电子束冷床炉上的熔炼工艺。结果表明,熔炼过程中,Al的挥发损失最为严重,为 12% ~ 22%。铸锭的宏观组织均匀,结晶晶粒为从外向内向上的柱状晶,铸锭心部是等轴晶。所生产的 TC4铸锭经锻造加工,棒材力学性能符合国家标准。生产 TC4铸锭的合适工艺为:原料中的 Al质量分数应控制在 7.0% ~ 7.5%,熔炼功率为 250 kW,熔化速度为 100 kg/h。

关键词 TC4钛合金,电子束冷床熔炼,Al的挥发损失,低成本钛合金

Electron Beam Cold Hearth Melting of TC4

Zhang Yingning^{1,2} Sun Jun¹ Han Mingchen² Zhou Lian² Yang Jianchao²

(1 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(2 Engineering Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016)

Abstract Because the high vacuum in the EBCHR process induces evaporation of Al element in TC4 alloy, it is difficult to control the Al content in the casting. In this article, the TC4 melting parameter by using 500 kW EBCHR furnace is studied. The result shows that the evaporation of Al is serious during melting process and the evaporation loss of Al is between 12% - 22%. The macrostructure of the ingot is homogeneous. The solidifying grains grow from outer to inner side and from bottom to up side. They are columnar grains. In the center of the ingot are equi-axed grains. The mechanical property of the TC4 bar made of the EBCHR TC4 ingot meets the state standard. The suitable melting parameter for the TC4 is as follows: Al content in feeding material is 7.0% - 7.5%, the melting power 250 kW and the melting rate 100 kg/h.

Key words TC4 titanium alloy, Electron beam cold hearth remelting, Evaporation of Al, Low cost titanium alloy

1 引言

钛合金因其比强度高、耐腐蚀等优点,广泛用于航空及航天领域。与钢铁等相比,高的成本限制了其应用范围,尤其是在民用领域。钛锭的生产成本约为钢锭的 30倍、铝锭的 6倍^[1]。

电子束冷床熔炼(EBCHR)技术 20世纪 80年代初开始用于钛合金熔炼,与真空电弧熔炼(VAR)两次和三次熔炼相比,它可以生产航空发动机用优质洁净钛合金铸锭,不需要压制和焊接电极,原料经一次熔炼就可以得到化学成分和宏观凝固组织均匀的铸锭。可以生产矩形截面的钛板坯,空心的钛管坯和圆

形截面的铸锭,从而减少后续加工环节,降低后续加工成本^[2]。电子束冷床熔炼炉可以充分利用回收的钛合金残料,有效地去除回收料中的各种夹杂,从而提高原料利用率,降低生产成本。EBCHR的高真空度,可以通过挥发充分去除原料中残留的 Mg、Cl元素和其他低熔点高挥发性金属杂质,并可以降低钛合金铸锭中的氢含量^[3]。

EBCHR的高真空状态(约 2×10^{-2} Pa),在净化原料的同时,也引起钛合金中的易挥发元素 Al、Cr等挥发损失,引起钛合金铸锭的化学成分不容易控制^[4-6]。本文研究了 TC4合金在 EBCHR中 Al挥发

收稿日期:2007-06-01;修回日期:2007-09-01

基金项目:国家 973项目(2007CB613802)

作者简介:张英明,1972年出生,博士研究生,主要从事电子束冷床熔炼的研究

损失的控制,铸锭的宏观组织均匀性及其棒材的力学性能。

2 实验

西北有色金属研究院 500 kW 双枪电子束冷床熔炼炉的尺寸为:500 mm ×300 mm ×80 mm,坩埚尺寸为 220 mm。电子束束斑直径约为 10 mm,熔炼过程见图 1。电子枪 1 维持结晶坩埚表面液态熔池的温度,避免局部凝固引起铸锭表面质量下降;电子枪 2 熔化原料和维持冷床内液态金属的温度。熔炼时,原料在冷床右端上方熔化,流入水冷铜床,从冷床左侧流出,进入结晶坩埚,凝固成铸锭,经拉锭机构进入铸锭室。液态钛合金在流动过程中,原料中的高密度夹杂(颗粒 WC)下沉进入凝壳,低密度夹杂(TN 颗粒)上浮到表面高温区溶解去除。

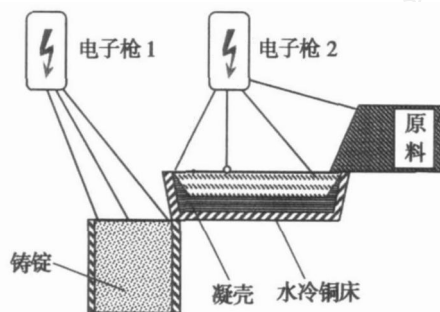


图 1 EBCHR 过程

Fig 1 Schematic of EBCHR melting process
熔炼原料为经 VAR 熔炼的 215 mm ×850 mm

TC4 合金锭。采用横进料方式,熔炼速度分别为 70、100 和 140 kg/h,熔炼总功率分别为 220、250 和 280 kW。

熔炼开始阶段炉室真空度略有降低,随着熔炼的进行,炉室真空度逐渐升高,最终保持在 $3.0 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-2}$ Pa,铸锭室真空保持在 5.0×10^{-1} Pa。

铸锭用 1 t 空气锤锻造。锻造工艺:1 150 开坯,950 锻造成 60 mm 钛棒。从所锻造的钛棒上锯切试样,退火后进行微观分析和力学性能测试。退火制度为 750 ,保温 1 h。

3 结果及讨论

3.1 化学成分

原料铸锭及经过冷床熔炼铸锭的化学成分,TC4 合金的化学成分国家标准见表 1。可以看出,所熔炼的铸锭化学成分符合国家标准。为了补偿电子束熔炼时 Al 元素的挥发损失,原料中 Al 元素质量分数为 7.3%,经过电子束冷床熔炼,降到了国家标准的范围,铝的挥发损失为 12% ~ 22%。V 的挥发可以忽略。因为 Al 的饱和蒸气压很高,远远大于 V、Ti 的饱和蒸气压。电子束熔炼时,氢的质量分数明显降低,从 0.003% 降到了 0.001%。氮、氧的质量分数没有明显增加,因为电子束熔炼和 VAR 熔炼比较,真空度要高出两个数量级,避免了钛合金的增氮、增氧。在 3 种熔速中,100 kg/h 最理想。表 2 是铸锭中化学成分在铸锭中的分布。

表 1 TC4 合金原料和 EBCHR 后铸锭的化学成分

Tab 1 Chemical compositions of TC4 feeding bar and EBCHR melted ingots

编号	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti	熔速 / kg · h ⁻¹
原料	7.30	3.93	0.06	0.02	0.021	0.003	0.09	余	-
2 [#]	5.70	4.03	0.06	0.01	0.020	0.001	0.08	余	70
3 [#]	6.20	4.10	0.06	0.01	0.025	0.001	0.07	余	100
4 [#]	6.40	4.03	0.05	0.01	0.023	0.001	0.08	余	140
GB3620 1—1994		5.5 ~ 6.8	3.5 ~ 4.5	0.30	0.08	0.05	0.015	0.15	-

表 2 EBCHR 后 TC4 合金铸锭的径向 Al, V, N 的化学成分

Tab 2 Al, V and N contents in EBCHR melted TC4 ingots in radial direction

编号	位置	中心			1/2 半径			边部		
		Al	V	N	Al	V	N	Al	V	N
2 [#]	上	6.30	4.00	0.021	6.30	4.00	0.021	6.20	4.10	0.020
	下	5.30	4.00	0.020	5.40	4.00	0.020	5.40	4.00	0.020
3 [#]	上	6.50	4.10	0.025	6.50	4.10	0.024	6.40	4.20	0.024
	下	5.70	4.10	0.023	5.80	4.10	0.022	5.80	4.20	0.023
4 [#]	上	6.40	4.10	0.022	6.50	4.10	0.022	6.40	4.20	0.021
	下	6.30	4.00	0.022	6.30	4.00	0.021	6.30	4.00	0.021

每个铸锭径向化学成分均匀,无明显变化,在纵向,Al 含量上部比下部稍微高出一些。分析原因为,

在熔炼开始阶段,需要在冷床中建立熔池和预热原料,液态 TC4 合金长时间维持在高温,引起 Al 的挥发

损失,造成冷床中液态 TC4合金的 Al含量降低。正常熔炼后,进料速度和 Al的挥发速度都趋于稳定,冷床中和铸锭中 Al含量也都稳定下来。

3.2 材料组织、性能

图 2是铸锭的宏观组织照片,铸锭的凝固晶粒是从外向内向上的粗大柱状组织,铸锭心部是较细小的等轴晶粒。铸锭上部的半圆形区域是熔炼结束补缩过程形成的。液态钛合金流入结晶坩埚后,受到坩埚的强烈冷却作用,表面先形核凝固。随着铸锭向下移动进入铸锭室,冷却主要来自铸锭表面的辐射传热和铸锭底部的热传导。铸锭内形成下面温度低,上面温度高,表面温度低,心部温度高的温度场。表面先结晶的晶粒沿温度梯度方向生长。最后,铸锭心部的液态 TC4合金温度趋于均匀,温度梯度减小,开始均匀形核,形成等轴晶。图 3是锻造钛棒的微观组织照片,可以看出,晶粒细小,没有异常夹杂颗粒。表 3是锻造钛棒的力学性能。

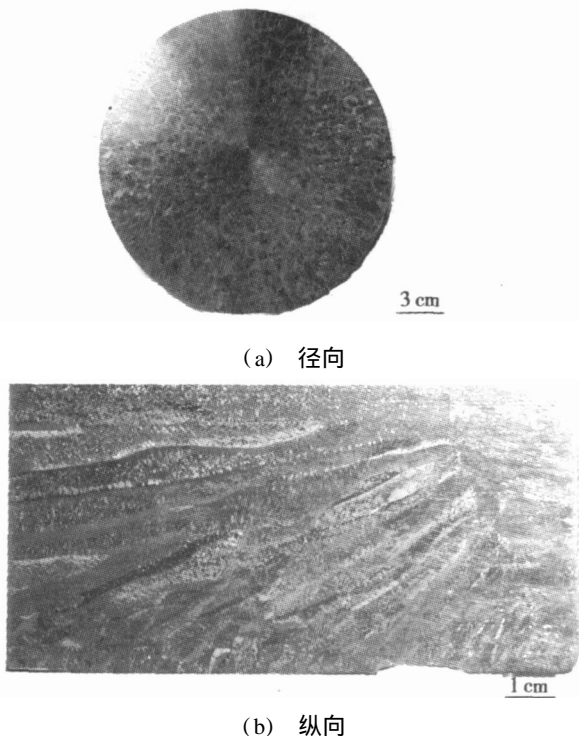
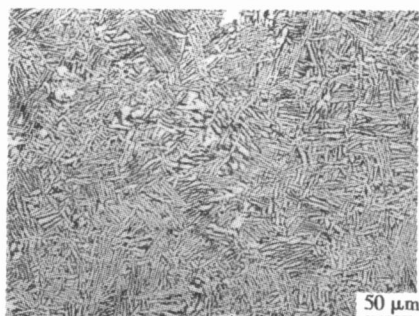
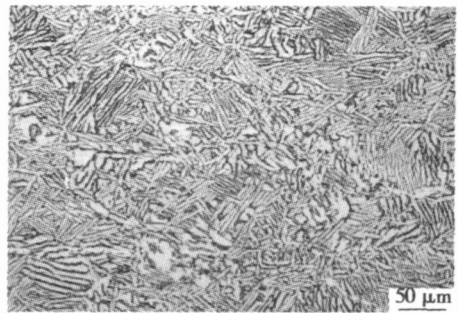


图 2 TC4电子束冷床熔炼铸锭宏观照片

Fig 2 Macrostructure of TC4 ingot melted with EBCHR



(a) 径向



(b) 纵向

图 3 TC4电子束冷床熔炼铸锭锻棒照片

Fig 3 Microstructure of TC4 bar made of EBCHR melted ingot

表 3 EBCHR 熔炼 TC4合金的力学性能

Tab 3 Mechanical properties of TC4 alloy

数据来源	拉伸强度 /	屈服强	伸长率	断面收
	MPa	度 /MPa	/ %	缩率 /%
实验值 (退火态)	910	830	18.0	46
GB/T 2965—1996	895	825	10	25

4 结论

(1)熔炼过程中, Ti、Al、V 都有不同程度的挥发, Al的挥发最为严重,其挥发损失在 12% ~ 22%, V的挥发损失不明显。

(2)电子束冷床熔炼所得的铸锭,径向化学成分均匀,纵向 Al含量铸锭上部比下部略高,是熔炼开始时冷床中液态 TC4合金中 Al元素挥发引起的。

(3)铸锭的凝固组织为从外向内向上的粗大柱状组织;铸锭心部为等轴晶。

(4)铸锭经开坯锻造,生产的钛棒力学性能符合国家标准。

(5)对于 500 kW 的电子束冷床炉,适合的熔炼参数为:熔炼功率 250 kW,熔化速度 100 kg/h,原料中 Al的质量分数应控制在 7.0% ~ 7.5%。

参考文献

- 1 杨遇春. 钛材降低成本的途径. 宇航材料工艺, 2004; 34 (1): 26 ~ 29
- 2 Yu K O. Recent developments in low cost titanium processing Rare Metal Materials and Engineering, 2006; 35 (1): 21 ~ 28
- 3 李青云,王道隆等. 稀有金属材料加工手册. 北京:冶金工业出版社, 1984: 334 ~ 342
- 4 韩明臣,周义刚,赵铁夫等. 电子束冷床熔炼参数对熔池表面温度的影响. 稀有金属, 2006; 30 (专辑): 55 ~ 59
- 5 韩明臣,邓炬,赵铁夫等. 冷床熔炼时 TiN 的去除和 Al 的挥发损失控制. 稀有金属快报, 2004; (2): 22 ~ 25
- 6 Akhonor S V, Zankov N P, Semiatin S L. Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron beam cold-hearth melting of Ti-6Al-4V ingots Metallurgical and Materials Transaction B, 2003; 34B: 447 ~ 454

(编辑 吴坚)

宇航材料工艺 2007年 第5期