● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4207

熔炼工艺对 TC6 铸锭成分均匀性及 β 斑偏析规律的影响

李欣琳,张天有,邢学伟,韩呈祥,张英明,郭金明
(西北有色金属研究院,陕西 西安 710016)

摘　要:TC6 合金具有中强、韧性好、热强性好等优异的综合性能,在航空航天发动机等领域有着广泛的应用。为了制备出成分均匀、无 β 斑产生的 TC6 合金铸锭,以小颗粒海绵钛、中间合金和单质金属为原料,通过真空自耗电弧熔炼制备了 3 t 级 TC6 合金铸锭(Ti-6.3Al-2.5Mo-1.65Cr-0.5Fe-0.3Si),研究了不同熔炼次数、不同稳弧电流及原料种类对合金铸锭成分均匀性及显微组织的影响。结果表明,选用二元中间合金为原料,稳弧电流为 15 A/30 s 时合金铸锭整体化学成分均匀,Cr 元素范围为 1.53%~1.56%(质量分数),铸锭组织中无 β 斑产生;选用金属单质为原料,熔炼次数为 2 次,稳弧电流为 9 A/30 s 时铸锭成分波动较大,Cr 元素范围为 1.55%~1.66%(质量分数),铸锭中存在富 Cr 和 Fe、贫 Mo 的 β 斑。实际生产中应通过合理的熔炼工艺制备出整体成分均匀,无 β 斑的 TC6 铸锭。

关键词:TC6;成分均匀性;真空自耗电弧熔炼;β 斑
中图分类号: TG146.2+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)03-0288-08

Effect of the Melting Process on the Composition Uniformity and β Fleck Segregation of the TC6 Alloy

LI Xinlin, ZHANG Tianyou, XING Xuewei, HAN Chengxiang, ZHANG Yingming, GUO Jinming
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: TC6 alloys have excellent comprehensive properties, such as medium strength, good toughness and good thermal strength, and have been widely used in aerospace engines and other fields. To prepare a TC6 alloy ingot with a uniform composition and no β fleck, a 3 t grade TC6 alloy ingot (Ti-6.3Al-2.5Mo-1.65Cr-0.5Fe-0.3Si) was prepared via vacuum consumable arc melting using a small particle titanium sponge, intermediate alloy and elemental metal as raw materials. The effects of different melting times, arc stabilizing currents and raw materials on the composition uniformity and microstructure of alloy ingots were studied. The results show that when the binary intermediate alloy is used as the raw material and the arc stabilizing current is 15 A/30 s, the whole chemical composition of the ingot is uniform, the Cr content ranges from 1.53 wt.% to 1.56 wt.%, and no β fleck exists in the structure of the ingot. When the arc stabilizing current is 9 A/30 s, the composition of the ingot fluctuates greatly, and the Cr element ranges from 1.55 wt.% to 1.66 wt.%. There are β flecks rich in Cr and Fe and poor in Mo in the ingot. A TC6 ingot with a uniform composition and no β fleck should be prepared via a reasonable melting process during actual production.

Key words: TC6; compositional uniformity; vacuum consumable arc melting; β fleck

钛合金具有高比强度、耐蚀性能好、高温性能优异等特点,广泛应用于航空航天、汽车船舶、生物医药等领域[1-3]。TC6 钛合金是典型的 α+β 型高温合金,由于其良好的热稳定性和高温力学性能,常用于制备发动机的零部件,如紧固件、叶片等[4-6]。真空自耗电弧熔炼是工业界普遍采用制备钛合金的方法之一,TC6 合金的合金元素较多, 其中 Cr、Mo 元素易产生偏析[7-8]。为了控制 TC6 合金元素偏析的现象,调控熔炼工艺、选择合适的原料是常见的手段。

合理的熔炼工艺能有效减少合金铸锭中缺陷和

收稿日期:2024-10-21
作者简介:李欣琳,1994 年生,硕士,工程师.主要从事金属材料先进成型技术、高性能钛合金、难熔合金材料方面的工作.
Email: 499169714@qq.com
引用格式:李欣琳,张天有,邢学伟,韩呈祥,张英明,郭金明.熔炼工艺对 TC6 铸锭成分均匀性其 β 斑偏析规律的影响[J].铸造技术,2025,46(3): 288-295.
LI X L, ZHANG T Y, XING X W, HAN C X, ZHANG Y M, GUO J M. Effect of the melting process on the composition uniformity and β fleck segregation of the TC6 alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(3): 288-295.

中国知网 https://www.cnki.net

偏析的产生。钛合金铸锭中一般存在 3 种缺陷：非金属/金属夹杂(氧化物、碳化物、钨、钼等)、合金元素偏析(间隙元素氧、氮、碳以及富铝、富钛偏析)以及 β 斑缺陷(铁、钼等 β 稳定元素的微区偏析)[9-10]。其中 β 斑的存在会显著降低材料的塑性和低周疲劳性能。对于 β 斑的成分和形成机制学术界尚未达成共识，当前基本可以确定 β 斑的形成来源于合金铸锭，但是铸锭中通常无法直接观察到 β 斑，常规的探伤手段也无法检测到 β 斑的存在。一般经过后续热加工处理后，合金低倍组织中即可观察到 β 斑[11]。

TC6 合金的成分和组织均匀性问题成为了目前学术界关注的焦点。李佳佳等[12]研究认为熔炼过程中采用浅熔池的方式可有效减少 β 斑的出现。王哲等[13]发现在 β 相变点以下 50 ℃锻造后，TC6 合金棒材表层强度高于心部并且表层的 α 相含量更高，随着退火温度的提高，合金的强度逐渐降低。冷却条件是影响 TC6 合金偏析情况的重要因素，减少坩埚壁厚，增加冷却速度可以一定程度上减少 Cr元素的偏析[14]。研究表明，β 斑在 TB6 合金中也会存在，且异常区域中 Fe 元素明显富集。含有 β 斑的试样抗拉强度更高但塑性较差[15]。因此提高 TC6 合金成分组织的均匀性，减少 β 斑的析出是非常必要的。本文结合实际生产，对比不同原材料、不同熔炼工艺对 TC6 合金成分均匀性的影响，并对合金中出现的 β 斑进行了分析，通过控制原料、控制熔炼次数、调整熔炼过程工艺参数等手段解决 β 斑出现的问题。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

通过 3 t 级真空自耗电弧炉熔炼制备ϕ640 mm 的 TC6 合金铸锭(名义成分为Ti-6.3Al-2.5Mo-1.65Cr-0.5Fe-0.3Si，质量分数，%，下同)，合金选用原料情况如表 1 所示。称量所用的全部原料，加入混料机，混合均匀后通过 4 000 t 自耗电极压力机压制电极块，在真空等离子焊箱内组焊电极。采用 3 t 真空自耗电弧炉进行熔炼，铸锭选用的熔炼参数见表 2，锻造及热处理工艺见表 3。

1.2　实验方法

合金铸锭成分检测统一按照国标 GB/T 4698《海绵钛、钛及钛合金化学分析方法》的规定进行。分别对 TC6 合金铸锭头部、中部、尾部的锭身取样进行成分检测，取样位置如图 1 所示。时效态合金组织观察采用心部样品，采用 JEOL JSM 7001F 型扫描电子显微镜(SEM)观察合金显微组织及 β 斑形貌特点，并通过能谱仪(EDS)分析 β 斑的元素组成。

2　实验结果及讨论

2.1　铸锭成分均匀性

图 2 是真空自耗电弧熔炼后制备的 3 t 级 TC6 合金铸锭，铸锭表面质量良好，无明显缺陷，经过扒皮、锯切冒口后成品率达到 94%以上。

表 4 是不同熔炼工艺制备的 TC6 合金铸锭头

表 1 TC6 合金铸锭选用原料
Tab.1 Raw materials for the TC6 alloy

No.	Alloying element					
	Mo	Fe	Si	Al	Cr	Ti
1#	Al-60Mo	Iron	Al-10Si	Aluminium shot	Chromium	Titanium sponge
2#	Al-60Mo	Al-60Fe	Al-10Si	Aluminium shot	Al-70Cr	Titanium sponge
3#	Al-60Mo	Al-60Fe	Al-10Si	Aluminium shot	Al-70Cr	Titanium sponge

表 2 TC6 合金熔炼工艺
Tab.2 Melting process for the TC6 alloy

No.	Electricity/kA	Voltage/V	Arc stabilizing current	Number of smelting
1#	15~25	29~39	9 A/30 s	Twice
2#	15~25	29~39	9 A/30 s	Three times
3#	15~25	29~39	15 A/30 s	Three times

表 3 TC6 合金锻造及热处理工艺
Tab.3 Forging and heat treatment process for the TC6 alloy

Production process	Heat treatment system	Processing step
Billet forging	1 200 ℃	One upsetting and pulling
Forging	30~40 ℃ above the phase transition point	Two upsetting and drawing
Forging	40~50 ℃ above the phase transition point	Four upsetting and drawing
Forging	50 ℃ above the phase transition point	Forming
Heat treatment	Isothermal annealing 870 ℃/2 h, furnace cooling to 650 ℃, holding for 2 h, air cooling	

中国知网　https://www.cnki.net

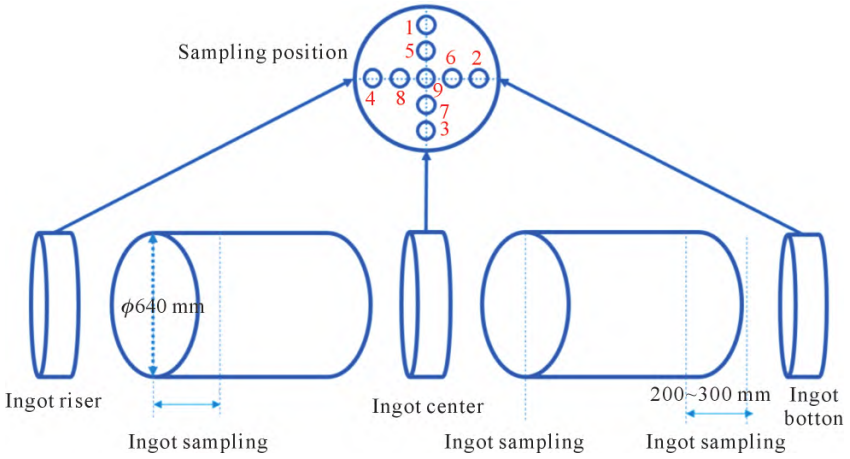

图 1 TC6 合金成分检测取样位置

Fig.1 Sampling position of the composition test for the TC6 alloy

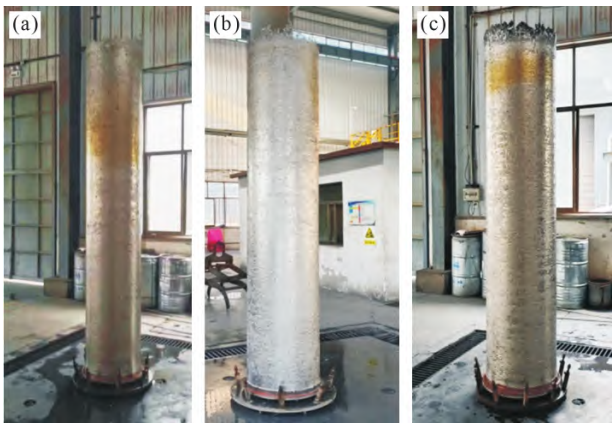

图 2 TC6 合金铸锭:(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#

Fig.2 TC6 alloy ingots: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

部、中部、尾部成分分析检测结果统计。1# 合金成分波动较大,2#、3# 合金化学成分分布较为均匀,其中 Al、Cr、Fe 元素含量波动较大,Mo、Si 元素存在轻微波动。1# 合金中铸锭上部 Al 元素含量较低为6.09%,铸锭下部 Al 元素含量为 6.4%,标准差为 15.50%。Cr 元素含量范围为 1.59%~1.66%,标准差为 5.57%。Fe 元素含量范围为 0.46%~0.57%,标准差为 5.51%。2# 合金 Al 元素含量波动较大,铸锭上部 Al 元素含量为 6.06%,铸锭下部 Al 元素含量为 6.32%,标准差为 13.45%,Al 元素均匀性有一定改善。Cr 元素含量范围为 1.62%~1.64%,标准差为 1.00%,Fe 元素含量为 0.45%~0.53%,标准差为 4.16%。3# 合金整体均匀性最好,Al 元素均匀性提高,含量范围为6.20%~6.27%,标准差为 3.79%。Cr、Fe 元素含量范围分别为 1.63%~1.66%和 0.49%~0.53%。

图 3 是 1# 合金上、中、下部不同取点位置各个元素含量的统计结果。合金下部 Al 元素含量偏高,为 6.31%~6.50%,标准差为 6.99%,极差为 0.19%。合金上部和中部 Al 元素含量范围分别为 6.01%~6.24%和 6.11%~6.34%,标准差分别为 6.60%和6.48%,极差为 0.23%。Cr 元素存在偏析情况,合金中部 Cr 元素含量较高,为 1.61%~1.77%,标准差为 4.74%;合金上、下部 Cr 元素含量范围为 1.55%~1.67%和 1.56%~1.61%,标准差为 4.31%和 1.83%。1# 合金中

表 4. 3 t 级铸锭头部、中部、尾部成分分析

Tab.4 Composition analysis of the head, middle and bottom of 3 t grade alloys

(mass fraction/%)

No.	Position	Al	Mo	Cr	Fe	Si
Nominal component		6.30	2.50	1.65	0.50	0.30
1#	Top	6.09	2.61	1.62	0.57	0.33
	Middle	6.24	2.65	1.66	0.46	0.28
	Bottom	6.40	2.71	1.55	0.52	0.28
	Standard deviation/%	15.50	5.03	5.57	5.51	2.89
2#	Top	6.06	2.55	1.63	0.53	0.33
	Middle	6.25	2.53	1.64	0.47	0.32
	Bottom	6.32	2.58	1.62	0.45	0.29
	Standard deviation/%	13.45	2.52	1.00	4.16	2.08
3#	Top	6.20	2.43	1.66	0.53	0.28
	Middle	6.26	2.48	1.64	0.51	0.28
	Bottom	6.27	2.49	1.63	0.49	0.27
	Standard deviation/%	3.79	3.21	1.53	2.00	0.58

中国知网 https://www.cnki.net

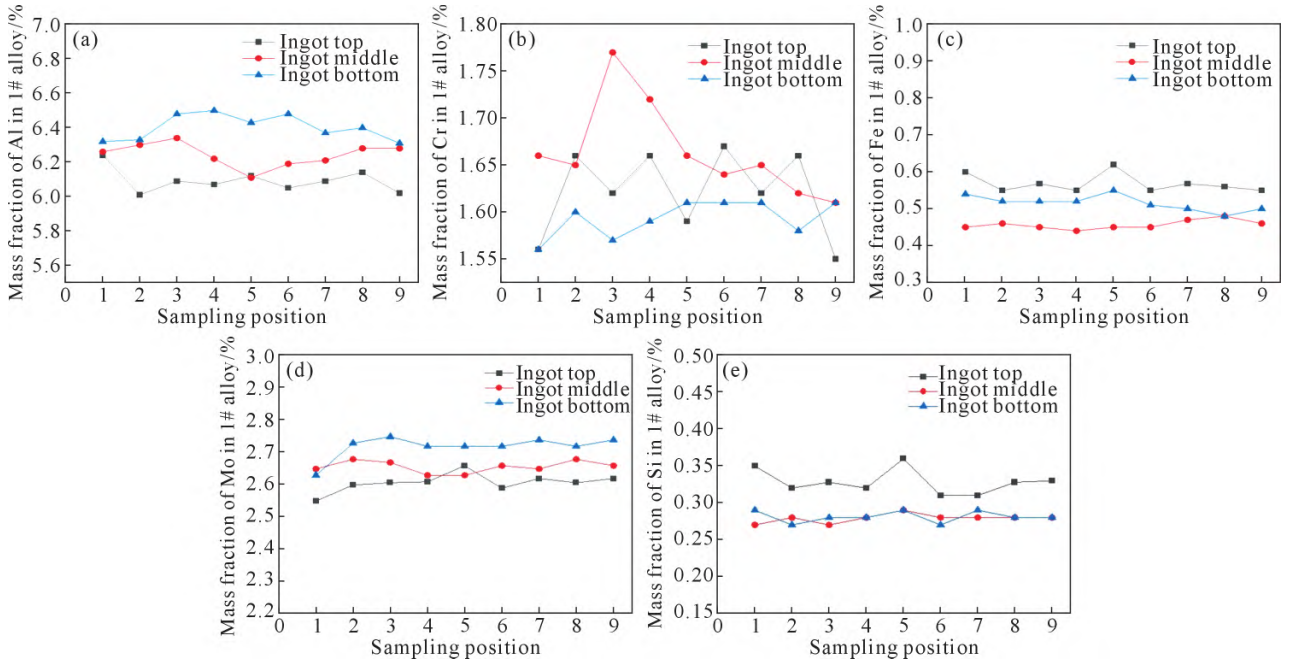

图 3　1# 铸锭元素分布：(a) Al; (b) Cr; (c) Fe; (d) Mo; (e) Si

Fig.3　Elemental distributions in 1# ingot: (a) Al; (b) Cr; (c) Fe; (d) Mo; (e) Si

部 1~4 号位置 Cr 元素含量波动较大，这是因为 1# 合金熔炼过程中熔炼次数较少、稳弧电流较低(9 A/30 s)，熔体未能充分搅拌均匀，导致高比重、高熔炼的 Cr 元素局部偏析，合金整体均匀性较差。合金中部 Fe 元素含量较低为 0.44%~0.48%，合金上、下部 Fe 元素含量为 0.55%~0.62%和 0.48%~0.55%。Si、Mo 元素均匀性较好，合金上、中、下部的 Si 元素含量极差小于 0.05%，Fe 元素含量极差小于 0.17%。

图 4 是 2# 合金上、中、下部不同取点位置各个元素含量的统计结果。合金上部 Al 元素含量偏低为 5.96%~6.32%，标准差为 15.20%，极差 0.51%；合金中、下部 Al 元素含量为 6.18%~6.28%和 6.25%~6.34%，标准差为 3.50%和 3.73%，极差为 0.12%和 0.15%。合金上部的 1~4 号位置 Al 元素含量低于合金中、下部的 1~4 号位置 Al 元素含量。Cr 元素含量分布均匀，合金上、中、下部的 Cr 元素含量极差为 0.1%、0.03%和 0.07%。Fe、Mo、Si 元素成分均匀，没有明显的偏析现象。

图 5 是 3# 合金上、中、下部不同取点位置各个元素含量的统计结果。3# 合金成分均匀性好，各个元素无

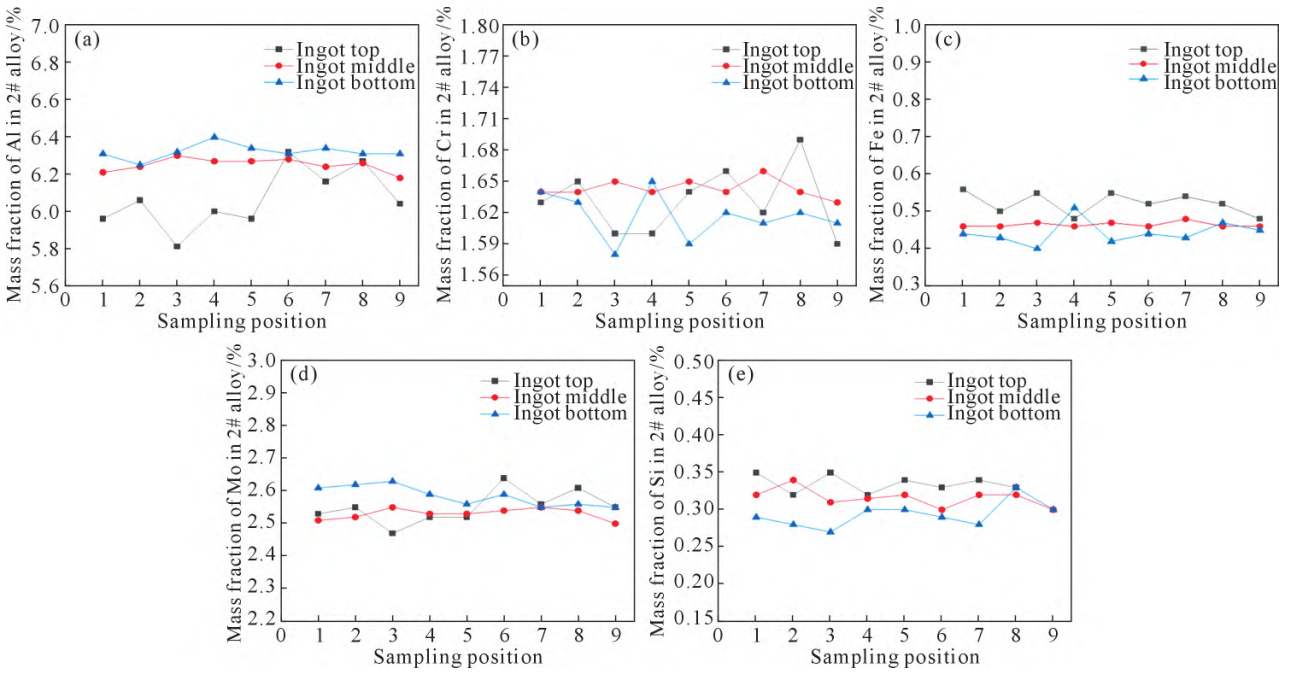

图 4　2# 铸锭元素分布：(a) Al; (b) Cr; (c) Fe; (d) Mo; (e) Si

Fig.4　Elemental distributions in 2# ingot: (a) Al; (b) Cr; (c) Fe; (d) Mo; (e) Si

中国知网　https://www.cnki.net

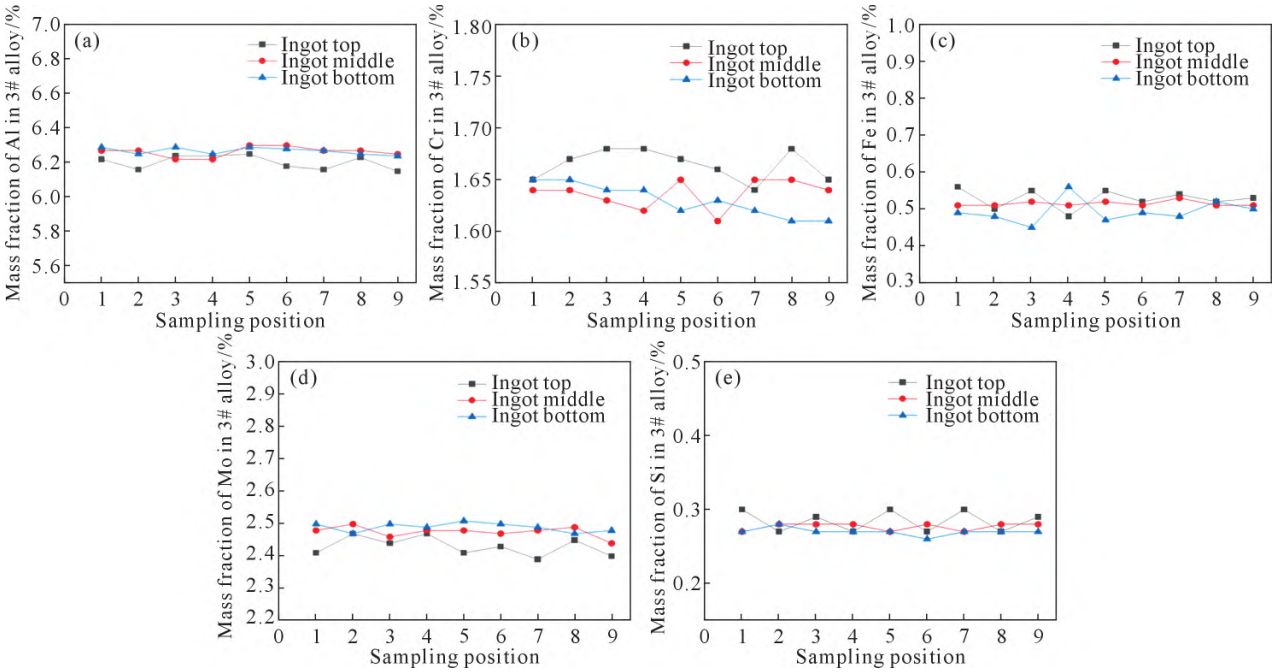

图 5 3# 铸锭元素分布:(a) Al; (b) Cr; (c) Fe; (d) Mo; (e) Si

Fig.5 Elemental distributions in 3# ingot: (a) Al; (b) Cr; (c) Fe; (d) Mo; (e) Si

明显偏析现象。合金上、中、下部的Al 元素含量极差为0.1%、0.08%和 0.05%，标准差为3.80%、2.75%和1.93%;Cr 元素含量极差均为 0.04%，标准差为1.42%、1.33%和 1.49%。合金中 Fe、Mo、Si 元素含量极差均小于 0.1%,Fe、Mo、Si 元素成分均匀性好。

钛合金熔炼一般选用真空自耗电弧熔炼的方式,而熔炼工艺参数(熔炼电压、熔炼电流、熔速、稳弧电流、冷却时间等)的选取直接影响铸锭化学成分和组织的均匀性[16-18]。实验设计了 3 种熔炼工艺方案对合金进行真空自耗电弧熔炼，其中 1# 铸锭选用纯金属作为原材料进行合金熔炼,且熔炼次数为 2 次;2# 和 3# 铸锭选用二元中间合金作为原材料进行熔炼并增加一次熔炼次数。根据实验结果可知，与 1# 铸锭相比,2# 和 3# 铸锭的化学成分和组织更加均匀，可归因于选用二元中间合金和增加熔炼次数。其中,二元中间合金的加入能够有效增加各种合金元素在电极中分布的均匀性,避免了在熔炼过程中局部合金元素富集而造成铸锭局部化学成分偏析现象。此外,2# 与 3# 铸锭相比,3# 铸锭化学成分和组织更加均匀归因于其熔炼过程中选取的稳弧电流对铸锭整体均匀性控制更优。除此之外,3 个铸锭的整体均匀性均为中部成分和组织均匀性最好,这是因为熔炼初期水冷铜坩埚底部作用和熔炼末期补缩工艺的影响，导致熔炼过程中熔池较浅,合金元素滞留时间较短，化学成分分布相对不均匀,而熔炼中期熔池深度适中，加之稳弧电流搅拌作用,使得铸锭中部化学成分更加均匀。

2.2 TC6 合金中 β 斑的成分及形貌特点

图 6 是 TC6 合金经过锻造、热处理后棒材的微观组织照片。合金显微组织为两相区加工产生的组织,无完整的原始 β 晶界;在转变的 β 基体上存在等轴 α 组织。1# 合金中发现存在 β 斑,β 斑相比于基体组织 α 相大大减少,边缘处存在过渡区域。2#、3# 合金中未发现 β 斑。

图 7 是 1# 合金基体和 β 斑的 SEM 照片,表 5 是相应的 EDS 能谱分析结果。可以发现,β 斑中 Si 元素含量相比于基体组织提高了 0.35%,Cr 元素含量提高了 0.58%,Fe 元素含量提高了 0.58%,而 Mo 元素降低了 0.44%。这与 Chen 等[19]的研究是一致的。慢共析元素 Cr、Fe 在熔炼过程中不易扩散，容易导致局部元素富集。β 元素的富集使得 β 转变温度降低。

真空自耗电极熔炼过程中，熔池受到熔体自身产生的浮力，熔炼电流产生的洛伦兹力及通过稳弧电流产生的洛伦兹力的共同影响。其中,当稳弧电流较大时,该参数是主要的影响因素[20]。施加稳弧电流后,炉体内形成竖直向上的磁场,对金属熔体产生环轴向力,从而对熔体进行搅拌。稳定电流的搅拌作用让熔体的温度分布均匀，各个方向上没有明显的温度梯度,有利于等轴晶生长,提高晶粒的形核率。β 斑是在熔炼过程中由于溶质的不均匀分布形成的,本实验中 3# 铸锭通过合适的稳弧电流得到了成分、组织均匀的铸锭，即选用合适的稳弧电流可以有效保证铸锭的成分均匀性和降低 β 斑的形成。

表 6 是 β 斑和基体组织的维氏硬度测试结果。

中国知网 https://www.cnki.net

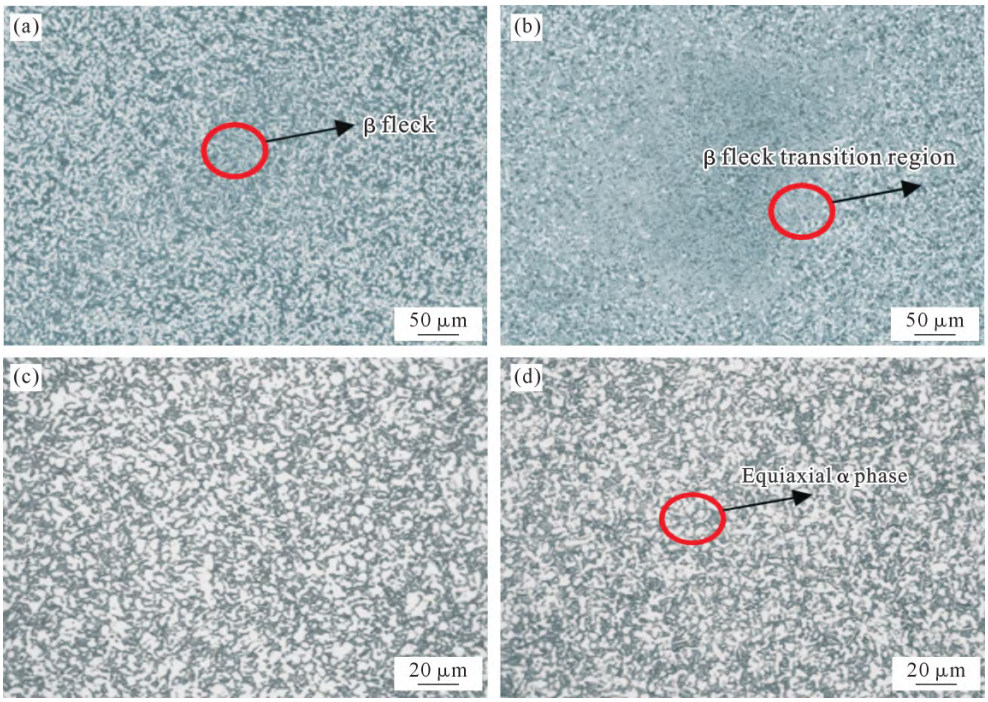

图 6 TC6 合金金相照片：(a, b) 1#; (c) 2#; (d) 3#

Fig.6 OM images of the TC6 alloys: (a, b) 1#; (c) 2#; (d) 3#

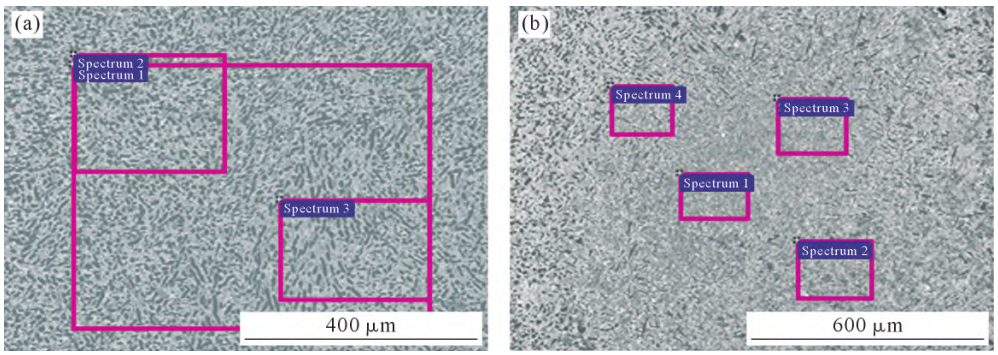

图 7 1# 合金 SEM 照片：(a) 基体；(b) β 斑

Fig.7 SEM images of 1# alloy: (a) matrix structure; (b) β fleck

表5 图7中不同区域EDS分析结果

Tab.5 EDS analysis results for different regions in Fig.7

(mass fraction/%)

Region		Element					
	Spectrum	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Mo
Matrix	Spectrum 1	5.63	0.35	88.42	2.45	0.66	2.49
	Spectrum 2	5.45	0.32	88.76	2.33	0.73	2.41
	Spectrum 3	5.62	0.34	88.31	2.57	0.99	2.51
	Average	5.57	0.34	88.50	2.45	0.79	2.47
β fleck	Spectrum 1	5.20	0.77	86.89	3.35	1.71	2.10
	Spectrum 2	5.77	0.56	86.86	3.38	1.57	1.86
	Spectrum 3	5.37	0.72	87.70	2.75	1.29	2.16
	Spectrum 4	5.84	0.69	87.91	2.66	0.89	2.00
	Average	5.55	0.69	87.34	3.03	1.37	2.03

表6 1#合金基体与β斑位置显微硬度分析

Tab.6 Microhardness analysis of the matrix and β fleck in 1# alloy

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	Average
Matrix(HV)	354	364	372	368	367	358	361	363	363
β fleck(HV)	331	336	345	330	334	336	336	335	335

中国知网 https://www.cnki.net

在正常区域及β斑区域随机取样，β斑显微硬度为335 HV，基体组织显微硬度为363 HV，β斑位置硬度略低于基体位置硬度，并且β斑显微硬度波动较大，表现出不均匀性，使得材料在形变过程中变形协调性降低。1#合金中的基体组织和β斑组织存在显著差异，造成了合金显微硬度的不同。

3 结论

(1)1#合金中存在富Cr和Fe元素、贫Mo元素的β斑，β斑相比于基体组织α相大大减少，其边缘处存在过渡区域且显微硬度明显高于基体组织。

(2)采用Al-60Mo、Al-60Fe、Al-10Si、Al-70Cr二元中间合金以及1级海绵钛作为原料，选用合适的熔炼工艺(熔炼电流：15~25 kA；熔炼电压：29~39 V；稳弧电流：交流电15 A/30 s)，制备了ϕ640 mm的TC6铸锭。铸锭成分均匀，无明显偏析和缺陷。

(3)β斑在TC6铸锭的不同位置出现，均表现出相近的成分偏析规律。经研究，钛合金的β斑是合金凝固过程中特有的一种局部微区成分偏析，β斑的微区成分差异符合微区偏析缺陷的主要特征，且有相似的形成规律，因此，可以通过选用合适的原料和熔炼工艺可以有效减少β斑的形成。

参考文献：

[1] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属，2000, 24(3): 218-223.
QIAN J H. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000, 24(3): 218-223.

[2] 赵永庆，奚正平，曲恒磊. 我国航空用钛合金材料研究现状[J].航空材料学报，2003, 23(s1): 215-219.
ZHAO Y Q, XI Z P, QU H L. Current situation of titanium alloy materials used for national aviation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(s1): 215-219.

[3] JIA W J, ZENG W D, ZHOU Y G, LIU J R, WANG Q J. High-temperature deformation behavior of Ti60 titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (12): 4068-4074.

[4] LI M Q, XIONG A M, HUANG W C, WANG H R, SU S B, SHEN L C. Microstructural evolution and modelling of the hot compression of a TC6 titanium alloy[J]. Materials Characterization, 2002, 49(3): 203-209.

[5] PEI C H, FAN Q B, CAI H N, LI J C. High temperature deformation behavior of the TC6 titanium alloy under the uniform DC electric field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489(2): 401-407.

[6] 韩亚侠，郑苏侠，高凤云. TC6钛合金的热处理工艺研究[J]. 热加工工艺，2013, 42(2): 190-192.
HAN Y X, ZHENG S X, GAO F Y. Study on heat treatment process of TC6 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (2): 190-192.

[7] 朱知寿，王庆如，周宇，王新南. TC6钛合金棒材热处理工艺研究 [J]. 航空材料学报，2004, 24(5): 15-20.
ZHU Z S, WANG Q R, ZHOU Y, WANG X N. Study of heat treatment processings of TC6 titanium alloy bars[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(5):15-20.

[8] 张鹏，魏寿庸，李阁平. TC6合金叶片用棒材组织与性能[J]. 金属学报，2002, 38(s1): 178-180.
ZHANG P, WEI S Y, LI G P. Microstructure and properties of TC6 alloy bar[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(s1): 178-180.

[9] LI G J, SHI R, FAN Q B, XIA Y M, ZHANG H M. Three-dimensional microstructure-based micromechanical modeling for TC6 titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 685: 327-331.

[10] 熊爱明，黄维超，陈胜晖，林海，李淼泉. 热处理制度对TC6钛合金显微组织的影响[J].中国有色金属学报，2005, 12(s1): 206-209.
XIONG A M, HUANG W C, CHEN S H, LIN H, LI M Q. Effects of heat treatment on microstructure of TC6 titanium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 12(s1): 206-209.

[11] SHAMBLEN C E. Minimizing β flecks in the Ti-17 alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28: 899-903.

[12] 李佳佳，王超南，刘华，康聪，李维. 熔炼工艺参数对TC6钛合金软偏析缺陷的影响[J]. 热加工工艺，2024, 53(7): 113-115, 120.
LI J J, WANG C N, LIU H, KANG C, LI W. Effect of melting process parameters on soft segregation defects in TC6 titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2024, 53(7): 113-115, 120.

[13] 王哲，王非，曹恒，王树军，郝晓博，张强. 热加工工艺对TC6钛合金棒材组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2023, 48(8): 144-148.
WANG Z, WANG F, CAO H, WANG S J, HAO X B, ZHANG Q. Effect of hot working process on microstructure and properties of TC6 titanium alloy bars[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(8): 144-148.

[14] 王阳阳，刘向宏，夏勇，赵小花，吴伟，何永胜. 冷却条件对TC6合金温度场和Cr偏析的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2023, 52 (12): 4245-4250.
WANG Y Y, LIU X H, XIA Y, ZHAO X H, WU W, HE Y S. Effect of cooling conditions on the temperature field and macrosegregation of Cr element of TC6 alloy ingot[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(12): 4245-4250.

[15] 顾忠明，张起，乔恩利，高芳兰. 固溶时效温度对TB6钛合金棒材组织及力学性能的影响[J]. 金属世界，2024(3): 7-11.
GU Z M, ZHANG Q, QIAO E L, GAO F L. Effect of solution aging temperature on microstructure and properties of TB6 titanium alloy bars[J]. Metal World, 2024(3): 7-11.

[16] 赵小花，李金山，杨治军，孙来喜，常辉，薛祥义，周廉. 钛合金真空自耗电弧熔炼过程中温度场的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金，2010, 30(11): 1001-1004.
ZHAO X L, LI J S, YANG Z J, SUN L X, CHANG H, XUE X Y, ZHOU L. Numerical simulation of temperature field in vacuum arc remelting Ti alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(11): 1001-1004.

[17] 李明宇，杨树峰，刘威，贾雷，赵朋，鄢宇灿. 真空自耗熔炼钛合

中国知网 https://www.cnki.net

金的偏析缺陷及控制研究进展[J].中国冶金,2023, 33(9): 1-10, 18.
LI M Y, YANG S F, LIU W, JIA L, ZHAO P, YAN Y C. Research process on segregation and control of titanium alloy during vacuum arc remelting[J]. China Metallurgy, 2023, 33(9): 1-10, 18.

[18] JING Z Q, SUN Y H, LIU R, CHEN L, GENG N T, ZHENG Y P, PENG L, WANG Y. Effect of vacuum arc remelting process parameters on macrosegregation in TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(3): 815-822.

[19] CHEN C C, BOYER R R Practical considerations for manufacturing high-strength Ti-10V-2Fe-3A1 alloy forgings[J]. JOM, 1979, 31: 33-39.

[20] 孙悦颖,景然,叶茜,张曼雪,解念锁. 固溶时效处理对 TC6 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2020, 45(7): 45-50.
SUN Y Y, JING R, YE X, ZHANG M X, XIE N S. Effect of solution and aging treatment on microstructure and properties of TC6 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(7): 45-50.

中国知网　https://www.cnki.net