

# TA17 钛合金锭半连续感应熔炼及熔模精密铸造工艺可行性研究

颜红兵<sup>1,2</sup>, 陈 慧<sup>1,2</sup>, 白荣忍<sup>1,2</sup>, 乔海滨<sup>1,2</sup>, 李伟东<sup>1,2,3</sup>

(1. 洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471039)

(2. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 河南 洛阳 471000)

(3. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对真空自耗电弧熔炼制备钛合金存在流程长、成本高及铸锭均质性不足等问题, 开发了一种适用于钛合金的半连续真空感应熔炼工艺。采用该工艺制备了大规格 TA17 钛合金铸锭, 系统评价了铸锭的化学成分均匀性, 结果表明主元素 Al、V 分布均匀, 最大偏差分别为 0.10% 与 0.08%; 间隙元素 O、N 含量低且分布一致。将该工艺制备的铸锭用于熔模精密铸造, 并对所制备的筒体铸件及拉伸试样进行综合性能研究。结果显示, 铸件成分均匀, Al、V 元素烧损率极低, O、N 元素含量满足技术标准; 微观组织为均匀的网篮组织,  $\alpha$  片层及  $\beta$  晶粒尺寸在不同部位偏差小; 室温拉伸性能优良且稳定, 抗拉强度为(740±15) MPa, 屈服强度为(685±20) MPa, 断后伸长率为(10.5±2)%。研究表明, 该半连续真空感应熔炼技术能够制备高纯净、高均质的钛合金铸锭, 为高品质钛合金精密铸件提供了可靠的原材料基础。

**关键词:** 半连续感应熔炼; TA17 钛合金; 间歇拉锭

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)02-001-06

## Feasibility Study on Semi-continuous Induction Melting and Investment Precision Casting Techniques for TA17 Titanium Alloy Ingot

Yan Hongbing<sup>1,2</sup>, Chen Hui<sup>1,2</sup>, Bai Rongren<sup>1,2</sup>, Qiao Haibin<sup>1,2</sup>, Li Weidong<sup>1,2,3</sup>

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

(2. Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To address the issues of lengthy processes, high costs, and insufficient homogeneity in titanium alloys produced by vacuum consumable arc melting, this study developed a semi-continuous vacuum induction melting process tailored for titanium alloys. Using this technology, a large-scale TA17 titanium alloy ingot was prepared, and the uniformity of its chemical compositions was systematically evaluated. The results show that the distribution of the principal elements (Al, V) in the ingot is uniform, with maximum deviations of 0.10% and 0.08%, respectively, while the interstitial elements (O, N) are maintained at low levels with consistent distribution. The ingot prepared by this process is further used for investment casting, and a comprehensive performance study is conducted on the prepared cylinder castings and tensile specimens. The results demonstrate that the casting exhibits uniform chemical composition, with extremely low burn-off rates of Al and V elements, while the contents of O and N elements both meet the technical standards. The microstructure of the casting consists of a uniform basket-weave structure, with minimal deviation in  $\alpha$  platelet and  $\beta$  grain sizes across different locations. The room-temperature tensile properties are excellent and stable, with tensile strength of (740±15) MPa, yield strength of (685±20) MPa, and elongation after fracture of (10.5±2)%. This study confirms that this semi-continuous vacuum induction melting technology can produce high-purity and homogeneous titanium alloy ingot, providing a reliable raw material foundation for high-

quality titanium alloy precision castings.

收稿日期: 2025-12-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB2008300)

通信作者: 李伟东(1985—), 男, 高级工程师。

**Keywords:** semi-continuous induction melting; TA17 titanium alloy; intermittent billet withdrawal

水冷坩埚真空感应熔炼技术是一种将分瓣式水冷坩埚置于交变电磁场中,通过电磁感应产生涡流热使金属熔化,并借助电磁力使熔体与坩埚壁保持软接触或非接触状态的先进熔炼方法。该技术能够有效避免高温下坩埚材料对熔体的污染,同时通过感应加热与电磁搅拌作用,使熔池温度分布均匀,实现合金成分的精确控制,因而被视为当前材料制备领域中最具应用前景的技术之一<sup>[1-5]</sup>。

水冷坩埚真空感应熔炼技术的应用已拓展至众多先进材料领域,包括高温合金、金属间化合物、高纯溅射靶材、难熔金属与合金、氧化物陶瓷、宝石晶体、放射性材料及高纯多晶硅等。然而,受限于该技术本身存在的能耗高与冷却难题,目前所熔炼的钛合金单锭质量仍低于100 kg,尚无法满足航空航天及舰船等领域对大规格、高均质钛合金铸锭的需求<sup>[6-7]</sup>。

针对钛合金真空自耗电弧炉熔炼工艺存在的流程长、成本高、铸锭均质性差、杂质含量高以及现有水

冷铜坩埚感应熔炼单锭规格小的技术难题<sup>[8-11]</sup>,项目团队开发了一种适用于钛合金的半连续真空感应熔炼装置以及大规格钛合金铸锭的熔炼工艺,同时将制备的大规格TA17钛合金铸锭用于熔模精密铸造,并对所浇铸的铸件及拉伸试样进行成分、组织及性能的评价,以探讨钛合金半连续感应熔炼+熔模精密铸造工艺的可行性。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

选取海绵钛、铝钒合金配制TA17钛合金原料,其中Al元素含量为4.025%,V元素含量为2.80%,余量为Ti。铝钒合金用铝箔包裹,所配制的单个合金包质量为4 kg。

熔模型壳采用多层复合结构,面层使用氧化钼基耐火材料,背层采用莫来石。表1为制备型壳的材料参数<sup>[12-13]</sup>。

表1 制备型壳的材料参数<sup>[12-13]</sup>

Table 1 Material parameters for preparing type shells

Structure layer	Adhesive	Powder	Sand material
Surface layer	Zirconium diacetate	325 mesh electro-fused yttria powder	60–120 mesh fused zircon sand
Transition layer	Silica sol	325 mesh fused zirconia powder	30–60 mesh molybdenum sand
Back layer	Silica sol	200 mesh molybdenum powder	15–30 mesh mullite sand

### 1.2 实验方法

采用半连续真空感应熔炼方法(如图1所示)制备 $\phi 280$  mm的大规格TA17钛合金铸锭,其工艺原理:

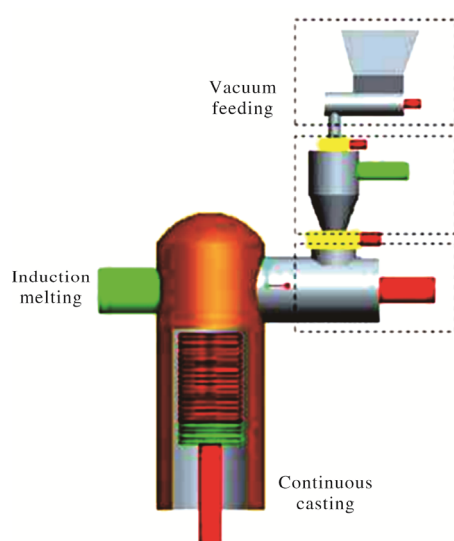


图1 半连续感应熔炼方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of semi-continuous induction melting method

① 在不破坏熔炼腔室真空的条件下,持续将合金料加入水冷铜坩埚中;② 通过线圈感应熔炼熔化水冷铜坩埚内的合金;③ 通过拉锭装置将熔化后的合金下拉至结晶器,凝固成锭;④ 重复上述动作,从而实现大规格高品质钛合金锭的制备。具体实施流程如下:① 将 $\phi 278$  mm $\times$ 300 mm的TA17钛合金锭作为引锭头,与间歇拉锭装置相连后关闭炉腔;② 将拉锭装置上移,使引锭头上升至坩埚熔炼区域;③ 抽真空,使炉腔真空度 $<0.9$  Pa;④ 开启半连续感应熔炼炉电源加热,功率按照100 kW/min的速度升高至设定的750 kW;⑤ 待引锭头熔化后,开始合金包的添加及熔炼,最终得到 $\phi 280$  mm $\times$ 200 mm的TA17钛合金铸锭。表2为熔炼工艺参数。

表2 半连续感应熔炼TA17钛合金铸锭的工艺参数

Table 2 Process parameters for semi-continuous induction melting of TA17 titanium alloy ingot

Current /A	Power /kW	Frequency /Hz	Feeding rate /kg $\cdot$ min <sup>-1</sup>	Casting speed /mm $\cdot$ min <sup>-1</sup>
1350	750	9000	4	14.5

用数控车床去除TA17钛合金铸锭表面氧化皮,采用熔模精密铸造的方法成形钛合金筒体铸件。表3为熔模精密铸造的主要工艺参数。为便于测量铸件的室温拉伸性能,采用相同工艺参数铸造拉伸试样,其中,拉伸试样直径为6 mm,标距长度为24 mm。

表 3 熔模精密铸造主要工艺参数

Fusion current /A	Arc voltage /V	Vacuum level /Pa	Mass of casting /kg
21000±1000	32-36	<0.9	300

TA17 钛合金铸件浇注完成后,在凝壳炉中保温 30 min,出炉后在型壳中缓冷至 200 °C以下脱壳。对脱壳后的 TA17 钛合金铸锭进行热等静压及退火处理,具体工艺参数见表 4。

表 4 TA17 钛合金铸件热等静压及退火处理工艺参数

Process	Temperature /°C	Pressure /MPa	Time /h	Vacuum level/ Pa	Cooling method
HIP	920±10	140±10	2±0.1	—	FC
Anneal	700±14	—	2	<0.9	FC

1.3 测试方法

1.3.1 铸锭成分

从半连续感应熔炼方法制备的 φ280 mm TA17 钛合金铸锭上取样,取样位置如图 2 所示,包括单锭区域(单次加料合金内部区域)和衔接界面(两次加料的界面衔接区域)。采用电感耦合等离子体发射光谱仪及惰性气体熔融分析仪进行化学成分分析。

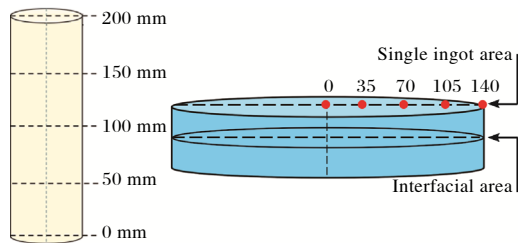


图 2 TA17 钛合金铸锭取样位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling locations for TA17 titanium alloy ingot

1.3.2 铸件成分及性能检测

如图 3 所示,在铸件顶部(1#)、中部(2#)及底部(3#)取样进行化学成分分析及显微组织观察。对所浇铸的拉伸试样进行室温拉伸性能表征。

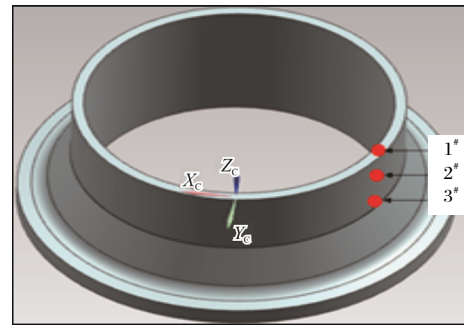


图 3 铸件化学成分及微观组织取样部位示意图

Fig.3 Sampling locations for chemical composition and microstructure analysis of casting

2 结果与分析

2.1 铸锭成分

为系统评估半连续感应熔炼 TA17 钛合金铸锭的化学成分均匀性,考察了单锭区域与衔接界面的元素分布特征。图 4 为 TA17 钛合金铸锭单锭区域和衔接界面不同位置的 Al、V 元素含量分布。从图 4 可知,单锭区域 Al 元素含量在 3.96%~3.98%的窄幅区间波动(极差 0.02%),表现出优异的径向均匀性;而在衔接界面,Al 元素含量分布范围稍宽,为 3.99%~4.04%(极差 0.05%)。单锭区域 Al 元素均匀性优于衔接界面,这与间歇加料导致的熔体扰动有关。单锭区域和衔接界面的 Al 元素含量从铸锭中心向边部呈现出略微升高的趋势,而衔接界面的 Al 元素含量整体略高于单锭区域,这主要是由于加料过程中衔接界面的熔体温度相对较低,导致 Al 元素的烧损较少。单锭区域 V 元素含量分布范围为 2.7%~2.8%(极差 0.10%),衔接界面为 2.71%~2.78%(极差 0.07%)。单锭区域和衔接界面的 V 元素含量均从铸锭中心向边部呈逐渐减少的趋势。这一现象的主要原因是钛合金熔体中心温度较高,而 V

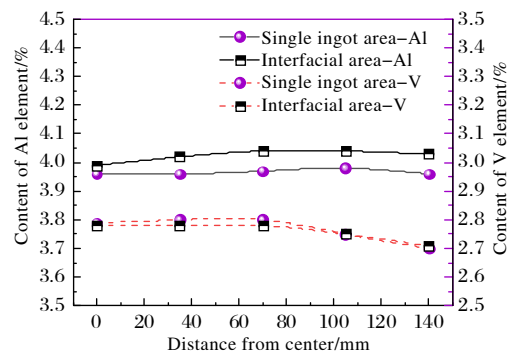


图 4 单锭区域和衔接界面不同位置 Al、V 元素含量分布  
Fig.4 Distribution of Al and V element contents at different locations in single ingot area and interfacial area

元素在钛合金熔体中的溶解度随温度升高而增大，因此中心区域的 V 元素含量相对较高。

图 5 为 TA17 钛合金铸锭纵剖面从中心到边部不同位置的 Al、V 元素含量分布。从图 5 可知，整个铸锭 Al、V 元素含量的最大偏差分别为 0.10%和 0.08%。虽然半连续感应熔炼铸锭中 Al、V 元素表现出较好的均质性，但存在较为明显的偏析规律。Al 元素含量从

铸锭边部向中心呈现出递减趋势，边部表现为正偏析，中心表现为负偏析。与 Al 元素相反，V 元素含量从铸锭边部向中心呈递增趋势，形成这一现象的原因是由于 V 元素为难挥发元素，在熔炼过程中无明显烧损情况。除此之外，随着温度的升高，V 元素在钛液中的溶解度增大，由于熔体心部温度相对较高，因此 V 元素在铸锭心部表现为正偏析，边部表现为负偏析。

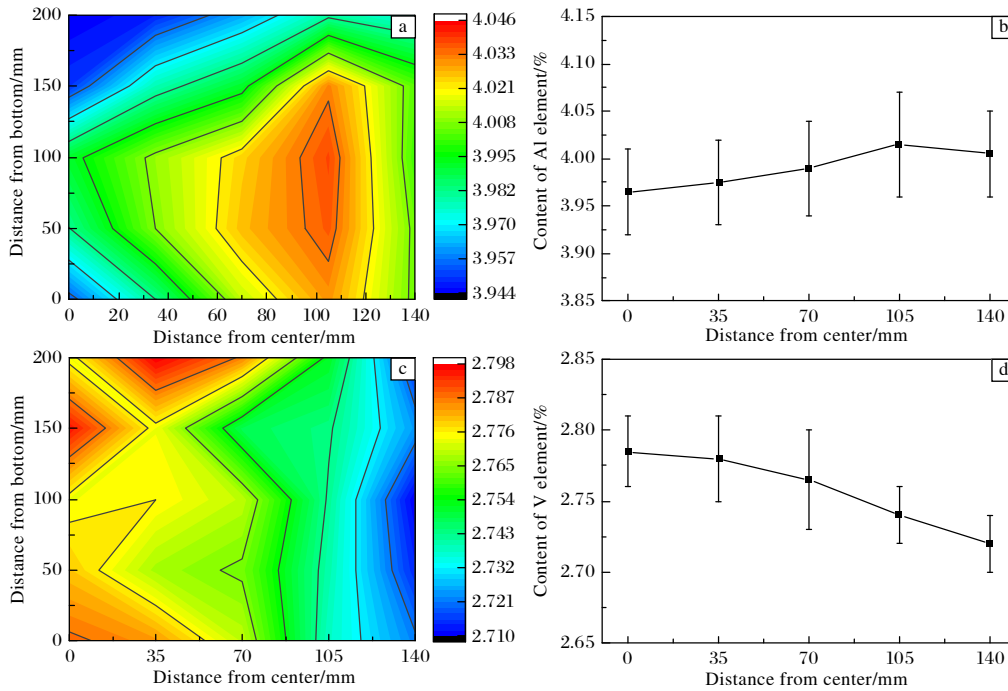


图 5 距铸锭中心不同位置的 Al、V 元素含量分布

Fig.5 Distribution of Al and V element contents at different locations from ingot center: (a, b) Al element; (c, d) V element

图 6 为 TA17 钛合金铸锭单锭区域和衔接界面 O、N 元素含量分布。从图 6 可知，铸锭中间隙元素 O、N 含量均被控制在较低水平，O 元素含量稳定在 0.125%~0.135%的狭窄区间内，且铸锭单锭区域及衔接区域轴向与径向分布均表现出高度一致性，未出现

明显的区域性偏聚。N 元素含量在 0.006%~0.008%的极低范围内。这一结果充分印证了高真空熔炼环境与电磁搅拌工艺对杂质元素的高效协同控制作用：高真空为气体杂质的脱除提供了强大的热力学驱动力，而电磁搅拌则通过强化熔体传质，显著提升了脱气动力学过程。

综上所述，本研究采用半连续感应熔炼工艺制备的 TA17 钛合金铸锭主元素(Al、V)和间隙元素(O、N)分布均较为均匀，且间隙元素含量较低。因此，半连续感应熔炼工艺能够有效制备高均质、低杂质含量钛合金铸锭。

## 2.2 筒体铸件成分

### 2.2.1 主元素

将 TA17 钛合金铸锭用于熔模精密铸造，所制备的筒体铸件不同部位 Al、V 元素含量见图 7。从图 7 可知，筒体铸件的 Al 元素含量分布范围为(3.95±0.03)%，V 元素含量分布范围为(2.80±0.02)%。相较于原始铸锭

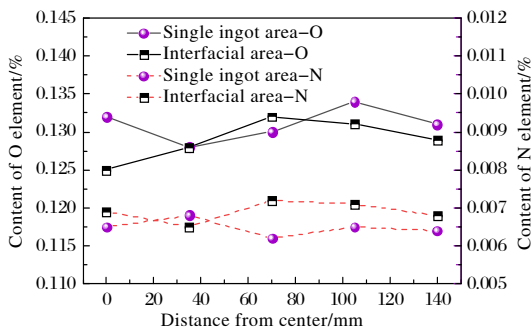


图 6 单锭区域和衔接界面不同位置 O、N 元素含量分布  
Fig.6 Distribution of O and N element contents at different locations in single ingot area and interfacial area

成分(Al 4.02%, V 2.80%), 筒体铸件的主元素烧损率极低, 其中 Al 元素平均烧损率为 1.7%, V 元素无明显烧损。这一优异表现归因于真空自耗电弧凝壳炉重熔过程的高真空环境(真空度 $<0.9$  Pa)与快速熔化特性, 有效抑制了 Al、V 等易氧化元素的烧损。

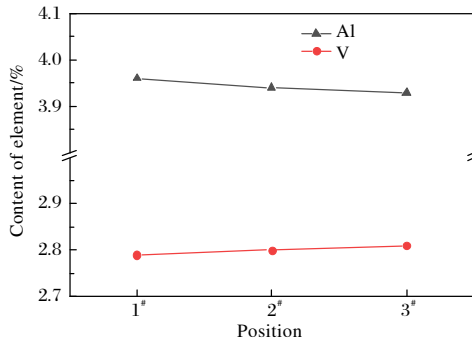


图 7 筒体铸件不同部位 Al、V 元素含量

Fig.7 Content of Al and V elements at different positions of cylinder casting

### 2.2.2 间隙元素

图 8 为筒体铸件不同部位的 O、N 元素含量。从图 8 可知, 筒体铸件中 O 元素含量为 $(0.14\pm 0.05)\%$ , N 元素含量为 $(0.007\pm 0.001)\%$ 。与原始铸锭相比, 筒体铸件中 O 元素含量略有升高, 主要是由于熔模铸造过程中, 高温钛液不可避免地会与面层型壳( $Y_2O_3$ )发生微量界面反应。尽管如此, 间隙元素 O、N 含量均满足 TA17 钛合金熔模铸件的技术标准(通常要求  $O < 0.20\%$ ,  $N < 0.05\%$ )。

### 2.3 筒体铸件组织

图 9 为 TA17 钛合金筒体铸件不同部位的微观组

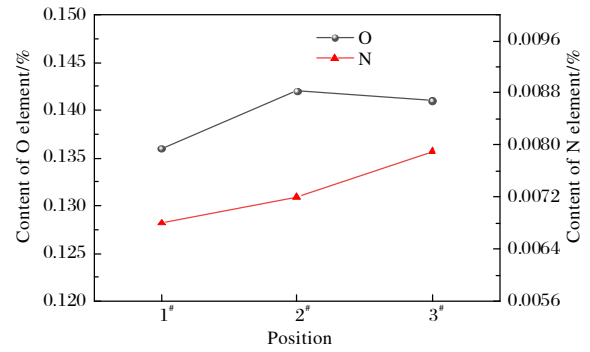


图 8 筒体铸件不同部位 O、N 元素含量

Fig.8 Content of O and N elements at different positions of cylinder casting

织。从图 9 可以看出, 筒体铸件微观组织为典型的网篮组织, 包含  $\alpha$  相和转变  $\beta$  相。通过图像分析软件统计了铸件  $\alpha$  片层集束尺寸, 其中 3#区域(铸件底部)  $\alpha$  片层集束平均尺寸为 $(185\pm 25)$   $\mu m$ , 1#区域(铸件顶部)为 $(175\pm 20)$   $\mu m$ , 不同部位间的最大偏差不得超过 12%, 表明  $\alpha$  片层集束尺寸分布均匀;  $\alpha$  片层宽度在 1.5~2.2  $\mu m$  之间, 平均值为 $(1.8\pm 0.3)$   $\mu m$ ;  $\beta$  晶粒尺寸为 $(220\pm 35)$   $\mu m$ , 尺寸偏差在 $\pm 8\%$ 以内。统计结果表明, 从筒体铸件的厚大部位到薄壁部位,  $\alpha$  片层宽度变化平缓, 未出现明显的组织梯度, 且各部位的  $\alpha$  片层集束尺寸、 $\alpha$  片层宽度和  $\beta$  晶粒尺寸均保持一致性, 表明制备的铸件具有优异的微观组织均匀性。这种均匀的组织特征主要归因于两方面: 一是半连续感应熔炼铸锭本身具有高度均匀的初始组织; 二是优化的熔模铸造工艺可确保铸件各部位经历相近的凝固冷却过程。

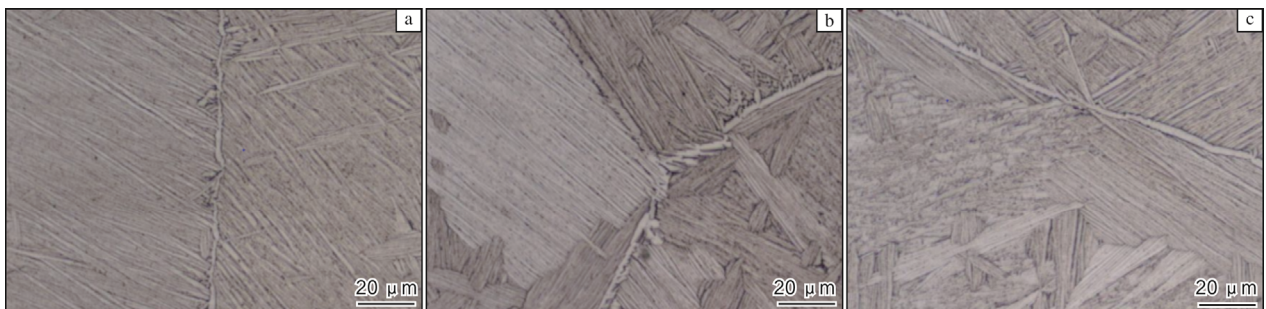


图 9 TA17 钛合金筒体铸件不同部位的微观组织

Fig.9 Microstructures in different positions of TA17 titanium alloy cylinder casting: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

### 2.4 筒体铸件力学性能

图 10 为熔模精密铸造 TA17 钛合金试样的室温拉伸应力-应变曲线。从图 10 可知, 熔模精密铸造试样的拉伸性能优良且稳定, 强塑性匹配良好, 抗拉强度为 $(740\pm 15)$  MPa, 屈服强度为 $(685\pm 20)$  MPa, 断后伸

长率为 $(10.5\pm 2)\%$ , 强度指标的标准偏差在合理范围内, 塑性指标优异。

铸件的组织与力学性能有着密切的内在关联, 其强度主要受  $\alpha$  片层宽度和  $\beta$  晶粒尺寸的协同作用控制, 适中的  $\alpha$  片层宽度通过界面强化机制为材料提供良好

的强度基础,而均匀的 $\beta$ 晶粒分布则可确保强度的稳定性。TA17钛合金铸件断后伸长率达到10.5%,表明其具有优异的塑性变形能力,主要得益于合理的 $\alpha$ 片层集束尺寸为位错运动提供了充足的滑移空间,同时在变形过程中能够有效延缓裂纹的萌生和扩展。

TA17钛合金铸件在拉伸测试中表现出良好的性能稳定性,主要得益于两个关键因素的协同保障:首先,半连续感应熔炼工艺制备的铸锭本身具有高度均匀的初始组织和化学成分分布,为后续精密铸造提供了可靠的原料基础;其次,优化的熔模铸造工艺参数确保铸件各部位经历了相近的凝固冷却历程,从而获得了协调一致的微观组织结构。

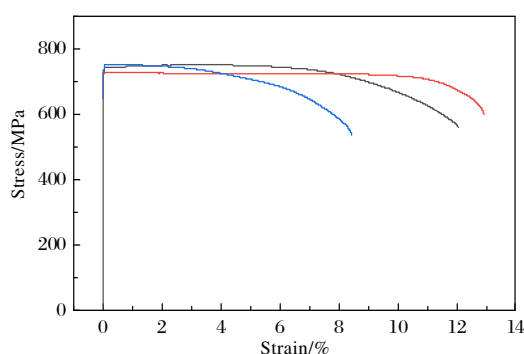


图10 铸造TA17钛合金拉伸试样应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of casting TA17 titanium alloy tensile specimens

### 3 结论

(1) 半连续真空感应熔炼工艺制备的大规格TA17钛合金铸锭,其主元素Al和V沿铸锭径向分布均匀,最大偏差分别仅为0.10%和0.08%;间隙元素O和N含量均控制在低水平范围内(其中,O为0.125%~0.135%,N为0.006%~0.008%),且分布一致。高真空环境与电磁搅拌的协同作用有效提升了熔体杂质控制能力和均质化程度。

(2) 基于上述TA17钛合金铸锭制备的熔模精密铸件保持了良好的成分稳定性,主元素Al含量为 $(3.95\pm 0.03)\%$ ,烧损率仅为1.7%;V元素含量稳定在 $(2.80\pm 0.02)\%$ ,无明显烧损。间隙元素O、N含量分别为 $(0.14\pm 0.05)\%$ 和 $(0.007\pm 0.001)\%$ 。

(3) TA17钛合金铸件各部位组织均匀, $\alpha$ 片层宽度在1.5~2.2 $\mu\text{m}$ 范围内, $\beta$ 晶粒尺寸为 $(220\pm 35)\mu\text{m}$ 。

(4) TA17钛合金铸件室温拉伸性能优良且稳定,抗拉强度为 $(740\pm 15)\text{MPa}$ ,屈服强度为 $(685\pm 20)\text{MPa}$ ,断后伸长率为 $(10.5\pm 2)\%$ 。良好的强塑性匹配源于均匀的微观组织结构,适中的 $\alpha$ 片层宽度通过界面强化机

制为材料提供了良好的强度基础,而合理的 $\alpha$ 片层集束尺寸为位错运动提供了充足的滑移空间,同时在变形过程中能有效延缓裂纹的萌生和扩展。

(5) 半连续真空感应熔炼与熔模精密铸造相结合的工艺路线,能够稳定制备组织均匀、成分可控、性能达标的高品质TA17钛合金铸件。

### 参考文献 References

- [1] Zhang R, Wang D J, Liu S Q, et al. Effect of microstructures on hot compression behavior of a Ti-43Al-2Si alloy fabricated by cold crucible continuous casting[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 424-430.
- [2] Yang J R, Chen R R, Ding H S, et al. Numerical calculation of flow field inside TiAl melt during rectangular cold crucible directional solidification[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 157-163.
- [3] 李磊, 张森. 真空悬浮熔炼技术[J]. 冶金设备, 2015(5): 13-17.
- [4] Wang Q, Ding H S, Zhang H L, et al. Growth rates dependence of macro/microstructures and mechanical properties of Ti-47Al-2Nb-2Cr-0.2Er alloy directionally solidified by cold crucible[J]. Materials & Design, 2017, 125: 146-157.
- [5] Wang S, Wang Q, Chen R R, et al. Numerical analysis for solid-liquid interface shape at various temperature gradient in electromagnetic cold crucible directional solidification[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 199: 123443.
- [6] 李磊, 张森. 真空悬浮熔炼技术简介及其研究进展[J]. 军民两用技术与产品, 2012(7): 43-44.
- [7] 刘宇, 张桂芳, 漆鑫, 等. 电磁悬浮熔炼金属合金的研究进展: 应用和数值模拟[J]. 材料导报, 2022, 36(21): 159-166.
- [8] 张晋, 王永强, 户如意, 等. 大规格TA10钛合金铸锭生产工艺研究[J]. 世界有色金属, 2020(23): 127-128.
- [9] 张娜, 廖强, 文娜, 等. 熔炼方法对TC2钛合金铸锭成分均匀性的影响[J]. 机械工程与自动化, 2019(4): 135-137.
- [10] 赵小花, 王凯旋, 王锦程, 等. 钛合金铸锭尾部冶金质量影响因素研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(9): 2565-2570.
- [11] 李莹莹. 等离子冷床炉冶炼钛合金去除夹杂物的研究[J]. 铸造技术, 2020, 41(2): 132-134.
- [12] 沈昀, 郑功, 冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 54-62.
- [13] 陈显明. 钛合金熔炼与铸造技术新进展[J]. 肇庆学院学报, 2010, 31(2): 20-25.