

# 钛合金铸锭冒口损失率差异性成因分析及对策研究

郑亚波<sup>1</sup>, 毛玲玲<sup>1</sup>, 刘钊<sup>1</sup>, 陈峰<sup>1</sup>, 陈战乾<sup>2</sup>

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西宝鸡 721014; 2. 宝钛集团有限公司, 陕西宝鸡 721014)

**摘要:** VAR熔炼的钛合金铸锭, 熔炼末期需要采用补缩工艺制度, 降低铸锭冒口损失率, 提高成材率。在实际生产过程中, 钛合金铸锭冒口损失率受各种因素影响, 每个铸锭之间存在较大差异, 且波动范围大, 损失严重。为了分析钛合金铸锭冒口损失率差异性的影响因素, 应用Minitab统计软件, 采用多因子方差分析方法进行研究, 找出了熔炼工班次、补缩时间班次、探伤操作者、补缩期操作稳定性、补缩过程是否频繁短路等显著影响因子, 排除了不显著的因子交互作用, 并针对各显著因子, 制定了相应的改进对策, 有效降低了钛合金铸锭冒口损失率以及铸锭间的差异性, 提高了成材率。

**关键词:** 钛合金; 铸锭; 冒口损失率; Minitab; 方差分析

钛合金性能优异, 在国防军工、航空航天、舰船兵器、冶金化工等各领域应用越来越广泛。而钛合金铸锭熔炼是钛材加工的第一道工序, 目前, 在国内外应用最多的熔炼方式仍然是真空自耗电弧(VAR)熔炼法。VAR熔炼过程可分为三个阶段, 依次是起弧期、正常熔炼期及头部补缩期; 其中, 对于钛合金成品铸锭, 头部补缩期是熔炼的最后操作阶段, 补缩质量的好坏将直接影响到铸锭头部组织的好坏及冒口损失量的多少, 进而影响铸锭成材率的高低<sup>[1]</sup>。

在工业化批量生产过程中, 大部分钛合金铸锭熔炼均经过长期的摸索和积累, 制定了固化的补缩工艺制度。对于VAR熔铸的不同直径及吨位的铸锭, 其冒口损失率也存在差异,  $\Phi 700$  mm/5 t级以下规格的铸锭, 其冒口损失率一般在1.5%~3.5%之间; 而 $\Phi 800$  mm/6 t级以上规格的铸锭, 其冒口损失率一般在2%~5%之间。实际操作过程中, 受各种因素影响, 每个铸锭之间的冒口损失率均存在一定的差异性, 部分铸锭之间波动范围较大, 最终造成成材率不稳定, 经济损失严重。为了降低成本及损失, 张新<sup>[2]</sup>、冉兴<sup>[3]</sup>、李莹莹<sup>[4]</sup>等人对低成本钛合金铸造及热封顶技术进行了研究; 张颖娟<sup>[5]</sup>、刘千里<sup>[6]</sup>、雷文光<sup>[7]</sup>等从数值模拟技术方面对钛合金铸造、凝固过程等方面进行了研究。因此, 如何确定钛合金铸锭冒口损失率差异性的影响因素, 从而制定有效的改进策略、降低铸锭冒口长度及锭间的波动性、减少损失, 就成为过程控制的关键。

Minitab统计软件是六西格玛管理中应用较为广泛的质量管理工具, 具有强大的数据分析和预测能力<sup>[8]</sup>。方差分析法能够通过对应变量影响的多个因子进行数据统计分析, 从而判定各因子对响应变量的影响是否显著<sup>[9-13]</sup>。本文针对钛合金铸锭冒口损失率差异性的多个影响因子, 应用Minitab软件中的多因子方差分析法, 研究各因子及其交互作用对相应变量影响的显著性, 进而对显著因子采取改进策略, 降低铸锭冒口损失率、提高铸锭的成材率。

## 作者简介:

郑亚波(1986-), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为钛及钛合金真空熔炼技术。电话: 0917-3382769, E-mail: yabozheng@163.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)07-0962-06

## 收稿日期:

2023-06-20 收到初稿,  
2023-08-15 收到修订稿。

# 1 试验条件与数据

## 1.1 铸锭冒口损失率

钛合金铸锭生产流程主要包括挑料、布料、配

料、压料、自耗电极焊接、一次VAR熔炼、一次锭处理，二次VAR熔炼、二次锭处理、三次VAR熔炼等工序，如图1所示。

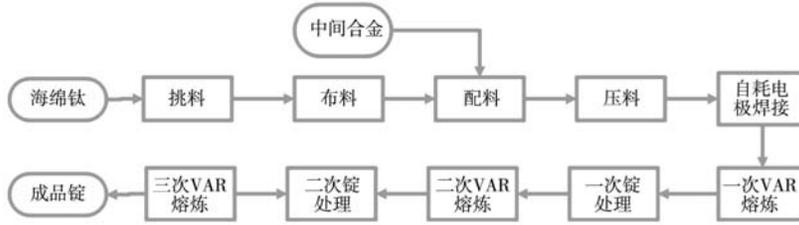


图1 三次钛合金铸锭生产流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the production process flow for three times titanium alloy ingot melting and casting

在钛合金铸锭最后一次VAR熔炼过程中，熔炼末期需要进行热封顶补缩操作，主要采用“多级补缩，低电流保温”的工艺制度，以减少铸锭头部缩孔和疏松的产生，使熔炼过程中产生的气体和夹杂物尽可能上浮，最终使铸锭头部的结晶组织与本体基本保持一致，减少铸锭头部的切除量，提高成材率。由于铸锭头部产生缩孔（图2），需要在后续加工前进行超声波探伤，确定位置并切除处理，切除部分的质量所占铸锭总质量的百分比称之为冒口损失率，具体如下。

$$\text{铸锭冒口损失率} = \frac{\text{铸锭头部缩孔切除部分的质量}}{\text{铸锭总质量}} \times 100\% \quad (1)$$

## 1.2 数据收集

对公司2022年1-6月份，某台套6 tVAR炉生产的109批次Φ820 mm/6 t级钛合金铸锭冒口损失率进行统计，



图2 钛合金铸锭头部缩孔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shrinkage cavity at the head of titanium alloy ingot

如图3所示。该型号VAR炉采用的是国际上最先进的计算机自动控制系统，熔炼和补缩工艺制度均以计算机自动控制为主，所有批次铸锭的补缩过程工艺制度是一致的。

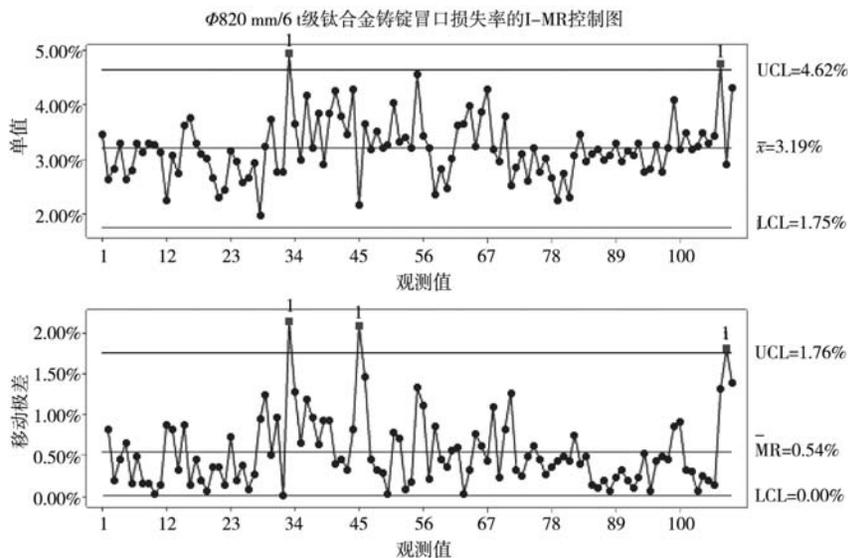


图3 铸锭冒口损失率控制图

Fig. 3 The control chart of ingot riser loss rate

从控制图中可以看出,铸锭的冒口损失率波动范围为1.96%~4.91%,波动范围较大,部分数据超出了3个标准差水平,急需进行改善控制。

## 2 分析与讨论

### 2.1 确定响应变量和影响因子

钛合金铸锭冒口损失率的影响因素较多,主要有熔炼电流、电压、熔速等工艺参数、铸锭锭型、假电极的直径、不同设备以及操作过程电弧长短等。由于本次试验所收集数据的109批次铸锭,均采用相同的VAR炉,相同锭型以及相同的熔炼和补缩工艺制度,且熔炼工艺参数经过前期大量试验和改进已经固化,VAR炉补缩过程采用的是计算机自动控制,因此,本次试验不研究熔炼设备、熔炼工艺参数以及锭型等因素对铸锭冒口损失率大小的影响,只研究铸锭冒口损失率的稳定性及一致性、主要研究人、熔炼过程等不可控因素对冒口损失率差异性的影响,结合钛合金铸锭实际生产过程,经质量小组讨论,确定了以下响应变量及相关潜在的影响因子。

响应变量 $y$ :铸锭冒口损失率;

影响因子 $x_1$ :熔炼工班别,分为甲、乙、丙、丁四个班别;

影响因子 $x_2$ :补缩时间班次,分为白、中、夜三个班次;

影响因子 $x_3$ :探伤操作者,分为A、B、C三人;

影响因子 $x_4$ :补缩期操作稳定性,分为是、否两个类别。

影响因子 $x_5$ :补缩过程是否频繁短路,分为是、否两个类别。

各影响因子的水平数及取值见表1所示。

表1 因子的水平数及取值  
Table 1 Levels and values of factors

因子	类型	水平数	值
$x_1$	固定	4	丙,丁,甲,乙
$x_2$	固定	3	白,夜,中
$x_3$	固定	3	A, B, C
$x_4$	固定	2	否,是
$x_5$	固定	2	否,是

### 2.2 多因子方差分析

将所收集的数据按照上述确定的响应变量和影响因子进行分类、汇总,之后应用Minitab统计软件,进行多因子方差分析,考虑 $x_1$ 分别和 $x_2$ 、 $x_4$ 有一定的相关性,因此,在进行方差分析时,先添加 $x_1*x_2$ 和 $x_1*x_4$ 的交互作用。分析结果见表2。

表2 铸锭冒口损失率方差分析表  
Table 2 Analysis table of variance for ingot riser loss rate

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F值	p值
$x_1$	3	0.000 097	0.000 032	3.11	0.030
$x_2$	2	0.000 046	0.000 023	2.20	0.117
$x_3$	2	0.000 201	0.000 101	9.66	0.000
$x_4$	1	0.000 080	0.000 080	7.68	0.007
$x_5$	1	0.000 123	0.000 123	11.85	0.001
$x_1*x_2$	6	0.000 051	0.000 008	0.81	0.566
$x_1*x_4$	3	0.000 008	0.000 003	0.24	0.868
误差	90	0.000 937	0.000 010	-	-
失拟	39	0.000 386	0.000 010	0.92	0.606
纯误差	51	0.000 551	0.000 011	-	-
合计	108	0.003 229	-	-	-

由表2可以看出, $x_1*x_2$ 和 $x_1*x_4$ 的交互作用结果显示, $p$ 值 $>0.05$ ,说明两个因子的交互作用对响应变量 $y$ 的影响不显著,需要对模型进行缩减。而 $x_2$ 的 $p$ 值 $=0.117>0.05$ ,说明对 $y$ 的影响也不显著,但考虑到 $x_1*x_2$ 的交互作用不显著,需要进行缩减,因此,暂时不移除 $x_2$ 。模型缩减后的方差分析结果见表3。

表3 缩减模型的铸锭冒口损失率方差分析表  
Table 3 Analysis table of variance of ingot riser loss rate for reduced model

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F值	p值
$x_1$	3	0.000 120	0.000 040	3.96	0.010
$x_2$	2	0.000 071	0.000 035	3.49	0.034
$x_3$	2	0.000 224	0.000 112	11.08	0.000
$x_4$	1	0.000 080	0.000 080	7.91	0.006
$x_5$	1	0.000 152	0.000 152	15.01	0.000
误差	99	0.001 002	0.000 010	-	-
失拟	48	0.000 451	0.000 009	0.87	0.686
纯误差	51	0.000 551	0.000 011	-	-
合计	108	0.003 229	-	-	-

由表3可以看出,移除 $x_1*x_2$ 和 $x_1*x_4$ 交互作用后的缩减模型,五个潜在的因子的 $p$ 值 $<0.05$ ,说明五个因子对响应变量铸锭冒口损失率的影响均显著,且影响程度由高到低依次为: $x_3$ 探伤操作者、 $x_5$ 补缩过程是否频繁短路、 $x_2$ 补缩时间班次、 $x_4$ 补缩期操作稳定性、 $x_1$ 熔炼工班别。

通过缩减模型建立起回归方程,回归方程各影响因子的系数分析结果见表4。

由表4可以看出, $x_1$ 熔炼工班别中丙班, $x_2$ 补缩时间班次中夜班, $x_3$ 探伤操作者A和B, $x_4$ 补缩期操作稳

表4 回归方程各因子的系数分析结果  
Table 4 Coefficient analysis results of each factor of the regression equation

项	取值	系数	系数标准误	T值	p值	方差膨胀因子
常量		0.033 16	0.000 449	73.87	0	
x1	丙	0.002 06	0.000 626	3.29	0.001	2.29
	丁	-0.000 69	0.000 569	-1.21	0.228	1.72
	甲	-0.000 356	0.000 579	-0.62	0.54	1.78
x2	白	-0.000 267	0.000 453	-0.59	0.557	1.36
	夜	0.001 174	0.000 463	2.54	0.013	1.57
x3	A	-0.001 46	0.000 463	-3.15	0.002	1.56
	B	0.002 621	0.000 566	4.63	0	2.15
x4	否	0.001 093	0.000 389	2.81	0.006	1.58
x5	否	-0.001 808	0.000 467	-3.87	0	1.35

定性(否),  $x_5$ 补缩过程是否频繁短路(否)对冒口损失率影响显著,上述几个问题是造成铸锭冒口损失率存在差异性且波动较大的主要因素,接下来要对以上因子进行优化。

### 2.3 残差分析

模型的四合一残差图如图4所示。从四合一残差图中可以看出,移除不显著的相关因子交互作用后,模型效果较好,残差呈正态分布,残差与拟合值符合等方差特性,且残差是随机和独立分布的,说明多因子方差检验结果可信。

## 3 改进策略

经过上述分析,确定了影响钛合金铸锭冒口损

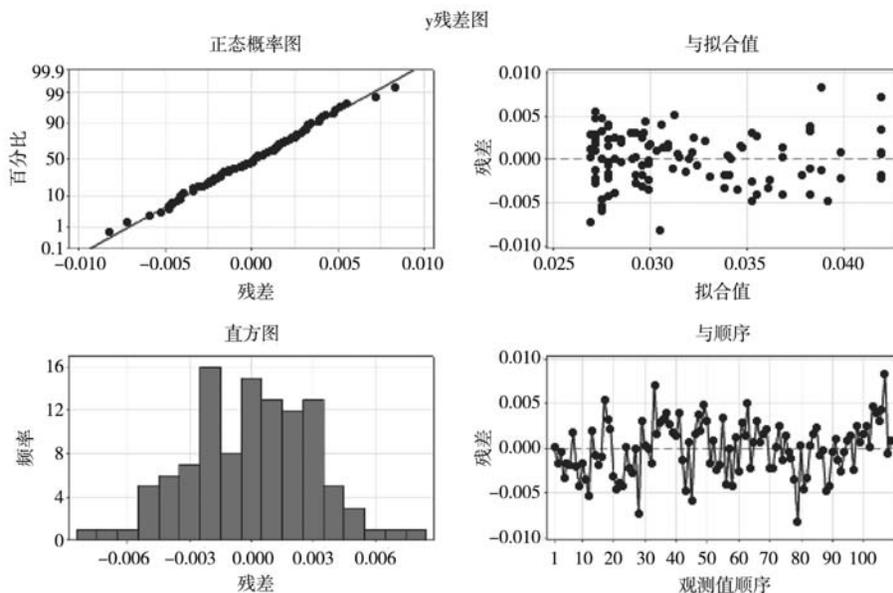


图4 模型残差图

Fig. 4 Model residual diagram

失率差异性的主要因素有:熔炼工班别、补缩时间班次、探伤操作者、补缩期操作稳定性、补缩过程是否频繁短路。针对几个显著影响因子,制定以下改进策略。

### 3.1 开展 OPL 单点课程

通过进一步分析,发现熔炼工班别中丙班和丁班所补缩的铸锭冒口损失率整体偏大,并且波动范围宽。而以上两个班别带班长从事该岗位时间较短,班组中的青年职工占比较高,总体上缺乏补缩经验。

探伤操作者中A和B所探伤的铸锭,冒口整体偏大,而经过对切除后的冒口检查发现,以上两个操作者对铸锭探伤后,划线位置较为保守,导致大部分冒

口切除后缩孔未暴露出来,存在过渡切除的问题。

针对以上问题,分别在各工序开展OPL(One Point Lesson)单点课程培训教育,通过将铸锭补缩过程以及探伤检验过程的关键控制要点制作成纸质教材,由经验丰富的操作者作为辅导员,在班组的班前班后会反复培训、宣贯,从而达到经验共享、提高操作技能的目的。

### 3.2 开展标准化作业

由于熔炼班别丙班和丁班中青年职工多,缺乏生产经验,所以在该班组内开展标准化作业。将铸锭补缩过程的操作顺序、主要操作内容、时间等形成量化的标准操作规范,制作成《钛合金铸锭补缩过程标准

化作业》，并在甲、乙、丙、丁四个操作班别中组织实施。这样保证了每个班别中不同操作人员补缩过程的一致性。

### 3.3 优化生产组织方式

针对补缩时间班次对铸锭冒口损失率影响较大的问题，发现不同班别在夜班进行铸锭补缩时，铸锭的冒口损失整体较大，主要由于夜班操作时注意力集中度不高，部分关键控制点未精心操作。从生产管理角度考虑，优化生产组织方式，调整铸锭熔化时间，尽可能避开夜晚时间对铸锭进行补缩操作。其次，如果要在夜班进行补缩，则安排经验丰富的操作工进行精心操作，减少过程异常及波动的发生。

### 3.4 优化工艺参数及操作方法

针对 $x_4$ （否）和 $x_5$ （否）对冒口损失率影响显著。一方面优化熔炼工艺参数，调整电压以及各电

流段的时间，使补缩期电弧的弧压尽可能稳定，同时补缩过程中减少因电压太低造成的短路现象。另一方面，对熔炼工补缩过程操作方法进行优化，规定其进入补缩期一定时间段内，必须人为观察弧光进行非自动控制干预，确保补缩期电弧及熔池的稳定性。

## 4 效果验证

结合上述制定的策略，对2022年三季度该VAR炉生产的50批次 $\Phi 820$  mm/6 t级钛合金铸锭冒口损失率进行跟踪验证，具体如图5所示。

从图5可以看出，通过改进策略的实施，铸锭冒口损失率平均值由之前的3.19%降至了2.93%，降低了8.15%；而且锭间的差异性减小，整体波动幅度明显改善，没有数据超出3个标准差。控制上下限范围由之前的2.87%减少至2.16%，降低了24.74%，标准差降低幅度较大，过程控制能力水平更高。

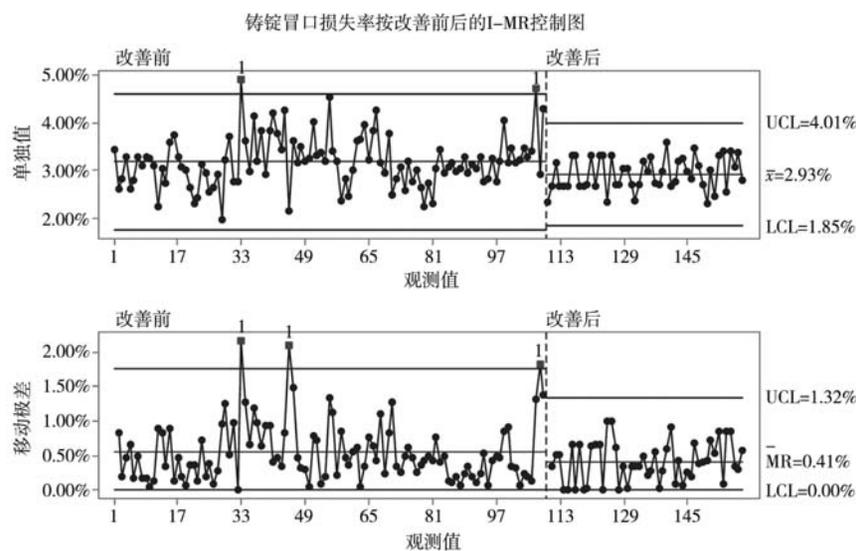


图5 铸锭冒口损失率改善前后对比

Fig. 5 Comparison before and after improvement of ingot riser loss rate

## 5 结束语

公司钛合金铸锭冒口损失率锭间差异性较大、过程波动范围较宽造成的经济损失较大，针对此问题，应用Minitab软件，通过多因子方差分析法，逐步缩减模型，分析出了影响铸锭冒口损失率的显著因子；结合实际生产过程，采用OPL单点课程、标准化作业等精

益改善工具，并对生产组织和工艺参数进行了优化。这些改进措施有效降低了钛合金铸锭冒口损失率，减小了锭间的差异性，显著提升了生产过程的控制能力，降低了材料损失，为公司带来了显著的经济效益。

**参考文献:**

- [1] 郑亚波, 陈战乾, 陈峰, 等. 基于DOE优化大规格钛及钛合金铸锭补缩工艺 [C]// 中国有色金属工业协会钛锆钎分会2012年钛年会论文集. 2012: 84-91.
- [2] 张新, 刘鸿羽, 车昶, 等. 钛合金低成本成形技术研究进展 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1141-1148.
- [3] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 137-146.
- [4] 李莹莹. 大规格钛合金真空自耗铸锭热封顶技术探讨 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (3): 324-326.
- [5] 张颖娟, 寇宏超, 李鹏飞, 等. 真空自耗电弧熔炼TC4铸锭的凝固组织和缩松缩孔的模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (5): 418-421.
- [6] 刘千里, 耿乃涛, 李向明, 等. 结晶器溢流口位置对电子束熔炼钛锭凝固过程的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 533-537.
- [7] 雷文光, 于兰兰, 毛小南, 等. 电子束冷床熔炼TC4钛合金铸锭凝固过程有限元模拟 [J]. 铸造, 2010, 59 (9): 912-916.
- [8] 马逢时, 周晔, 刘传冰, 等. 六西格玛管理统计指南——Minitab使用指导 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2007.
- [9] 孙超, 韩广广, 张俊峰. 基于方差分析与多元线性回归模型的快速路事故成因分析及对策研究 [J]. 交通与运输, 2021, 34 (z1): 70-75.
- [10] 李瑞歌, 张梦娇, 吴璐璐, 等. 基于SPSS软件多因素方差分析在化学实验中的应用 [J]. 农业网络信息, 2017 (4): 22-26.
- [11] 鲍全. 基于多因素方差分析法的外窗隔声性能分析与研究 [J]. 工程质量, 2020, 38 (2): 42-46.
- [12] 毋玉莲. 卷烟厂房温湿度传感器测量一致性的方差分析和改进 [J]. 工程质量, 2014 (z1): 35-38.
- [13] 王绍丹, 刘建培. 应用方差分析提高台车退火炉硬度均匀性 [J]. 河北冶金, 2014 (11): 23-26.

---

## Cause Analysis and Countermeasure Research on the Difference of Riser Loss Rate of Titanium Alloy Ingot

ZHENG Ya-bo<sup>1</sup>, MAO Ling-ling<sup>1</sup>, LIU Zhao<sup>1</sup>, CHEN Feng<sup>1</sup>, CHEN Zhan-qian<sup>2</sup>

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, Shaanxi, China; 2. Baotai Group Co., Ltd., Baoji 721014, Shaanxi, China)

**Abstract:**

During VAR smelting of titanium alloy ingots, feeding process system shall be adopted at the end of smelting, so as to reduce the loss rate of ingot riser and improve the yield. In the actual production process, the loss rate of titanium alloy ingot riser is affected by various factors. There is a large difference between each ingot, and the fluctuation range is large, resulting in serious losses. In order to analyze the influencing factors of the difference in the riser loss rate of titanium alloy ingots, the Minitab statistical software was used to conduct the research by the method of multi factor variance analysis. The significant influencing factors, such as the shift of smelting workers, the shift of feeding time, the flaw detection operator, operation stability during feeding period, and whether the feeding process was frequently shorted out, were found out, and the insignificant factor interaction was eliminated. According to the significant factors, the corresponding improvement measures were formulated, which effectively reduced the riser loss rate of titanium alloy ingots and the difference between ingots, and increased the product yield.

**Key words:**

titanium alloy; ingot; riser loss rate; Minitab; variance analysis