

# 转炉 - RH 流程 O5 板显微夹杂物的研究

韩鹏龙<sup>1</sup>, 王若思<sup>2</sup>, 张彩军<sup>1</sup>, 王硕明<sup>1</sup>

(1. 河北联合大学冶金与能源学院, 教育部、河北省重点实验室, 河北唐山 063009; 2. 河北钢铁集团采购总公司唐山分公司, 河北唐山 063000)

**摘 要:** 针对某厂生产 O5 板的工艺流程(铁水预脱硫→转炉→钢包改质剂→RH→连铸), 系统分析各工序及铸坯中 T[O]、[N] 含量和显微夹杂物的类型、来源、数量及组成。结果表明: 铸坯中 T[O] 为  $25.67 \times 10^{-6}$ , [N] 为  $27 \times 10^{-6}$ , 显微夹杂物数量为 2.66 个/mm<sup>2</sup>, 显微夹杂物类型主要有 TiN 夹杂、TiO<sub>2</sub>-FeS 夹杂和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂, 其含量分别为 30%、24.55%、20.91%。RH 破真空后钢水中 T[O]、[N] 含量偏高, 钢中显微夹杂物的数量较多, 说明 RH 真空处理尚有余地; 钢中夹杂物上浮去除效果较差, 提高钢包顶渣吸附夹杂物的性能是提高钢品质的一个途径; 铸坯中显微夹杂物近一半为不规则夹杂物, 因此夹杂物充分地液化、聚集、上浮是进一步提高 O5 板品质的关键。

**关键词:** O5 板; 显微夹杂物; 钢包改质剂

中图分类号: TF76 文献标志码: A 文章编号: 1004 - 7638(2014)03 - 0111 - 05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2014.03.023

## Study of Micro-inclusion in O5 Sheet Steel Produced by BOF-RH Route

Han Penglong<sup>1</sup>, Wang Ruosi<sup>2</sup>, Zhang Caijun<sup>1</sup>, Wang Shuoming<sup>1</sup>

(1. College of Metallurgy and Energy, Hebei United University, Ministry of Education and Hebei Key Laboratory, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Tangshan Branch, Purchasing Cooperation, Hebei Iron and Steel Co., Tangshan 063000, Hebei, China)

**Abstract:** T[O] and [N] and the type, source, quantity and composition of micro inclusions during the production route of O5 sheet steel (pre-desulfuration→BOF→ladle slag modifier→RH→CC) had been analyzed. The results showed that T[O] is  $25.67 \times 10^{-6}$ , [N] was  $27 \times 10^{-6}$ , and the number of micro-inclusions per mm<sup>2</sup> was 2.66 in slab. The main types of micro-inclusion in casting billet were TiN, TiO<sub>2</sub>-FeS and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions and their contents were 30%, 24.55%, 20.91% respectively. After RH vacuum break the molten steel still had high T[O], [N] and large quantity of micro-inclusions, indicating insufficient RH vacuum treatment. Floating and removal of inclusions in steel was less effective, thus improving the ladle top slag inclusions adsorption performance is one way to improve the quality of steel slab, nearly half of micro-inclusions in slab were irregular shape, therefore, fully liquefying, aggregation and floating of micro inclusion are essential to improve the quality of O5 sheet steel.

**Key words:** O5 steel sheet, micro-inclusion, ladle slag modifier

收稿日期: 2014 - 04 - 03

基金项目: 河北省自然科学基金, 高效渣洗料脱除钢中夹杂物的基础研究(E2012209023)。

作者简介: 韩鹏龙(1987—), 男, 河北平山人, 硕士研究生, 主要从事钢铁冶金专业研究。王硕明(1955—), 男, 河北联合大学教授, 长期从事凝固理论与钢质量控制等方面的研究, E-mail: wsm\_ts@163.com。

## 0 引言

O5板属于汽车板中的高端产品,主要用于汽车的外板,如轿车的顶盖、侧围板、前门用板及行李箱盖用板等<sup>[1]</sup>。目前,影响汽车O5板品质进一步提高的主要因素是钢中的夹杂物,尤其是氧化物夹杂<sup>[2-6]</sup>。了解汽车O5板中夹杂物的行为规律,为汽车O5板的生产提供基础资料是当前急需解决的问题。为此,针对国内汽车O5板典型生产流程进行了夹杂物的系统研究,并针对分析结果提出预防

和减少夹杂物的措施。

## 1 试验条件及取样方案

试验钢种为O5板,成分如表1所示。O5板的生产工艺流程为:铁水预脱硫→200 t转炉→钢包改质剂→RH→连铸。入转炉目标[S]小于0.002%,转炉停吹条件:[C]、[P]、[S]分别不大于0.05%、0.005%、0.005%。RH精炼时间为42 min,真空度为80 Pa,脱碳时间要求大于15 min,纯脱气时间大于10 min,镇静时间不小于20 min。

表1 O5板主要成分  
Table 1 Chemical composition of O5 sheet steel

C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	N
≤0.002	≤0.01	0.05~0.12	≤0.012	≤0.009	0.025~0.035	0.065~0.085	≤0.003

根据生产计划,进行现场取样。对每个浇次的前三炉次分别在RH精炼、中间包和铸坯取样,共取3个浇次。

## 2 试验结果分析

### 2.1 各工序钢中全氧、氮含量及显微夹杂数量的变化

试验结果如表2、图1所示。

表2 各工序钢中显微夹杂物含量变化  
Table 2 Content changes of micro-inclusions during each process

RH破真空后	开浇5 min	开浇10 min	开浇20 min	铸坯
5.70	2.76	2.50	2.35	2.66

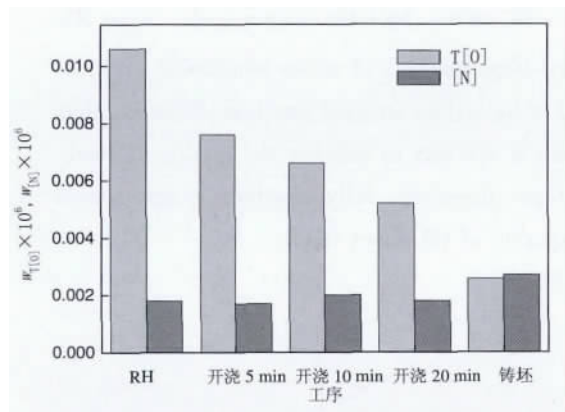


图1 各工序中全氧、氮含量变化

Fig. 1 Content changes of T[O] and [N] during each process

RH破真空后-出站前钢水中T[O]含量为 $106 \times 10^{-6}$ , [N]含量为 $18 \times 10^{-6}$ , 钢中显微夹杂物的数量为5.7个/mm<sup>2</sup>, 钢中T[O]、[N]含量偏高, 显微夹杂物数量较多, 说明RH真空处理尚有余地, 钢中大型夹杂物上浮去除效果较差, 因此提高RH中精炼渣吸附夹杂物的性能是提高钢品质的一个努力方向。

经过一段时间的镇静, 钢水浇至中间包。开浇5 min时, T[O]为 $76 \times 10^{-6}$ , 比RH减少了28.36%; 显微夹杂数量减少了51.58%。开浇10 min时, T[O]为 $66 \times 10^{-6}$ , 又减少了13.16%; 显微夹杂数量减少了9.42%。开浇20 min时, 即中间包处于稳态浇注时, T[O]为 $52 \times 10^{-6}$ , 进一步减少了21.21%; 显微夹杂的数量减少了6%。说明钢包有效地镇静, 中间包流场设置合理, 可以有效地减少钢中大型夹杂物降低氧含量。中间包[N]含量约为 $20 \times 10^{-6}$ , 与钢包中[N]含量相差不大, 钢包至中间包保护浇铸效果良好。

铸坯中显微夹杂物以粒径小于10 μm的夹杂物占大多数; 其中粒径为0~5 μm夹杂物占总量的62.73%, 粒径为5~10 μm的夹杂物占总量的34.53%, 粒径大于10 μm的夹杂物占总量的2.74%。铸坯中T[O]的平均值为 $25.67 \times 10^{-6}$ , 比中间包平均氧含量 $64.67 \times 10^{-6}$ 减少了60.31%; 进一步说明中间包、结晶器合理的流场脱除夹杂物的效果。铸坯中[N]为 $27 \times 10^{-6}$ , 比中间包平均含量增加了8.67  $\times 10^{-6}$ , 增加了32.11%; 中间包显微夹杂物平均数量为2.54个/mm<sup>2</sup>, 而铸坯中显微夹杂物数量为2.66个/mm<sup>2</sup>, 比中包夹杂物数量多1.2个/mm<sup>2</sup>; 说明由中

间包至铸坯有严重的二次氧化。中间包的保护浇铸、中间包至结晶器的保护浇铸、结晶器液面的保护浇铸对进一步提高钢的品质至关重要。

由于在 RH 和精炼处理过程中夹杂物不断上浮, 外来夹杂物不断进入钢水中, 使得显微夹杂物的数量和粒径发生变化。静态夹杂物的上浮速度可用斯托克斯公式进行计算。

$$u_p = (\rho_m - \rho_p) g d_p^2 / 18 \eta_m \quad (1)$$

式中  $u_p$  为夹杂物的自由上浮速度;  $\rho_m$ 、 $\rho_p$  分别为钢液和夹杂物的密度;  $g$  为重力加速度;  $d_p$  为夹杂物直径;  $\eta_m$  为钢液黏度。

由式(1)可知, 夹杂物的上浮速度与半径的平方成正比, 因此夹杂物的颗粒越大, 越容易上浮, 所以钢中小颗粒的夹杂物比例越来越高。对钢中存在

的细小夹杂物来说已不遵循斯托克斯定律, 在钢液中做布朗运动, 上浮缓慢而很难排除。

### 2.2 各工序钢中显微夹杂物的成分分析

RH 破真空后 - 出站前钢液中显微夹杂物类型主要为  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  夹杂、 $Al_2O_3$  夹杂和  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -FeS 夹杂。其含量分别为 41.67%、41.67%、10.42%。夹杂物中 Al 含量为 1.68% ~ 41.91%, Ti 含量 0.96% ~ 16.38%, S 含量为 0.42% ~ 3.94%。其中不规则形状的  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  夹杂(典型能谱如图 2 所示)和  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -FeS 夹杂占总夹杂物含量的 52.09%, 球形夹杂占总夹杂物含量的 41.67%, 聚集状的夹杂占总夹杂物含量的 6.24%。不规则夹杂物占一半, 这部分夹杂物不易液化聚集上浮, 进一步说明此工位钢包顶渣吸附夹杂物的重要性。

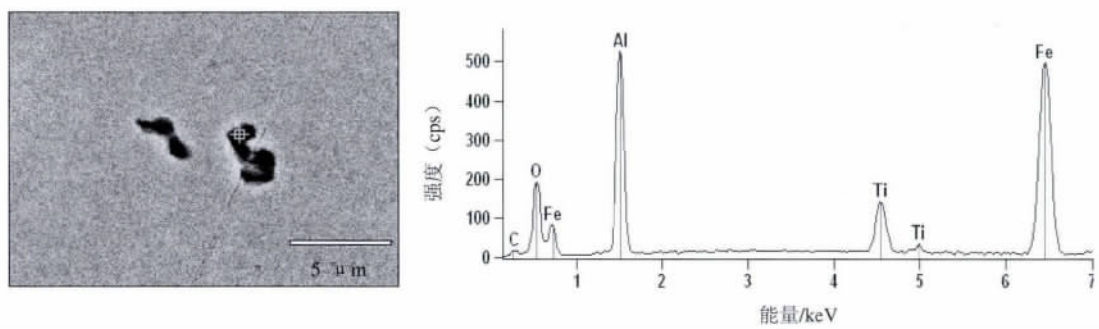


图 2 不规则的  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  夹杂形貌及能谱分析

Fig. 2 Morphology and energy spectrum analysis of  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  irregular inclusion

中间包内钢液中显微夹杂物类型为  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -FeS (MnS) 夹杂、 $Al_2O_3$ - $TiO_2$  夹杂、 $Al_2O_3$  夹杂、 $Al_2O_3$ -TiN 夹杂和  $Al_2O_3$ -TiN-FeS 夹杂。其主要含量分别为 28.16%、26.64%、21.00%、11.74% 和 9.19%。夹杂物中 Al 含量为 0.37% ~ 43.68%, Ti 含量 0.60% ~ 38.93%, S 含量为 0.10% ~ 6.67%。

其中不规则形状的  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -FeS (MnS) 夹杂(典型能谱如图 3 所示)、 $Al_2O_3$ - $TiO_2$  夹杂、 $Al_2O_3$ -TiN 夹杂和  $Al_2O_3$ -TiN-FeS 夹杂占总夹杂物含量的 75.73%, 球形夹杂占总夹杂物含量的 21.00%, 聚集状的夹杂占总夹杂物含量的 3.27%。液化后的夹杂物聚集上浮, 使不规则夹杂物更为暴露。

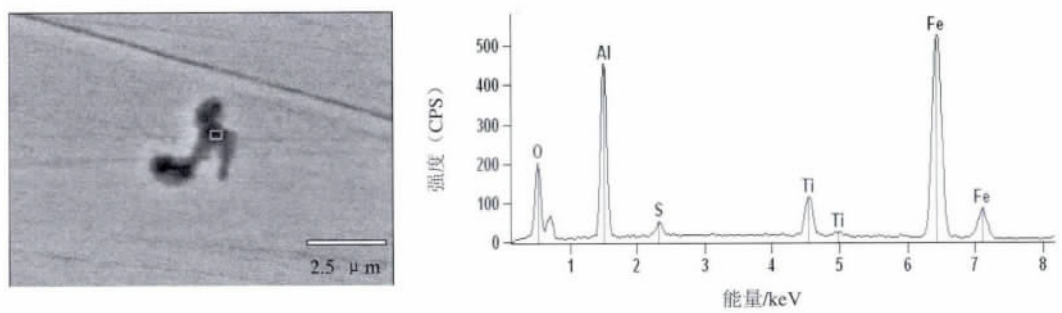


图 3  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -FeS 夹杂形貌及能谱分析

Fig. 3 Morphology and energy spectrum analysis of  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -FeS inclusion

铸坯中显微夹杂物类型为 TiN 夹杂、TiO<sub>2</sub>-FeS 夹杂、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 夹杂和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-TiO<sub>2</sub> 夹杂。其含量分别为 30%、24.55%、20.91%、8.18%、7.27% 和 5.45%。其中 Al 含量为 0.22% ~ 52.28% ,Ti 含量 0.20% ~ 30.72% ,S 含量为 0.17% ~ 11.59% ,Mg 含量为 0.18% ~ 6.72%。其中不规则形状的夹杂占总夹

杂物含量的 45.45% ,球形夹杂占总夹杂物含量的 40.91% ,四边形的 TiN 夹杂(典型能谱如图 4 所示)夹杂占总夹杂物含量的 30% ,聚集状的夹杂占总夹杂物含量的 3.64%。铸坯中仍有近一半不规则夹杂物,说明上述流程如何使不规则夹杂物充分地液化、聚集、上浮是进一步提高 O5 板品质的关键。

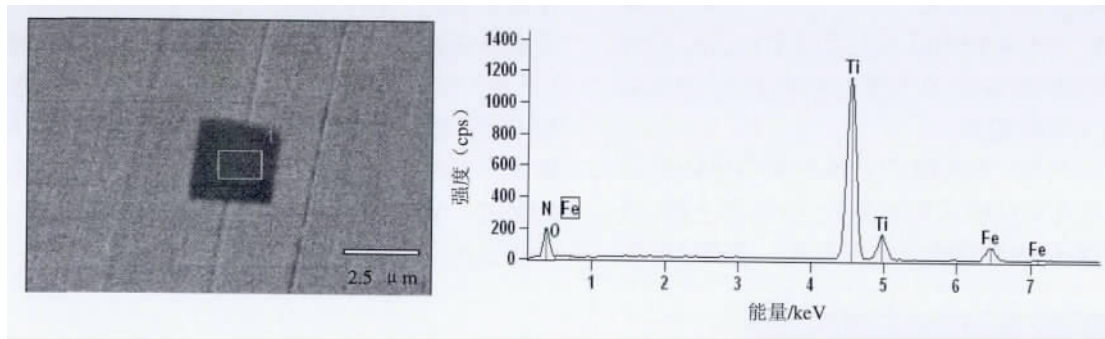


图 4 TiN 夹杂形貌及能谱分析

Fig. 4 Morphology and energy spectrum analysis of TiN inclusion

### 3 铸坯中显微夹杂的分布

铸坯 1/2 处样显微夹杂物分布如图 5 所示。

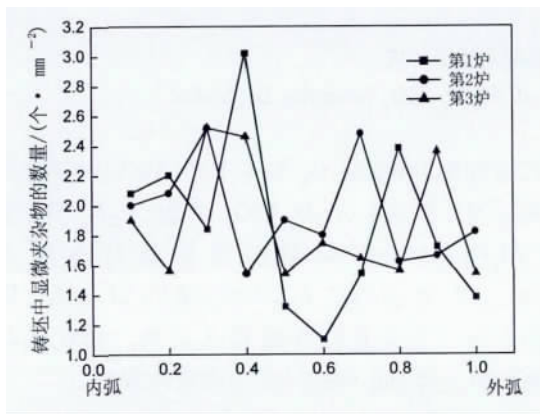


图 5 铸坯中显微夹杂物分布

Fig. 5 Micro-inclusions distribution in slab

由图 5 分析可知:第 1 炉在距内弧 2/5 处显微夹杂物含量达到最高,含量为 3.02 个/mm<sup>2</sup>,在距内弧 3/5 处显微夹杂物含量达到最低,含量为 1.1 个/mm<sup>2</sup>。第 2 炉在距内弧 3/10 处显微夹杂物含量达到最高,含量为 2.52 个/mm<sup>2</sup>,在距内弧 2/5 处显微夹杂物含量达到最低,含量为 1.54 个/mm<sup>2</sup>。第 3 炉在距内弧 3/10 处显微夹杂物含量达到最高,含量为 2.52 个/mm<sup>2</sup>,在距内弧 7/10 处显

微夹杂物含量达到最低,含量为 1.24 个/mm<sup>2</sup>。综上所述可以看到:铸坯中显微夹杂在距内弧 3/10 ~ 2/5 处含量达到最高。这主要是由于在全弧型连铸机生产时,铸坯出结晶器时内弧冷却皮壳厚度约 1/4,但 O5 板采用直弧型连铸机生产,出结晶器后有一段直型,凝固皮壳厚度约为 3/10 ~ 2/5 时铸坯进入弧型段,此时夹杂物上浮到凝固皮壳附近无法排除,最终夹杂物留在距铸坯内弧 3/10 ~ 2/5 处,导致该部位夹杂物含量升高。由于夹杂物具有向上的驱动力,上浮和扩散的方向也是向上,使铸坯下边缘处的夹杂物数量较少。说明钢中悬浮夹杂物还有一定的数量,夹杂物上浮还不充分,需要进一步改善夹杂物上浮的动力学条件。

### 4 结论

1) 铁水预脱硫→转炉→钢包改质剂→RH→连铸流程生产的铸坯 T[O]为 25.67 × 10<sup>-6</sup>, [N]为 27 × 10<sup>-6</sup>,显微夹杂物类型主要有 TiN 夹杂、TiO<sub>2</sub>-FeS 夹杂和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂,数量为 2.66 个/mm<sup>2</sup>,有进一步提高钢品质的必要。

2) RH 破真空后钢水中 T[O]、[N]含量偏高,钢中显微夹杂物的数量较多,说明 RH 真空处理尚有余地,钢中夹杂物上浮去除效果较差,因此提高钢包顶渣吸附夹杂物的性能是提高钢品质的一个

途径。

3) 钢包有效地镇静,中间包及结晶器流场设置合理,可以有效减少钢中大型夹杂物。中间包至结晶器的保护浇铸、结晶器液面的保护对进一步提高钢的品质至关重要。

4) 铸坯显微夹杂物以粒径小于  $10\ \mu\text{m}$  的夹杂物占大多数,占夹杂物总含量的 97.26%;显微夹杂物类型主要有 TiN 夹杂、 $\text{TiO}_2\text{-FeS}$  夹杂和  $\text{Al}_2\text{O}_3$

夹杂。其中有近一半不规则夹杂物,因此不规则夹杂物充分地液化、聚集、上浮是进一步提高 O5 板品质的关键。

5) O5 板生产采用直弧型连铸机,铸坯凝固厚度约  $3/10 \sim 2/5$  时进入弧形段,钢中悬浮夹杂物还有一定的数量,夹杂物无法上浮去除,导致该部位夹杂物含量较高,夹杂物上浮的动力学条件还有待提高。

## 参考文献

- [1] Tang Hongbo. The study of feeding coefficient and partial ladder method about O5 steel sheet [C]// National Symposium Strip Production Equipment. Shanghai: The Chinese Society For Metals, 1999.  
(汤洪博.对O5板投料系数及分批阶梯式投料生产方法的探讨[C]//全国板带生产设备学术研讨会论文集.上海:中国金属学会,1999.)
- [2] Gao Ju, Ji Dandan, Wang Shuoming. Study of micro-inclusion of CCSD36 [J]. Journal of Hebei Politechnic University ( Natural Science Edition ), 2012, 34(3): 42-46.  
(高菊,姬旦旦,王硕明. CCSD36 钢显微夹杂物[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 42-46.)
- [3] Li Zhiqiang, Yu Jingkun. Present status and development of research on micro-inclusion in steel [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(3): 159-163.  
(李志强,于景坤. 钢中显微夹杂物研究现状与进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(3): 159-163.)
- [4] Peng Qichun, Chen Benqiang, Peng Zisheng, et al. Analysis on nature and source of micro inclusions in tube bloom and steel pipe [J]. Steelmaking 2006, 22(4): 6-8.  
(彭其春,陈本强,彭自胜,等. 管坯和钢管显微夹杂物性质及来源分析[J]. 炼钢, 2006, 22(4): 6-8.)
- [5] Wu Huajie, Bao Yanping, Yue Feng, et al. Study on total content and micro inclusion of bearing steel GCr15 during RH vacuum process [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31 ( Suppl. 1 ): 121-124.  
(吴华杰,包燕平,岳峰,等. RH 真空处理 GCr15 轴承钢中全氧及显微夹杂物的行为研究[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(增刊1): 121-124.)
- [6] Wang Shuoming, Huo Yanpeng, Wang Shumin. Research on micro inclusions of SS400 steel in slag washing process [J]. Advanced Engineering Materials II, 2012, 706-710.

编辑 余文华

## 攀钢开发的宇航级钒铝合金产业化关键技术居国际先进水平

2014年5月获悉,由攀钢研究院钒钛冶金研究所牵头负责的攀钢重大项目“宇航级钒铝合金产业化关键技术研究”顺利通过四川省鉴定。鉴定委员会认为:该产品填补了国内空白,质量达到了德国 GfE 公司企业标准要求,整体技术居国际先进水平。

含钒铝合金的钛合金是一种广泛应用于航空航天领域的高级合金材料。其中,应用最广泛的两种合金是 Ti-6Al-4V 和 Ti-8Al-1Mo-1V,这两种合金约占钛合金市场的 50%,主要用于生产喷气发动机、高速飞行器骨架和火箭发动机机壳等。国内对钒铝合金的研发起步较晚,且生产的钒铝合金主要用于民用。随着我国经济的迅速发展和国防实力、宇航实力快速提升,将会给钒铝合金带来井喷式的发展和巨大的市场需求。

攀钢从目前国内市场潜能出发,于 2009 年成立了“宇航级钒铝合金产业化关键技术研究”课题组,通过产品机理性研究、实验室试验、半工业试验、工程化试验等阶段的研究,完成了制备宇航级钒铝合金的产业化试验,填补了国内空白,摆脱了国外公司对钒铝合金高端市场的垄断,提高了攀钢钒产业在高端产品中的地位,更对我国国防尖端科技及宇航领域的发展有着重要的战略意义。

(尹丹凤 供稿)