

EAF-LF(VD)-VT 工艺生产曲拐用钢 S34MnV 的洁净度研究

刘剑辉¹⁾ 朱荣¹⁾ 林腾昌¹⁾ 闵兴海²⁾ 曲素君²⁾ 庞宗旭²⁾ 白静²⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 鞍钢重机公司铸钢厂, 鞍山 114021

摘要 针对 EAF-LF(VD)-VC 工艺生产的大型船用 S34MnV 曲拐探伤不合的问题, 分别在电炉还原期、LF-VD 精炼期、浇注和锻造后钢锭取样对钢中夹杂物进行了研究. 结果表明, 精炼期间大于 15 μm 的夹杂物比例波动在 1.65%~10.34% 之间; 钢锭横截面上凝固前沿的柱状晶截获夹杂物的几率不同, 帽口中心部位大型夹杂物含量少于边部试样夹杂物含量为 5.81 mg/10 kg; 钢锭尾部中心部位夹杂物含量高于边部试样夹杂物含量为 25.9 mg/10 kg; 锻造钢锭中夹杂物富集严重, 其中尾部 DS 类夹杂达到了 4 级以上. 钢锭锻造后尾部含有大型夹杂物聚集部分不能完全切除是目前导致产品探伤不合的一个主要原因.

关键词 洁净度; S34MnV; 曲拐; 电弧炉; 真空精炼; 大型钢锭

Study on the cleanliness of crank steel S34MnV produced by the EAF-LF(VD)-VT

LIU Jian-hui¹⁾, ZHU Rong¹⁾, LIN Teng-chang¹⁾, MIN Xing-hai²⁾, QU Su-jun²⁾, PANG Zong-xu²⁾, BAI Jing²⁾

1) Metallurgical and Ecological Engineering School, University and Science Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Steel Casting Foundry, Angang Heavy Machine Co., Ltd, Anshan 114021, China

ABSTRACT The experimental samples were the marine crank steel S34MnV produced by the EAF-LF(VD)-VC production process, including the electric period, LF-VD refining period, casting period, and forging ingots from a heavy machinery factory in north China to solve the difficulty of being rejected by ultrasonic flaw detection for crank shaft. These samples were analyzed by the methods of metallographic observation, energy spectrum, and the electrolysis. The obtained results indicated that there was a large number of inclusions during the refining stage, and the proportion of inclusions with the size bigger than 15 μm accounting to total inclusions were within 1.65%~10.34% after VD process. Furthermore, the probability of inclusions captured by columnar crystal in the steel ingot cross-section was found changed obviously in different locations of ingot cap. The content of large inclusions in the center of the beginning of the ingot cap was 5.81 mg/10 kg, with increasing the distance from the center to the edge, whereas this value decreased to only 25.9 mg/10 kg in the rear center of ingot cap, with decreasing the distance from the center to the edge. In addition, large numbers of inclusions was found to exist in the forging ingot with the biggest inclusion of a 140 μm DS category, which were difficult to be cut off completely and would be the main reason of being rejected by ultrasonic flaw detection for crank shaft.

KEY WORDS cleanliness; S34MnV; crank shaft; EAF; vacuum refining; heavy ingot

随着世界船舶工业的迅速发展, 70 年代以来船用锻件规格越来越大, 技术要求越来越高, 生产难度也越来越大, 特别是近几年我国造船业也迅猛发展^[1]. 曲拐是大型船舶低速大功率发动机的核心, 它与发动机和螺旋桨联结传递动力, 在高温工作环境下承受周期性变化的弯曲和扭转力矩、惯性力矩

和震动附加力矩, 因此要求曲拐有较高的刚度、抗冲击性能、扭曲强度和疲劳强度, 这些对曲拐用钢的洁净度及锻造加工提出了更高的要求. 因为尺寸大, 曲拐均采用自由弯曲锻造的方法制造^[2]. 本文对锻造后曲拐探伤不合的问题, 分别在冶炼过程中和钢锭锻造后进行了取样分析, 研究了不同工序夹杂物

的含量和分布情况,并对工艺进行了分析讨论.

1 工艺特点

S34MnV 的冶炼流程为:30t 电弧炉(EAF)→30t LF 精炼→扒渣→30t VD 精炼→二次 LF 精炼→85t 钢锭真空浇铸(VT)→热送锻造. 冶炼一炉钢约需 7~8 个小时.

配料时要严格控制原料中的 S、P 等杂质元素和 Cu、Pb、Sn、As、Sb、Bi 等残余金属元素;采用 30t 电炉全冷料冶炼,分熔化期、氧化期和还原期,出钢槽出钢;在 LF 精炼期造精炼渣脱硫及去夹杂,底吹氩气搅拌,采用铝终脱氧;VD 真空精炼,在 20Pa 的真空度下吹氩精炼 20min;二次 LF 精炼,进一步调节温度和成分,白渣出钢;在氩气保护下真空浇注.

2 实验方法

本实验针对三炉次生产过程中的 21 个试样采用 SEM 扫描电镜分析,对锻造后钢锭 10 个试样进行大型夹杂物分析.

2.1 取样方案

(1) 电炉期:在电炉扒氧化渣后 10min(电炉还原前期)和电炉出钢前(电炉还原末期)取杯状样.

(2) LF/VD 精炼期:LF 通电后 20min(LF 前期)、LF 通电后 40min(LF 中期)、VD 精炼结束、二次 LF 精炼后,用圆饼状取样器取金相样.

(3) 浇注期:用取样勺在氩气保护的浇注钢流中取样,浇注成杯状.

(4) 锻造后钢锭:在距钢锭帽口端 500mm 和钢锭尾部 300mm 的横截面上切割 240mm×240mm×25mm 的电解样和金相样,钢锭横截面取样位置见图 1,帽口和钢锭尾部按取样位置分别标识为 A1、A2、A3、A4、A5、B1、B2、B3、B4、B5.

2.2 试样加工

将所取的试样加工成 Φ20mm×15mm 的金相样,锻造后钢锭所取方坯样加工成尺寸为 200mm×200mm×24mm 的电解样.

2.3 试样分析

将金相样进行粗磨、细磨、粗抛光、细抛光后,首先用 DMM-500 型正置式光学显微镜对钢样非金属夹杂物的数量和粒径分布进行统计. 在金相显微镜放大倍数为 100 倍下观察抛光平面上面积为 0.50mm² 的正方形视场,每个视场内统计各尺寸区间(0~5μm、5~10μm、10~15μm、15~20μm、20~30μm、>30μm)内的夹杂物个数,每个金相样抛光面上统计 100 个视场. 然后采用英国剑桥公司产 S360 型扫描电镜分析夹杂物成分;对锻造后试样分别进行金相夹杂物评级和大样电解分析.

3 洁净度的分析与讨论

3.1 冶炼过程显微夹杂物的数量统计

取样炉次各工序中夹杂物的数量变化见图 2. 由图 2 可知,电炉期夹杂物平均个数在 15.72~39.41 个/mm² 之间波动,精炼期夹杂物个数在 1.74~6.05 个/mm² 之间. 三炉次中从电炉还原期至 LF 精炼中期,夹杂物的个数均呈急剧减少的趋势,降低幅度达到 90% 以上. 在 LF 前期到 LF 中期的过程中,由数据可知钢液中夹杂物的数量呈明显下降趋势,如 2065 炉次降幅是 46%,1070 炉次降幅达到 65%,充分说明 LF 精炼对夹杂物去除的效果.

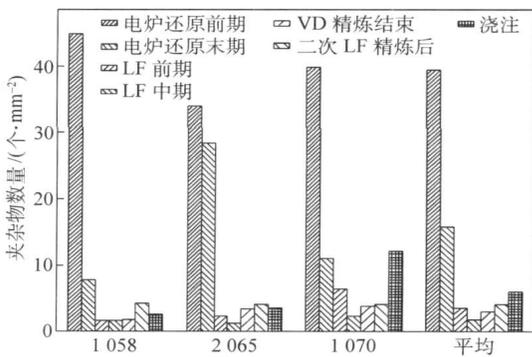


图 2 各工序夹杂物数量

VD 精炼结束后,钢中夹杂物的数量又有所上升,表明在 VD 精炼过程中脱氧反应剧烈,钢中的卷渣和大量夹杂物没有充分上浮,炉衬也对钢水的洁净度造成污染. 1070 炉次浇注试样夹杂物个数异常,原因一种可能是取样受到污染. 另一种可能为浇注时氩气保护不好导致钢液二次氧化所致.

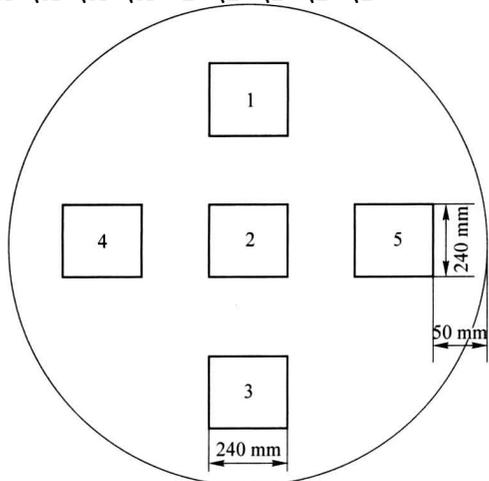


图 1 锻造后钢锭电解样取样位置

3.2 冶炼过程显微夹杂物的粒径分布

钢的力学性能在很大程度上取决于能产生应力集中的夹杂物的体积、尺寸、分布、化学成分以及形态,夹杂物尺寸分布尤其重要. 有研究表明 $20\ \mu\text{m}$ 的显微夹杂物就能引起钢材断裂^[3]. 根据不同粒度夹杂物的危害程度,统计上述六个粒度区间内的夹杂物个数. 各个工序中的夹杂物平均粒径分布见图 3,其中大于 $15\ \mu\text{m}$ 夹杂物所占比例见图 4.

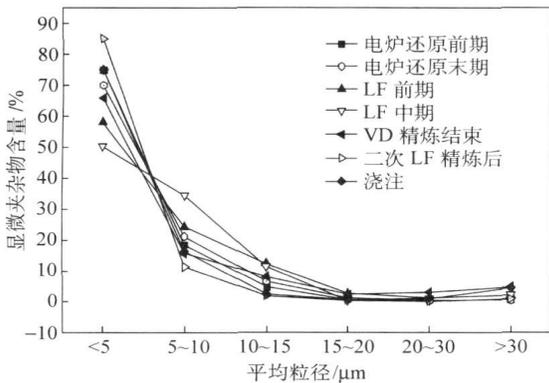


图 3 各工序显微夹杂物平均粒径分布

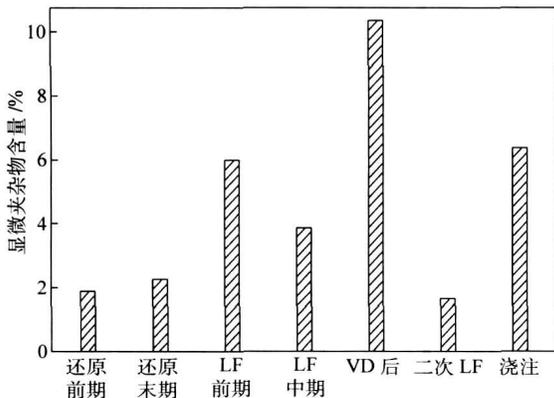


图 4 各工序大于 $15\ \mu\text{m}$ 的显微夹杂物含量



图 5 LF/VD 精炼期夹杂物形貌和类型:(a) $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$; (b) $\text{SiO}_2\text{-MnO}$; (c) $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$

3.3 锻造后钢锭的大型夹杂物分析

在钢锭中取样进行大样电解实验,分析了钢锭中大型夹杂物分布. 大型夹杂电解分析结果见表 1,钢锭中取样位置夹杂物总量和分布见图 6. 数据显示钢锭中大型夹杂物尺寸主要分布在 $50\sim 365\ \mu\text{m}$

在“EAF \rightarrow LF \rightarrow VD \rightarrow VT”生产流程中,LF 精炼期是去除夹杂物的主要时期之一. 夹杂物从钢中的去除程度主要取决于它们在钢液中的上浮速度,而上浮速度又与脱氧产物的组成、形状、大小等因素有关,根据斯托克斯公式可知,夹杂物的上浮速度是与其半径的平方成正比的,所以夹杂物的粒径越大,上浮速度越快. 由图 3 知,LF 精炼中期小于 $5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物的比例在 50%左右,为各工序中最低,而 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ 夹杂物比例为 36%,明显高于其他工序的比例,说明在 LF 精炼期小颗粒夹杂物在吹氩搅拌下聚集成为稍大的夹杂物,夹杂物粒度在不断聚集后会变大,有利于夹杂物的上浮去除. 然而分析中发现 LF 精炼期间大于 $15\ \mu\text{m}$ 的显微夹杂物比例为 4%~6%,并有 $50\ \mu\text{m}$ 甚至更大的夹杂物存在,分析发现 LF 精炼时氩气流量小,搅拌功率远没有达到所要求的 $50\sim 150\ \text{W/t}$ 钢的搅拌功率,导致夹杂物上浮不充分.

由图 4 知,冶炼过程钢中大于 $15\ \mu\text{m}$ 的夹杂物比例起伏波动,最大为 VD 精炼后的 10.34%,最小为二次 LF 精炼后的 1.65%,两者相差 6.3 倍. VD 精炼后,随真空脱气后夹杂物数量的上升,钢液中大颗粒夹杂物的比例也有所增加,说明反应产生的夹杂物还来不及上浮. 从精炼出钢到浇注之间没有软吹工序,钢包内的夹杂物聚集后上浮速度缓慢,使钢液中较大粒度的显微夹杂物比例上升,所以在浇注时依然有大的夹杂物残存于钢液中.

各冶炼时期均有大型夹杂物存在,这些大的夹杂物主要为球状的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2\text{-MnO}$ 和 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 等脱氧复合产物,其形貌和类型见图 5.

之间,在钢锭帽口部位和钢锭尾部均有大于 $365\ \mu\text{m}$ 的夹杂物存在,且都分布在钢锭远离中心的区域,说明在钢液对流中这些早期聚集长大的大型夹杂物很容易被凝固前沿的柱状晶截获.

钢锭凝固规律为由外向里,由下向上逐渐凝固,

表1 曲拐大样电解分析结果

试样号	夹杂总量, mg/10 kg	夹杂物粒径分级/mg		
		50~180 μm	180~365 μm	>365 μm
A1	6.88	0.2	0.2	0.2
A2	5.81	0.3	0.2	0
A3	5.81	0.4	0	0
A4	16.1	0.4	0.3	0.4
A5	9.04	0.4	0.2	0
B1	14.8	0.9	0.3	0
B2	25.9	2.0	0.2	0
B3	19.2	1.5	0.2	0
B4	22.1	1.5	0.2	0.2
B5	24.3	2.0	0.3	0.3

钢锭底部的凝固能力强. 结合取样标记位置进行分析, 帽口部位 A1、A2、A3 位置夹杂物含量分别为

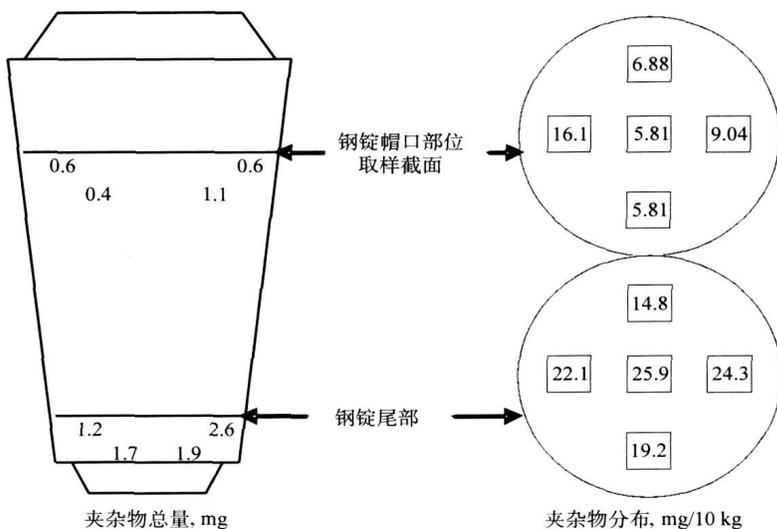


图6 钢锭中大型夹杂物分布

由图6可知, 钢锭尾部的夹杂物含量比钢锭帽口部位的夹杂物含量多. 根据钢锭中夹杂物的沉积锥聚集机理可知, 是由于镇静钢钢锭凝固过程中沿凝固前沿下降的热对流携带夹杂物下降, 并在下降结晶雨的捕捉和钢锭底部黏稠层的粘附作用下, 使得钢锭尾部截获大型夹杂物的能力和几率都很大. 随着钢锭的凝固, 钢液环流范围不断缩小, 其携带的夹杂物在钢锭底部聚集的范围越来越小, 最终形成钢锭大型夹杂物富集的沉积锥.

为减少钢锭中沉积锥的夹杂物数量, 适当提高浇注温度以保证钢液有一定的过热度^[4], 推迟形核时间后移, 抑制结晶雨的形成, 减少了夹杂物被结晶雨捕捉的几率. 基于钢锭凝固时温度场的变化, 在保护浇注帽口时将加入的普通覆盖剂改为速燃高热值发热剂, 也可以减少铁晶体的形成, 推迟结晶雨的

6.88、5.81 和 5.81 mg/10 kg, A4 为 16.13 mg/10 kg, A5 位置为 9.04 mg/10 kg. A4 位置夹杂物含量约为 A3 位置的三倍, 说明在钢锭浇注时, 钢液下降冲刷和钢液因温差环流过程中携带的夹杂物被钢锭横截面上的柱状晶截获的几率是不同的. 图6显示钢锭帽口部位取样横截面中心即 A2 位置的夹杂物最少.

钢锭尾部夹杂物分布显示, 横截面中心 B2 位置夹杂物为 25.9 mg/10 kg, 高于 B1、B3、B4 和 B5 的 14.8、19.2、22.1 和 24.3 mg/10 kg. 根据钢液对流富集理论^[4], 钢液在自然对流时携带的夹杂物在凝固前沿运动时被柱状晶截获而留在最早冷却的钢锭边部, 没有被截留的少部分大型夹杂物因被钢液对流带到钢锭的中心区部位集聚, 从而使中心 B2 位置的夹杂物含量较大.

形成, 为夹杂物提供充足的上浮时间, 减少钢锭底部沉积锥的大型夹杂物数量.

3.4 锻造后钢锭中夹杂物分析

采用 GB/T 10561—2005“钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法”^[5], 对从锻造后钢锭上所取的样品进行评级测定.

整个锻造后钢锭中夹杂物主要由 A 类夹杂、B 类夹杂、D 类夹杂和 DS 类夹杂组成(见图7), 最严重的等级为 A 类粗系 2 级、B 类细系 2 级、D 类粗系 1 级和 DS 类 4 级. 钢锭帽口部位主要是硫化物、氧化物及少量氮化物夹杂, 钢锭尾部则出现严重的 B 类夹杂和 DS 类夹杂, 同时伴随少量硫化物夹杂.

帽口部位的氧化铝、硫化物类夹杂物等级比钢锭尾部的严重. 钢锭帽口中间部位氧化铝类夹杂物比边部少, 中间硫化物比边部多, 粗系最大达到 436

μm , 是硫化物主要在钢锭中心区偏析所致^[6]; 钢锭尾部出现的单个球形夹杂物直径均大于 $53 \mu\text{m}$, 最

大的达到 $140 \mu\text{m}$.

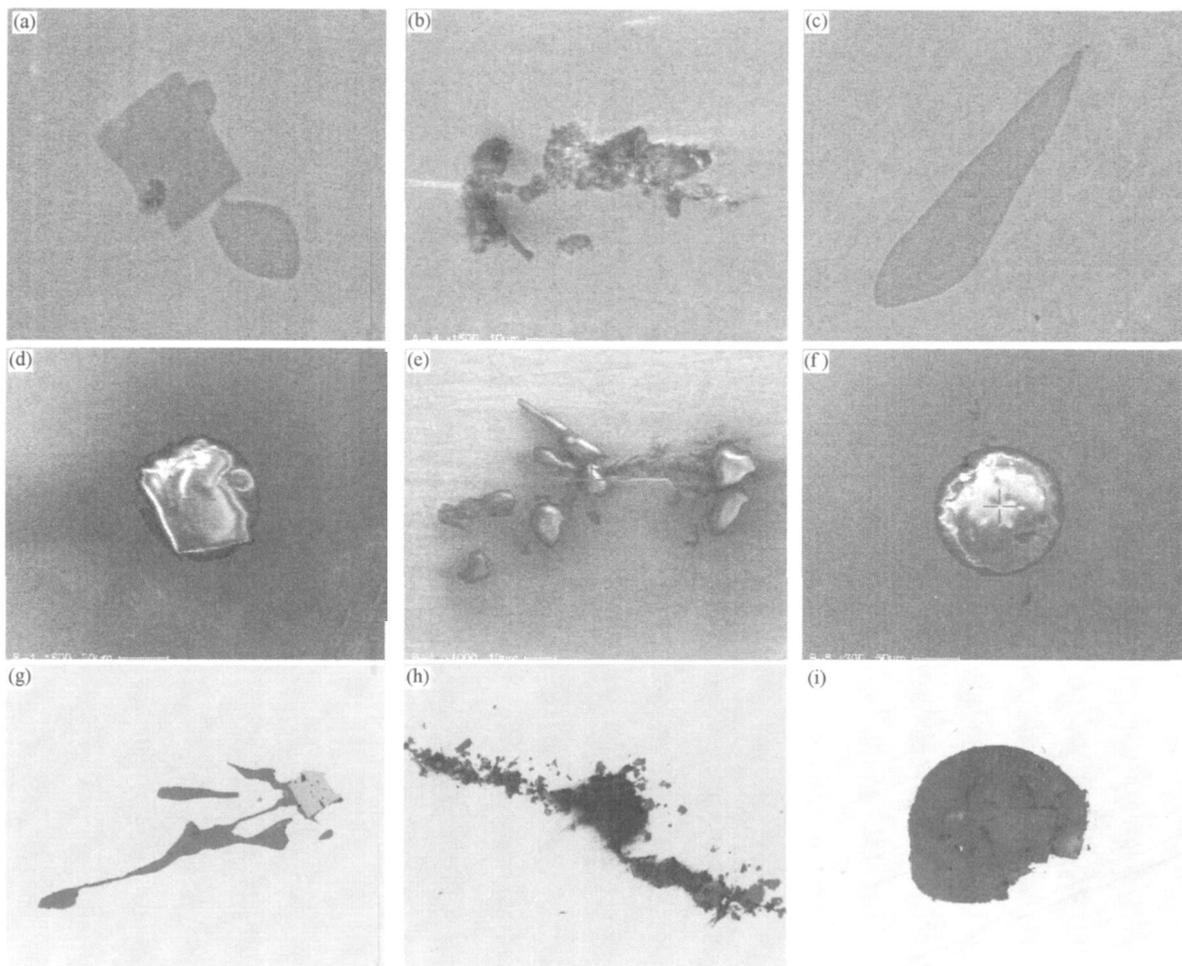


图7 锻锭中的夹杂物形貌和类型. 钢锭帽口部位电镜图: (a) TiN(方形)-MnS(椭圆形)-Al₂O₃(深色)复合夹杂; (b) B类 Al₂O₃夹杂; (c) A类 MnS夹杂; 钢锭尾部电镜图: (d) D类 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃复合夹杂; (e) B类 Al₂O₃夹杂; (f) DS类夹杂, 140 μm ; 夹杂物金相图: (g) 硫化物+氮化物; (h) B类 Al₂O₃夹杂(包裹着氮化物和硫化物); (i) DS类夹杂, 130 μm

4 结论

(1) 精炼期大于 $15 \mu\text{m}$ 的夹杂物百分比波动在 $1.65\% \sim 10.34\%$ 之间, 精炼后夹杂物数量为 $3 \text{ 个}/\text{mm}^2$. 各工序均有大型夹杂物存在, LF 精炼期最大夹杂物达到 $230 \mu\text{m}$. 大尺寸夹杂的存在表明吹氩搅拌功率, 炉渣吸附能力不足, 不能将其排除钢液.

(2) 钢锭尾部大型夹杂物的含量高于钢锭帽口部位的含量. 钢锭横截面上凝固前沿的柱状晶截获夹杂物的几率不同; 钢锭帽口中间部位夹杂物的含量小于周边夹杂物含量为 $5.81 \text{ mg}/10 \text{ kg}$; 钢锭尾部中间部位夹杂物含量高于周边夹杂物含量为 $25.9 \text{ mg}/10 \text{ kg}$.

(3) 锻造后钢锭帽口部位主要为锻造拉长的硫化物夹杂, 伴随氧化物和少量氮化物夹杂; 钢锭尾部主要是 B 类夹杂和大量的 DS 类夹杂.

(4) 提高搅拌功率, 保证充足的软吹时间, 促进夹杂物上浮. 适当提高浇注温度和采用好的发热剂保护帽口的方法促进夹杂物上浮, 减小钢锭底部沉积锥夹杂物的富集.

研究表明, 锻造后曲拐探伤不合格的主要原因是钢锭尾部含有大型夹杂物聚集部分的沉积锥不能完全切除造成的.

参 考 文 献

- [1] Song S D, Hu C B. Research for Forging Process of Supergiant Crankshaft Used in Ships. *Heavy Casting and Forging*, 2001, 91(1):11
(宋士丹, 胡朝备. 特大型船用曲轴曲拐锻造工艺研究. 大型铸锻件, 2001, 91(1), 11)
- [2] Sun Y M, Li D Z, Li Y Y, et al. Simulation and experiment study of bending process of large marine crankthrow. *Acta Metall Sin.*, 2005, 12: 1261

- (孙明月,李殿中,李依依,等. 大型船用曲轴曲拐的弯锻过程模拟与实验研究. 金属学报,2005(12): 1261)
- [3] Cheng J, et al. The determination of macro-inclusions in production of clean steel. *Angang Technology*, 2004(4):58
(Cheng J, 等. 洁净钢生产过程中宏观夹杂物的测定. 鞍钢技术,2004(4):58)
- [4] Dong L R, Liu X H, et al. *Large-Scale Nonmetallic Inclusion of ingot*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991
(董履仁,刘新华,等. 钢中大型非金属夹杂物. 北京:冶金工业出版社,1991)
- [5] Standardization Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 10561—2005/ISO 4967:1998(E), Steel-Determination of Content of Nonmetallic Inclusions—Micrographic Method Using Standards Diagrams. Beijing: Standards Press of China, 2005
(中国国家标准化管理委员会,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 10561—2005/ISO 4967:1998(E), 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法. 北京:中国标准出版社,2005)
- [6] Zhou H, Yuan H Y, Cui K. The segregation of sulfides in Ingot. *Res Iron Steel*, 1996(5): 3
(周宏,袁浩扬,崔昆. 钢锭中硫化物偏析的研究. 钢铁研究,1996(5):3)