

40 t EBT EAF-LF-VD-铸锭工艺冶炼模具钢 H13 的洁净度分析

庞永刚¹ 侯明山¹ 胡建成² 李士琦¹ 刘润藻¹ 王玉刚¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 中原特钢股份有限公司,济源 454685)

摘 要 试验用热作模具钢 H13 (/%: 0.36 ~ 0.38C, 0.36 ~ 0.38Mn, 0.89 ~ 0.91Si, 0.007 ~ 0.010P, 0.006 ~ 0.011S, 5.10 ~ 5.15Cr, 1.12 ~ 1.18Mo, 0.84 ~ 0.89V) 的冶炼工艺流程为 40 t 偏心炉底出钢电弧炉-钢包炉精炼-VD 处理-4.65 t 铸锭工艺。通过对各冶炼工序钢水的总氧和氮含量- T[O] 和 [N] 的分析以及钢中夹杂物的形貌和组成的分析,研究了该工艺流程生产的 H13 钢的洁净度。结果表明,经 LF-VD 精炼后 H13 钢中的平均总氧含量- T[O] 为 22×10^{-6} , 平均氮含量- [N] 为 95×10^{-6} ; $\Phi 200$ mm 锻坯中夹杂主要以脱氧产物氧化铝为主,同时含有硫化锰等硫化物和偏析产生的氮化物;夹杂物尺寸集中在 5 μm 左右,较大尺寸的夹杂物为 10 μm 左右。采用该流程冶炼的 H13 钢可以满足对该钢种洁净度的要求。

关键词 40 t EBT EAF-LF-VD-铸锭流程 热作模具钢 H13 洁净度 分析

An Analysis on Cleanliness of Die Steel H13 Steelmaking by 40 t EBT EAF-LF-VD-Ingot Casting Process

Pang Yonggang¹, Hou Mingshan¹, Hu Jiancheng², Li Shiqi¹, Liu Runzao¹ and Wang Yugang¹
(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Zhongyuan Special Steel Co Ltd, Jiyuan 454685)

Abstract The steelmaking process for test hot working die steel H13 (/%: 0.36 ~ 0.38C, 0.36 ~ 0.38Mn, 0.89 ~ 0.91Si, 0.007 ~ 0.010P, 0.006 ~ 0.011S, 5.10 ~ 5.15Cr, 1.12 ~ 1.18Mo, 0.84 ~ 0.89V) is 40 t eccentric bottom tapping arc furnace-ladle furnace refining-VD treatment-4.65 t ingot casting process. With analysis on total oxygen and nitrogen content in liquid- T[O] and [N], and analysis on morphology and ingredient of inclusions in steel, the cleanliness of steel H13 produced by this process flow sheet has been studied. Results show that after refining by LF-VD process the average total oxygen content in steel H13- T[O] is 22×10^{-6} and the average nitrogen- [N] is 95×10^{-6} ; the main inclusions in $\Phi 200$ mm forging are deoxidation products- aluminium oxide with sulfides including manganese sulfide and nitride formed by segregation; the sizes of inclusions are mainly about 5 μm , the sizes of some inclusions can come up to about 10 μm . The steel H13 steelmaking by this flow sheet could meet the requirement for cleanliness of that steel grade.

Material Index 40 t EBT EAF-LF-VD-Ingot Casting Flow Sheet, Hot Working Die Steel H13, Cleanliness, Analysis

H13 钢是一种应用比较广泛的热作模具钢,世界各国都有应用,在我国一般称作 4Cr5MoSiV1 钢, H13 钢主要含 Cr、Mo、V 等合金元素^[1], GB1299 标准 H13 钢的化学成分及其质量分数为(%) : 0.32 ~ 0.45C、0.80 ~ 1.20Si、0.20 ~ 0.50Mn、 $\leq 0.030\text{P}$ 、 $\leq 0.030\text{S}$ 、4.75 ~ 5.50Cr、1.10 ~ 1.75Mo、0.80 ~ 1.20V。

目前国内外 H13 钢大多采用电渣重熔来提高洁净度和均匀性^[2-5], 而中原特钢公司生产 H13 钢的工艺是 40 t 电弧炉(偏心炉底出钢)冶炼 40 t 钢包炉精炼-VD 真空脱气处理 4.65 t 铸锭,其工艺过程为:电弧炉出钢 1/3 左右加预熔渣、硅铁以及铬铁等难溶合金,终点碳控制在 0.12% 左右,LF 进站吹氩、喂铝、加入石灰、精炼渣改制剂等造渣材料,白渣保持时间 ≥ 15 min,VD 过程在 133.32 Pa 的真空度下保持至少 15 min,软吹 10 min,采用下注法浇铸铸

锭,并锻成 $\Phi 200$ mm 的锻件。此工艺不经过电渣重熔处理工艺,因此在钢的洁净度等方面能否满足 H13 钢材的要求是需要探讨的问题。

1 研究方法

通过现场取样分析研究,对中原特钢 H13 钢生产中分别在 LF 前、LF 后、VD 后、模铸锻造钢锭上取金相样和 T[O]、[N] 样,分析 H13 钢中氧化物夹杂的演变。钢液中取样时采用盖有木塞的内径 60 mm、高 180 mm 的取样杯,样杯插入渣层下 300 mm 取样;铸锭锻造钢锭试样分别在钢锭中心、距中心 1/2 处和钢锭边缘取样。对金相样采用扫描电镜观察夹杂物形貌及夹杂物组成,气体样中 T[O]、[N] 的分析结果来源于国家钢铁材料测试中心。过程样和锻坯上取样方法如图 1 所示。

2 试验结果与分析

2.1 化学成分

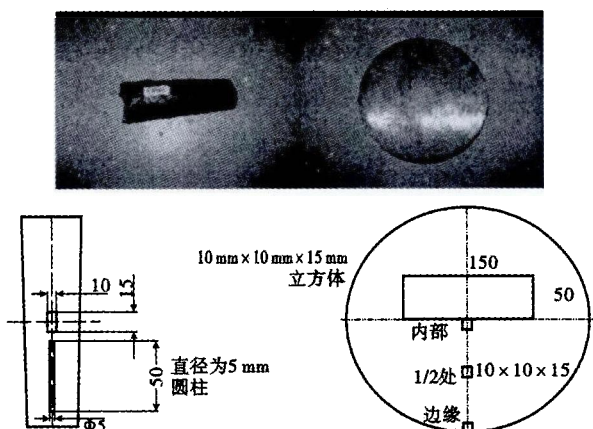


图 1 炼钢过程样和 Φ200 mm 锻坯实物图及取样位置
Fig. 1 Sample size in steelmaking process and location of sampling on cross section of Φ200 mm forging

表 1 H13 钢冶炼终点钢水成分 / %

炉号	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
3121894	0.36	0.36	0.010	0.011	0.91	0.15	5.15	1.12	0.89
3121921	0.37	0.38	0.009	0.008	0.90	0.16	5.10	1.18	0.85
3121923	0.38	0.37	0.007	0.006	0.89	0.12	5.05	1.16	0.84
平均	0.37	0.37	0.009	0.008	0.90	0.14	5.10	1.15	0.86

按照电弧炉冶炼-LF/VD 处理-铸锭的工艺,在中原特钢公司进行工业试验 3 炉,冶炼终点的化学成分见表 1,化学分析由中原特钢理化计量中心完成,钢水化学成分分析表明钢水成分控制稳定,变化幅度小,各成分均控制在钢种要求之内^[6],可见中原特钢生产工艺满足 H13 钢冶炼的钢种成分要求。

2.2 钢中总氧含量- T[O]

图 2 为 LF 精炼前后及 VD 处理后及铸锭锻造铸锭上取样分析得到的钢中 T[O]、[N] 的变化情况。

氧含量变化可以看出,在 LF 进站时钢中 T[O] 很高,平均为 150×10^{-6} 。精炼过程钢中 T[O] 下降较为明显,到 LF 出站时,平均 T[O] 均控制在 50×10^{-6} 以下,平均降低 112×10^{-6} ,下降 75%。VD 处理过程真空度为 133.32 Pa。VD 出站后 T[O] 为平均 22×10^{-6} ,平均降低 56%,锻坯中 T[O] 略有升高为 24×10^{-6} 。氧分析表明锻坯中全氧含量控制在 $20 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$,钢中氧控制较好,国内此钢种全氧含量一般控制在 20×10^{-6} 左右,国外较先进的企业可以控制在 15×10^{-6} 。

2.3 钢中氮含量- [N]

(1) 3 炉次钢中 [N] 在 LF 精炼过程的变化趋势基本一致,LF 处理前最低平均为 89×10^{-6} ,处理后氮含量升高到 111×10^{-6} ,升高了 25%。在 LF 精炼

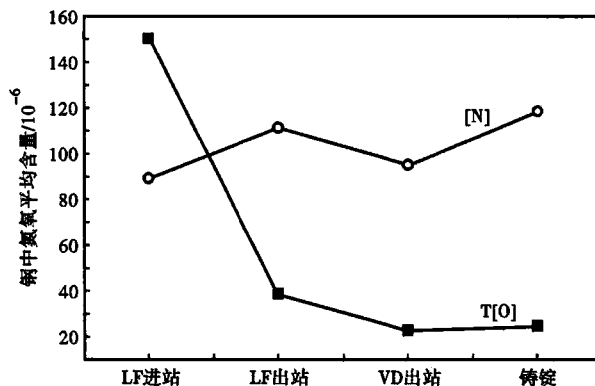


图 2 不同时期的平均总氧和氮含量
Fig. 2 Average total oxygen content and nitrogen content in liquid in different steelmaking process

时,喂铝线进行深脱氧后,钢液中氧、硫含量降低,特别在 [O]、[S] 较低的情况下,氧、硫对阻碍钢液吸氮下降,钢液吸氮速率增加,吸氮速度加快。合金元素 Cr、Mo、Mn、Ti、V 等对氮的作用系数为负值,而模具钢 H13 中合金元素 Cr、Mo、Mn、Ti、V 较高,其含量增加,将降低钢中氮的活度系数,提高钢液吸氮速率,使氮在钢中的溶解度增加。LF 精炼过程时间长,在电极附近的氮气受到电弧的作用被电离成氮原子,提高钢液中氮的含量。

(2) VD 处理后钢中氮含量下降到 95×10^{-6} ,下降 14%。VD 真空处理主要是利用真空脱气的基本原理,利用钢液在 VD 真空炉内良好的搅拌条件,加强钢中夹杂物的上浮和吸收,降低钢中的氮含量。铸锭中 T[O] 有所回升,原因为在浇铸过程中二次氧化所致。氮含量在 120×10^{-6} 左右,尚有降低的空间。

2.4 微观夹杂物的形貌和组成

钢中全氧和全氮分析可以确定,钢中夹杂物总量可以满足 H13 冶炼要求,接下来通过扫描电镜来观测钢中夹杂物的形貌和成分。冶炼过程中分别取 LF 喂铝后、LF 处理结束和 VD 处理结束 3 个时期的过程样,锻坯分别在锻坯边缘,1/2R 处和锻坯中心 3 个位置取样分析。过程样钢中典型夹杂物形貌成分如图 3。

LF 进站喂铝后的钢样电镜分析可知,样品中大量出现的夹杂为硫化物包裹的脱氧产物, Al_2O_3 , 夹杂物尺寸较小,但由于钢中硫含量较高,Al 夹杂外包裹一层硫化物;大颗粒球状 SiO_2 是 Si 预脱氧的产物,此类大颗粒夹杂物在后期可以被精炼渣所吸附去除。

LF 处理后的钢样经电镜分析可知,随着脱氧的

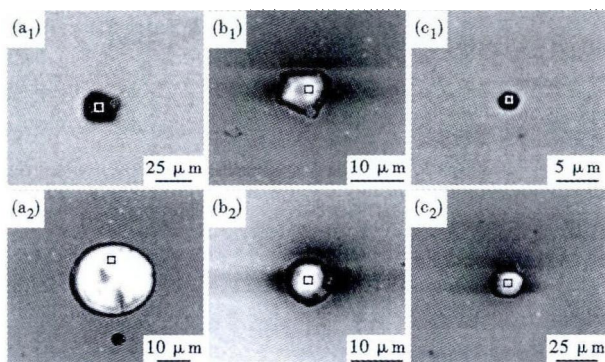


图3 冶炼过程 H13 钢中典型夹杂物形貌和成分:LF 喂铝后- (a₁) Al₂O₃ 和 (a₂) SiO₂; LF 精炼终点- (b₁) MgO-Al₂O₃ 和 (b₂) CaO-Al₂O₃-SiO₂; VD 处理后- (c₁) CaO-Al₂O₃-SiO₂ 和 (c₂) CaO-Al₂O₃-SiO₂

Fig.3 Morphology and ingredient of typical inclusions in steel H13 in different steelmaking process; LF after feeding aluminium- (a₁) Al₂O₃ and (a₂) SiO₂; end-of LF refining- (b₁) MgO-Al₂O₃ and (b₂) CaO-Al₂O₃-SiO₂; after VD treatment- (c₁) CaO-Al₂O₃-SiO₂, (c₂) CaO-Al₂O₃-SiO₂

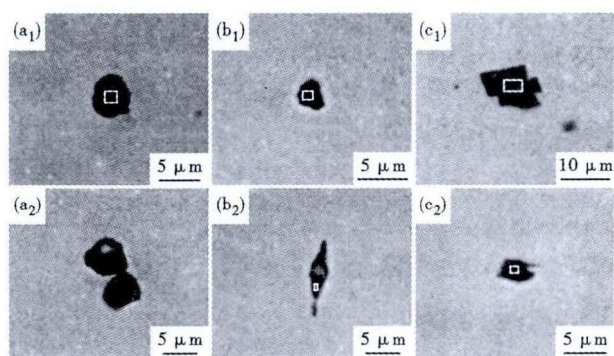


图4 H13 钢 Φ200 mm 锻坯中各部位典型夹杂物形貌和成分:锻坯边缘- (a₁) Al₂O₃ 和 (a₂) Al₂O₃-MnS; 锻坯1/2半径- (b₁) Al₂O₃-MgO 和 (b₂) MnS; 锻坯中心- (c₁) TiN-VN 和 (c₂) Al₂O₃

Fig.4 Morphology and ingredient of typical inclusions in Φ200 mm forging of steel H13; edge of forgings- (a₁) Al₂O₃ and (a₂) Al₂O₃-MnS; 1/2 of radius of forgings- (b₁) Al₂O₃-MgO and (b₂) MnS; center of forgings- (c₁) TiN-VN and (c₂) Al₂O₃

进行钢中出现了复杂氧化物夹杂,包括 MgO-Al₂O₃-CaO-Al₂O₃-SiO₂ 等,此类夹杂多为球状或不规则球状,部分外面包裹有 CaS。

VD 处理后的钢样电镜分析可知,VD 处理后钢中 CaS 包裹的复杂氧化物 MgO-Al₂O₃-SiO₂ 成分更加复杂,数量减少,尺寸明显减少,但是偶尔也会有较大尺寸复合氧化物出现,这部分极有可能是精炼渣卷渣未上浮的结果^[7]。

Φ200 mm 锻坯中典型夹杂物形貌成分如图 4

所示。

H13 锻坯中各部位典型夹杂物形貌经形貌分析可知,锻坯边缘大部分为氧化物,主要为 Al₂O₃,少数夹杂物外面包裹有 MnS;锻坯半径1/2处的部分夹杂物仍为氧化物,不过硫化物明显增多,单独存在的 MnS 向锻造方向延伸;锻坯中心多见氮化钛、氮化钒等氮化物,其原因为钛、钒等元素偏析造成^[8-9]。从尺寸上看各部分夹杂物尺寸较小,一般在 5 μm 左右,个别在 10 μm 左右。

3 结论

(1) 采用 40 t 电弧炉冶炼-LF/VD 处理-模铸工艺生产 H13 锻坯中 T[O] 为 $20 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$, 其成分、钢液洁净度可以满足钢种要求,工业试验和测试结果表明该工艺方案是可行的。

(2) 夹杂物微观分析表明钢中夹杂物种类主要以脱氧产物氧化物为主,存在形态为单独存在或和硫化物形成复杂夹杂物,另一类夹杂物为氮化钛和氮化钒等由于钒钛等元素偏析产生的氮化物;锻坯中夹杂物尺寸集中在 5 μm,较大的夹杂物在 10 μm 左右,基本没有大型夹杂物的存在。

参考文献

- [1] 王春琼,李长荣. H13 钢中非金属夹杂物在 LF-VD 精炼过程的行为研究[J]. 模具工业,2007,37(6):63-65.
- [2] 杨志刚,方鸿生,王家军,等. 新型贝氏体易切削塑料模具钢中夹杂物的研究[J]. 钢铁,1994,29(12):42-44.
- [3] 卢国辉,黄拿灿,黄惠. H13 铝型材挤压模具早期开裂失效分析[J]. 模具工业,2001(4):48-51.
- [4] 王玉峰,刘宗昌,范文宝. H13 钢的带状组织及其消除方法[J]. 上海金属,2005,27(6):39-43.
- [5] 张建国,丛培武. H13 热作模具钢的真空热处理[J]. 金属热处理,2005,30(6):77-79.
- [6] 邹安全. 等温球化对 H13 钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2003,28(8):34-35.
- [7] 叶俭,陆建明. 大型压铸模用钢及其真空热处理[J]. 金属热处理,2003,28(8):53-58.
- [8] 潘振鹏. 气门热精锻模具新材料新技术与系统工程[J]. 金属热处理,1999,21(9):23-25.
- [9] Castro G, Fern'andez-Vicente A, Cid J. Influence of the Nitriding Time in the Wear Behaviour of an AISI H13 Steel during a Crankshaft Forging Process, Sciencedirect,2007,263(2):1375-1785.

庞永刚(1971-),男,博士,钢铁冶金研究。

E-mail: mingslanhou@126.com

收稿日期:2013-05-07