

大功率电力机车车轴用 EAIN 钢的生产工艺实践

王玉玲 王之香 邬中华

(太原钢铁(集团)有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 车轴用钢 EAIN($\% : 0.32 \sim 0.38C, 0.15 \sim 0.35Si, 0.80 \sim 1.10Mn, \leq 0.015P, \leq 0.010S$) 300 mm \times 300 mm 钢坯试制流程为 60 t 电弧炉-LF-VD-8.4 t 铸锭-1 000 mm 初轧机开坯工艺。通过 EAF 热装 $\geq 70\%$ 的预处理热水, EAF 控制终点 $[P] \leq 0.008\%$ 和 $[C] \geq 0.10\%$, 出钢留钢 10%, 高碱度渣 $(CaO)/(SiO_2) = 4 \sim 7$ 并喂 Al 线精炼, 控制 $[Al]_s 0.020\% \sim 0.040\%$, VD 后喂 0.5 kg/t Si-Ca 线, 氩气保护浇铸等工艺措施, 使生产的 EAIN 钢的洁净度为 $[O] \leq 15 \times 10^{-6}$, $[H] \leq 1.0 \times 10^{-6}$, $[N] \leq 80 \times 10^{-6}$, $P \leq 0.015\%$, $S \leq 0.005\%$, A、B、C、D 类非金属夹杂物级别 ≤ 1.0 , EAIN 车轴钢坯和车轴技术指标符合大功率电力机车车轴的技术要求。

关键词 60 t EAF-LF-VD-8.4 t 铸锭流程 大功率电力机车车轴用钢 EAIN 生产实践

Process Practice of Steel EAIN for Axle of High Power Electric Locomotive

Wang Yuling, Wang Zhixiang and Wu Zhonghua

(Technical Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The pilot production flow sheet for 300 mm \times 300 mm bloom of steel EAIN ($\% : 0.32 \sim 0.38C, 0.15 \sim 0.35Si, 0.80 \sim 1.10Mn, \leq 0.015P, \leq 0.010S$) for axle is 60 t EAF-LF-VD-8.4 t ingot casting-1 000 mm blooming mill breakdown process. With the process measures including EAF hot charging $\geq 70\%$ pre-treating hot metal, EAF controlling end $[P] \leq 0.008P$ and $[C] \geq 0.10\%$, 10% heel liquid in tapping, refining with high basicity slag $(CaO)/(SiO_2) = 4 \sim 7$ and feeding Al wire to control $[Al]_s 0.020\% \sim 0.040\%$, after VD process feeding 0.5 kg/t Si-Ca wire and argon shielding ingot casting, the cleanliness of produced steel EAIN is $[O] \leq 15 \times 10^{-6}$, $[H] \leq 1.0 \times 10^{-6}$, $[N] \leq 80 \times 10^{-6}$, $P \leq 0.015\%$, $S \leq 0.005\%$, and inclusion rating of A, B, C and D series ≤ 1.0 ; the technical indexes of bloom and axle of steel EAIN all meet specification requirement for axle of high power electric locomotive.

Material Index 60 t EAF-LF-VD-8.4 t Ingot Casting Process, Steel EAIN for Axle of High Power Electric Locomotive, Process Practice

我国铁路运力占世界总运力的 25%, 但铁路长度却只有全世界的 2%, 铁路运力非常紧张。大力发展铁路运输, 提高机车牵引能力, 货车重载化已迫在眉睫、大势所趋。目前国内机车车轴用钢主要是 JZ40、JZ50 钢, 无法满足大功率铁路机车的要求。

车轴是机车重要的走行部件, 受力状态复杂, 主要承受弯曲载荷、扭转载荷, 并承受一定的冲击, 因此, 为了保证铁路运输安全、高效, 大功率电力机车车轴对化学成分、力学性能、纯净度等质量指标要求非常严格。我国目前大秦铁路上运行的国际最大功率 9 600 kW 的交流电力机车 EAIN 钢车轴技术要求不仅严于 GB/T5068-1999“铁路机车、车辆车轴用钢”要求, 而且严于欧洲标准 EN13261-2006“铁路应用-轮对和转向架-车轴-产品要求”。

太钢生产的 EAIN 钢的各项技术指标均符合大功率电力机车 EAIN 钢坯及车轴要求, 制成的车轴已在国际最大功率 9 600 kW 的大秦铁路专用机车上成功应用。

1 大功率电力机车车轴用 EAIN 钢的主要技术要求

EAIN 钢的熔炼成分要求为 ($\%$): $0.32 \sim 0.38C, 0.8 \sim 1.1Mn, 0.15 \sim 0.35Si, \leq 0.015P, \leq 0.010S, \leq 0.05Mo, \leq 0.30Cr, \leq 0.30Cu, \leq 0.30Ni, \leq 0.05V$ 。

钢液 $[H] \leq 2 \times 10^{-6}$, 钢中 $[O] \leq 15 \times 10^{-6}$; $[N] \leq 80 \times 10^{-6}$ 。

160 mm \times 160 mm 大样坯正火后, 按照图 1 取试样。力学性能应符合 $ReH \geq 320$ MPa, $R_m 550 \sim 650$ MPa, $A_5 \geq 22\%$, 纵向冲击功 $A_{KU} \geq 30$ J, 横向冲击功 $A_{KU} \geq 20$ J (冲击功试样缺口深度为 5 mm)。

钢中非金属夹杂物按 GB/T10561 方法 A 进行检测, 应符合表 1 要求。取样位置见图 1。

2 工艺流程及工艺要求

2.1 工艺流程

60 t 电弧炉 \rightarrow LF 精炼 \rightarrow VD 真空脱气 \rightarrow 模铸 8.4 t 钢锭 $\rightarrow \Phi 1\ 000$ mm 初轧开坯成材 \rightarrow 钢坯探

表 1 EAIN 钢非金属夹杂物要求/级

Table 1 Requirement on nonmetallic inclusion rating of steel EAIN /rating

项目	粗系(最大值)	细系(最大值)
A 硫化物	1.5	1.5
B 氧化铝	1.0	1.5
C 硅酸盐	1.0	1.5
D 球状氧化物	1.0	1.5
(B+C+D)类	2.0	3.0

伤、取样、检验、精整、入库。

2.2 工艺要求

2.2.1 电弧炉冶炼工序

将废钢和预处理后的铁水加入电弧炉冶炼,预处理的铁水装入重量比 $\geq 70\%$ 。在冶炼过程中脱 C、脱 P、去气,控制 $P \leq 0.008\%$, 终点 $[C] \geq 0.10\%$, 温度 $1640 \sim 1680\text{ }^\circ\text{C}$ 时,将钢水倒入钢包中进行初步合金化。电弧炉出钢要求留渣、留钢(留钢约装炉量 10%)。

在钢包炉精炼前,加入石灰、萤石、合成渣和硅铝钡,使钢包中钢水的熔渣碱度 $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$ 达到 $4.0 \sim 7.0$,在钢包中加入硅铁、硅锰,使钢水中金属元素含量达到 $0.80\% \sim 1.00\% \text{ Mn}$, $0.15\% \sim 0.30\% \text{ Si}$,以备 LF 精炼工序用。

2.2.2 LF 精炼工序

进站在线喂 Al 线,喂入量为每吨钢水加入 $2 \sim 6 \text{ m}$ 。采用 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系,控制熔渣碱度 R 为 $4.0 \sim 7.0$;根据化学元素炉前分析结果加入相应铁合金微调各元素成分,使钢水中各元素成分达到以下范围($\%$): $0.34 \sim 0.37\text{C}$, $0.90 \sim 1.10\text{Mn}$, $0.25 \sim 0.35\text{Si}$, $0.02 \sim 0.05\text{V}$, $\leq 0.013\text{P}$, $\leq 0.005\text{S}$ 。在白渣下保持不少于 20 min ,温度 $1620 \sim 1650\text{ }^\circ\text{C}$,钢水转移出精炼工序。

2.2.3 VD 真空脱气工序

高真空状态($\leq 67 \text{ Pa}$)下保持 15 min 以上。钢包抽真空结束后,喂 Si-Ca 线 0.5 kg/t ,软搅拌 10 min 以上,出工位测温 $1560 \sim 1570\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2.4 浇铸工序

将装有钢水的钢包移到铸台,采用氩气保护进行浇铸;浇铸

锭型为 8.4 t 大钢锭,锭身浇注速度为 $8 \sim 10 \text{ kg/s}$;帽口的浇注速度 $1.5 \sim 3.0 \text{ kg/s}$ 。

2.2.5 轧制工序

采用均热炉加热钢锭到 $(1290 \pm 10)\text{ }^\circ\text{C}$,保温 $2 \sim 4 \text{ h}$,总加热时间 $4 \sim 6 \text{ h}$,然后轧制成 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 方坯,缓冷。

3 钢坯检验结果及讨论分析

3.1 化学成分及气体含量

根据钢中 C、Mn、Si、Al、V、P、S 等元素对钢的组织性能的影响^[1-3],为保证较高的综合力学性能,内控成分($\%$) $0.34 \sim 0.37\text{C}$, $0.25 \sim 0.35\text{Si}$, $0.02 \sim 0.04\text{Al}$, $0.02 \sim 0.05\text{V}$, $\leq 0.013\text{P}$ 。综合考虑各元素对钢性能的影响并结合实验结果,大功率电力机车车轴用 EAIN 钢成分内控目标为表 2。随机统计 5 炉,EAIN 钢的化学成分和气体含量检测结果见表 2。

3.2 非金属夹杂物

钢中非金属夹杂物主要有 A、B、C、D 类;影响因素主要是钢中硫含量、氧含量控制,钢包软搅拌,钙化处理技术,浇铸温度、速度控制等。通过控制钢中 $P \leq 0.015\%$, $S \leq 0.010\%$ 、钢中氧含量 $\leq 15 \times$

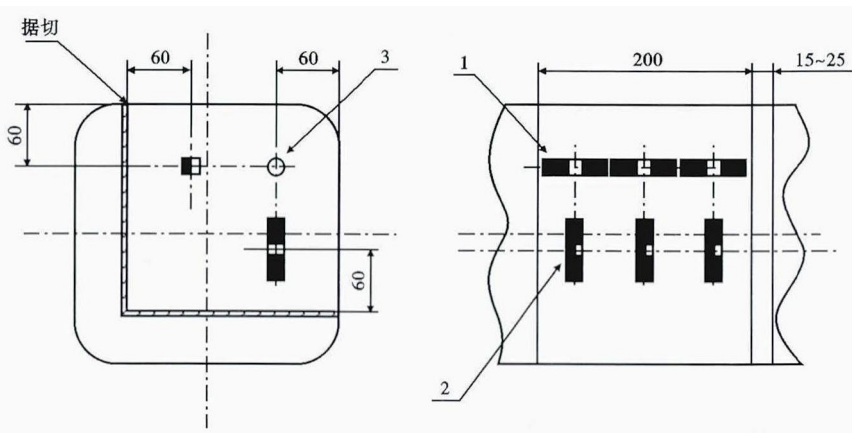


图 1 取样位置示意图:1- 纵向冲击试样;2- 横向冲击试样;3- 拉伸试样

Fig. 1 Schematics of sampling location: 1- longitudinal impact specimen; 2- cross sectional impact specimen; 3- tensile specimen

表 2 EAIN 钢的化学成分/ $\%$

Table 2 Chemical composition of steel EAIN /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Al	V	[H]	[O]	[N]
技术要求	0.32 ~ 0.38	0.15 ~ 0.35	0.8 ~ 1.1	≤ 0.015	≤ 0.010	无	≤ 0.05	≤ 0.0002	≤ 0.0015	≤ 0.0080
内控要求	0.34 ~ 0.37	0.25 ~ 0.35	0.90 ~ 1.10	≤ 0.013	≤ 0.005	0.020 ~ 0.040	0.02 ~ 0.05	≤ 0.0001	≤ 0.0015	≤ 0.0070
1#	0.35	0.30	0.98	0.010	0.003	0.025	0.03	0.00008	0.0010	0.0049
2#	0.36	0.28	0.95	0.009	0.002	0.037	0.05	0.00006	0.0009	0.0055
3#	0.35	0.28	0.99	0.013	0.004	0.026	0.04	0.00009	0.0011	0.0053
4#	0.36	0.29	0.95	0.010	0.001	0.038	0.04	0.00007	0.0009	0.0065
5#	0.35	0.32	0.97	0.008	0.002	0.033	0.04	0.00007	0.0012	0.0059

10^{-6} ,同时采用钙处理技术,在精炼后期加入钙系合金,钙在 Al_2O_3 夹杂颗粒中扩散,连续地进入铝的位置,置换出来铝进入钢液中。随着钙的扩散,夹杂物中钙含量增加, Al_2O_3 将沿 $Al_2O_3 \rightarrow CaO \cdot 6Al_2O_3 \rightarrow CaO \cdot 2Al_2O_3 \rightarrow CaO \cdot Al_2O_3 \rightarrow 12CaO \cdot 7Al_2O_3 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ 的路线转移,使 Al_2O_3 变为钙铝酸盐。这种 CaO 含量高的液态钙铝酸盐夹杂大部分浮出,进入渣中,剩余的夹杂物则由条状变为球状,从而也抑制夹杂的危害^[4]。采用上述集成技术,保证了钢质纯净,具体见表 3。

3.3 晶粒度

均匀、细小的晶粒度可保证车轴强韧性能良好,同时也保证车轴钢探伤质量。通过控制钢中 Al 含量,采用 V 微合金化技术,保证了钢的晶粒细小,均匀,EAIN 钢 $860\text{ }^\circ\text{C}$ 正火后晶粒度为 8 级,见图 2。

3.4 力学性能

采用 GLEEBLE-3800 型热/力学模拟试验机测试 EAIN 钢 A_{c_3} 为 $810\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据热处理原理^[5],正火温度取 A_{c_3} 以上 $50\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 为好,确定 EAIN 钢的正火温度为 $860\text{ }^\circ\text{C}$ 。大轴重机车车轴运行过程轴径位置服役状态最恶劣。因此,检验用热处理样坯模

表 3 EAIN 钢的非金属夹杂物/级
Table 3 Nonmetallic inclusions in steel EAIN/ rating

炉号	A		B		C		D		B+C+D	
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细
1 [#]	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5	1.0
2 [#]	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0.5	0	1.0
3 [#]	0	0	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	1.5
4 [#]	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	0	1.0
5 [#]	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	1.5

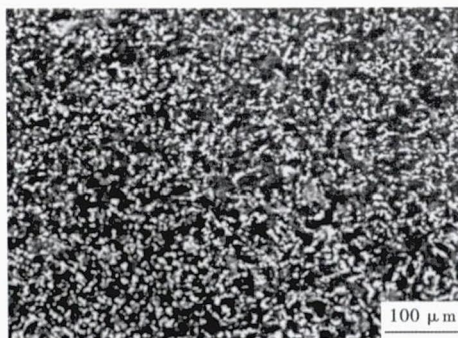


图 2 $860\text{ }^\circ\text{C}$ 正火后晶粒形貌

Fig. 2 Morphology of grain in steel EAIN normalized at $860\text{ }^\circ\text{C}$

表 4 EAIN 钢力学性能

Table 4 Mechanical properties of steel EAIN

炉号	ReH/ MPa	R_m / MPa	A_5 / %	冲击功 A_{KU} /J	
				纵向	横向
1 [#]	360	605	26	46	43
2 [#]	365	635	25	49	46
3 [#]	380	645	23	46	40
4 [#]	380	640	24	50	44
5 [#]	375	630	26	48	45

拟车轴轴径尺寸, $160\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 长,正火后在图 1 所示指定位置取样测试性能。测试的力学性能见表 4。由表 4 可以看出,各项性能良好。

3.5 钢坯制成车轴后的性能情况

太钢生产 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的 EAIN 钢坯供用户制成车轴后,车轴的各项指标均符合大功率电力机车车轴用 EAIN 钢技术要求。

4 结论

(1)通过制定内控化学成分、采用微合金化技术、电弧炉铁水热装、控渣、控磷,LF 精炼,VD 真空脱气技术和大钢锭模铸工艺技术,太钢生产的大功率电力机车车轴用 EAIN 钢,材质纯净、拉伸性能和冲击性能良好,各项技术指标均符合大功率电力机车车轴用 EAIN 钢技术要求。

(2)通过 LF 精炼过程深脱氧、深脱硫、夹杂物变性处理,钢包软搅拌以及浇铸过程控温控速、低温快铸等集成技术,可保证钢中氧含量 $\leq 15 \times 10^{-6}$,A、B、C、D 类夹杂物均 ≤ 1 级。

(3)太钢生产 EAIN 材料制成车轴后,车轴的各项技术指标符合大功率电力机车车轴技术要求。

参考文献

- [1] 吴承建. 合金钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1980:43.
- [2] 李学峰,王玉玲. 铁道车辆用 LZW 车轴钢晶粒度的研究[J]. 钢铁,2001,36(8):36-38.
- [3] 项程云. 合金结构钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1999:119.
- [4] 范鼎东,焦兴利. 精炼炉去除 B 类夹杂的试验研究[J]. 钢铁,2001,36(12):16-18.
- [5] 安运铮. 热处理工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1982:62.

王玉玲(1963-),女,硕士,教授级高工,新产品研究及工艺技术开发。E-mail:wangyl@tisco.com.cn

收稿日期:2013-08-20