

## 保护气氛电渣重熔对 DZ2 高速车轴钢成分及夹杂物的影响

邬中华<sup>1</sup>, 郭波<sup>2</sup>, 王松伟<sup>1</sup>, 王育田<sup>1</sup>, 张锦文<sup>1</sup>

(1 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 太原 030003; 2 山西太钢不锈钢股份有限公司型材厂, 太原 030003)

**摘要** 对 DZ2 高速车轴钢铸坯进行氩气保护气氛电渣重熔并轧制成车轴坯成分分析和检测轴坯、氢氧含量及夹杂物的数量、尺寸和形貌, 并与铸坯直接轧制成的车轴坯进行比较。结果表明: 电渣重熔后, 轴坯纵向上的成分较均匀(0.25%~0.27% C), 但平均 Si 和 Al 含量分别从锭头的 0.25% 和 0.018% 降至锭尾的 0.23% 和 0.015%; 钢中氢和氧含量分别由铸坯的  $0.85 \times 10^{-6}$  和  $9 \times 10^{-6}$  增至电渣锭的  $1.52 \times 10^{-6}$  和  $10 \times 10^{-6}$ 。电渣重熔轴坯中的夹杂物主要是小球状的钙铝酸盐, 其尺寸在  $10 \mu\text{m}$  以上的很少,  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  的数密度为  $0.068 \text{ 个}/\text{mm}^2$ ,  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  的为  $0.04 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。保护气氛电渣重熔不仅可以去除钢中的大型夹杂物, 还可以使小尺寸夹杂物的数量显著降低。

**关键词:** 电渣重熔; DZ2 高速车轴钢; 成分; 夹杂物; 连铸

## Effect of Electroslag Remelting in Protective Atmosphere on Composition and Inclusions of DZ2 High-Speed Axle Steel

Wu Zhonghua<sup>1</sup>, Guo Bo<sup>2</sup>, Wang Songwei<sup>1</sup>, Wang Yutian<sup>1</sup>, Zhang Jinwen<sup>1</sup>

(1 Technology Center of Shanxi Taigang Stainless steel Co., Ltd., Taiyuan 030003;  
2 Section Plant of Shanxi Taigang Stainless steel Co., Ltd., Taiyuan 030003)

**Abstract** The continuous cast round bloom of DZ2 high-speed axle steel is remelted by electroslag with argon protective atmosphere and rolled into axle billets. The composition, hydrogen and oxygen content and the number, size and morphology of inclusions in the axle billets are analyzed and detected, and the corresponding results are compared with that in the axle billet rolled directly by continuous cast slab. The results show that after electroslag remelting, the C content of the axle billet is more uniform at longitudinal and transverse direction (0.25%-0.27% C), but average Al and Si content respectively decreased from 0.25% and 0.018% in ingot head to 0.23% and 0.015% in ingot tail, hydrogen and oxygen content respectively increased from  $0.85 \times 10^{-6}$  and  $9 \times 10^{-6}$  in cast bloom to  $1.52 \times 10^{-6}$  and  $10 \times 10^{-6}$  in ESR ingot. The inclusions in the ESR axle billets are mainly small-size spherical calcium aluminate, the size of inclusions above  $10 \mu\text{m}$  is few, and the number density between  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  is  $0.068/\text{mm}^2$  and  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  is  $0.04/\text{mm}^2$ , which indicates that electroslag remelting in protective atmosphere can not only remove large inclusions, but also significantly reduce the number of small-size inclusions in steel.

**Key Words:** Electroslag Remelting; DZ2 High-Speed Axle Steel; Composition; Inclusions; Continuous Casting

高速列车车轴是列车运行的关键承重部件<sup>[1]</sup>, 中国自主研发的 DZ2 高速车轴钢轴坯是采用连铸大断面的连铸坯或模铸大钢锭直接轧制或锻造而成。在生产实践中发现, 大断面的连铸坯或钢锭在其横向和纵向总存在一定的成分偏析, 导致热处理后的车轴的成分和性能差异较大。另外, 轴坯里偶尔有少量的大颗粒脆性夹杂物, 也使得高速车轴在服役期内的运行存在重大安全隐患。

电渣重熔可有效提高钢质的纯净度和成分的均匀性, 当熔滴穿越渣层时发生溶解和同化<sup>[2-3]</sup>, 并在强制冷却的条件下进行可控的定向凝固, 达到提高钢液的纯净度和均匀性的目的<sup>[4-6]</sup>。本试验在氩气

保护气氛下电渣重熔 DZ2 高速车轴钢, 并对其成分、气体含量和夹杂物变化进行了研究。

### 1 试验方法

试验 DZ2 高速车轴钢(表 1)电极坯采用连铸生产的  $\Phi 690 \text{ mm}$  大断面铸坯(记为 CCB), 单支质量约 8.2 t, 电极坯进行表面扒皮处理。设备为 IN-TECO 公司制造具有保护气氛的电渣重熔炉, 结晶器直径为  $\Phi 740 \text{ mm}$ 。电渣渣系为 70%  $\text{CaF}_2$  + 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的基础上, 配加 3%~5%  $\text{MgO}$ , 同时加入 0.5~2 kg 铝粉。电渣重熔钢锭的增氢主要是由渣料中水分的带入<sup>[7]</sup>, 因此, 渣料使用前先在  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘烤 4 h 以去除水分。根据熔速设定电流大小, 同时

通入 Ar 保护气体以排出炉内存在的空气, Ar 气流量  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ , 氧化锆分析仪检测炉内氧气浓度为  $0.010\%$ 。电渣重熔锭脱模后直接吊运到加热炉加热至  $1260 \text{ }^\circ\text{C}$ , 保温  $5 \text{ h}$ , 然后轧制成  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$  的高速车轴坯(记为 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet)。

在 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 的不同部位(对应于电渣锭头部、中部和尾部)切片并分别取样以分析化学成分、夹杂物和气体含量, 取样位置如图 1 所示。为了对比, 将 CCB 也轧制成 CCB-ESR

ingot-Axle Rolling Billet 同规格( $\Phi 40 \text{ mm}$ )的坯(记为 CCB-Axle Rolling Billet)并在不同位置取样分析。采用 ARL4460 真空直读光谱仪对表面磨光的试样进行化学成分分析。氢氧分析试样加工成  $\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  圆棒, 然后采用 RH404 分析仪和 ON836 型仪器分别检测 H、O 含量。夹杂物试样为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 将通过中心且平行于轧制方向的观察面磨平、抛光后, 利用集扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)于一体的 ASPEX 全自动夹杂物分析仪进行检测。

表 1 高速车轴钢 DZ2 化学成分/%  
Table 1 Chemical composition range of DZ2 high-speed axle steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	O
0.24 ~ 0.32	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 0.90	$\leq 0.01$	$\leq 0.01$	0.90 ~ 1.20	0.20 ~ 0.30	0.50 ~ 1.50	$\leq 0.06$	0.01 ~ 0.04	$\leq 0.0015$

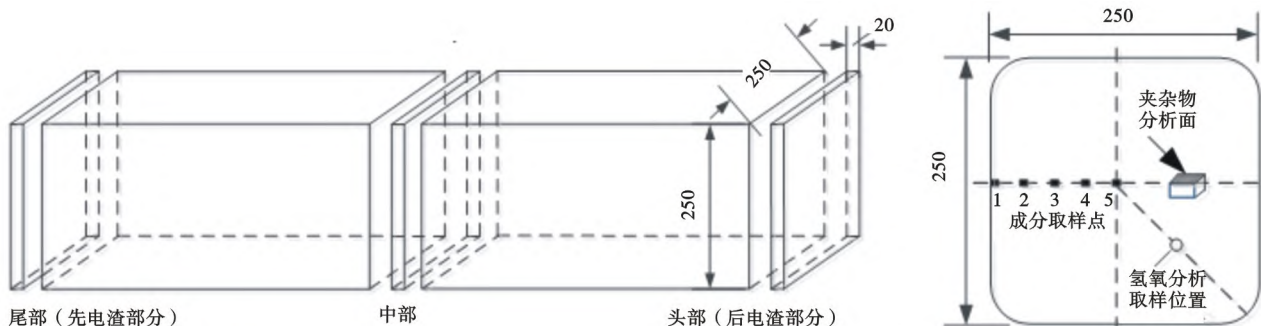


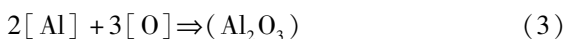
图 1 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location in CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet

## 2 试验结果和讨论

### 2.1 电渣重熔工艺对轴坯纵向成分的影响

CCB、CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 和 CCB-Axle Rolling Billet 的化学成分如表 2 所示。从表 2 中看出, DZ2 钢中的 P、S、Mn、Cr、Ni、Mo、V 在电渣重熔前后几乎没有变化。而 Si、Al 元素由于还原性强在电渣重熔后含量有所下降, 而且下降程度在 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 尾部比头部表现更为严重, 这与电渣重熔过程中钢渣反应有关<sup>[8]</sup>。在电渣重熔开始阶段, 渣中存在一定量的不稳定氧化物发生分解, 使得渣中的氧势增高, 钢液中 Si、Al 发生一定的氧化反应, 从而降低钢中 Si、Al 含量。



基于此, 在渣料中配加  $0.5 \sim 2 \text{ kg}$  的 Al 粉并通入 Ar 气保护, 以达到平衡钢中氧含量、隔绝环境氧

气目的。随着反应的进行, 渣料中的不稳定氧化物消耗减少, 母材中的 Al、Si 不再发生氧化反应, 因此电渣锭头部 Al、Si 元素的下降程度要轻于尾部部分。

### 2.2 电渣重熔工艺对轴坯横向成分的影响

在生产实践中发现, 大断面的连铸坯或钢锭直接轧锻成轴坯, 其同截面成分总会存在一定的偏析, 特别是碳成分, 偏差值一般在  $0.04\%$  左右, 如表 2 中检测结果, CCB-Axle Rolling Billet 同截面上 C 偏差为  $0.03\%$ 。由于碳成分对钢的性能影响较大, 且易形成区域偏析, 故重点分析 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 截面的碳成分。

采用电渣重熔后, CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 同截面的成分相对较为均匀, C 偏差只有  $0.01\%$ 。电渣重熔过程示意在图 2 中。从图 2 可见, 电极坯 CCB 重新熔化形成熔滴, 并穿过渣层形成金属熔池。在熔滴汇入金属熔池后, 会与熔池内的金属混合而二次均匀化, 从而大幅度减轻偏析程度。另外, 由于电渣重熔所用的铜质结晶器为强制

表 2 DZ2 钢 CCB、CCB-Axle Rolling Billet 和 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 化学成分/%

Table 2 Chemical composition of CCB, CCB-Axle Rolling Billet and CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet of DZ2 steel/%

位置	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	V	Mo
CCB-Axle 边部	0.25	0.25	0.72	0.006	0.001	0.021	1.01	1.08	0.043	0.24
1/4 边	0.27	0.26	0.71	0.006	0.001	0.023	1.01	1.08	0.042	0.25
中心	0.28	0.28	0.75	0.007	0.001	0.022	1.02	1.13	0.044	0.26
CCB-ESR 头 1	0.27	0.26	0.70	0.006	0.001	0.019	1.02	1.10	0.05	0.25
头 2	0.26	0.25	0.70	0.005	0.001	0.018	1.02	1.10	0.05	0.25
头 3	0.26	0.25	0.69	0.006	0.001	0.018	1.02	1.09	0.048	0.25
头 4	0.26	0.25	0.69	0.005	0.001	0.017	1.02	1.09	0.047	0.25
头 5	0.27	0.24	0.69	0.006	0.001	0.017	1.02	1.09	0.047	0.25
中 1	0.26	0.25	0.71	0.006	0.001	0.015	1.01	1.10	0.046	0.25
中 2	0.26	0.24	0.71	0.006	0.001	0.016	1.02	1.10	0.046	0.24
中 3	0.26	0.24	0.70	0.006	0.001	0.014	1.03	1.09	0.045	0.24
中 4	0.26	0.24	0.70	0.006	0.001	0.015	1.02	1.09	0.045	0.23
中 5	0.26	0.24	0.70	0.006	0.001	0.014	1.04	1.09	0.046	0.24
尾 1	0.26	0.24	0.72	0.006	0.001	0.016	1.01	1.09	0.056	0.24
尾 2	0.26	0.23	0.72	0.007	0.001	0.015	1.02	1.09	0.047	0.24
尾 3	0.26	0.23	0.72	0.007	0.001	0.015	1.03	1.09	0.045	0.24
尾 4	0.25	0.23	0.72	0.006	0.001	0.013	1.02	1.08	0.046	0.23
尾 5	0.25	0.23	0.71	0.006	0.001	0.014	1.02	1.08	0.045	0.24
CCB	0.27	0.27	0.73	0.006	0.001	0.024	1.02	1.1	0.050	0.25

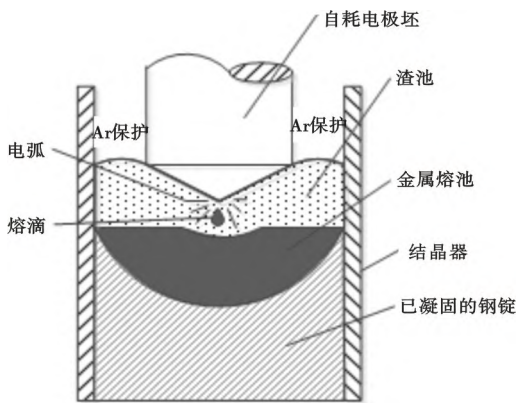


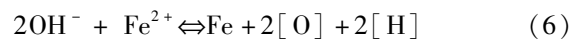
图 2 电渣重熔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electroslag remelting

冷却设备,熔池内的金属可在较短时间内凝固而不易发生选分结晶导致的成分偏析。

### 2.3 电渣重熔过程 H、O 含量变化

钢中气体含量见表 3。电极坯原始 H、O 含量分别为  $0.85 \times 10^{-6}$  和  $9 \times 10^{-6}$ 。电渣重熔后 DZ2 钢中的 H、O 含量均有所增加,而且 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 尾部分的 H、O 含量高于其头部分的。研究表明<sup>[9]</sup>,大气湿度、渣中的水分、电极中的氢含量及炉渣成分对电渣锭中的氢有重要影响。对 DZ2 高速车轴钢进行电渣重熔时,虽然采取了通入 Ar 气保护、烘烤渣料以及对电极坯表面扒皮处理等措施,但仍不可避免有少部分水分随渣料、电极坯、电极坯表面残存氧化层或结晶器等带入,从而在渣-金界面发生如下反应:



在电渣重熔开始阶段,电渣炉内水分含量高,反应式(6)中的 H、O 进入 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 尾部。由于母材中 Al 的存在,可以使反应式(7)发生,从而消耗进入钢液中的 [O]。随着电渣重熔的进行和 Ar 的保护作用,反应体系中水分减少,进入电渣锭中的 H 将逐渐降低,不稳定的氧化物也分解殆尽,所以 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 头部的 H、O 含量低于其尾部的。

### 2.4 钢中夹杂物

表 4 列出了 CCB-Axle Rolling Billet 和 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 三组样夹杂物的平均检测结果。可以看出,两种条件下的夹杂类型基本一样,都含有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ca-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$ 、 $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$ 、TiN 等,但 CCB-Axle Rolling Billet 中主要为  $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$ -

表 3 CCB 和 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 不同部位的氢氧含量及增幅

Table 3 Contents of H and O and corresponding increases in different positions of CCB and CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet

位置	H/ $10^{-6}$	O/ $10^{-6}$	$\Delta\text{H}/\text{H} \times 100$	$\Delta\text{O}/\text{O} \times 100$
ESR 尾	1.65	11	94.12	22.22
中	1.52	10	78.82	11.11
头	1.46	9.5	71.76	5.56
CCB	0.85	9	-	-

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 复合夹杂,而 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 中此类夹杂则较少。CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 所有夹杂物的平均尺寸都小于 6 μm,而 CCB-Axle Rolling Billet 所有夹杂物的平均尺寸大多数都大于 7 μm,说明钢中的大型夹杂物经电渣重熔后能很好地被去除。

对大量夹杂物的尺寸、分布进行统计得出图 3: 在 CCB-Axle Rolling Billet 中,夹杂物尺寸在 1 ~

5 μm 的数密度为 0.14 个/mm<sup>2</sup>,5 ~ 10 μm 的为 0.24 个/mm<sup>2</sup>,10 μm 以上的为 0.11 个/mm<sup>2</sup>;而 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 中,夹杂物尺寸在 10 μm 以上的数密度微乎其微,5 ~ 10 μm 的为 0.068 个/mm<sup>2</sup>,1 ~ 5 μm 的为 0.04 个/mm<sup>2</sup>。可见在保护气氛下电渣重熔不仅可以去除钢中的大型夹杂物,还可以使小尺寸夹杂物的数量显著降低。

表 4 DZ2 钢 CCB-Axle Rolling Billet 和 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 的 ASPEX 检测结果  
Table 4 Test results on CCB-Axle Rolling Billet and CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet of DZ2 steel by ASPEX

夹杂物类型	平均尺寸/μm		最大尺寸/μm		数量/个	
	CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet	CCB-Axle Rolling Billet	CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet	CCB-Axle Rolling Billet	CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet	CCB-Axle Rolling Billet
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.37	5.17	5.73	5.73	5	12
MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.48	7.21	2.48	12.16	1	10
CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.08	10.96	5.08	24.64	1	17
CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO	5.43	7.54	5.43	9.32	1	3
CaS-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.61	10.01	6.6	25.05	2	10
CaS-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO	5.97	7.75	5.97	10.26	1	3
TiN	3.54	4.53	3.54	7.49	1	3

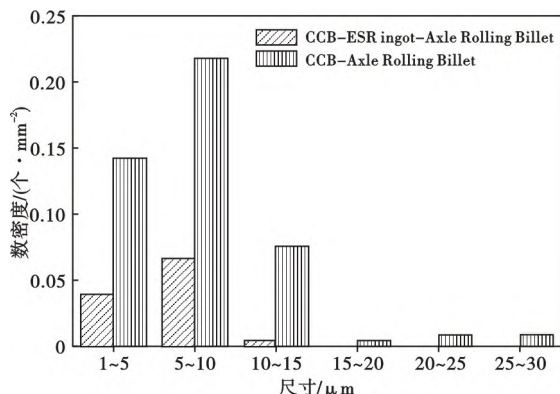


图 3 DZ2 钢 CCB-Axle Rolling Billet 和 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 中夹杂物尺寸分布

Fig. 3 Size distribution of inclusions in CCB-Axle Rolling Billet and CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet of DZ2 steel

图 4(a)球状夹杂中含有棱状夹杂,根据两者的 EDS[图 4(d)和图 4(e)]可知,此复合型夹杂是 (Al, Mg, Si)O-CaS 和镁铝尖晶石 MgO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;图 4(b)中夹杂为长条状,结合图 4(f)的 EDS 和图 5(a)的元素分布可知其为 CaS;图 4(c)中夹杂为纺锤状,从图 4(g)可知其为钙铝酸盐夹杂。图 4 的能谱分析结果与表 4 中的夹杂类型一致,表明 CCB-Axle Rolling Billet 中夹杂形状多样,既存在单独夹杂,又有复合型夹杂。

CCB 和 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 中夹杂物的形状没有 CCB-Axle Rolling Billet 的复杂,CCB 只有球状和棱状两种形貌,而 CCB-ESR ingot-

Axle Rolling Billet 中几乎全为球状夹杂。CCB 的球状夹杂是镁铝尖晶石与硫化钙的复合,其尺寸从 10 μm 到 23 μm 不等,其形成与冶炼用 Ca-Si 线进行处理有关。CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 球状夹杂的元素分布如图 5(b),可见主要是钙铝酸盐 12Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 7CaO,没有 SiO<sub>2</sub>。图 6 是 CCB 中棱状夹杂的形貌和能谱图,据此可知为 TiN。CCB 和 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 中球状夹杂的形貌和 EDS 因与 CCB-Axle Rolling Billet 的类似没在文中列出,其差别在于 CCB 和 CCB-Axle Rolling Billet 夹杂物中镁铝尖晶石的比例较高,而 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 中脆性镁铝尖晶石组分相的比例降低,对提高高速车轴的疲劳强度有益<sup>[10-11]</sup>。

电渣重熔过程中,钢中夹杂物的去除主要有 3 个阶段<sup>[12-14]</sup>:自耗电极端部熔滴的形成阶段、熔滴滴落穿越液渣池的阶段以及汇入熔池与渣界面反应的阶段。在熔滴的形成阶段,熔滴中的镁铝尖晶石夹杂物具有稳定体心立方结构,因熔点高(2 135 °C)<sup>[15]</sup>,仍然以固态存在。在熔滴穿过液渣池阶段,镁铝尖晶石在钢液中的表面张力 1.425 N/m,与钢液接触角 134.1°,很容易被液渣吸附,从而去除电极坯中大尺寸的镁铝尖晶石夹杂物。能谱分析来看,电渣重熔后的夹杂物数量更少、近球化尺寸更小,且复合夹杂物中镁铝尖晶石脆性相比比例少。根据研究<sup>[16]</sup>,电渣重熔后电极坯中原始夹杂物(钙

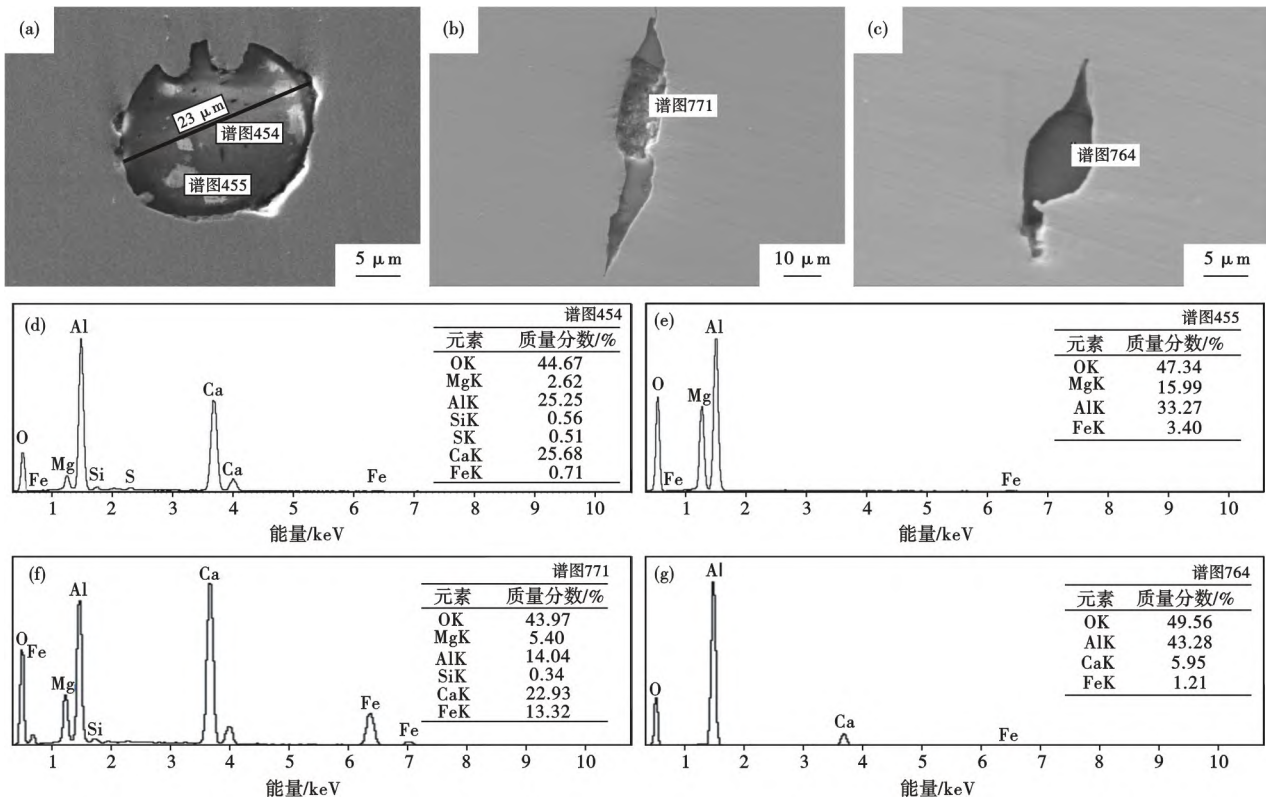


图 4 DZ2 钢 CCB-Axle Rolling Billet 中夹杂物形貌及能谱: (a) 球状和棱状夹杂物; (b) 长条状夹杂物; (c) 纺锤状夹杂物; (d) 图(a)中球状夹杂物的能谱; (e) 图(a)中棱状夹杂物的能谱; (f) 图(b)中长条状夹杂物的能谱; (g) 图(c)中纺锤状夹杂物的能谱

Fig. 4 Inclusions in CCB-Axle Rolling Billet and corresponding energy spectrum of DZ2 steel: (a) Spherical and prismatic inclusions; (b) lath-shape inclusions; (c) Spindle inclusions; (d) EDS of spherical inclusions in Fig. 4a; (e) EDS of prismatic inclusions in Fig. 4a; (f) EDS of lath-shape inclusions in Fig. 4b; (g) EDS of spindle inclusions in Fig. 4c

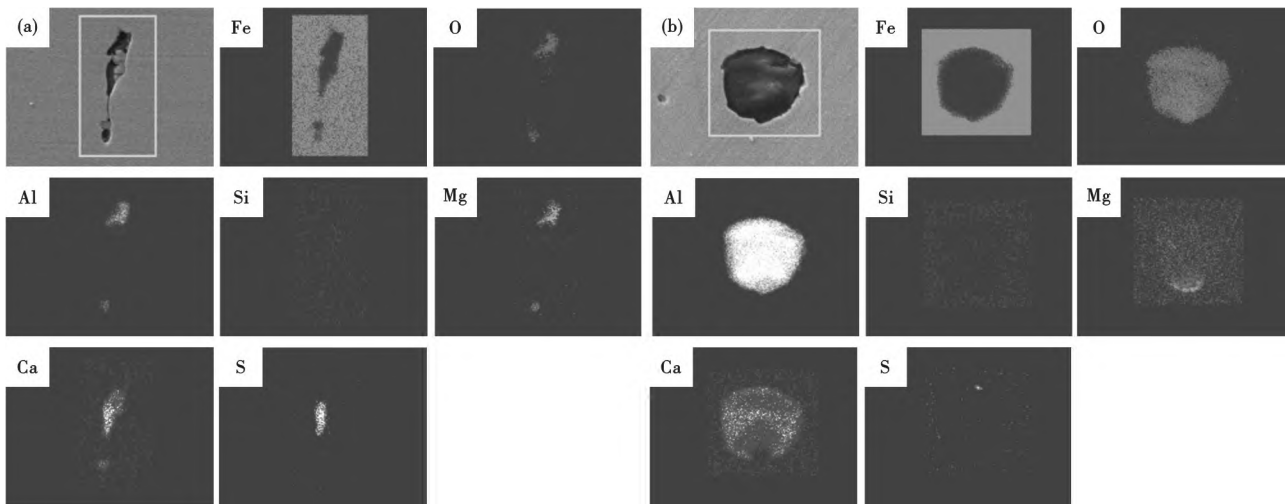
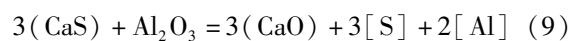


图 5 DZ2 钢 (a) CCB-Axle Rolling Billet; (b) CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 轴坯中夹杂物元素分布  
Fig. 5 Elements distribution in DZ2 steel: (a) CCB-Axle Rolling Billet; (b) CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet

铝酸盐、氮化钛等)可基本吸附或溶解,重熔钢中夹杂主要是金属熔池在结晶冷却过程中重新生成。

电渣重熔过程中夹杂物的生成分析如下:在电渣重熔时,复合夹杂物外层的 CaS 可以通过反应

(8)或(9)去除:



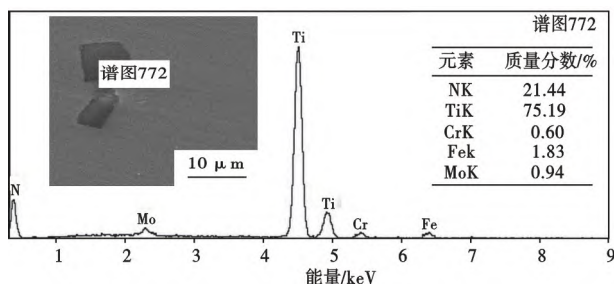


图 6 DZ2 钢 CCB 中的棱角状夹杂物及能谱

Fig. 6 Prismatic inclusions and corresponding energy spectrum in CCB of DZ2 steel

生成的 Ca、S 部分进入熔池中,在金属冷却过程中钢中 S 与 Ca 又生成 CaS,进入熔池后可与  $Al_2O_3$  夹杂物碰撞生成复合夹杂。钢中  $CaO-Al_2O_3$  夹杂主要是渣-金界面的 CaO 与  $Al_2O_3$  反应生成,在结晶冷却过程中未及上浮而留在钢中,并与钢中低熔点的 CaS 复合。熔池中在有 Al 存在的条件下,Al 优先与钢液中溶解的氧发生,生成  $Al_2O_3$ ,因此在 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 钢中的夹杂物没有硅酸盐类夹杂。

在电渣条件下,反应式(10)的  $\Delta G^0 > 0$  [11],说明夹杂物中的 MgO 不能被 Al 还原,电渣钢中的 MgO 不可能是钢中 Mg 与溶解 O 反应的产物。重熔钢中的  $MgO-Al_2O_3$  夹杂可能是熔滴中未被熔渣吸附的小尺寸夹杂物的残存,也可能是金-渣表面钢液中的  $Al_2O_3$  与渣中 MgO 反应生成的  $MgO-Al_2O_3$  在钢液凝固时被捕获。

### 参考文献

- [1] 潘涛,朱静,刘淑华,等. 高速列车车轴综合性能试验分析[J]. 中国铁道科学,2014,35(1):72-77.
- [2] 姜周华. 电渣渣金的物理化学及传输现象[M]. 沈阳:东北大学出版社,2000:1-14.
- [3] Dong Y W, Jiang Z H, Cao Y L, et al. Effect of Slag on Inclusions During Electroslag Remelting Process of Die Steel[J]. Metall Mater TransB,2014,45(4):1315-1324.
- [4] Shi C B. Deoxidation of Electroslag Remelting (ESR)-a Review[J]. ISIJ Int,2020,60(6):1083-1096.
- [5] Li S J, Cheng G G, Miao Z Q, et al. Evolution of Oxide Inclusions in G20CrNi2Mo Carburized Bearing Steel During Industrial Electroslag Remelting[J]. ISIJ Int,2018,58(10):1781-1790.
- [6] 陈希春,史成斌,王飞,等. 气体保护电渣重熔过程中电渣锭的洁净化控制[J]. 材料与冶金学报,2013,12(1):27-32.
- [7] 耿鑫,姜周华,刘福斌. 电渣重熔过程中氢含量的控制[J]. 钢铁,2018,43(10):38-41.
- [8] 赵海东,陈列,严清忠,等. 电渣重熔对 GCr15 轴承钢化学成分和夹杂物特性的影响[J]. 特殊钢,2016,37(4):44-47.
- [9] 常立忠,李正邦. 电渣重熔过程中氢行为的分析及控制[J]. 钢铁研究,2007,3(3):24-26.
- [10] 王习术,梁锋,曾燕屏,等. 夹杂物对超高强度钢低周疲劳裂纹萌生及扩展影响的原位观测[J]. 金属学报,2005,41(12):1272-1276.
- [11] 刘伟建,史成斌,徐昊驰,等. 气氛保护电渣重熔过程中氧化物-CaS 复合夹杂物的演变[J]. 工程科学学报,2020,42(1):109-118.
- [12] 董艳伍,陈浩禹,李想,吴镇湘. 电渣重熔过程中熔滴滴落的影响因素[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(11):1564-1568.
- [13] Shi C B, Zhang J X, Zheng X, et al. Review on Desulfurization in Electroslag Remelting (ESR)[J]. Int J Miner Metall Mater,2021,28(1):18-29.
- [14] Liu Y, Zhang Z, Li G, et al. Evolution of Desulfurization and Characterization of Inclusions in Dual alloy Ingot Processed by Electroslag Remelting[J]. Steel Res Int,2017,88(11):1700058.
- [15] 张立峰. 钢中非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,2019:18-206.
- [16] 周德光,陈希春,傅杰,等. 电渣重熔与连铸轴承钢中的夹杂物[J]. 北京科技大学学报,2000,22(1):26-29.



$$\Delta G^0 = -537391 + 468.4T \text{ (J. mol}^{-1}\text{)}$$

分析 CCB-ESR ingot-Axle Rolling Billet 钢中 N 含量为  $51 \times 10^{-6}$ , Ti 含量为 0.003 2%。

### 3 结论

(1) 电渣重熔后,在轧制轴坯纵向,P、S、Mn、Cr、Ni、Mo、V 元素的含量基本无变化,但 Al、Si 在锭尾部分比在锭头部烧损严重;在轧制轴坯横向,成分相对较为均匀,C 含量偏差 0.01%,低于非电渣重熔坯的 0.03%。

(2) 电渣重熔后 DZ2 钢中有一定幅度的增氢增氧,且锭尾的氢氧增量较锭头大。

(3) DZ2 钢中原有的大尺寸球状镁铝尖晶石与硫化钙的复合夹杂物和棱状 TiN 的夹杂物通过电渣重熔被去除。电渣重熔钢中主要是尺寸小、塑性较好、球状的钙铝酸盐夹杂,并且电渣重熔钢中复合夹杂中脆性镁铝尖晶石组分相的比例降低。

(4) 在非电渣重熔轴坯中,夹杂物平均尺寸  $\geq 7 \mu\text{m}$ ; 尺寸在  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  的数密度为 0.14 个/ $\text{mm}^2$ ,  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  的为 0.24 个/ $\text{mm}^2$ ,  $10 \mu\text{m}$  以上的为 0.11 个/ $\text{mm}^2$ ; 而电渣重熔轴坯中,夹杂物平均尺寸  $\leq 6 \mu\text{m}$ ; 尺寸在  $10 \mu\text{m}$  以上的数密度微乎其微, $5 \sim 10 \mu\text{m}$  的为 0.068 个/ $\text{mm}^2$ ,  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  的为 0.04 个/ $\text{mm}^2$ 。