

超低碳钢 AISI 1006 铸坯夹杂物的分布及工艺改进

李润,印传磊,翟万里,张洪才,林鹏,许正周

(江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司技术中心,淮安 223002)

摘要:为研究 90 t BOF-RH-LF-CC 流程生产的超低碳钢 AISI1006 夹杂物控制情况,通过对 200 mm × 200 mm 铸坯横断面不同位置夹杂物进行统计分析,结果表明:钢中小颗粒夹杂物比较大,尺寸 5 ~ 10 μm 的夹杂物占比达到 91.0%, 10 ~ 13 μm 的占比 3.6%, 13 μm 以上占比 5.4%。尺寸较大夹杂主要分布于铸坯中心。在铸坯 1/4 边长处夹杂物分布最多,其次是近中心处,铸坯近表面处夹杂物最少。铸坯内夹杂物主要为 Al₂O₃、Al₂O₃ · CaO · (CaS · MnS)、Al₂O₃ · CaO · MgO · (CaS · MnS)、MgO · Al₂O₃ · (CaS · MnS) 复合夹杂物,为内生夹杂物。开展工艺优化改进, RH 高真空保持时间控制在 15 min 以上, LF 精炼做好脱氧渣及脱硫,精炼时间控制在 90 min 以内,精炼终渣碱度在 6 ~ 7,出站前喂入硅钙线进行变性处理,软吹时间控制在 25 min 以上,连铸做好保护浇注,中间包开大氩气流量吹扫 10 min 以上,避免二次氧化,将夹杂物往钙铝酸盐方向控制,工艺优化后,钢水 T. O 含量 ≤ 20 × 10⁻⁶, B、D、Ds 夹杂级别 ≤ 1.0。

关键词:超低碳钢 AISI 1006; 200 mm × 200 mm 铸坯; 夹杂物数量; 成分; 工艺改进

Distribution and Improvement Process of AISI 1006 Casting Bloom Inclusion of Ultra-Low Carbon Steel

Li Run, Yin Chuanlei, Zhai Wanli, Zhang Hongcai, Lin Peng, Xu Zhengzhou

(Technology Center, Huaigang Special Steel Co., Ltd., Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002)

Abstract: In order to study the control of 90 t BOF-RH-LF-CC flowsheet produced ultra-low carbon steel AISI 1006 inclusions, the sample was taken at different sampling point at cross section of 200 mm × 200 mm cast bloom to analyze inclusions, the analysis results show that the ratio of inclusions of small particles in the steel are relatively large, and the inclusions with size of 5-10 μm accounted for 90.1%, 3.6% of the 10-13 μm, and 5.4% above 13 μm, and the larger size inclusions are mainly distributed in the center of the casting bloom. The largest distribution of inclusions is at the length of side 1/4 of the cast billet, followed by the near center, and the least inclusions near the surface of the cast bloom. The inclusions in the casting bloom are mainly Al₂O₃, Al₂O₃ · CaO · (CaS · MnS), Al₂O₃ · CaO · MgO · (CaS · MnS), MgO · Al₂O₃ · (CaS · MnS) composite inclusions, which are endogenous inclusions. The process optimization is carried out, RH high vacuum holding time is controlled for more than 15 minutes, Deoxygenation slagging and desulfurization be controlled well during LF refining, the refining time is controlled for within 90 minutes, the alkalinity of the refining final slag is 6 to 7, the silicon calcium line is fed before leaving the station for modification treatment, the soft blowing time is controlled for more than 25 minutes, the continuous casting is well protected, the tundish large argon flow is purged for more than 10 minutes to avoid the secondary oxidation, the inclusions are controlled in the direction of calcium aluminate, and the T. O content of molten steel is reduced, after process optimization, T. O content of molten steel ≤ 20 × 10⁻⁶, rate of B, D, Ds inclusion ≤ 1.0.

Key Words: Ultra-Low Carbon Steel AISI 1006; 200 mm × 200 mm Cast Billet; Number of Inclusions; Component; Process Improvements

随着我国汽车产业的快速发展,对车载发电机的要求越来越高,车载发电机爪极是发电机的重要部件,电机爪极用钢的高饱和磁感应强度、高磁导率、低矫顽力等磁性能直接影响发电量^[1],钢中的夹杂物是影响磁性能的主要因素之一^[1-2]。关于爪极的锻造工艺、爪极的设计、爪极的热处理、爪极用钢的生产等相关研究较多,关于爪极材料尤其是洁净度方面的研究很少^[3-5]。关于钢的洁净度方面的控制,朱苗勇等^[6-8]学者研究指出连铸浇注过程夹杂

物易向铸坯内弧侧聚集,为此,本文对钢厂生产的 AISI1006 电机爪极用钢在铸坯横截面不同位置夹杂物成分、数量及夹杂物沿连铸坯厚度方向分布规律进行了深入的分析,为电机爪极用钢连铸生产中铸坯的洁净度控制提供依据。

1 生产工艺

AISI1006 为低碳低硅钢,采用“90 t 转炉吹炼→RH 真空处理→LF 精炼→200 mm × 200 mm 方坯连

表 1 AISI1006 钢的化学成分/%

C	Si	Mn	P	S	Al	O
0.020 ~ 0.050	≤ 0.070	0.28 ~ 0.43	≤ 0.025	≤ 0.010	0.008 ~ 0.030	≤ 0.005 0

铸”生产工艺流程,钢的主要成分见表 1 所示。

AISI1006 钢在生产时,转炉采用高铁水比吹炼保证充足热源,实现吹炼终点钢液温度达到 1 660 ℃ 以上,终点[C] < 0.06%。出钢过程使用预熔型精炼渣造渣,硅铁粉进行渣面脱氧。

钢液吊包至 RH 炉,在前期轻处理模式下进行脱氧,后期加入铝粒在本处理模式下进行深脱氧及合金化^[9]。钢液处理结束,破空吊包至 LF 精炼。钢液 LF 进站后送电升温、脱氧,补加石灰脱硫,精炼结束后软吹 10 ~ 20 min 后吊包到连铸浇铸。

连铸浇铸时采用弧形半径为 11 m 连铸机,连铸过程使用氩封长水口和内装浸入式水口保护浇注,避免二次氧化。钢液连铸浇铸过程采用结晶器电磁搅拌,浇铸全程过热度在 25 ~ 35 ℃,结晶器采用超低碳钢保护渣,连铸浇铸过程工艺参数见表 2。

在原工艺条件下生产的 AISI1006 钢,轧材 T. O 含量在 $30 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$,B 类氧化物夹杂 2.0 级,D 类夹杂物在 2.5 ~ 3.0 级。使用该钢加工制备的电机爪极磁性能较差,电极在冷、热态下输出电流均不能满足用户要求,且不同批次的原材料磁性能差别也较大。电极爪极发电机在不同转速下的冷、

表 2 AISI 1006 钢的连铸工艺参数

Table 2 Continuous casting process parameters of Steel AISI1006

结晶器电 磁搅拌	结晶器水量/ (L · min ⁻¹)	二冷比水量/ (L · kg ⁻¹)	拉速/ (m · min ⁻¹)
320A/5.0Hz	1 800 ~ 2 200	0.44	1.3

表 3 发电机 1 500 ~ 6 000 r/min 转速下的冷、热态输出电流/A

Table 3 Generator outputs current in a cold and hot state at 1 500-6 000 r/min speeds/A

电机转速/r/min	输出电流/A			
	用户要求		钢厂	
	冷态	热态	冷态	热态
1 500	19	15	11	8
1 800	62	48	50	40
2 000	82	64	71	56
2 500	110	89	102	83
3 000	125	102	116	97
3 500	132	109	123	104
4 000	136	113	127	108
5 000	140	118	132	113
6 000	143	120	135	116

热态输出电流见表 3。通过爪极材料的对比分析,钢中氧化物夹杂较多是影响磁性能差及波动大的主要因素之一。为了解目前该钢中夹杂物的控制情况及对后续的工艺改进提供依据,对铸坯进行取样分析夹杂物。

钢中夹杂物主要是钢在冶炼过程中脱氧反应产生的氧化物和硅酸盐类内生夹杂,冶炼和浇铸过程由炉渣卷入、耐材侵蚀脱落进入钢中来不及上浮去除产生的外来夹杂物。按化学成分夹杂物分为硫化物、氧化物及氮化物等,夹杂物的存在导致钢基体的均匀性、连续性发生中断,其本身是非磁性或者弱磁性物质,使磁滞损耗增大、磁性能恶化。文献[10]中详细阐述了夹杂物影响钢材磁性能的机理。

2 铸坯夹杂物分析与讨论

2.1 试样取样和分析方法

钢液在浇注过程的流动、热传递、拉速大小及凝固过程对铸坯夹杂物都产生影响^[11]。为探究超低碳钢 AISI1006 的夹杂物控制情况及铸坯中夹杂物分布,取铸坯断面试样,断面尺寸为 200 mm × 200 mm,由内弧表面至外弧表面连续取样,试样尺寸为 20 mm × 30 mm,试样编号为 1 ~ 10,取样点如图 1。使用蔡司 EVO18 扫描电镜对所取试样非金属夹杂物数量、尺寸、形貌、成分进行 SEM-EDS 自动扫描分析,统计,样品自动扫描面积设定为 10 mm × 20 mm,夹杂物尺寸 ≥ 5 μm。

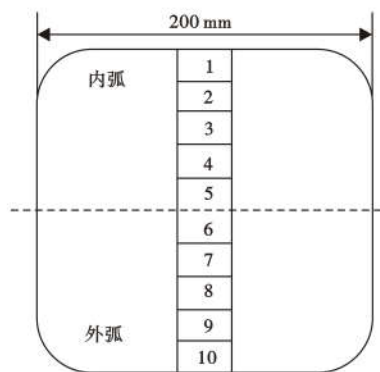


图 1 铸坯断面夹杂试样取样点

Fig. 1 Sampling point of inclusion samples at cross section of cast bloom

2.2 夹杂物数量、尺寸

对铸坯的 10 个试样进行夹杂自动扫描统计,样品实际扫描面积为 229 mm²,铸坯中主要以小颗粒的夹杂物为主,典型夹杂物形貌特征如图 2 所示。铸坯断面不同位置处各尺寸夹杂物数量、尺寸分布

如图3所示。从分析统计结果看,铸坯5 μm 以上夹杂物数量达到 0.430 个/mm²,而内弧侧达到 0.465 个/mm²,比外弧侧多 0.069 个/mm²,在距内弧表面 1/4 边长附近(试样3和4)夹杂物数量分布最多共 308 个,其次是距外弧表面 1/4 边长处共 244 个,近中心附近夹杂物数量次之,而在铸坯近表面处夹杂物数量最少,在铸坯内弧至外弧夹杂物数量呈“M”型分布,这一结果与相关研究相符^[6]。从夹杂物尺寸(夹杂物等效粒径 ECD,下同)情况看,夹杂物主要为 10 μm 以内,占比达 91.0%,10 ~ 13 μm 夹杂物占比 3.6%,13 μm 以上夹杂物占比 5.4%。

从铸坯每个位置夹杂物粒径分布看,夹杂物平均粒径呈“W”型分布,与夹杂物数量分布相反。虽然距表面 1/4 边长处夹杂物数量最多,但夹杂物粒径最小,而中心处夹杂物粒径最大(平均 ECD =

8.41 μm)。同样,铸坯内弧侧夹杂物尺寸比外弧侧大,内弧侧夹杂物平均 ECD = 6.84 μm,外弧侧夹杂物平均 ECD = 6.81 μm。

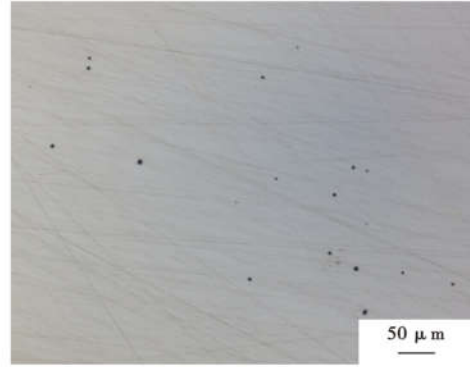


图2 铸坯中典型夹杂物形貌
Fig.2 Typical inclusion morphology in casting bloom

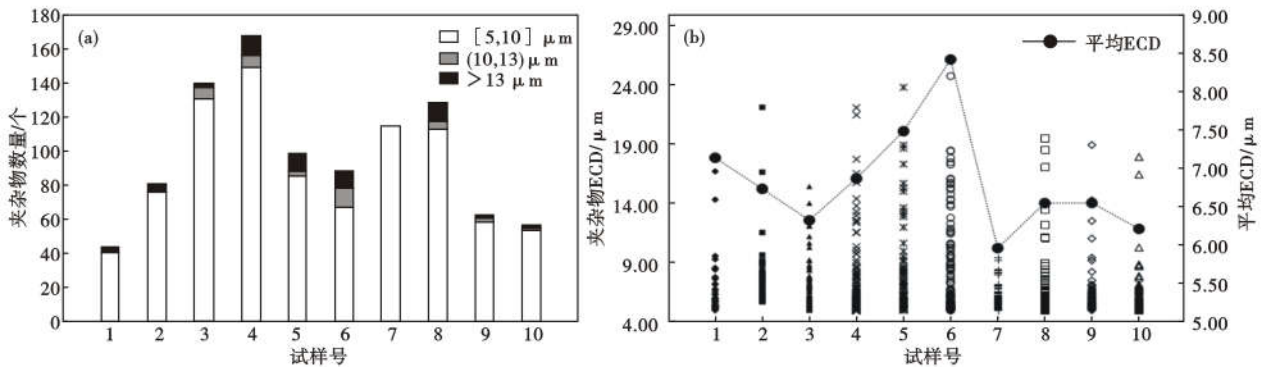


图3 铸坯夹杂物数量(a)、尺寸(b)分布
Fig.3 Distribution of number (a) and size (b) of inclusions in casting bloom

2.3 夹杂物成分

铸坯不同位置处夹杂物中 CaO、Al₂O₃、MgO、CaS、MnS 各成分含量分布情况如图4所示。铸坯内夹杂物主要为 Al₂O₃、Al₂O₃ · CaO · (CaS · MnS)、Al₂O₃ · CaO · MgO · (CaS · MnS)、MgO · Al₂O₃ · (CaS · MnS) 复合夹杂物,为内生夹杂物。CaO 平均含量在 14.0% ~ 23.3%,在铸坯内、外弧表面成分含量最高,其次是铸坯中心,而在距内弧表面 1/4 边长附近夹杂物中 CaO 含量最低。Al₂O₃ 平均含量在 56.8% ~ 65.0%,其在铸坯表面夹杂物中含量最低,其他位置处平均含量均在 60% 以上。MgO 平均含量在 8.9% ~ 11.0%,在铸坯各位置处含量相当。CaS 平均含量在 5.6% ~ 9.3%,在距铸坯内弧表面 1/4 边长附近夹杂物中 CaS 含量较高,在铸坯内弧表面和中心含量最低。在各试样均未发现纯硫化物夹杂,主要是该钢硫含量控制较低,另外

在精炼结束后喂大量纯钙线进行变性处理,同时生成 CaS 以附着于氧化物表面的形式存在^[12]。

各试样夹杂物在 Al₂O₃ · MgO · CaO 三元相图中的分布,如图5所示。从夹杂物相图分布看,铸坯

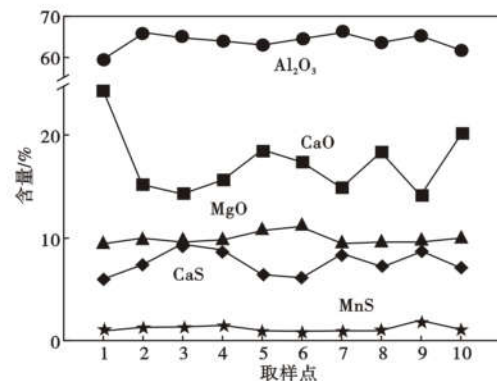


图4 各取样点试样的夹杂物成分含量
Fig.4 Mass fraction of component of inclusions in sample at each sampling point

不同位置 < 10 μm 的夹杂物基本相同, 均为高熔点的 Al₂O₃ · CaO · MgO 复合夹杂, (Al₂O₃) = 60% ~ 70%、(CaO) = 15% ~ 28%、(MgO) = 6% ~ 12%。而大颗粒夹杂物则有三类, 一是在铸坯边部主要为低熔点的 Al₂O₃ · CaO · MgO 复合夹杂, (Al₂O₃) =

45% ~ 60%、(CaO) = 35% ~ 55%、(MgO) = 4% ~ 8%; 二是在铸坯 1/4 处的大颗粒夹杂物和小颗粒夹杂物成分类似, 为高熔点夹杂物; 三是铸坯中心处大颗粒夹杂物则多为纯 Al₂O₃ 夹杂物, 从统计结果看纯 Al₂O₃ 夹杂物占比达到 7.8%。

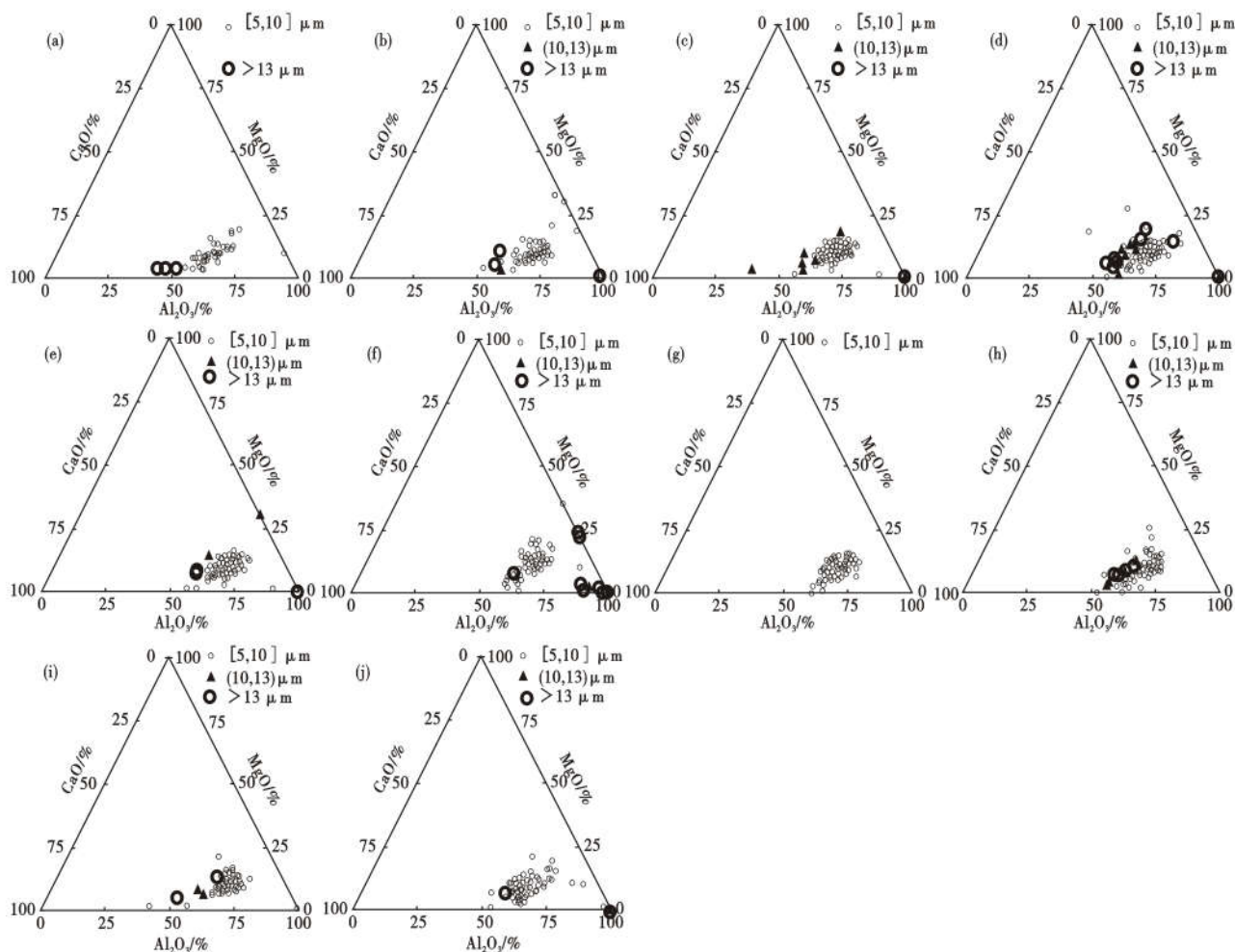


图 5 铸坯取样位置 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e), 6 (f), 7 (g), 8 (h), 9 (i) 和 10 (j) 试样中夹杂物尺寸和成分分布
Fig. 5 Distribution of size and composition of inclusions in sample at cast bloom sampling position 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e), 6 (f), 7 (g), 8 (h), 9 (i) and 10 (j)

2.4 典型夹杂物形貌特征

铸坯中典型夹杂物形貌特征和能谱分析如图 6。铸坯中的夹杂物形貌特征主要可分为: (1) 类, CaO · Al₂O₃ · MgO · CaS 类复合夹杂, 为该钢种的主要夹杂物类型。其主要存在两种形态, 如图 6(a) 所示以 CaO · Al₂O₃ · MgO 为核心, 外侧包裹 CaS; 另一种是以 Al₂O₃ · MgO 为核心和 CaO-Al₂O₃ 黏结, 最外侧包裹 CaS, 如图 6(b)。 (2) 类, 镁铝尖晶石, 成分为 80% 左右的 Al₂O₃ 和 20% 左右 MgO, 在铸坯中呈块状, 如图 6(c)。 (3) 类, 钙铝酸盐, 成分为 40% CaO、54% Al₂O₃, 如图 6(d)。 (4) 类, 纯

Al₂O₃ 夹杂, 在铸坯中呈片状、块状、长条状等, 尺寸均较大, 如图 6(e), 扫描过程未发现簇状 Al₂O₃ 分布, 都是单独存在。

3 工艺优化改进

通过对铸坯夹杂物进行分析统计发现, 在现有工艺下该钢种的夹杂物数量较多, 洁净度较差, 对材料的磁性能影响较大, 特别是在铸坯中发现了较多的尖角类纯 Al₂O₃ 夹杂物, 其熔点高、尺寸大, 为硬质颗粒, 与钢基体粘合差, 轧制时严重破坏机体的连续性, 并且在钢水浇铸过程中易在水口结瘤, 之后

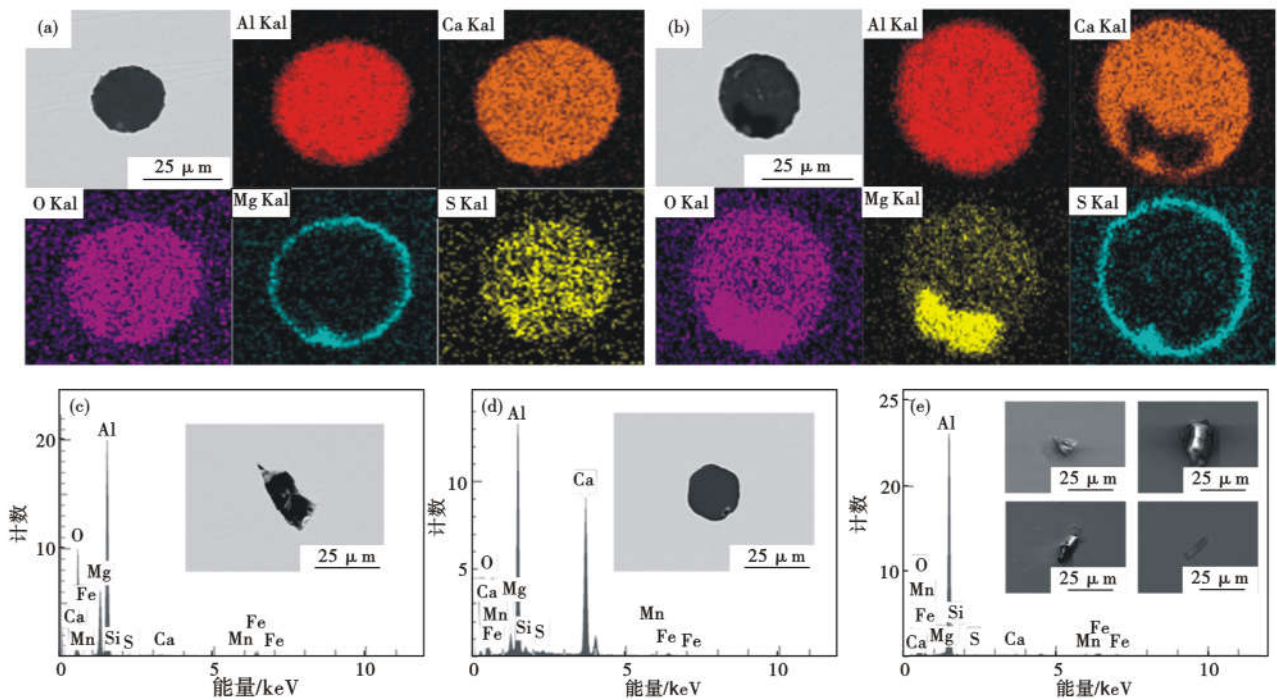


图 6 典型夹杂物形貌特征:(a)核心 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 外侧包覆 CaS , (b)核心 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO-CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 外侧包覆 CaS , (c) 镁铝尖晶石, (d) 钙铝酸盐, (e) Al_2O_3

Fig. 6 Typical inclusion morphological characteristics: (a) core $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$ outer covered by CaS , (b) core $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO-CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ outer covered by CaS , (c) magnesium-aluminum spinel, (d) calcium aluminate, (e) Al_2O_3

生产中应避免此类夹杂物的生成,使夹杂物向着低熔点、且易上浮去除的 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 复合夹杂物进行控制。为提高钢水洁净度,生产工艺需要从多方面考虑。

冶炼用铁水采用 KR 铁水脱硫,转炉出钢 C 控制在 0.04% ~ 0.06%,出钢过程使用预熔型精炼渣造渣,用量在 4 kg/t_钢 左右,出钢结束加入硅铁粉做好渣面脱氧。之后将钢水吊运至 RH 工位。钢水在 RH 轻处理模式下完成脱氧、脱碳,时间控制在 10 min 左右,之后提高真空度至 100 Pa 以下,由真空料仓加入铝粒增 Al,控制破空 Al 达到 0.040% 左右,高真空度下的保持时间由原工艺 10 min 提高至 15 min 以上,利用 RH 强有力去除夹杂物的特性来提高钢水纯净度。RH 破空后立即吊包至 LF 精炼。

LF 精炼钢水进站后加入 5 kg/t_钢 左右的石灰造渣及脱硫,使用铝粒、电石及硅铁粉做好渣面脱氧。冶炼过程做好渣况调整,保证渣的良好流动性,使夹杂物能很好的上浮去除,炉渣终点二元碱度控制在 6 ~ 7,终渣成分见表 4。精炼过程控制好各阶段的搅拌强度并做好渣面脱氧,精炼中前期在高强度搅拌下完成脱硫及成分调整,精炼后期控制在弱搅拌,避免卷渣及钢水二次氧化。精炼结束调整好软吹搅拌,并保证软吹时间在 25 min 以上,使得夹杂物能

充分的上浮去除,LF 精炼时间控制在 90 min 以内。

表 4 优化工艺后精炼终渣成分/%

Table 4 Final refining slag composition after process optimization/%

CaO	MgO	SiO ₂	TFe	Al ₂ O ₃	TiO ₂	S	P ₂ O ₅	MnO	R2
52.89	6.73	8.42	0.24	30.67	0.17	0.44	0.026	0.41	6.28

鉴于在铸坯中发现较多的 Al_2O_3 夹杂物,其尺寸大、硬度高,严重破坏钢基体的连续性,究其原因这是由于二次氧化及变性处理不到位。原工艺变性处理使用纯钙线,由于其钙含量较高,喂入钢水后局部富钙,导致钢水出现较大喷溅,从而使钢水出现严重二次氧化,产生较多 Al_2O_3 夹杂物。工艺优化采用硅钙线代替纯钙线,中间包第一炉用量控制为 3 m/t_钢,连浇炉用量为 2 m/t_钢,使钢水中及中间包氧化产生的 Al_2O_3 夹杂物得以充分变性,使夹杂物向低熔点钙铝酸盐夹杂物转变。连铸浇注前使用大流量氩气对中间包进行吹扫,吹扫时间控制在 10 min 以上,中间包使用无碳覆盖剂,采用长水口吹氩保护浇注,从而避免钢水二次氧化。

对优化工艺后生产的铸坯夹杂物按之前的检验方法进行分析。铸坯中 5 μm 以上的夹杂物数量为 0.128 个/mm²,比原工艺减少 0.303 个/mm²。

10 μm 以内夹杂物占比 91.4%、10 ~ 13 μm 夹杂物占比 5.5%、13 μm 以上夹杂物占比 3.1%，大尺寸夹杂物数量也有所降低。夹杂物类型主要是 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 复合夹杂物，各类成分的含量与原工艺接近，仍是小颗粒的高熔点复合夹杂居多。优化后铸坯中仅在中心位置发现少量纯 Al_2O_3 夹杂物，占

比仅为夹杂物总量的 3.1%，较原工艺降低 4.7%。

取轧材试样分析钢中气体及对夹杂物进行评级，其结果见表 5。钢材 T. O 控制在 20×10^{-6} 以内，夹杂评级 B 类夹杂物和 D 类夹杂物均在 1.0 级以内，控制较好。材料经用户使用，发电机输出电流也均符合要求，未出现质量异议，效果良好。

表 5 优化工艺后钢材夹杂物评级及气体含量
Table 5 Steel inclusion rating and gas content in products after process optimization

炉次	夹杂物级别/级									钢中气体/($\times 10^{-6}$)	
	A _粗	A _细	B _粗	B _细	C _粗	C _细	D _粗	D _细	D _s	T. O	N
1	0.5	0.5	0/0.5	0	0	0	0.5/1.0	0.5/1.0	0/0.5	17	36
2	0/0.5/1.0	0.5/1.0	0/0.5/1.0	0	0	0	0.5/1.0	0.5/1.0	0/0.5	15	36
3	0/0.5/1.0	0.5/1.0	0/0.5	0	0	0	0.5/1.0	1.0	0.5	16	33
4	0.5/1.0	0.5/1.0	0.5/1.0	0	0	0	0.5/1.0	1.0	0.5/1.0	18	35

4 结论

(1) 在原生产工艺下超低碳钢铸坯中氧化物类夹杂数量较多，纯净度较差，5 μm 以上夹杂物数量达到 0.430 个/ mm^2 。铸坯中内弧至外弧表面夹杂数量大致呈“M”型分布，夹杂物平均粒径呈“W”型分布。夹杂物类型主要是 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 复合夹杂物和纯 Al_2O_3 夹杂物。

(2) 尺寸小于 10 μm 的小颗粒夹杂物基本为高熔点 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$ 复合夹杂。而大尺寸夹杂物在铸坯边部为低熔点夹杂物，距铸坯表面 1/4 边长处为高熔点夹杂，铸坯中心大多为纯 Al_2O_3 夹杂物。 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaS}$ 类复合夹杂形貌是以 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 为核心与 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 黏结或以 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 为核心，外侧包裹 CaS 。纯 Al_2O_3 夹杂物呈片状、条状等形态，在铸坯中均单独存在。

(3) 通过对铸坯夹杂物分析，对冶炼工艺进行

工艺优化试验。RH 工序延长高真空保持时间至 15 min 以上；LF 精炼工序控制合理搅拌强度，精炼过程做好脱氧造渣，终渣碱度控制在 6 ~ 7，精炼结束喂入硅钙线进行变性处理，使夹杂物变性更加充分，软吹时间在 25 min 以上使夹杂物充分上浮去除。

(4) 工艺优化后铸坯夹杂物数量降低至 0.128 个/ mm^2 ，13 μm 以上大尺寸夹杂物数量也有所降低。仅在铸坯中心发现少量纯 Al_2O_3 夹杂物占比仅为夹杂物总量的 3.1%，较原工艺减少一半以上。夹杂类型和原工艺相差不大，小尺寸的高熔点夹杂占比仍最大。钢材检验 T. O 含量在 20×10^{-6} 以内，夹杂物评级 B 类、D 类、D_s 均在 1.0 级以内，控制较好。用户使用该材料制造的电机输出电流均满足需求。

参考文献

- [1] 陈正阳. 成分与组织对爪极用钢磁性能影响的研究[D]. 沈阳: 辽宁工业大学材料科学与工程学院, 2015.
- [2] 包石磊, 张洪才, 吴朝兵. 转炉冶炼低碳低硅 AISI1006 钢实践[J]. 现代冶金, 2014, 42(3): 15-18.
- [3] 杨程, 赵升吨, 章建军. 汽车发电机爪极闭式热锻一步成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2011, 36(3): 14-18.
- [4] 滕来, 王飞, 郭成, 等. 汽车发电机爪极温冷精密成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2012, 37(5): 166-170.
- [5] 张庆国, 白连臣, 石玉良, 等. 转炉冶炼低碳低硅钢的生产实践[J]. 炼钢, 2000, 16(5): 24-27.
- [6] 朱苗勇. 现代冶金工艺学——钢铁冶金卷[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 332-333.
- [7] 高帅, 王敏, 郭建龙, 等. IF 钢铸坯厚度方向夹杂物分布及洁净度评估[J]. 工程科学学报, 2020, 42(2): 194-202.
- [8] 周萌, 姜敏, 苑鹏, 等. 超低碳钢连铸坯厚度方向大尺寸夹杂物分布特征[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(4): 62-67.
- [9] 印传磊. 一种电机爪极用 AISI1006 钢的生产方法[P]. 中国专利: 109439842, 2019-03-08.
- [10] 李文权, 高振宇, 罗理, 等. 夹杂物对电工钢磁性能影响的初步分析[J]. 鞍钢技术, 2004: 15-18.
- [11] 段少平, 皇甫江涛. 连铸坯夹杂物产生原因分析及改进措施[J]. 山东冶金, 2018, 40(2): 24-26.
- [12] 孙彦辉, 方忠强. 钙处理中间产物的形成及其对氧化铝夹杂的改性[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(12): 1615-1625.