DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.002

高品质钻探管连铸坯质量研究

刘　敏[1,2],刘　伟[3],冯小明[1,2],赖朝彬[2]

(1. 新余钢铁集团有限公司,江西 新余 338001;2. 江西理工大学 材料冶金化学学部,江西 赣州 341000;3. 天津钢铁集团有限公司,天津 300301)

摘　要:工业试生产了 ZT740 连铸坯,利用冷酸侵蚀法、钻屑化学分析法、氧/氮分析仪、扫描电镜+能谱分析等手段分别研究了连铸坯的组织和成分偏析,并分析了[N]、[H]、[O]气体含量,以及夹杂物的性质。结果表明,铸坯低倍组织评级结果良好;[N]、[H]、[O]气体平均含量分别为 65.45×10^{-4}%、1.0×10^{-4}%和 21.48×10^{-4}%,均达到高品质钻探钢管中气体含量的设计指标;此外,在连铸坯中,除 P、S 元素出现一定程度的偏析外,其他元素均呈均匀分布;铸坯中非金属夹杂物形貌为点状和球形,10 μm 以下的夹杂物占比达到 70 %以上,大型夹杂物很少。连铸坯质量满足生产高品质钻探管的要求。

关键词:钻探管;连铸坯质量;低倍组织评级;夹杂物

中图分类号:TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)10-0839-06

Study on Quality of Continuous Cast Slab for High Grade Drilling Pipe

LIU Min[1,2], LIU Wei[3], FENG Xiaoming[1,2], LAI Chaobin[2]

(1. Xinyu Iron and Steel Co., Ltd., Xinyu 338001, China; 2. Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. Tianjin Iron and Steel Co., Ltd., Tianjin 300301, China)

Abstract: Microstructure, composition and segregation of ZT1740 continuous cast slab for high-grade drilling pipe were studied by cold acid method, chemical analysis, SEM and EDS analysis, gas analyzer. Results show that the macrostructure is good, gas contents including [N], [H] and [O] are low and satisfy the design requirement of the slab used for drill pipe. Element segregation, inclusion size and distribution all meet the demands of the high-grade drilling pipe.

Key words: high-grade drilling pipe; continuous cast slab; low magnification grade; inclusionl macrostructure

近年来,我国钢铁产能在大幅度提高,无缝钢管产量也逐渐增加,但产品的性能普遍较低[1-7],根据我国钻探用无缝钢管的标准,目前最高级别的钻探管钢为 ZT740,其抗拉强度 $\sigma_b \geq 840$ MPa、屈服强度 $\sigma_s \geq 740$ MPa、伸长率 $\delta \geq 10$ %。随着钻探行业的蓬勃发展,以及钻探钢管服役条件越来越复杂,钻探行业对高品质钻探管的需求量在日益增加[8-15]。新余钢铁集团根据用户的需求,决定对 ZT740 钻探管进行试制。本文作者主要对试生产 ZT740 连铸坯质量进行研究,以期满足高品质钻探管的生产要求。

1　生产设备及工艺流程

根据 ZT740 钢种成分及新钢特钢厂生产设备,将 ZT740 的炼钢工艺确定如下:铁液+废钢→EBT 电炉(50 t)粗炼→LF 炉(50 t)精炼→VD(50 t)炉精炼→连铸 210 mm×280 mm 大方坯。

ZT740 钻探管的化学成分如表 1。

2　研究方法

铸坯缺陷评级采用 TB/T4002 方法进行,铸坯冷酸侵蚀后,用肉眼观察并用 5～10 倍的放大镜进行检测。将试样加工成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体试样,利用 TC-500 氮/氧分析仪测量铸坯中总氧含量和氮含量。铸坯截面上成分偏析采用偏析度来衡量,偏析度的定义如式(1)。

$$K=C_i/C_0 \tag{1}$$

式中,C_i 为铸坯取样点相应元素的含量;C_0 为铸坯所有取样点 C_i 元素含量的平均值。

在连铸坯上截取厚度为 20 mm 的试块,用直径为 5 mm 的钻头钻孔,孔深为 5 mm,取钻削样分析元素含量。试样取样示意图见图 1。

对连铸坯非金属夹杂物的研究,主要从夹杂物的形貌、成分、数量和大小 4 方面进行分析。将 1 379 V 炉和 1 380 V 炉连铸坯上所取金相试样分

收稿日期:2021-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974139);科技部科技计划项目资助(SQ2009GJC5005722)

作者简介:刘　敏(1990—),江西新余人,博士研究生,工程师.主要从事钢铁产品开发方面的研究.

电话:13607909954,Email:525916191@qq.com

表 1 ZT740 钻探管化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of ZT740 drilling pipe

元素	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	Ti
实测	0.38	0.30	1.50	≤0.010	≤0.010	0.50	0.07	0.03
标准	0.35~0.41	0.20~0.40	1.40~1.70			0.40~0.60	0.04~0.10	0.03~0.05

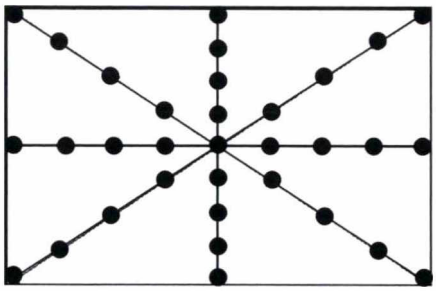


图 1 铸坯试块钻孔取样位置示意图
Fig.1 Schematic sampling location in the continuous cast slab

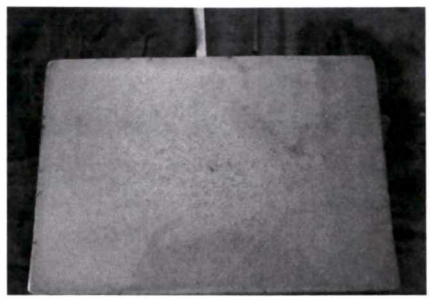


图 2 连铸坯低倍组织
Fig.2 Macrostructure of the continuous cast slab

组标记并加工,取样位置为连铸坯内弧 1/4 处,每炉连铸坯取 3 块试样,共计 6 块。将试样加工成厚度为 20 mm、长度为 30 mm、宽度为 20 mm 的金相样,用 Olympus 光学显微镜进行观察并拍照,同时对典型形貌夹杂物进行标记,以利于扫描电镜(XL30-TMP 型)及能谱仪(VANTAGE 型)分析。采用夹杂物数量指数来衡量试样中夹杂物的多少,即以每 mm²(即 10^6 μm)试样面积上相当于 7.5 μm 大小的夹杂物个数。其表达式如式(2)所示。

$$I=\frac{\Sigma n_i d_i}{N\cdot a\cdot b\cdot B}\cdot 10^6 \tag{2}$$

式中,n_i 为显微镜下每个视场观察到的夹杂物的个数;d_i 为同级别夹杂物的平均直径(尺寸在 0~2.5 μm,2.5~5 μm,5~10 μm,10~20 μm,>20 μm 下;其平均直径分别选取 1.25、3.75、7.5、15、30 μm);N 为观察的视场(取 3 000 放大倍数下 100 个视场);a、b 为观察视场的实际长和宽(光学显微镜视场长为 184.855 μm,高为 139.383 μm);面积:25 765.64 μm²;B 为夹杂物平均直径(取 7.5 μm)。

3 结果分析与讨论

3.1 连铸坯低倍组织

连铸坯低倍组织如图 2。从表 2 可得连铸的一般疏松为 0.5 级、中心疏松为 0.5 ~ 1.0 级,疏松程度较低,经过轧制后,在压下比为 3 时疏松便会焊合消失。连铸坯低倍评级结果表明连铸坯表面质量良好。

3.2 连铸坯气体含量

钢中气体含量分析结果如表 3 所示。其中总氧含量表示为:T[O]=$[O]_{溶}$+$[O]_{夹}$;H 含量为在 VD 炉取样分析得到。由表 3 可知,1 379 V 炉连铸坯中[N]、[H]、[O] 气体平均含量分别为 68.45×10^{-4}%、1.3×10^{-4}%和 23.20×10^{-4}%;1 380 V 炉连铸坯中 [N]、[H]、[O] 气体平均含量分别为 61.94×10^{-4}%、0.7×10^{-4}%和 19.76 ×10^{-4}%。可以看出,1 380 V 炉连铸坯气体含量要低于 1 379 V 炉连铸坯气体含量,其原因可能是由于 1 379 V 炉在浇注过程中钢液温度比 1 380 V 炉钢液温度高,从而导致 1 379 V 炉连铸坯中[O]含量高于 1 380 V 炉连铸坯中[O]含量,这说明钢液温度越高,钢液也越容易被氧化。

表2 连铸坯低倍组织评级结果
Tab.2 Macrostructure grading of the continuous cast slab

炉号	规格 /mm	一般疏松	中心疏松	偏析	其他缺陷
1379V-1	210×280	0.5	1.0	1.0	—
1379V-2	210×280	0.5	0.5	1.0	—
1380V-1	210×280	0.5	1.0	1.0	—
1380V-2	210×280	0.5	0.5	1.0	—

表 3 钢中气体含量/×10^{-4}%
Tab.3 Gas content in steel

炉号	[N]	[H]	[O]
1379V-1	68.41	1.3	22.12
1379V-2	69.49	1.3	24.28
1380V-1	59.04	0.7	19.10
1380V-2	64.84	0.7	20.43

3.3 连铸坯化学成分偏析

1 379 V 炉和 1 380 V 炉连铸坯成分偏析程度如表 4。由表 4 可得到以下结果:

(1)除 P、S 元素外,其他元素偏析度较小,说明这些元素在连铸坯中含量分布比较均匀。Mn、Mo、V 和 Ti 等重要合金元素偏析度较小,在铸坯中分布均匀,从而保证了钢材具有良好的性能。

(2)P、S 元素产生了较大程度的正偏析,与铸坯低倍组织存在 1 级的偏析相吻合。根据溶质元素析出与富集理论分析可知,铸坯凝固过程中,P、S 元素在凝固前沿由于选分结晶而形成偏析,其产生的原

表 4 连铸坯化学成分及偏析度

Tab.4 Chemical composition and segregation degree of continuous casting slab

元素	1 379 V					1 380 V				
	最大值	最小值	平均值	极差	偏析度	最大值	最小值	平均值	极差	偏析度
C	0.411	0.368	0.392 0	0.043	1.05	0.390	0.371	0.379 0	0.019	1.03
Mn	1.520	1.470	1.500 0	0.050	1.01	1.510	1.460	1.488 0	0.050	1.01
S	0.003	0.002	0.002 5	0.001	1.20	0.002	0.001	0.001 3	0.001	1.54
P	0.010	0.007	0.009 0	0.003	1.11	0.009	0.007	0.008 2	0.002	1.10
Si	0.320	0.310	0.310 0	0.010	1.03	0.310	0.300	0.305 0	0.010	1.02
Mo	0.502	0.473	0.491 0	0.029	1.02	0.499	0.468	0.486 0	0.031	1.03
V	0.073	0.069	0.071 0	0.004	1.03	0.075	0.071	0.073 0	0.004	1.03
Ti	0.025	0.019	0.022 0	0.006	1.04	0.020	0.017	0.019 2	0.003	1.04

因可能是连铸坯冷却速度过快,从而影响溶质元素的传输,造成晶粒交界处形成溶质聚集。P、S 元素偏析会对连铸坯的性能产生一定影响,可以通过低过热度浇注技术来减轻 P、S 元素的偏析[9]。

3.4 连铸坯非金属夹杂物

3.4.1 夹杂物形貌

对 1 379 V 炉和 1 380 V 炉连铸坯中夹杂物形貌进行观察,结果如图 3 和 4 所示。从图中看出,夹杂物均呈球形,尺寸基本都在 10 μm 以下,没有发现大颗粒的夹杂物;且夹杂物没有出现聚集的现象,在连铸坯中均匀分布。夹杂物呈球状的原因是当夹杂物经过了 Ca 处理后,生成了一些低熔点物质。这些低熔点物质溶解于钢液中,由于受到表面张力的作用而呈现出球形,随着钢液凝固的进行,这些低熔点夹杂物形核长大,在钢液凝固过程中很少会发生形变,从而使夹杂物的形状呈球状。

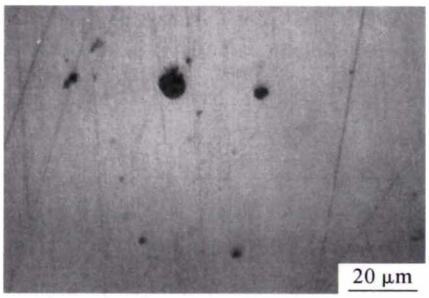


图 3 1 379 V 炉连铸坯中的夹杂物

Fig.3 Inclusions in the continuous cast slab from batch 1 378 V

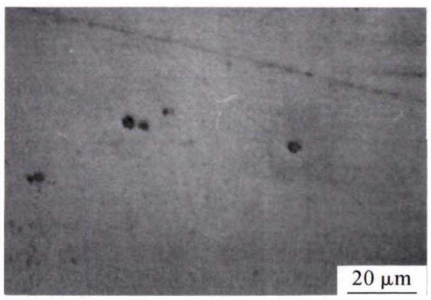


图 4 1 380 V 炉连铸坯中的夹杂物

Fig.4 Inclusions in the continuous cast slab from batch 1 378 V

通过对比两炉连铸坯上夹杂物的尺寸可以看出,1 379 V炉连铸坯中夹杂物整体尺寸要大于 1 380 V 炉连铸坯中的夹杂物,其原因可能为 1 379 V 炉连铸坯中[O]含量要高于 1380V 炉连铸坯中[O]含量。

3.4.2 连铸坯中典型夹杂物形貌及成分

用 XL30-TMP 型扫描电子显微镜和VANTAGE 能谱分析仪对连铸坯中典型夹杂物进行检测分析。连铸坯中的夹杂物主要可以分为以下几类:

(1)TiN 夹杂物　连铸坯中 TiN 夹杂物的形貌如图 5 所示,其化学成分见表 5。由图 5 可知,TiN 夹杂物为方形并带有棱角。TiN 颗粒能够在较高的温度析出,通过钉扎奥氏体晶界阻止奥氏体晶粒的长大,从而提高钢材的强度和韧性。

表5 TiN夹杂物成分表

Tab.5 Chemical composition of TiN inclusion

元素重量和原子百分比	N	Ti	V
w(%)	20.23	77.76	2.00
Atom(%)	46.49	52.25	1.26

(2)MnS 夹杂物　连铸坯中 TiN 夹杂物的形貌如图 6,其化学成分见表 6。MnS 夹杂具有良好的塑性,在铸坯轧制过程中能够沿钢塑性流变方向延伸成长条形状,过多的硫化物会降低钢材的延伸性能。

表 6 MnS 夹杂物成分表

Tab.6 Chemical composition of manganese sulfide inclusion

元素重量和原子百分比	S	Mn
w(%)	38.02	61.98
Atom(%)	51.25	48.75

(3)铝酸盐类夹杂物　由图 7 和表 7 可知,铝酸盐类夹杂物呈圆球状并且颜色较深,并且此类夹杂物伴有少量的 MgO、SiO_2。由于冶炼过程中采用 Al 作为脱氧剂,Al 脱氧后形成的 Al_2O_3 与钙处理过程中生成的 CaO 相结合,从而形成铝酸钙类夹杂物。

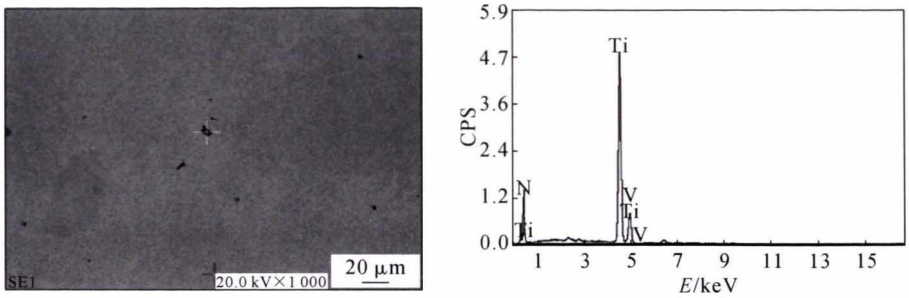


图 5 TiN 夹杂物的扫描电镜图像和能谱分析

Fig.5 SEM image and EDS result of TiN inclusion

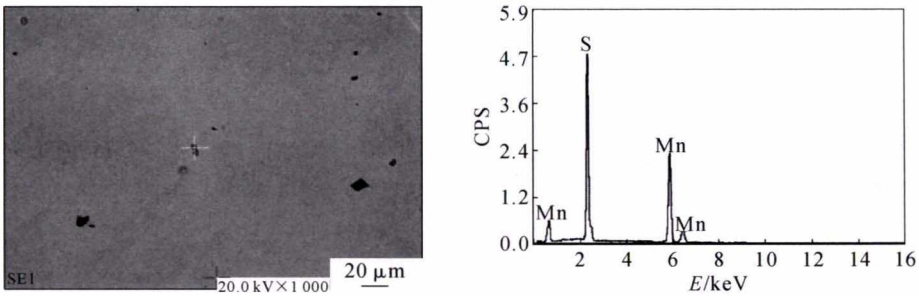


图 6 MnS 夹杂物的扫描电镜图像和能谱分析

Fig.6 SEM image and EDS result of MnS inclusion

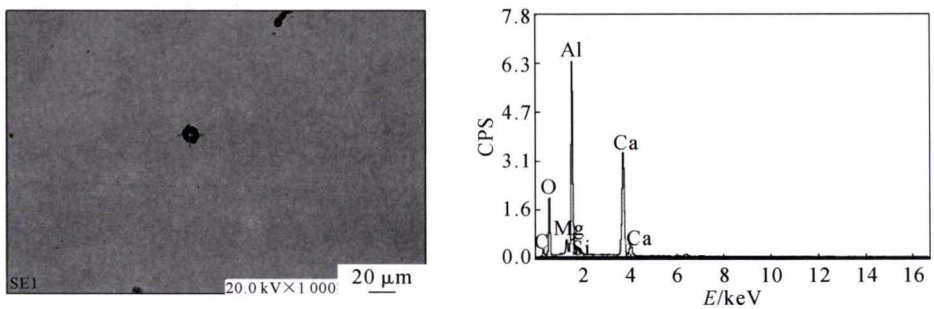


图 7 铝酸钙夹杂物的扫描电镜图像和能谱分析

Fig.7 SEM image and EDS result of calcium aluminate inclusion

表7 铝酸钙类夹杂物成分表

Tab.7 Chemical composition of calcium aluminate inclusion

元素重量和原子百分比	O	Mg	Al	Si	Ca
w(%)	36.85	9.33	30.06	1.80	21.95
Atom(%)	52.19	8.70	25.25	1.46	12.41

这类夹杂物形貌呈球形,其对钢材性能的危害比不规则形状的夹杂更小,这也是冶炼过程中采用钙处理的原因。

(4)氧化物夹杂物　由图 8 和表 8 看出,连铸坯中会形成长条状的 FeO 夹杂，并且伴有少量的 MnO。FeO 夹杂物属于低熔点夹杂物,在铸坯扎制过程中容易导致裂纹产生，从而对钢材的性能造成不利影响。

表8 氧化物夹杂成分表

Tab.8 Chemical composition of oxide inclusion

元素重量和原子百分比	O	S	Mn	Fe
w(%)	30.66	0.79	2.73	65.82
Atom(%)	60.47	0.78	1.57	37.18

(5)镁铝尖晶石类夹杂物　镁铝尖晶石类夹

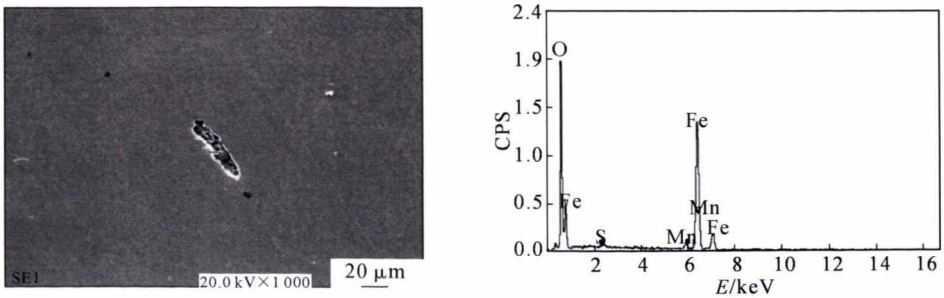


图 8 氧化物夹杂观察

Fig.8 Observation of oxide inclusion

杂物的形貌及成分如图 9 和表 9。由图 9 可知，这类夹杂物的形状呈椭圆形，且颜色较黑。其来源可能是钢液对炉衬冲刷导致 MgO 进入到钢液并与 Al 脱氧产生的 Al_2O_3 相结合，从而生成镁铝尖晶石。这种夹杂物属于脆性夹杂，在钢材轧制过程中会碎裂，从而恶化钢材的性能。

表9 镁铝尖晶石类夹杂物成分表

Tab.9 Chemical composition of magnesium aluminum spinel inclusion

元素重量和原子百分比	O	S	Mg	Al	Si	Ca	Fe
w(%)	35.01	5.61	17.19	29.39	0.76	6.70	5.35
Atom(%)	49.18	3.93	15.90	24.48	0.60	3.75	2.15

(6)铝硅酸盐类夹杂物　由图 10 可知，铝硅酸盐类夹杂物呈椭圆形，颜色较浅。由表 10 分析可看出，这类夹杂物为复相的铝硅酸盐，其组成元素与精炼渣成分相似。说明这类夹杂物的形成是精炼渣被卷入钢液所形成的。

表10 铝硅酸盐类夹杂物成分表

Tab.10 Chemical composition of aluminosilicate inclusion

元素重量和原子百分比	O	Mg	Al	Si	Ca
w(%)	36.46	0.96	26.75	6.14	29.70
Atom(%)	53.38	0.92	23.22	5.12	17.36

3.4.3　夹杂物数量和大小

在 1 379 V 炉和 1 380 V 炉连铸坯中各取 3 个试样，利用 Olympus 光学显微镜在 100 倍的情况下观察分析夹杂物的粒径，夹杂物粒径的统计范围分别为 0~5 μm、5~10 μm、10~20 μm、>20 μm，每个试样选取 100 个视场，每个视场的直径为 71 μm，统计各粒径内夹杂物的个数。金相统计分析结果如图 11 所示。

通过金相分析可得，1 379 V 炉和 1 380 V 炉连铸坯中夹杂物的粒径主要在 0 ~ 5 μm 内。1 379 V 炉连铸坯中 0 ~ 5 μm 夹杂物个数占 54.8%；5~10 μm 夹杂物个数占 21.8%；10~20 μm 夹杂物个数占 13.7%；大于 20 μm 夹杂物个数占 9.7%。1 380 V炉连铸坯中 0~5 μm 夹杂物个数占 52.8%；5~10 μm 夹杂物个数占 24.4%；10~20 μm 夹杂物个数占 14.6%；大于 20 μm 夹杂物个数占 8.2%。1 379 炉连铸坯中 0~5 μm 夹杂物数量比 1 380 V 炉连铸坯中 0~5 μm 夹杂物数量要多，这与 1 379 V 炉连铸坯中[O]含量高于 1 380 V 炉连铸坯中[O]含量相吻合。

通过对连铸坯中夹杂物进行分析可得到如下结果：有 75%的夹杂物粒径在 10 μm 以下，铸坯中没有发现大颗粒的夹杂物；夹杂物的类型有硫化物类和铝硅酸盐类，这些夹杂物的尺寸较小，对连铸坯性

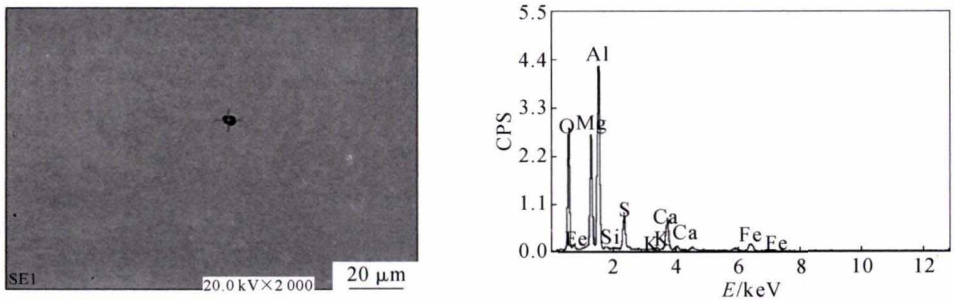


图 9 镁铝尖晶石类夹杂物观察

Fig.9 Observation of magnesium aluminum spinel inclusion

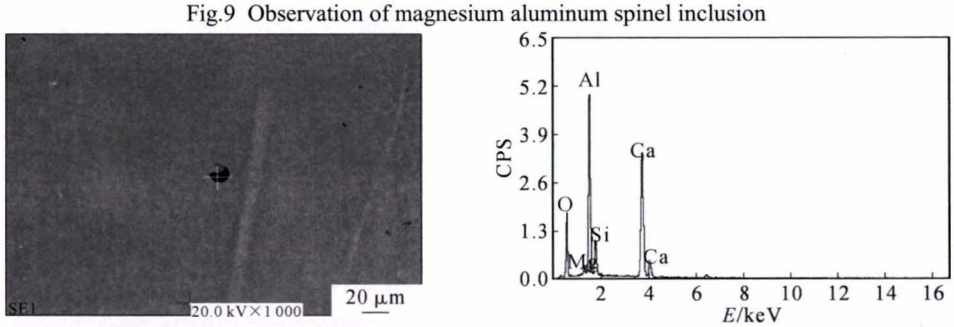


图 10 铝硅酸盐类夹杂物观察

Fig.10 Observation of aluminosilicate inclusion

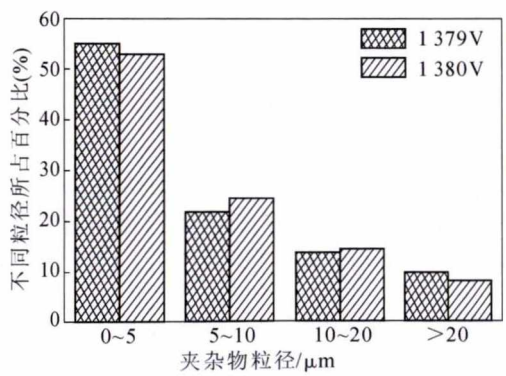


图 11 夹杂物粒径分布图

Fig.11 Inclusion size distribution diagram

能的危害程度较低;此外,在连铸坯上还发现很多细小 TiN 夹杂物,这类夹杂物能够提高钢材的强度。

基于以上分析可知,将铁液+废钢→EBT 电炉粗炼→LF 炉精炼→VD 炉精炼→连铸 210 mm×280 mm 方坯做为高品质钻探管冶炼工艺,该工艺设计合理,生产的连铸坯质量良好,满足生产高品质钻探管的要求。

4 结论

以铁液+废钢→EBT 电炉粗炼→LF 炉精炼→VD 炉精炼→连铸 210 mm×280 mm 矩形坯做为高品质钻探管冶炼工艺,对连铸坯的质量进行分析,可得到如下结论:

(1)连铸坯中除 P、S 元素出现一定程度的偏析外,其他元素偏析程度较低。

(2)连铸坯中[N]、[H]、[O]气体平均含量分别为 $65.45\times10^{-4}\%$、$1.0\times10^{-4}\%$和 $21.48\times10^{-4}\%$,均达到高品质钻探管钢中气体含量的设计指标。

(3)连铸坯中非金属夹杂物以硫化物和铝硅酸盐为主,形貌为点状和球形,且大部分在 10 μm 以下,大型夹杂物很少。

(4)铁液+废钢→EBT 电炉粗炼→LF 炉精炼→VD 炉精炼→连铸 210 mm×280 mm 方坯冶炼工艺做为高品质钻探管钢的生产工艺是可行的。

致谢:感谢北京科技大学博士生习小军在实验研究及论文撰写过程中给予的指导和帮助。

参考文献:

[1] 达春娟,王建平. 浅谈钢铁工业发展趋势[J]. 浙江冶金, 2020(1): 12-16.

[2] 王甜甜, 王强. 我国无缝钢管行业现状及展望 [J]. 环球市场, 2016 (18): 61-62.

[3] 赵佳,管志杰,李文远. 我国无缝钢管行业发展现状及相关建议[J]. 钢管, 2020, 49(2): 1-4.

[4] 赵鹏. 宝钢钻杆的生产技术实践[J]. 钢管, 2012, 41(2): 21-34.

[5] 李鹤林,韩礼红,张文利. 高性能油井管的需求与发展[J]. 钢管, 2009, 38(1): 1-5.

[6] 兰兴昌. 国外无缝钢管生产现状[J]. 钢管, 2012, 41(2): 15-20.

[7] 成海涛. 防止我国由无缝钢管大国变成无缝钢管"穷"国的思考[J]. 钢管, 2011, 40(4): 1-5.

[8] TUSSET, MATHY M, GOMMERS, et al. Cleanness Assessment of High Quality Steels Produced by RH Treatment [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2003, 30(2): 142-145.

[9] TABATABAEI Y, COLEY K S, IRONS G A, et al. Tracking Inclusions During Ladle Refining using a Kinetic Model for the Compositions of Metal, Slag, and Inclusions[J]. Steel Research International, 2019, 90(10): 29-38.

[10] 李建强,于丽松,牛成杰,等. 石油钻杆的生产现状与发展趋势[J]. 焊管, 2011, 34(11): 35-38.

[11] Mandal M, POOLE W, MILITZER M, et al. Mechanical Properties of Intercritically Annealed X80 Line Pipe Steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2021, 52(1): 1336-1352.

[12] LIU W J, LI J, WANG H, et al. The Effect of Al-Mg Deoxidation on the Cleanliness of Steel During the Electroslag Remelting Process [J]. Steel Research International, 2019, DOI: 10.1002/srin.201900185.

[13] WANG H, SHI C M, LI J, et al. Evolution of CaO-MgO-Al_2O_3-CaS-(SiO_2) Inclusions in H13 Die Steel During Electroslag Remelting Process[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(1): 33-45.

[14] ZENG J H, ZHANG M, CHEN Y, et al. Study on LF Refining Slag and Slagging Regime of High-aluminium Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011,18(2): 201-205.

[15] XU J F, WANG K P, WANG Y, et al. Effects of Ferrosilicon Alloy, Si Content of Steel, and Slag Basicity on Compositions of Inclusions During Ladle Furnace Refining of Al-killed Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(1): 1011-1017.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章:1 铸铁件均衡凝固与有限补缩;2 铸铁件冒口补缩设计及应用;3 压边浇冒口系统;4 浇注系统大孔出流理论与设计;5 铸件均衡凝固工艺;6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7 浇注系统当冒口补缩设计方法;8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价:280元。

邮购咨询:李巧凤　　电话/传真:029-88491681　　技术咨询:13609155628