

· 应用与服役 ·



非金属夹杂物对高强度石油套管冲击韧性的影响

邓叙燕, 王居超, 张玲通, 王书岭
(达力普石油专用管有限公司, 沧州 061000)

摘要:采用扫描电镜和大样电解等检验方法对高强度石油套管用连铸圆坯中夹杂物的数量、尺寸、成分、形貌进行了系统分析。结果表明:中间包开浇阶段连铸圆坯中的显微夹杂物 and 大型夹杂物都明显高于稳定浇铸状态;在稳定浇铸状态下,连铸圆坯中的 $w[\text{T. O}] < 10 \times 10^{-6}$, 大型夹杂物的含量小于 1.5 mg/10 kg。采用中间包开浇阶段连铸圆坯制成的无缝钢管冲击功波动较大,最大冲击功是最小冲击功的 1.4 倍,冲击功随着钢中的 $w[\text{T. O}]$ 含量增大而降低。冲击功越低的试样,夹杂物的面积比越大,37 J 试样的夹杂物面积比是 53 J 试样夹杂物面积比的 2.1 倍。钢中的非金属夹杂物是导致冲击功波动的主要原因。

关键词:高强度石油套管; 非金属夹杂物; 冲击韧性; 大样电解

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250523 **中图分类号:** TG142. 1

Effect of Nonmetallic Inclusion on Impact Toughness of High Strength Oil Casing

Deng Xuyan, Wang Juchao, Zhang Lingtong, Wang Shuling
(Dalipal Pipe Company, Cangzhou 061000, China)

Abstract: The number, size, chemical composition and morphology of inclusions in continuous casting billet samples were analyzed using SEM and bulk sample electrolysis for high strength OCTG steel. The results show that the micro inclusions and large inclusions in the continuous casting billets are significantly higher than the stable casting state in the beginning casting stage of the tundish. T. O content in the billet is less than 10×10^{-6} , and the macro inclusion content in the billet is less than 1.5 mg/10 kg in the stable casting stage. The seamless steel pipes produced from round billets at casting start stage exhibit significant fluctuations in impact energy, with the maximum impact energy being 1.4 times the minimum. The impact energy decreases as the T. O content in the steel increases. Samples with lower impact energy show a higher area fraction of inclusions, the inclusion area fraction in the 37 J sample is 2.1 times that of the 53 J sample. Non-metallic inclusions in the steel are the primary cause of the impact energy fluctuations.

Key Words : High Strength Casing; Non-metallic Inclusion; Impact Toughness; Bulk Sample Electrolysis

随着常规油气资源的开发日益衰竭,深地油气藏逐渐成为勘探开发的重点,井下钻采环境变得极端苛刻。目前我国四川、塔里木等油气田区块钻采的深度已经达到 9 000 m 以上,井底下温度达 200 °C 以上、压力达到 150 MPa 以上,井下石油套管要求具有高强度、高韧性等优异性能。为了满足苛刻环境下油气井的使用要求和开采安全性,各大石油套管生产企业开发了 125、140、155、165V 系列高强度高韧性产品,140V 钢级以上产品已经在各大油气田得到广泛应用^[1]。

在绝大多数情况下,钢铁材料的强度与韧性表现为此消彼长的关系。油井管生产企业通过优化

钢的化学成分和冶炼工艺,实现细晶强化、沉淀强化、降低杂质含量、改善夹杂物形态等满足了高强度和高韧性的要求^[2-3]。目前,高强度高韧性油井管通常采用连铸圆坯轧制,连铸过程中存在开浇、换包等非稳定状态,非稳定状态下连铸圆坯的非金属夹杂物含量较稳定状态下存在较大差异^[4-6]。非金属夹杂物是影响材料冲击韧性的主要因素^[7-9],因此,采用非稳定状态和稳定状态连铸圆坯生产的石油套管冲击韧性会存在差异,但是目前未见相关的报道。通过工业试验研究了 140V 石油套管用钢非金属夹杂物的特征以及对冲击韧性的影响,可为石油套管的质量控制提供支撑。

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(246Z1012G)

作者简介: 邓叙燕(1983—),男,硕士,正高级工程师; **E-mail:** dalipal_dxy@163.com; **收稿日期:** 2025-08-22

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

1 试验条件

1.1 化学成分

140V 高强度石油套管的化学成分设计在传统 Cr-Mo 钢的基础上加入微合金化元素 Nb、V、Ti 细化晶粒,并析出细小的碳氮化物来提升钢管的强韧性。由于 S、P 元素易在晶界偏聚,严重降低钢管的韧性, $w[\text{P}]$ 控制在 $\leq 0.01\%$ 、 $w[\text{S}]$ 控制在 $\leq 0.001\%$ ^[10]。化学成分要求见表 1。

1.2 生产工艺流程

1) 炼钢:炼钢的主要工序包括 100 t 超高功率电弧炉熔炼、LF 钢包精炼、VD 真空精炼、圆坯连铸。在连铸工序,钢包就位后,打开滑板,钢水经长水口流经中间包,中间包钢水吨位达到 20 t 后,加入中间包覆盖剂,打开中间包塞棒进行浇铸,浇铸成 $\phi 200$ mm 的连铸圆坯。

2) 轧管:轧管工序包括环形炉加热、穿孔、三辊连轧机组轧制、微张力减径、冷却、锯切、探伤、检验等,连铸圆坯经轧管工序后制成 $\phi 139.7$ mm \times 12.7 mm 轧态无缝钢管。

3) 热处理:采用“淬火+回火”调质热处理工艺将轧态无缝钢管调质成 140V 钢级无缝钢管,淬火加热目标温度控制在 920 °C,回火加热温度控制在

640 °C。

1.3 试验方法

按照工艺要求冶炼了 1 炉钢。为了系统对比浇铸过程中连铸圆坯的洁净度,分别在中间包浇铸不同吨位时对应的连铸圆坯上进行取样分析。采用氧氮氢分析仪分析其总氧(T.O)含量;采用扫描电镜和牛津 INCA 软件对夹杂物进行自动检测,得到其夹杂物面积;采用电解的方法提取大型夹杂物(≥ 50 μm),并用扫描电镜分析了夹杂物的形貌和成分。

将试验炉的前 24 t 连铸圆坯按工艺要求制成 53 支 140V 钢级无缝钢管。在每支钢管上取样进行拉伸性能、冲击韧性、T.O 含量的分析。采用扫描电镜对冲击试样断口以及断口中的第二相粒子进行分析,采用扫描电镜和牛津 INCA 软件对夹杂物进行自动检测,得到其夹杂物面积。

2 连铸圆坯夹杂物试验结果及分析

2.1 显微夹杂物的变化规律

本研究中夹杂物面积比是指扫描面积内所有夹杂物的面积与扫描面积的比值。图 1 给出了浇铸过程中夹杂物(≥ 3 μm)面积和 T.O 含量的变化规律。从图 1 中可以看出,夹杂物面积比与 T.O 含量均随

表 1 140V 高强钢化学成分要求(质量分数)

Table 1 Chemical composition requirement of 140V high strength steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Nb+V+Ti
0.24~0.28	0.25~0.40	0.90~1.10	≤ 0.010	≤ 0.001	0.90~1.10	0.30~0.60	0.02~0.05	适量

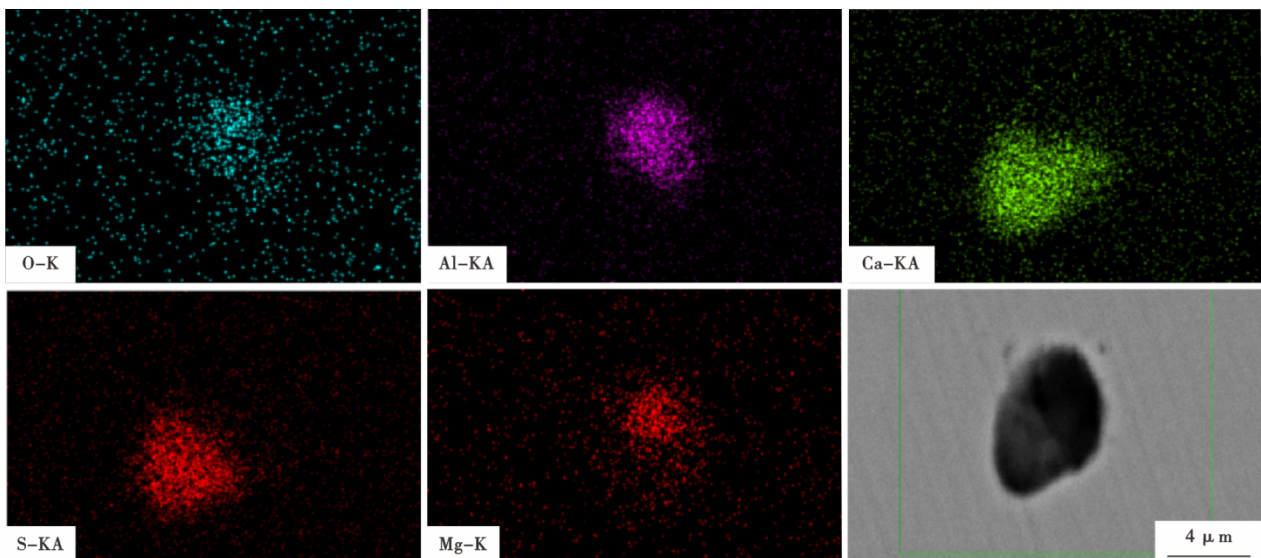


图 2 140V 高强钢连铸圆坯中典型显微夹杂物形貌及面扫描

Fig. 2 Typical inclusion morphology and EDS mapping in the 140V high-strength steel continuous casting billets

着浇铸吨位的增加而逐渐降低,当中间包浇铸 20 t 后逐渐趋于稳定。这是由于开浇阶段中间包钢液发生较严重的二次氧化,夹杂物含量增加^[11]。在稳定浇铸状态下,连铸圆坯中的 $w[\text{T.O}]$ 从开浇初始阶段的 26×10^{-6} 降低到 10×10^{-6} 以下,夹杂物面积比从 2.0×10^{-4} 降低到 1.5×10^{-4} ,纯净度得到大幅度提升。典型显微夹杂物的形貌和 EDS 面扫描结果如图 2 所示,从 EDS 面扫描结果可以看出显微夹杂物主要为 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaS}$ 类夹杂物。

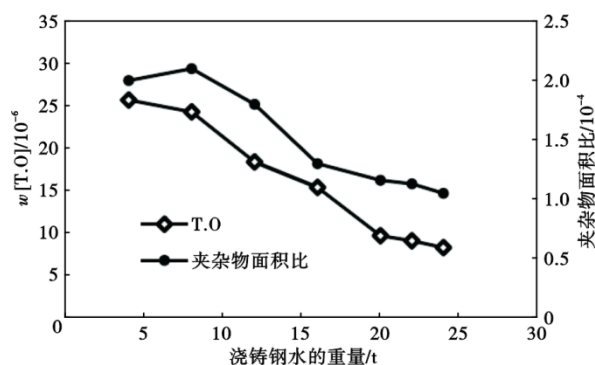


图1 140V 钢浇铸过程中钢液纯净度的变化

Fig. 1 Cleanliness variation of 140V steel in the process of casting

2.2 大型夹杂物的变化规律

电解出的大型夹杂物($\geq 50 \mu\text{m}$)经过淘洗、烘干、称重后,其含量变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出,大型夹杂物的含量随着浇铸吨位的增加而逐渐降低,当中间包浇铸 20 t 后,连铸圆坯中的大型夹杂物含量从开浇阶段的 $4.8 \text{ mg}/10 \text{ kg}$ 降低到 $1.5 \text{ mg}/10 \text{ kg}$ 以下,并逐渐趋于稳定。电解出的大型夹杂物的三维形貌如图 4 所示,均为球状的夹杂

物。化学成分见表 2,浇铸 4 t 时主要元素为 Al、Si、Ca、Mg、Cr、K、O,其中,含有 K 的夹杂物由于浇铸初期结晶器液面不稳定,结晶器保护渣卷入导致;含有 Cr 的夹杂物是由于钢包开浇时带入的引流砂与钢液及夹杂物相互作用的产物^[11]。浇铸 24 t 对应的连铸圆坯中大型夹杂物组成主要为 Al、Si、Ca、Mg、O,根据其成分推测主要为钢液的脱氧产物、二次氧化产物。

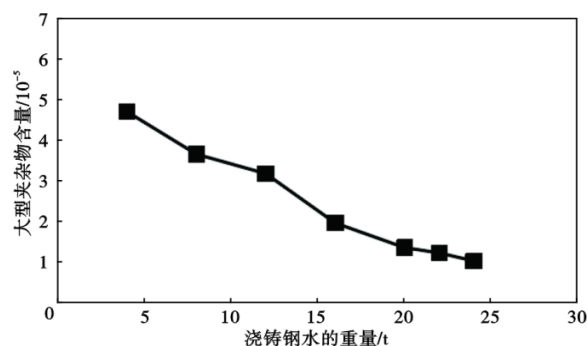


图3 140V 钢浇铸过程中大型夹杂物变化

Fig. 3 Macro inclusion variation of 140V steel in the process of casting

3 非金属夹杂物对冲击韧性的影响

3.1 力学性能试验结果

对拉伸试验和冲击试验数据(试验温度为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、试样尺寸为 1/2 横向)进行统计分析,结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,试验钢管的屈服强度为 $1041 \sim 1107 \text{ MPa}$ 、平均值为 1066.9 MPa 、标准差为 15.8 MPa ;抗拉强度为 $1104 \sim 1183 \text{ MPa}$ 、平均值为 1144.5 MPa 、标准差为 14.5 MPa ;冲击功为 $37 \sim 53 \text{ J}$ 、平均值为 46.1 J 、标准差为 4.6 J ,冲击功波

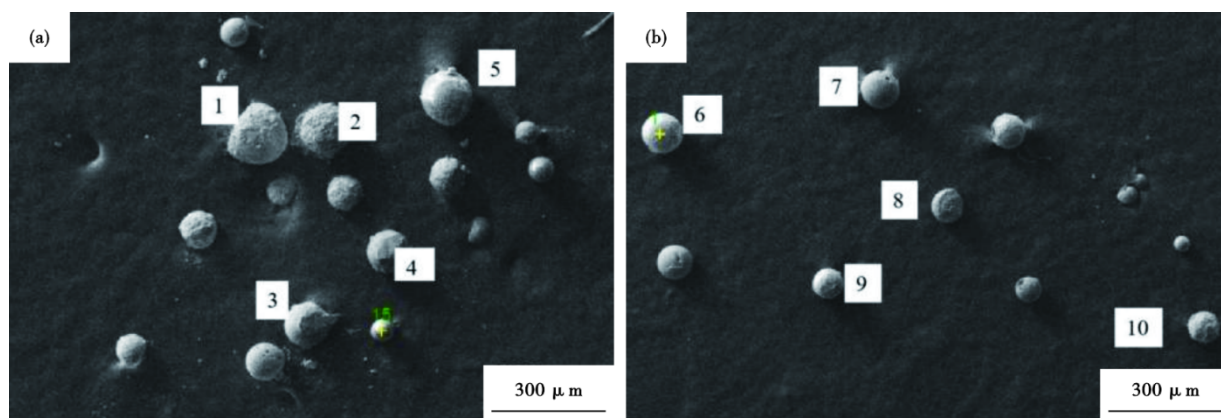


图4 140V 钢大型夹杂物形貌:(a)浇铸 4 t,(b)浇铸 24 t

Fig. 4 Morphology of macro inclusions in 140V steel:(a)casting 4 ton,(b)casting 24 ton

表 2 图 4 中检测点夹杂物的成分(质量分数)

Table 2 Inclusion composition at the detection points in Fig. 4

检测点	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Cr	K
1	3.77	35.39	1.61	1.33	52.07	-	5.83	-
2	14.45	30.25	26.00	-	22.27	-	-	7.04
3	4.71	22.79	13.75	-	47.09	-	8.09	3.61
4	3.86	14.73	26.00	-	17.45	33.15	-	4.81
5	2.86	40.53	4.50	-	42.66	-	9.40	-
6	5.40	47.61	-	-	44.10	2.96	-	-
7	4.32	40.96	3.76	-	50.96	-	-	-
8	5.50	29.48	-	-	32.78	32.26	-	-
9	-	32.91	-	-	22.26	44.73	-	-
10	19.22	36.00	-	6.91	38.37	-	-	-

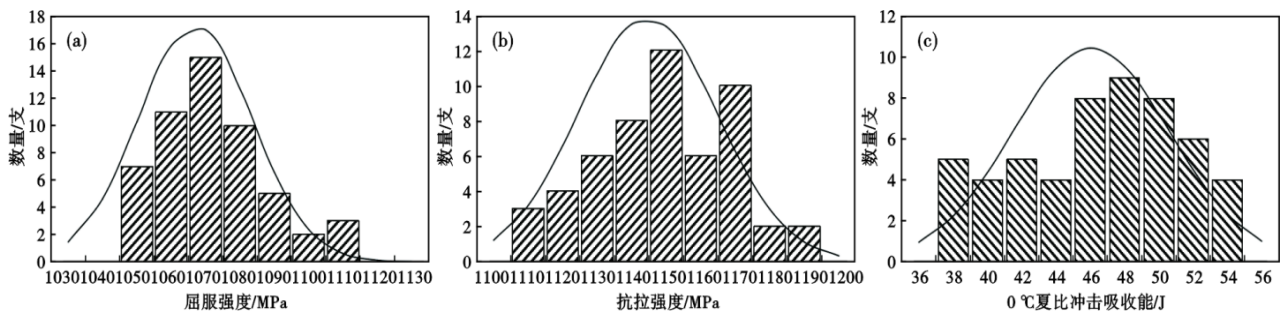


图 5 140V 钢力学性能分布图:(a)屈服强度,(b)抗拉强度,(c)冲击韧性

Fig. 5 Distribution figure of mechanical properties of 140V steel : (a)yield strenghen,(b)tensile strenghen,(c)impact toughness

动较大,最大冲击功是最小冲击功的 1.4 倍。拉伸性能波动较小,不是造成冲击功波动的主要因素。

按照 API 5CT 第 11 版附录 A.7 统计冲击试验方法,生产批的预测最低冲击吸收能 S_{min} 应采用式(1)计算^[6]。

$$S_{min} = \bar{S} - F \times \sigma_{tot} \quad (1)$$

式中, S_{min} 为最低冲击吸收能, J; \bar{S} 为测试试样的平均冲击吸收能, J; F 为系数,取 3.09; σ_{tot} 为测试试样冲击功的标准偏差。按照式(1)计算,该批的预测最低冲击吸收能仅为 32 J。

3.2 影响冲击韧性的因素确定

试验测得的每支钢管的 0 °C 横向 1/2 尺寸冲击功与 T.O 含量的关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出, T.O 含量越高,冲击功越低。因 T.O 可作为钢中夹杂物的衡量指标,冲击功的波动可能是由于钢中的夹杂物导致的。

为了进一步确定冲击韧性波动的原因,分别取冲击功为 37、45、54 J 的冲击试样用扫描电镜进行分析,试样分别标记为 L、M 和 H,这三个试样的 $w[T.O]$ 分别为 26×10^{-6} 、 16×10^{-6} 、 9×10^{-6} ,屈服强度分别为 1 080、1 101、1 093 MPa。

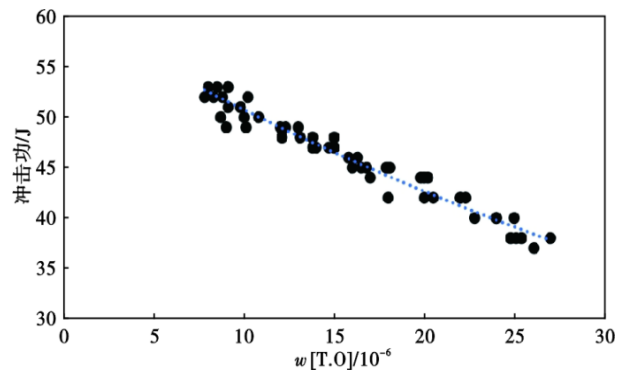


图 6 140V 钢冲击韧性与 T. O 的关系

Fig. 6 Relation between impact toughness and T. O of 140V steel

三个试样的冲击断口形貌如图 7 所示。可以看出,断口有大量大小不一的等轴韧窝,可以判断是韧性断裂,在有些韧窝中还可以清楚观察到第二相粒子。这是由于在冲击试验的过程中,金属发生塑性变形,由于位错的滑移和攀移,在第二相离子处形成应力集中。当应力集中达到一定程度时,这些区域就会发生塑性失稳,形成显微空洞。随着显微空洞的不断长大,相邻的空洞之间会逐渐靠近并相互连接。当空洞之间的金属基体被完全撕裂时,就

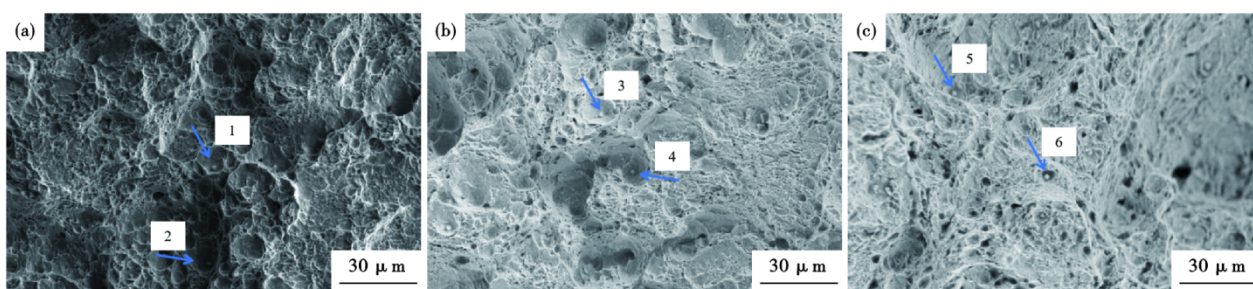


图7 140V钢冲击试样断口的微观形貌:(a)L试样,(b)M试样,(c)H试样

Fig. 7 Microscopic morphology of impact test specimen fracture of 140V steel : (a) sample L, (b) sample M, (c) sample H

表3 图7中检测点夹杂物的成分(质量分数)

检测点	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Cr	K	%
1	19.77	42.53	0.68	17.35	15.20	3.65	0.82	-	
2	6.30	25.19	-	28.26	31.78	4.35	-	4.13	
3	6.42	29.77	0.44	27.16	29.88	2.95	1.86	1.52	
4	1.46	13.17	1.46	27.21	49.43	2.51	4.75	-	
5	18.70	54.47	1.39	10.73	14.17	0.53	-	-	
6	6.39	45.80	-	6.82	40.99	-	-	-	

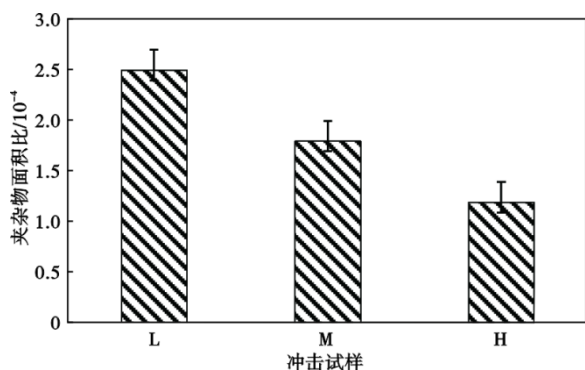


图8 140V钢冲击试样夹杂物面积比

Fig. 8 Area fraction of inclusions in the impact testing specimens of 140V steel

会形成韧窝。

扫描电镜能谱分析发现,第二相粒子主要为非金属夹杂物,L和M试样中的部分非金属夹杂物检测到含有Al、Si、Ca、Mg、Cr、K、O等,由此判断该试样对应的无缝钢管是由非稳定状态连铸圆坯轧制而成的;H试样中的非金属夹杂物化学成分组成主要为Al、Si、Ca、Mg、O,由此判断该试样对应的无缝钢管是由稳定状态连铸圆坯轧制而成;典型能谱图见表3。总体来看,L试样断口中可观察到的夹杂物数量明显多于H试样。

用扫描电镜对三个试样轧制方向截面中的非

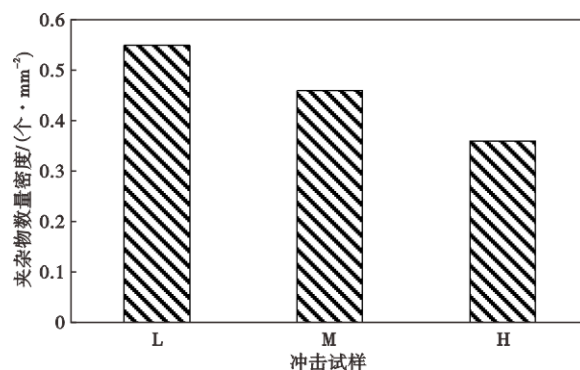


图9 140V钢冲击试样夹杂物数量密度

Fig. 9 Number density of inclusions in the impact testing specimens of 140V steel

金属夹杂物进行了定量分析。每个试样观察10个400 mm²的区域,夹杂物面积比统计结果如图8所示。从图8中可见,冲击功越低的试样,夹杂物面积比越大,L试样夹杂物面积比是H试样夹杂物面积比的2.1倍。夹杂物数量的统计结果如图9所示。由图9中可知,冲击功越低的试样,夹杂物数量密度越大,L试样的夹杂物数量密度是H试样夹杂物数量的1.5倍。典型夹杂物的形貌如图10所示、EDS能谱成分见表4,主要为串状的B类夹杂物,这是由于炼钢过程形成的铝酸钙夹杂物具有较低的熔点、容易变形,在轧管过程中随基体一起变形而形成。

由此可见,钢的纯净度是影响冲击功的主要因素。在冲击试样发生塑性变形的过程中,非金属夹杂物的韧性比钢铁基体差,不能容纳塑性变形,因而限制了裂纹尖端塑性区的尺寸,明显降低形成单位面积微裂纹所消耗的塑性功,所以,非金属夹杂物将使材料的韧度明显降低,因此,随着非金属夹杂物的体积分数的增加,冲击韧性明显降低^[12]。

通过以上分析发现,钢的纯净度是影响140V

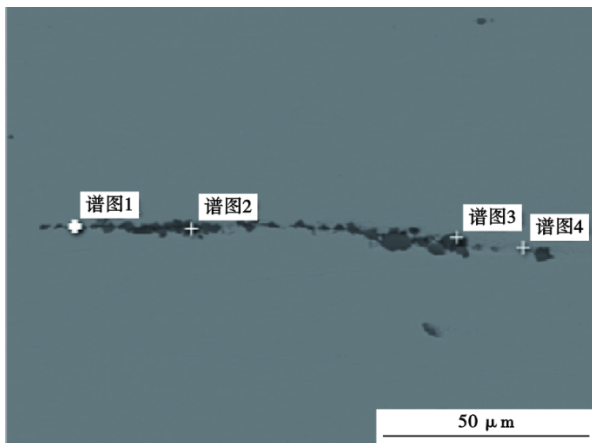


图 10 140V 钢冲击试样典型夹杂物形貌

Fig. 10 Morphology of typical inclusions in the impact testing specimens of 140V steel

油套管冲击功的关键因素。目前,用户一般要求 0 °C 全尺寸横向冲击功在 80 J 以上(半尺寸 44 J),从图 6 可以看出,要使冲击功控制在 44 J 以上,钢中的 $w[\text{T.O}]$ 必须在 15×10^{-6} 以下。根据图 1 可知,建议将连铸开浇阶段的前面 20 t 连铸圆坯进行改判,不用于生产 140V 油套管。

参考文献

- [1] 冯耀荣,张传友,张忠铎,等. 油井管国产化技术及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2023: 2023.
- [2] Wang Y K, Kang J, Liu D S, et al. Effect of V and Nb on the microstructure and properties of high strength and toughness steel for petroleum casing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 1403-1413.
- [3] 董晓明,尹学东,张忠铎. 超深井用 160 钢级超高强度高韧性套管的研制及组织表征[J]. 钢管, 2024, 53(1): 40-44.
- [4] 李源源,张炯明,崔衡,等. IF 钢连铸开浇工艺对头坯洁净度影响的研究[J]. 工程科学学报, 2023, 45(6): 899-906.
- [5] 郎炜昀,王建昌,王伟,等. 连铸非稳态 430 不锈钢铸坯大型夹杂物分析[J]. 中国冶金, 2024, 34(4): 118-126.
- [6] 张新文,施嘉凯,汪德伟,等. 连铸开浇首炉二次氧化程度对比与分析[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 56-60.
- [7] 黄宇,成国光,王启明,等. 大尺寸夹杂物对 12MDV6 铸件冲击性能的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(6): 39-47.
- [8] Huang Y, Cheng G G, Li S J, et al. Effect of Ti(C, N) particle on the impact toughness of B-microalloyed steel[J]. Metals, 2018, 8(11): 868.
- [9] 罗钢,隋亚飞,刘彭,等. La-Ce 稀土对 Q345D 钢夹杂物和冲击性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(3): 33-39.
- [10] 洗爱平,张盾,王仪康. 钢中残余元素及其对钢性能的影响[J]. 钢铁, 1999, 34(10): 64-68.
- [11] 邓叙燕,胡楚江,段宝美,等. 高端抗硫管线钢非金属夹杂物研究[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(2): 136-142.
- [12] 朱明原,鲁泽凡,黄飞,等. 第二相粒子对 V-Ti 微合金油井管钢力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(12): 70-73.

表 4 图 10 中检测点夹杂物的成分(质量分数)

Table 4 Inclusion composition at the detection points in Fig. 10

检测点	O	Mg	Al	Si	S	Ca
1	34.81	0.20	23.57	0.19	0.53	32.69
2	37.75	0.38	21.43	0.40	0.90	29.05
3	32.32	0.25	17.40	0.28	0.44	23.70
4	21.49	0.24	15.77	0.18	0.43	20.19

4 结论

1) 在稳定浇铸状态下,连铸圆坯中的 $w[\text{T.O}]$ 从开浇初始阶段的 26×10^{-6} 降低到 10×10^{-6} 以下,大型夹杂物含量从 4.8 mg/10 kg 降低到 1.5 mg/10 kg,纯净度得到大幅度提高。

2) 采用中间包开浇阶段连铸圆坯制成的无缝钢管冲击功波动较大,最大冲击功是最小冲击功的 1.4 倍,冲击功随着钢中的 T.O 含量增大而降低。

3) 冲击功越低的试样,夹杂物的面积比和数量密度越大,37 J 试样的夹杂物面积比是 53 J 试样夹杂物面积比的 2.1 倍,夹杂物数量密度比的 1.5 倍。钢的纯净度是影响冲击功的主要因素。