

## 压力容器钢板探伤不合格原因分析及工艺优化

林强<sup>1</sup> 张华<sup>1</sup> 陈国威<sup>2</sup> 周琦<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 武汉钢铁股份有限公司炼钢总厂, 武汉 430083)

**摘要** 试验 12MnNiVR 压力容器钢板 ( $\% : \leq 0.15C, 0.15 \sim 0.40Si, 1.20 \sim 1.60Mo, \leq 0.008P, \leq 0.018S, 0.15 \sim 0.40Ni, \leq 0.30Cu, 0.02 \sim 0.06V$ ) 的生产工艺为 KR 铁水脱硫-90 t BOF-RH-210 ~ 300 mm 板坯连铸-轧制成 20 ~ 30 mm 钢板, 用扫描电镜分析了容器钢板, 研究 12MnNiVR 容器钢 RH 精炼和连铸过程钢液全氧含量、夹杂物数量、粒径分布、形貌和组成。结果表明,  $Al_2O_3$  夹杂物经轧制发展形成线状缺陷是钢板探伤不合格主要原因; RH 精炼过程钢水偏低, 吹氧量高和连铸过程钢液二次氧化易造成  $Al_2O_3$  夹杂物超标; 通过控制 BOF 出钢温度 1 650  $^{\circ}C$ , RH 前钢水温度  $\geq 1 610$   $^{\circ}C$ , 减少 RH 精炼过程升温吹氧量, RH 循环时间  $\geq 10$  min, 加强保护浇铸等工艺措施, 容器钢板探伤合格率由 96.85% 提高到 99.07%。

**关键词** 12MnNiVR 容器钢板 探伤不合格  $Al_2O_3$  夹杂 RH 精炼 保护浇铸

## Analysis on Unqualified Pressure Vessel Steel Plate by Nondestructive Test and Optimization of Process

Lin Qiang<sup>1</sup>, Zhang Hua<sup>1</sup>, Chen Guowei<sup>2</sup> and Zhou Qi<sup>2</sup>

(1 Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 General Steelmaking Works, Wuhan Iron and Steel Co Ltd, Wuhan 430083)

**Abstract** The production process of tested 12MnNiVR pressure vessel steel plate ( $\% : \leq 0.15C, 0.15 \sim 0.40Si, 1.20 \sim 1.60Mn, \leq 0.008P, \leq 0.018S, 0.15 \sim 0.40Ni, \leq 0.30Cu, 0.02 \sim 0.06V$ ) is KR metal desulfurization-90 t BOF-RH-210 ~ 230 mm slab casting-rolling to 20 ~ 30 mm steel plate. The liquid total oxygen content, inclusions number, inclusion size distribution, morphology and ingredient of unqualified specimen of 12MnNiVR pressure vessel steel plate in RH refining and casting process have been studied by scanning electron microscope. Results show that the linear  $Al_2O_3$  defect formed by rolling is main reason of un-qualification of plate by nondestructive test; with process measures including controlling BOF tapping temperature 1 650  $^{\circ}C$ , liquid temperature before RH refining  $\geq 1 610$   $^{\circ}C$ , decreasing oxygen blowing amount in RH refining process, strengthening shielding process and RH cycling time  $\geq 10$  min, the qualified rate of pressure vessel steel plate by nondestructive test increases from original 96.85% to 99.07%.

**Material Index** 12MnNiVR Pressure Vessel Steel Plate, Unqualified Plate by Nondestructive Test,  $Al_2O_3$  Inclusion, RH Refining, Shielding Casting

随着压力容器应用领域向高压、高温、大容量等方向发展, 压力容器钢质量要求越来越高<sup>[1-2]</sup>, 探伤合格率是确保其内部质量主要措施。国内压力容器钢生产企业针对提高探伤合格率开展了大量研究<sup>[3-7]</sup>, 研究表明, 造成钢板探伤不合格的主要原因是夹杂、偏析、疏松和裂纹等。

武钢炼钢总厂二分厂是国内压力容器钢板生产的主要企业之一, 主要包括 15CrMoR、16MnDR、Q345R、Q370R、09MnNiDR、12MnNiVR-CFD、13MnNiMoR 等钢号, 2014 年 ~ 2015 年钢厂探伤合格率平均 96.85%。本文通过对探伤不合格容器钢

板取样分析, 并通过对压力容器钢生产过程质量跟踪, 分析探伤不合格原因, 提出有效控制措施, 进一步提高探伤合格率, 提高产品质量和经济效益。

### 1 容器钢生产工艺

武钢二炼钢分厂容器钢板炼钢生产工艺为: 90 t KR 脱硫  $\rightarrow$  90 t 转炉炼钢  $\rightarrow$  90 t RH 精炼  $\rightarrow$  (210 ~ 300) mm  $\times$  (900 ~ 1 550) mm 板坯连铸-轧制成 20 ~ 30 mm 钢板。以低合金压力容器钢 12MnNiVR 开展研究, 其成分如表 1。

### 2 探伤缺陷检测分析

取 12MnNiVR 20 mm 和 30 mm 两种规格中厚板

通讯作者: 张华, 副教授, 武汉科技大学材料与冶金学院冶金工程系, 武汉 430081

E-mail: huazhang@wust.edu.cn

表 1 12MnNiVR 钢化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of steel 12MnNiVR / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V
≤ 0.15	0.15 ~ 0.40	1.20 ~ 1.60	≤ 0.008	≤ 0.018	0.15 ~ 0.40	≤ 0.30	0.02 ~ 0.06

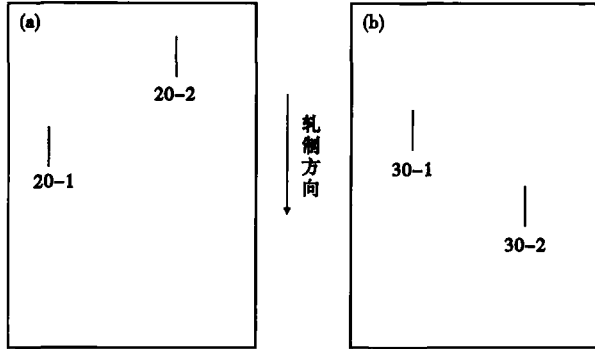


图 1 20 mm(a) 和 30 mm(b) 12MnNiVR 容器钢板探伤缺陷分布

Fig.1 Distribution of defect in 20 mm (a) and 30 mm (b) plate of 12MnNiVR pressure vessel steel by nondestructive test

探伤不合格钢 20 cm × 30 cm 板样各 1 块, 在实验室对钢板样使用手持式探伤仪检测, 探伤分布情况如图 1 所示。

由图 1 可见, 20 mm 和 30 mm 钢板各有两处缺陷, 分别标记为 20-1、20-2、30-1、30-2, 4 个缺陷均沿轧制方向发展, 是由铸坯内部缺陷经轧制发展而成。同时, 检测结果发现 20-1 缺陷距上表面 14.3 mm, 20-2 缺陷距上表面 13.9 mm, 30-1 距上表面 24 mm, 30-2 距上表面 23.1 mm, 可见 4 个缺陷发生的位置均为距上表面约 1/4 处。

对 4 个缺陷采用线切割取覆盖缺陷的 10 mm × 10 mm 试样, 分别对 4 个试样探伤缺陷位置进行扫描电镜 (PHILIPS XL30 TMP) 和能谱仪 (EDAX PHOENIX) 分析, 检测结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 4 个试样缺陷位置都有夹杂物存在, 3 个试样为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1 个为 MnS。结合 4 个探伤缺陷发生处于板材的厚度位置, 可以断定 12MnNiVR 探伤不合格的原因为钢液中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂和少量 MnS 夹杂没有上浮去除, 被凝固前沿捕捉到厚度 1/4 处, 经轧制发展形成线状缺陷。

### 3 探伤缺陷成因分析

#### 3.1 研究方案

RH 精炼和浇注过程对压力容器钢夹杂物影响显著, 选取 12MnNiVR 钢 1 个 5 炉连浇浇次, 5 炉钢在 RH 精炼和连铸过程中的工艺参数如表 2 所示, 对其精炼和连铸过程钢液氧含量和夹杂物情况进行了取样分析。RH 精炼过程跟踪连浇的第 2 炉和第 3 炉, 分别取 RH 到站、微调、微调 3、6、9 min, RH 结束 6 个钢样。另外, 对连浇的 5 炉均取每炉浇注 3 min 和 25 min 时的 2 个钢样。钢样制备后, 通过 TC500 氧氮分析仪进行全氧分析, 采用 MIT 金相显微镜对每个试样统计 30 个 100 倍视场分析夹杂物平均数量和尺寸分布。同时, 对部分工序试样进行小样电解, 再使用前经扫描电镜和能谱仪进行夹杂物形貌和成分分析。

#### 3.2 炼钢过程钢液夹杂物变化规律

由图 3 可见, 两炉钢到站至微调前全氧都有增加, 这是由于吹氧升温所致, 由于第 3 炉钢液进站温

表 2 12MnNiVR 容器钢连浇炉次冶炼过程中工艺参数  
Table 2 Parameters of process in continuous-continuous casting steelmaking of 12MnNiVR pressure vessel steel

浇次	钢水量 / t	RH 进站温度 / °C	RH 吹氧量 / m <sup>3</sup>	浇注温度 / °C	拉速 / (m · min <sup>-1</sup> )
第 1 炉	79.3	1 611	18	1 534	0.9
第 2 炉	77.6	1 605	13	1 530	0.9
第 3 炉	78.9	1 596	80	1 533	0.9
第 4 炉	77.1	1 610	17	1 550	0.9
第 5 炉	79.8	1 617	9	1 546	0.9

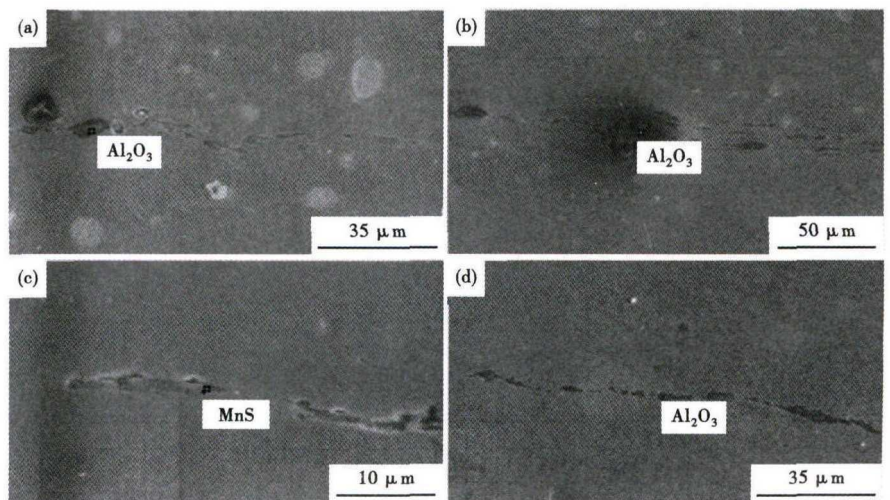


图 2 12MnNiVR 容器钢板探伤缺陷试样 20-1 (a)、20-2 (b)、30-1 (c)、30-2 (d) 中夹杂物形貌, SEM

Fig.2 Morphology of inclusions in defect specimen 20-1 (a), 20-2 (b), 30-1 (c) and 30-2 (d) of 12MnNiVR pressure vessel steel by nondestructive test, SEM

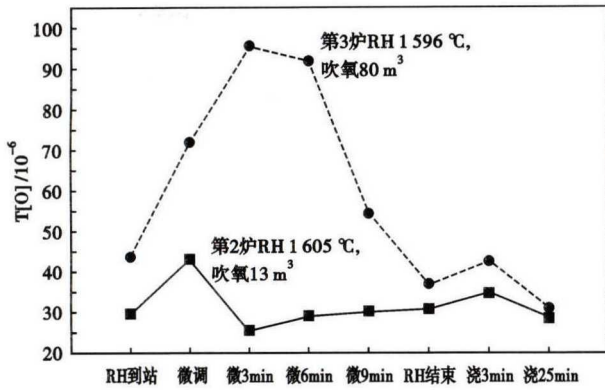


图3 12MnNiVR 容器钢炼钢过程 RH 钢水温度和吹氧量对钢中全氧量的影响

Fig.3 Effect of RH liquid temperature and oxygen blowing amount on total oxygen content in steel during steelmaking process of 12MnNiVR pressure vessel steel

度比第2 炉低 10 °C,吹氧量较大,全氧峰值比第2 炉高  $54 \times 10^{-6}$ ,也容易形成较多  $Al_2O_3$  夹杂物;微调后经真空循环全氧降低,第2 炉循环3 min 后全氧至  $25 \times 10^{-6}$ ,而第3 炉由于吹氧量大,循环约12 min

才降到  $37 \times 10^{-6}$ ;连铸开浇时由于二次氧化作用,氧含量又小幅上升,浇注中期氧含量又降到较低水平;由于第3 炉钢液 RH 进站温度偏低,吹氧量大,各工序钢液全氧都高于第2 炉。

由以上分析可知,如不需大量吹氧升温炉次,微调后 RH 循环6 min 即可控制全氧含量;如进行大量吹氧升温炉次,微调后 RH 循环至少10 min 才能保证全氧含量较低。

由图4 和图5 可以看出:

(1)第2 炉和第3 炉钢的夹杂物数量和夹杂物面积比变化规律一致。RH 进站至微调前,夹杂物数量先略有减少;随着加铝脱氧合金化,夹杂物数量迅速增加,继续循环6 min 后,夹杂物数量开始迅速减少;连铸开浇由于二次氧化原因,夹杂物数量略有增加,浇注中期又降低。

(2)第3 炉的升温吹氧量较大,各工序夹杂物数量也多于第2 炉。

(3)钢中夹杂物大多数都  $< 10 \mu m$ ,  $10 \mu m$  以上

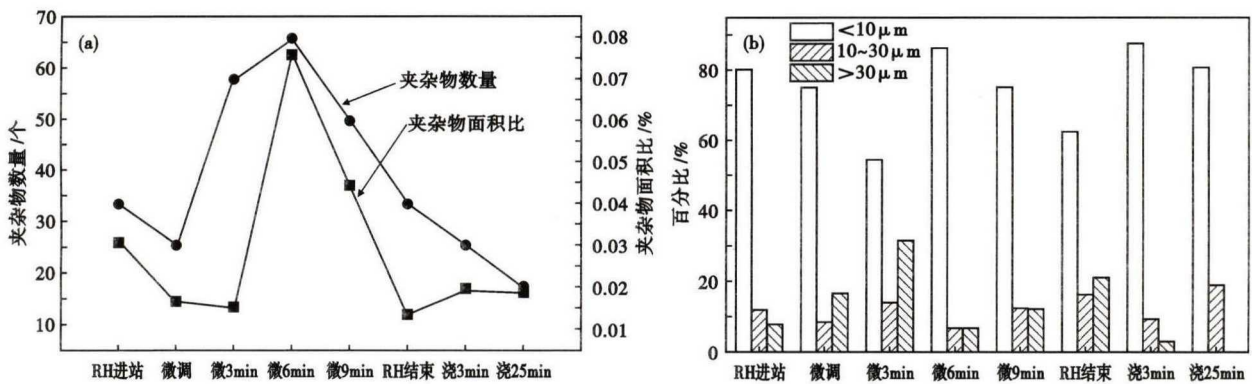


图4 12MnNiVR 容器钢连浇第2 炉钢液(RH 钢水1 605 °C,吹氧  $13 m^3$ )各工序夹杂物数量、面积比(a)和粒度分布(b)

Fig.4 Number and area ratio of inclusions (a) and distribution of size of inclusions (b) in liquid of 2nd heat (RH liquid blowing oxygen  $13 m^3$  at  $1 605 \text{ }^\circ\text{C}$ ) of continuous-continuous casting of 12MnNiVR pressure vessel steel at each procedure

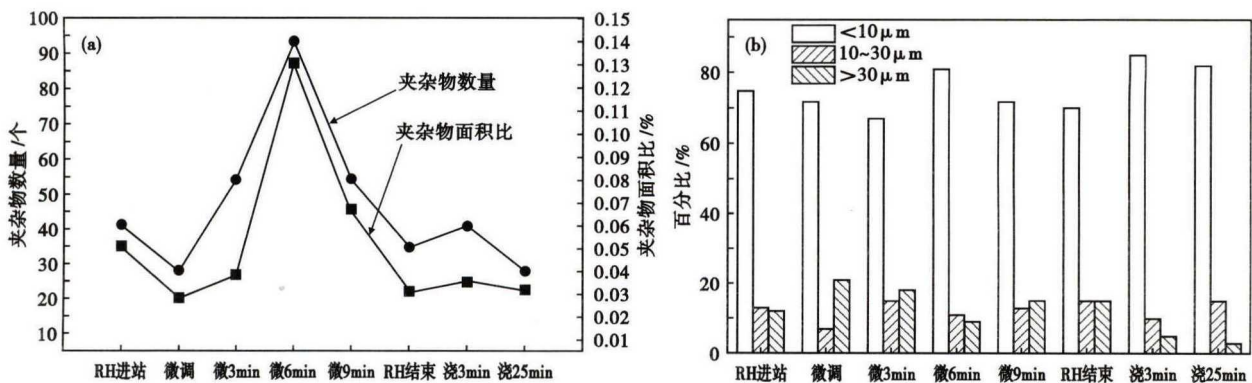


图5 12MnNiVR 容器钢连浇第3 炉钢液(RH 钢水1 596 °C,吹氧  $80 m^3$ )各工序夹杂物数量、面积比(a)和粒度分布(b)

Fig.5 Number and area ratio of inclusions (a) and distribution of size of inclusions (b) in liquid of 3rd heat (RH liquid blowing oxygen  $80 m^3$  at  $1 596 \text{ }^\circ\text{C}$ ) of continuous-continuous casting of 12MnNiVR pressure vessel steel at each procedure

的夹杂物较少。尺寸 > 10 μm 的夹杂物在 RH 真空处理阶段是先增加后减少,这是由于在 RH 精炼初期,在 RH 真空室及下降管附近,由于钢液的剧烈混合,湍动能大,流速快,小颗粒夹杂物通过湍流碰撞聚合长大,碰撞形成的大型夹杂物又会通过气泡或 Stokes 上浮去除<sup>[8-11]</sup>,导致大颗粒夹杂物所占百分比增大;随着精炼的进行,大颗粒以较快的速度上浮去除,数量逐渐减小;浇注过程中,尺寸 > 30 μm 夹杂物所占百分比很低,说明钢中大颗粒夹杂物在中间包内被上浮去除。

### 3.3 连浇过程中钢液夹杂物变化规律

由图 6 可见,由于开浇和换包非稳态过程,各炉次浇注 3 min 钢液全氧含量明显高于浇注 25 min,第 1 炉开浇尤为明显,全氧增加了  $13 \times 10^{-6}$ ;RH 升温吹氧量较大的第 3 炉和第 5 炉全氧含量均高于吹氧量较少的第 2 炉和第 4 炉;夹杂物数量变化规律和全氧含量一致;除了开浇第 1 炉,浇注 25 min 试样大于 30 μm 的夹杂物略有增加,这是由于随着浇

注进行,钢包内钢液的夹杂物继续聚集<sup>[12-13]</sup>。

### 3.4 炼钢过程钢液夹杂物形貌和组成变化

跟踪两炉钢各工序夹杂物形貌和类型基本相同,RH 进站和 RH 结束钢液夹杂物形貌和组成如图 7 所示,浇注 3 min 和 25 min 夹杂物形貌和组成如图 8 所示。

由图 7 可以看出,RH 进站样夹杂物主要为  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $FeO$  和  $CaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$  等脱氧产物及少量耐材带入  $MgO$ ,经 RH 真空循环精炼则主要为  $Al_2O_3$ 、 $CaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$  和少量  $MgO$ 、 $SiO_2$ 、 $FeO$  则被去除或还原,并出现少量较大尺寸  $Al_2O_3$  夹杂。

由图 8 可以看出,由于开浇易发生钢液二次氧化,浇注 3 min 钢样夹杂物组成与 RH 精炼结束样相比, $FeO$  明显增加,随着浇注的稳定,浇注 25 min 钢样夹杂物  $FeO$  又有所减少。

另外,对比 RH 结束钢液成分,连铸中间包钢液的  $Als$  含量平均降低了 0.01%,说明钢液在浇注平台钢包至中间包钢液发生了二次氧化,保护浇注还

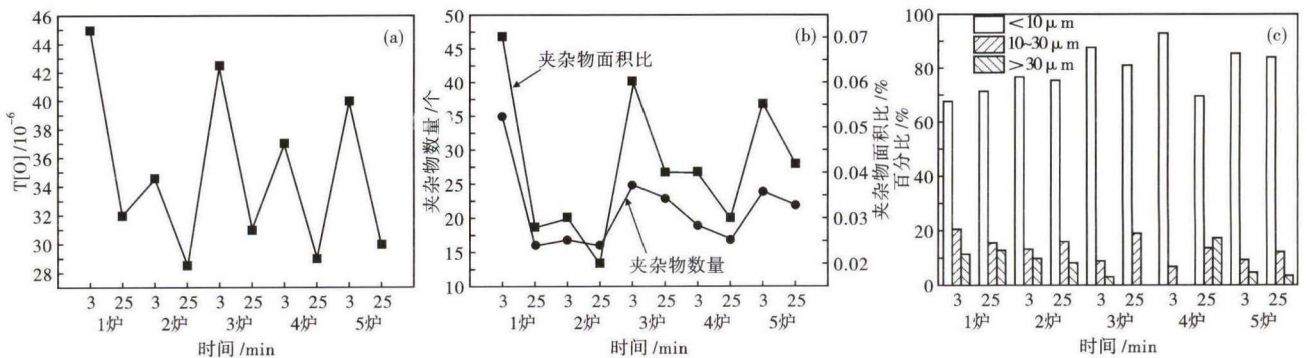


图 6 12MnNiVR 容器钢 5 炉连浇各炉次钢液全氧含量(a)、夹杂物数量和面积比(b)及粒度分布(c)

Fig. 6 Total oxygen content in liquid (a), number and area ratio of inclusions (b) and distribution of size of inclusions in liquid of each heat of continuous-casting 5 heats of 12MnNiVR pressure vessel steel

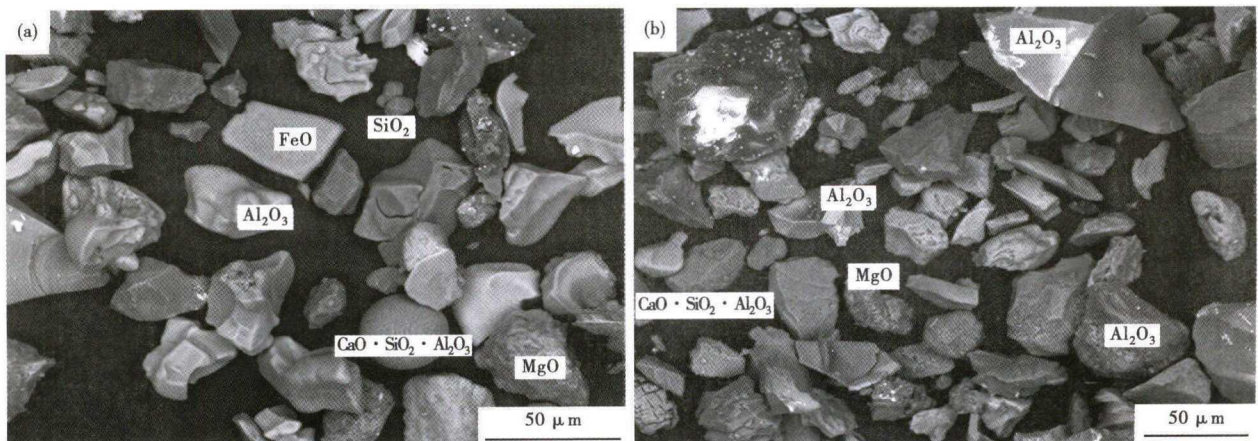


图 7 12MnNiVR 容器钢 RH 进站样(a)和结束样(b)中夹杂物形貌及成分

Fig. 7 Morphology and ingredient of inclusions in specimen sampling at beginning (a) and end (b) RH refining of 12MnNiVR pressure vessel steel

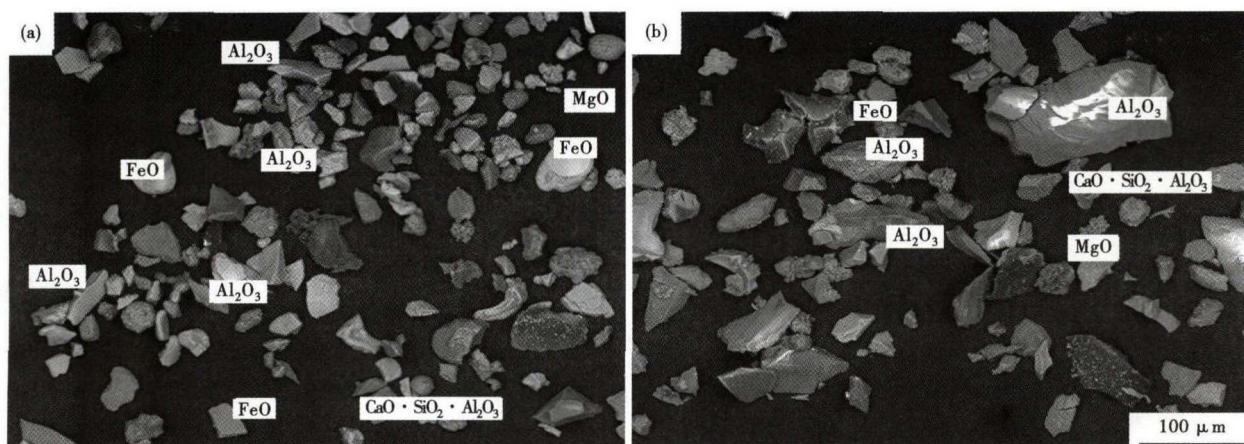


图8 12MnNiVR 容器钢浇铸 3 min 钢样(a)和 25 min 钢样(b)中夹杂物形貌及成分

Fig. 8 Morphology and ingredient of inclusions in specimen sampling in 12MnNiVR pressure vessel steel casting for 3 min (a) and 25 min (b)

需加强。

#### 4 控制措施及效果

(1) 保证出钢温度 1650  $^{\circ}C$ , 减少低温出钢炉次, 严格控制出钢时间标准, 避免 6 min 以上出钢时间, 同时加强钢包管理, 保证烘烤时间, 控制钢包周转时间 60 min 以内, 保证 RH 到站钢水温度在 1610  $^{\circ}C$  以上, 减少 RH 精炼过程的升温吹氧量;

(2) 根据 RH 精炼中钢液升温吹氧量, 确定合理的循环时间, 吹氧量升温 10  $^{\circ}C$  以上, 微调后保证循环时间在 10 min 以上;

(3) 加强连铸过程全程保护浇注, 尤其是钢包长水口氩封, 并严格规范开浇、换包操作, 防止钢液发生二次氧化。

通过采取以上控制措施, 武钢二炼钢分厂 2016 年 7 月 ~ 12 月生产压力容器钢板探伤合格率由以前的

96.85% 提高到 99.07%。

#### 5 结论

(1) 压力容器钢板探伤不合格主要原因为钢液中  $Al_2O_3$  夹杂没有上浮去除, 被凝固前沿捕捉到厚度 1/4 处, 经轧制发展形成线状缺陷。

(2) RH 精炼过程如大量吹氧升温, 钢液中  $Al_2O_3$  夹杂物会明显增加, 需保证足够的循环时间去夹杂物。

(3) 连铸开浇、换包等非稳态过程以及保护浇注控制不严, 钢液易发生二次氧化, 造成  $Al_2O_3$  夹杂物增加。

(4) 通过控制 RH 精炼升温吹氧量, 保证 RH 循环时间, 加强保护浇注, 规范开浇、换包操作, 压力容器钢板探伤合格率由 96.85% 提高到 99.07%。

#### 参考文献

- [1] 张朝生. 新开发的高性能锅炉和压力容器用厚板[J]. 宽厚板, 2000, 7(6): 35-39.
- [2] 熊建新. 石油化工压力容器用钢的选择问题[J]. 冶金标准化与质量, 2002, 40(3): 1-2.
- [3] 李连任, 刘德红, 毕于顺, 等. 厚规格压力容器板探伤不合格原因分析与改进措施[J]. 天津冶金, 2011(2): 46-48.
- [4] 后宗保. 16MnR 容器板性能不合格的原因[J]. 物理测试, 2004, 22(5): 35-38.
- [5] 李玉奇. 锅炉压力容器用 16Mn 钢冷弯不合格原因分析[J]. 理化检验: 物理分册, 1996, 32(6): 56-56.
- [6] 朱建业, 李连任. 调质型压力容器板探伤不合格原因分析与改进措施[J]. 天津冶金, 2012(1): 22-24.
- [7] 唐海燕, 李京社, 杨树峰, 等. EAF-LF/VD-CC 工艺生产压力容器钢的洁净度研究[J]. 钢铁, 2008, 43(1): 30-32.
- [8] 张爱民, 陈 晔. 锅炉压力容器用钢板中夹杂物的形成原因[J]. 理化检验, 2009, 45(5): 266-268.
- [9] Oh Y J, Lee B S, Hong J H. The Effect of Non-Metallic Inclusions on the Fracture Toughness Master Curve in High Copper Reactor Pressure Vessel Welds[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 301(2-3): 108-117.
- [10] 王德永, 吕 铭, 刘承军, 等. RH 精炼过程钢中非金属夹杂物行为及演变规律[J]. 东北大学学报自然科学版, 2013, 34(3): 373-377.
- [11] Yang G W, Chu R S, Wang X H, et al. Removal Behavior of Inclusion During RH Vacuum Treatment of X70 Pipeline Steel[J]. Iron & Steel, 2014, 49(1): 34-38.
- [12] 耿佃桥, 雷 洪, 赫冀成. 不同工艺因素对 RH 精炼夹杂物去除过程的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(10): 26-30.
- [13] 张钟铮, 林 洋, 尚德礼, 等. RH 精炼过程非金属夹杂物[J]. 钢铁, 2014, 49(4): 32-35.

林 强(1990-), 男, 硕士研究生, 2013 年武汉科技大学(本科)毕业, 洁净钢生产技术。E-mail: 463926848@qq.com

收稿日期: 2017-04-25