

· 技术讨论 ·

厚钢板超声波探伤缺陷成因及控制

夏保卫 赵向政 张 杰
(舞阳钢铁有限责任公司)

摘 要 本文介绍了锭—材钢板超声波探伤缺陷类型,通过低倍检查和能谱分析,确认缺陷部位的夹杂物种类,指出缺陷产生的原因,提出相应的控制措施。

关键词 超声波探伤缺陷 夹杂物 控制措施

Causes and Control Measures of Ultrasonic Detected Defects on Heavy Plate

Xia Baowei, Zhao Xiangzheng and Zhang Jie
(Wuyang Iron and Steel Co. Ltd)

Abstract Ultrasonic detected defect type of heavy plate rolled from ingot is presented. Inclusion types at the defects are defined by macrographic examination and energy spectrum analysis. Causes of defects are pointed out. Corresponding control measures are raised.

Keywords Ultrasonic flaw detection, Defect inclusion, Control measures

1 前言

舞阳钢铁有限责任公司是以生产宽厚钢板为主的特钢企业,拥有轧制压力 42 000 kN 的 4 200 mm 宽厚板轧机,“特厚、特宽”是其产品特色。供轧机作原料用的扁钢锭单重为 11 ~ 35 t,钢板最大轧制厚度可以达到 400 mm 以上。因受钢锭凝固结晶的特点及锭—材压缩比的限制,钢板厚度与超声波探伤等级之间存在一定的关系。通常国家标准对 100 mm 厚度以下钢板的超声波探伤等级要求有明确规定。而对于超出国家标准的部分,必须通过大量钢板的实际探伤结果,总结出钢板的实际探伤等级,满足用户的订货要求。通过对缺陷部位取样做低倍检验和能谱分析,对形成缺陷的原因进行判断,制定相应的控制措施,优化工艺,是提高钢板探伤等级和合格率的重要手段。

2 钢板探伤缺陷类型的划分

目前订货合同中常用钢板超声波探伤标准有: Se1072—77、GB/T4730—2005、EN10160: 1999

等,本文讨论的钢板厚度为 120 ~ 200 mm,探伤级别要求为 EN10160: 1999 中的 S1E1,钢种为 EN10025 标准中的 S355JO。用直探头检验扁平产品的验收标准如表 1、2。

探伤标准尤其强调了钢板边缘部位的超声波探伤要求,对于通常采用电炉 LF 精炼 VD 真空处理 模铸 轧钢 探伤检查 入库工艺生产的钢板,根据钢板的超声波探伤情况,常见超声波探伤标准缺陷类型可以描绘为:

2.1 点状密集缺陷

整张钢板从头至尾或从头至板长 1/2 以上都为点状密集缺陷,连续不断,缺陷波高多在 30% ~ 80% 之间,缺陷为单层或多层,缺陷深度约位于板厚 1/2 处,对底波影响 2 ~ 8 dB。

2.2 尾部分层或面积缺陷

钢板尾部部分区域(板长的 1/4 ~ 1/6)有一处或多处分层或面积缺陷,缺陷波在 80% 以上,缺陷对底波影响多数为 4 ~ 6 dB,少数达 10 ~ 18 dB。

表 1 直探头检验扁平产品的验收标准

等级	不可接受的单个不连续 (缺陷)	可接受的群集不连续 (缺陷)	
		考虑的尺寸 (数值)	不允许超过的最大数量
S0	$S > 5\,000\text{ mm}^2$	$1\,000\text{ mm}^2 < S < 5\,000\text{ mm}^2$	在最密集处的 1 m × 1 m 见方的区域内: 20
S1	$S > 1\,000\text{ mm}^2$	$100\text{ mm}^2 < S < 1\,000\text{ mm}^2$	在最密集处的 1 m × 1 m 见方的区域内: 15
S2	波高大于 11 mm 平底孔特性曲线的不连续 (缺陷)	N_2 (8 ~ 11 mm 之间)	在最密集处的 1 m × 1 m 见方的区域内: 10
S3	波高大于 8 mm 平底孔特性曲线的不连续 (缺陷)	N_3 (5 ~ 8 mm 之间)	在最密集处的 1 m × 1 m 见方的区域内: 10

表 2 检验扁平产品边缘区的验收标准

等级	允许的单个不连续 (缺陷) 尺寸		考虑的最小不连续 (缺陷) 尺寸 L_{\min}/mm	每 1 m 长度内小于最大面积 S_{\max} 且大于 L_{\min} 的不连续允许 (缺陷) 数
	L_{\max}/mm	S_{\max}/mm^2		
E0	100	2 000	50	6
E1	50	1 000	25	5
E2	40	500	20	4
E3	30	100	15	3
E4	20	50	10	2

3 缺陷部位的低倍和能谱分析

为准确地了解缺陷部位的情况,对缺陷部位经超声波探伤确认后,取样加工,做厚度方向

的拉伸,在断口部位做低倍和电子图像。

对钢锭帽口线下点状密集缺陷做低倍检验和能谱分析见图 1 及表 3。

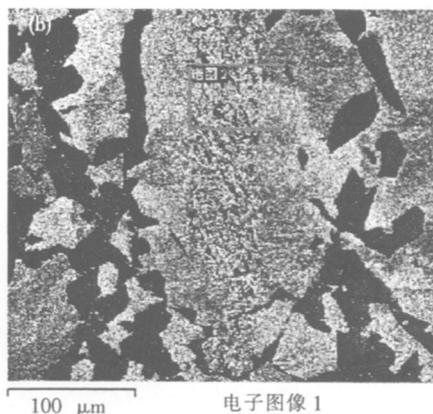
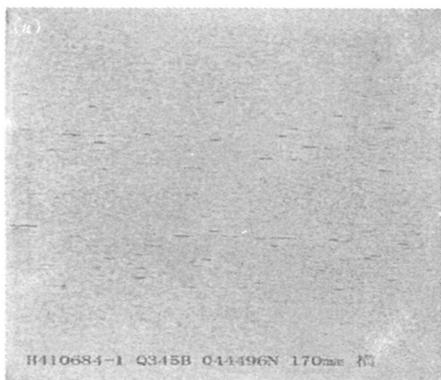


图 1 点状密集缺陷的低倍检验和电子图像

表 3 点状密集缺陷的能谱分析

元素	重量百分比	原子百分比
Si K	0.55	1.08
Mn K	2.98	3.01
Fe K	96.47	95.90
总量	100.00	

由图 1(a)和表 3 可以看出,点状密集缺陷部位的疏松比较严重,与此相伴的夹杂物并没有明显增加。

对整板点状密集缺陷区做低倍检验(图 2),可心看出:被检验试样上夹杂物分布弥散,而且能谱检验成分相似,O、Al 分别占 40%和 23%左右,

应该是钢锭中大颗粒夹杂物在轧制时被破碎而成,这种情况的出现,容易造成探伤不合格。整炉钢液的洁净度出现了问题,很容易造成同炉钢水多支钢锭出现同类情况,影响钢板探伤合格率的

提高。

根据钢锭尾部探伤缺陷的低倍检验汇总情况,可以将其分为锭—材尾部分层缺陷和锭—材尾部裂纹缺陷两类。

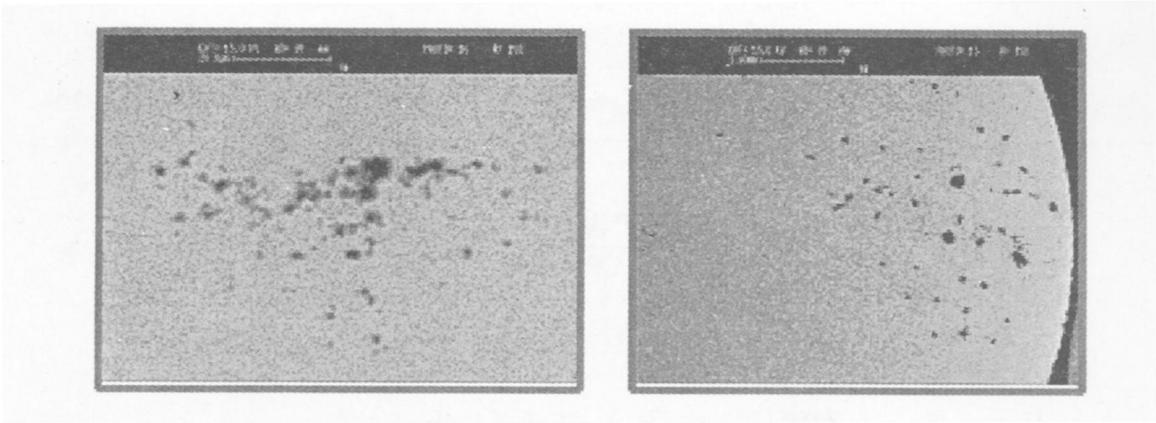


图 2 典型弥散夹杂物示意图

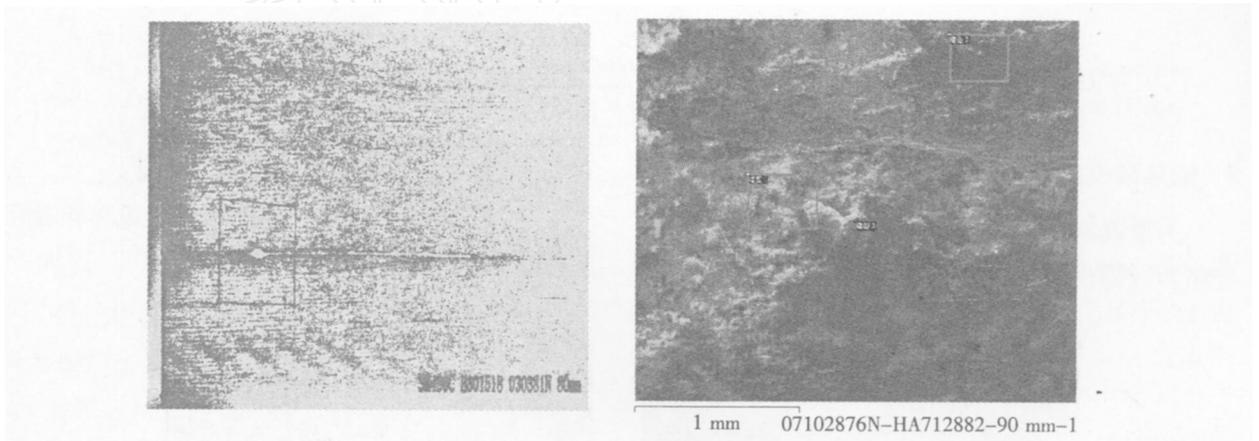


图 3 分层缺陷的低倍检验及电子图像

第一类为锭—材钢板尾部分层缺陷(图 3 和表 4)。由图 2 和图 3 (b)可以看出,该试样低倍检验的分层缺陷非常明显,缺陷部位的能谱反映

出 [Si]元素占主导地位,占到了总量的 45% ~ 50%。表 4 可以看出,在缺陷部位分布的主要元素以 O、Al 为主,主要是三氧化二铝或铝酸钙。

表 4 点状密集缺陷的能谱分析重量百分比显示的所有结果

谱图	O	Mg	Al	Ca	Ti	Fe	总的
谱图 1	44.99	1.51	37.40	3.63	0.68	11.79	100.00
谱图 2	38.75	0.77	31.94	3.36	0.50	24.68	100.00
谱图 3	39.04	1.06	34.51	1.42		23.97	100.00
最大	44.99	1.51	37.40	3.63	0.68	24.68	
最小	38.75	0.77	31.94	1.42	0.00	11.79	

第二类为锭—材钢板尾部裂纹缺陷(图 4 和

表 5)。由图 3 (b)和表 5 可以看出,一些试样局

部有较为粗大的裂纹存在(宽度大于 $100\ \mu\text{m}$, 总长有数毫米), 这些裂纹源很可能在柱状晶晶间,

如果加热制度控制不合适, 会在轧制过程中加重这些现象。

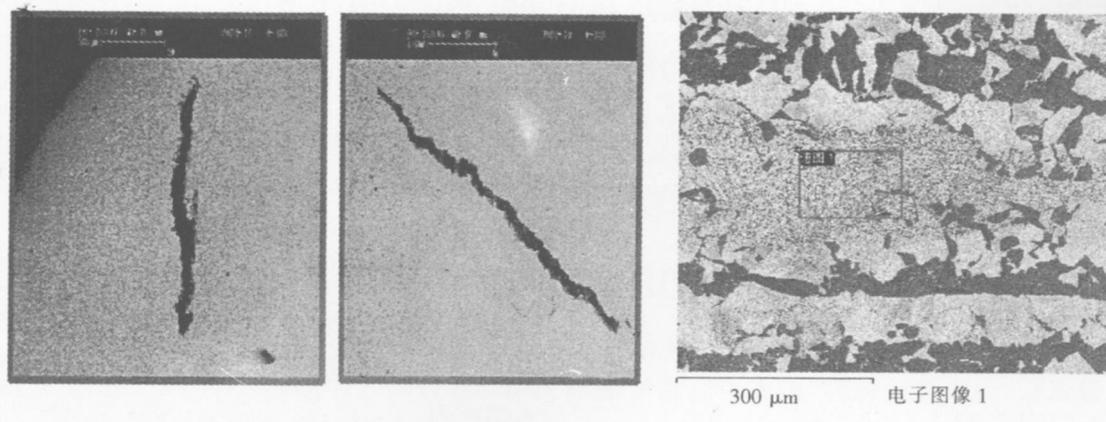


图 4 典型裂纹和裂纹区域的能谱图

表 5 裂纹缺陷的能谱分析

元素	重量百分比	原子百分比
Si K	0.77	1.52
Mn K	2.11	2.13
Fe K	97.12	96.35
总量	100.00	100.00

4 钢锭的组织结构与缺陷部位的关系

根据对锭—材钢板超声波探伤不合的统计数据, 点状密集缺陷约占探伤不合缺陷总量的 80% 左右, 其余为尾部分层或面积缺陷, 这与钢锭的凝固结构和机理有着密切关系。

4.1 镇静钢钢锭的凝固结构

一般来说, 镇静钢钢锭的凝固结构具有 3 个性质、晶体形态不同的区域。

1) 激冷区: 钢锭表面细晶粒区, 它是由无规则排列的细小等轴晶粒形成的。

2) 柱状晶区: 是由垂直于钢锭模壁、彼此平行的柱状晶所组成的。

3) 中心等轴晶区: 处于钢锭的中心区域, 由等轴晶粒组成。晶粒尺寸比激冷区的大得多。

这 3 个主要区域的大小随凝固条件的不同而变化。通常, 激冷区较薄, 只有几到十几毫米。其厚度决定于钢锭模的冷却能力和钢的导热性等, 同时这一区域的化学成分相当于液相成分, 其余两个区域较厚, 在不同的凝固条件下, 柱状晶区和

中心等轴晶区在钢锭截面上所占的面积是不同的。一般柱状晶区约为钢锭厚度的 $1/4 \sim 1/6$ 。另外, 大钢锭底部还有球型等轴晶区, 化学成分纯净, 是由“结晶雨”沉淀于底部所致。

4.2 镇静钢钢锭凝固结构的形成机理及与探伤缺陷的关系

成分过冷理论较好地解释了镇静钢钢锭凝固结构的形成机理。即在钢锭凝固过程中, 随着柱状晶的不断生长, 凝固层变厚, 散热强度逐渐减小, 两相区宽度不断扩大。由于结晶速度减慢, 杂质不断向凝固前沿浓集, 于是凝固前沿的固液两相区形成了一个杂质浓集区, 使该区的液相熔点降低, 过冷度减小。但在浓集区前面的区域, 杂质含量偏低, 液相的熔点高于实际温度, 从而出现了成分过冷区, 结晶首先在这里进行。

由于 V 型偏析存在于锭心粗大等轴晶区, 其纵向范围从锭高 $1/3$ (从底部算起) 至保温帽。它是最后凝固钢液所形成的硫、磷、碳等的正偏析, 在钢板断面上表现为中心偏析, 通常与中心疏松伴生。对应于钢板的探伤情况, 通常表现为点状密集缺陷。

而在钢锭尾部, 最先进入锭模的钢液由于模壁吸热较快, 迅速形成粘稠层, 钢水快速凝固, 钢液中的夹杂物 (多为外来夹杂物) 来不及上浮而被凝固壳的树枝晶捕获, 成为大型夹杂物。在钢水过热度较低时, 补缩不好, 易形成小缩孔, 轧制

后表现为分层缺陷。而对于钢锭尾部轧板后内部出现的裂纹,尚不清楚其产生的机理。

5 减少锭—材钢板超声波探伤缺陷的措施

对于帽口线下点状密集缺陷,钢水自身洁净度是关键,同时要做好钢锭帽口部位的保温,使凝固过程的补缩得以充分进行。

根据钢板探伤的异常情况和现场工艺调查,钢锭本身存在缺陷的主要原因为:

1)电炉出钢时钢水过氧化程度严重,精炼过程为了保持白渣,大量加入硅铁粉,导致炉渣中 CaO 含量偏低, SiO₂ 含量偏高,造成炉渣碱度偏低,影响了炉渣对夹杂物的吸附。

2)真空过程钢包吹氩不良或氩气带漏气,造成真空过程吹氩搅拌弱,导致真空过程夹杂物的碰撞、聚集、长大、上浮的动力学条件较差,制约了钢液中的夹杂物充分进入炉渣。

找出了导致钢锭缺陷的原因,在冶炼过程中,为减少非金属夹杂物含量,主要采取以下措施:

5.1 确保电炉的入炉钢铁料的配碳量,减少过氧化的发生

随着电炉冶炼节奏的加快,吨钢氧气消耗已经由 20 世纪末的 15 ~ 30 m³/t 钢增加到目前的 40 m³/t 钢,要求配碳量由 0.70% 左右增加到 1.20% 左右,有利于氧化阶段促进夹杂物上浮,同时使出钢碳控制在 0.08% 左右的较高水平(以 S355 系列为准),降低粗钢液的氧含量,使游离氧在 150 × 10⁻⁶ 左右,减少精炼过程非金属氧化物的产生。

5.2 精炼坐包定氧,依据氧值来判断钢水的氧含量,确定脱氧剂的种类和用量。

5.3 控制合理精炼周期为 80 min 左右,以保证

精炼过程产生的非金属夹杂物有充分的上浮时间。

5.4 确保真空过程钢包吹氩良好,使真空过程的氩气流量控制为 400 L/min,压力为 0.6 MPa 左右,确保钢水循环次数。

5.5 对于全新包和新渣线钢包,将浇铸温度过热度控制在 50 ~ 60 ℃,避免钢水浇铸过热度偏高,偏析加剧。

5.6 为了防止真空过程顶渣卷入钢液,要求在真空破坏前 10 min,将真空氩气调整至渣面脉动即可,给钢渣分离创造条件,最大程度地避免顶渣卷入钢液中。

5.7 对钢液进行钙处理,根据钙处理能够改变钢液中 Al₂O₃ 夹杂的理论,要求真空前加入 2 ~ 3 kg/t 钢的硅钙合金,以生成低熔点的铝酸盐产物,使其呈液体状态而排除,或以球状存在于钢中,减少簇状 Al₂O₃ 夹杂。

对于钢锭尾部面积缺陷,浇铸系统洁净度是关键,同时要保证钢水浇铸时过热度在 50 ℃ 以上,使凝固过程的补缩得到充分进行。

6 结语

通过控制钢水中氧含量和精炼周期,促进夹杂物去除,帽口线下点密缺陷显著减少;在强化浇铸系统的清洁后,钢锭尾部的内在缺陷也得到了控制,锭—材 S355 钢种按 EN10160:1999 中的 S1E1 探伤,探伤合格率稳定在 97% 以上。

夏保卫,男,2003年毕业于郑州大学工业工程专业,工程师。

收稿日期:2007-08-09