

珠光体偏析带与 Ti(C,N) 对 HG70C 钢热轧板拉伸断口分层的影响

王 芹¹ 彭其春¹ 王理猷¹ 陈 凯¹ 李具中² 李 伟²

(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(集团)公司, 武汉 430080)

摘 要 针对低合金高强焊接钢 HG70C(/% : 0.069 ~ 0.077C、0.07 ~ 0.11Si、1.79 ~ 1.83Mn、0.011 ~ 0.012P、0.004 ~ 0.005S、0.121 ~ 0.123Ti、0.046 ~ 0.047Nb) 8 ~ 12 mm 板拉伸试验后试样断口出现分层的现象, 利用金相显微镜、扫描电镜和能谱仪对断口形貌及分层附近区域进行了观察和分析, 并且统计分析实际生产中加热参数。结果表明, 该钢种分层与热轧工艺无关, 主要与中心珠光体偏析带及偏析处大颗粒 Ti 的碳氮化物有关, 并且在铸坯中发现已有 2 μm 左右的该类析出物颗粒存在, 它们成为疲劳源导致拉伸断口分层。

关键词 低合金高强焊接钢 HG70C 拉伸断口 分层 碳氮化物

Effect of Pearlite Segregation Band and Ti(C,N) on Layering of Tensile Fracture of Steel HG70C Hot Rolled Plate

Wang Qin¹, Peng Qichun¹, Wang Liyou¹, Chen Kai¹, Li Juzhong² and Li Wei²

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; Wuhan Iron and Steel (Group) Corp, Wuhan 430080)

Abstract According to the phenomena of 8 ~ 12 mm plate tensile fracture layering of low alloy high strength welded steel HG70C (/% : 0.069 ~ 0.077C, 0.07 ~ 0.11Si, 1.79 ~ 1.83Mn, 0.011 ~ 0.012P, 0.004 ~ 0.005S, 0.121 ~ 0.123Ti, 0.046 ~ 0.047Nb), the morphology of fracture and area near layering are observed and analyzed by using optical and scanning electron microscope and energy spectrum analyser, and the statistical-analysis of heating process parameters of bloom in real production is carried out. Results show that the layering of the steel plate tensile fracture has nothing to do with heating process for hot rolling, it is mainly related to center pearlite segregation band and large titanium carbo-nitride, and this precipitates with 2 μm is found in casting bloom which are fatigue source lead to layering of tensile fracture.

Material Index Low Alloy High Strength Welded Steel HG70C, Tensile Fracture, Layering, Carbo-Nitride

HG70C 钢是一种具有高强、高韧和良好焊接性能的低合金高强焊接钢, 主要用于各类机械工程结构上^[1], 然而在对 HG70C 钢进行拉伸试验时, 经常出现断口分层现象, 往往会影响钢材的交货率, 甚至报废, 此前已有诸多文献对拉伸分层进行了研究^[2-4], 研究认为分层缺陷主要由铸坯心部偏析处的铌、钛碳氧化物和硫化物夹杂、心部带状组织这些因素引起。

本文就国内钢厂 2010 年生产 HG70C 钢拉伸分层发生率高达 0.7%, 拟通过金相显微镜、扫描电镜及能谱分析仪对典型分层样和未分层样的拉伸断口进行对比检测分析, 以掌握 HG70C 钢拉伸分层的形成原因, 为现场生产提供理论指导。

1 试验材料

钢厂冶炼 HG70C 工艺流程为: 250 t 转炉→RH 精炼→CC→热轧。在热轧检验室选取拉伸后的试样, 研究对象的化学成分和力学性能均符合我国的

低合金高强度结构钢的国家标准 GB/T1591-2008, 结果见表 1 和表 2。表 1 中编号 A[#]、B[#] 分别表示 HG70C 钢分层样和未分层样。

2 试验结果

图 1 为分层试样宏观形貌, 从拉伸断口形貌来看, 在断口的中心线处附近, 有许多平行于轧钢方向

表 1 试验 HG70C 钢的化学成分 / %

编号	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	Nb	N	Cu
A [#]	0.077	0.11	1.79	0.012	0.004	0.032	0.121	0.046	0.005 6	0.054
B [#]	0.069	0.07	1.83	0.011	0.005	0.043	0.123	0.047	0.004 4	0.046

表 2 拉伸断口分层(A[#])和未分层(B[#])的 HG70C 钢板的力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel HG70C plate with tensile fracture layering (A[#]) and without tensile fracture layering (B[#])

编号	状态	板材厚/ mm	板坯宽/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
A [#]	分层	10	1 600	708	786	26.6
B [#]	未分层	8	1 500	675	742	24

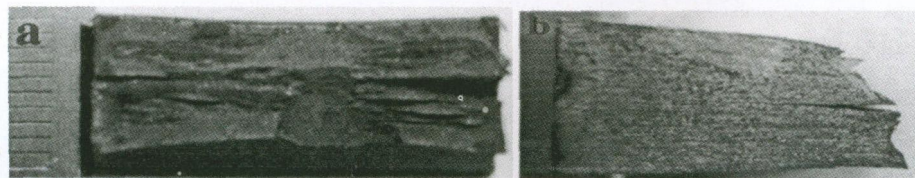


图 1 HG70C 钢板拉伸断口分层正面(a)与侧面(b)宏观形貌
Fig. 1 Macro-morphology of front (a) and side (b) of layering of tensile fracture of steel HG70C plate

的沟槽,其中有一条贯穿的裂纹,深度不一,一般深度在 2~5 mm,最深处竟达 1 cm 左右。

2.1 断口形貌观察

从图 2(a)可以看出分层沟槽处附近的表面呈

自由面特征,整个分层区呈撕裂状条层与韧窝状交替分布的形貌;而在分层区以外的区域,如图 2(b)是韧窝状断口。

由图 2 可知,断口中存在大量的夹杂物颗粒,直径多在 5~6 μm,图 2(a)和(b)的夹杂物扫描电镜能谱图,由图 2(a)可见,Ti 含量高达 48.4%、N 含量高达 31.09%。由图 2(b)中看出,断口中 O、Si、Al、Na 元素含量较高,可能为 Al₂O₃ 或含 Al、Si、Na 的复合夹杂物。

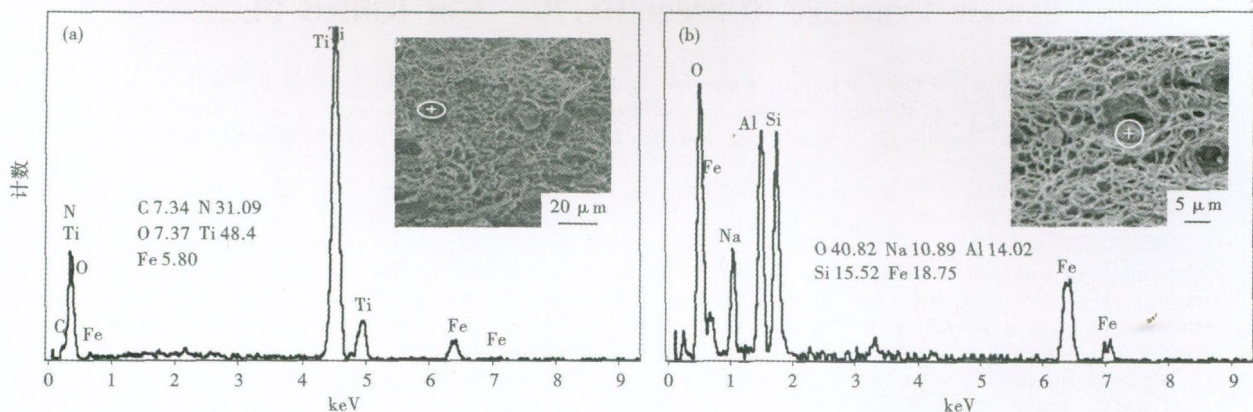


图 2 HG70C 钢板拉伸断口分层微观形貌和夹杂物能谱分析:(a)分层附近区域-撕裂状条层和韧性断裂;(b)远离分层的区域-韧性断裂

Fig. 2 Micro-morphology of tensile fracture layering and energy spectrum analysis of inclusions, steel HG70C plate: (a) area near layering-tear stripe fracture combined with tough fracture; (b) area far from layering-tough fracture

2.2 组织观察

图 3(a₁, b₁, c₁)为分层样组织图,图 3(a₂, b₂, c₂)为未分层样组织图。从图 3(a₁)中可以看到试样中心有两条黑色条带横贯整个视场,在图 3(b₁)晶界上有大颗粒微米级液相析出物,图 3(c₁)在中心有珠光体偏析带,而且偏析带上有大量夹杂物;而未分层样组织图 3(a₂)中,只在试样中心检测到较浅的中心偏析带,整个视场内并无明显的大颗粒析出物与夹杂,且未分层的晶粒较细小且均匀,都在 10 μm 以下。

2.3 夹杂物检测

图 4 为轧板横断面中心缺陷处经过腐蚀后的电镜图和成分图。在分层断口的珠光体带中含有大量的夹杂物,能谱点 1、2、3、4 处夹杂物均为含 Ti、C、S、Mn 的复合夹杂,但随着各元素成分的不同,该夹

杂为长条状、球状、棒状等。能谱点 5 为方形 Ti(C,N)夹杂簇,边长约为 20 μm。另从点 1 处看到,该夹杂有明显被拉伸断裂的痕迹。

断口表面经打磨、抛光后的试样由扫描电子显微镜观察与能谱分析表明,在轧板中心存在边部轮廓清晰的方形夹杂物,其尺寸在 3~7 μm,根据能谱图判断主要成分为 TiN。

为进一步了解该含钛合金钢板中的析出物粒子的产生阶段,选取 HG70C 钢均热前铸坯样,在腐蚀后进行电镜及能谱分析表明,只在铸坯中心处发现大颗粒夹杂,尺寸为 1.6 μm × 2.3 μm 的 TiN 方块夹杂物中含有 Mn、Fe 等成分;有的夹杂物成分也含有 C、S、Ti、Mn、Fe。这也说明成品板中的大颗粒氮化物和硫化物粒子是在铸坯进均热炉前就已析出了^[5]。

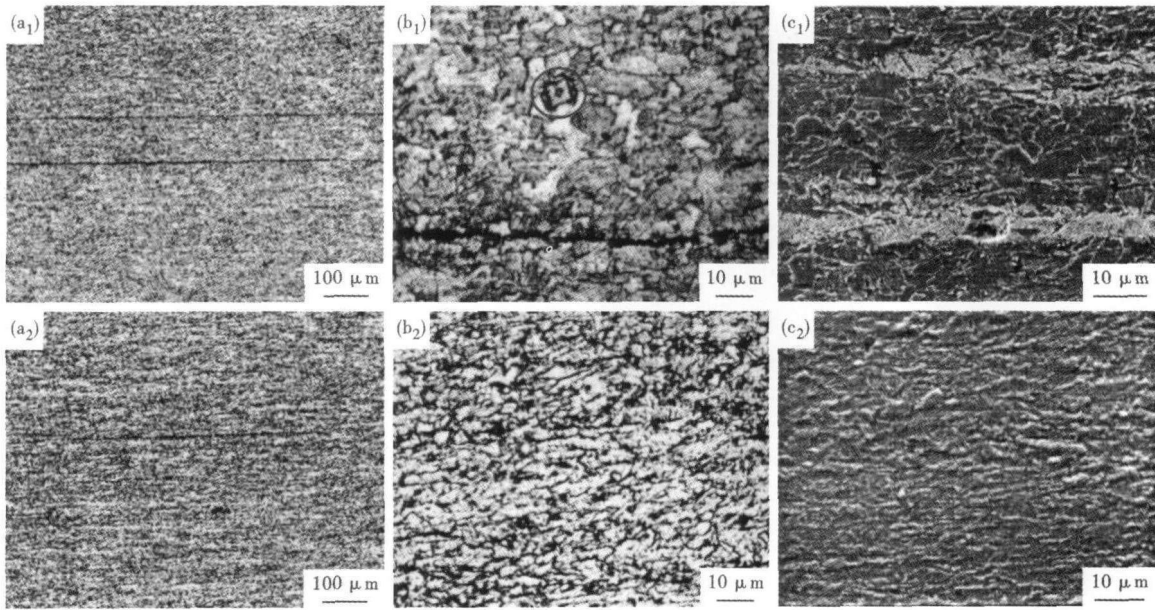


图 3 分层样(a₁, b₁, c₁)与未分层样(a₂, b₂, c₂)中心区域组织形貌:(a₁)明显黑色条带;(b₁)晶界上有大颗粒析出物;(c₁)有珠光体偏析带;(a₂)浅条带;(b₂)无析出物;(c₂)无珠光体偏析带

Fig. 3 Morphology of structure at center of sample with layering (a₁, b₁, c₁) and at center of sample without layering (a₂, b₂, c₂): (a₁) obvious black stripe; (b₁) existing large precipitate at grain boundary; (c₁) existing pearlite segregation band; (a₂) light stripe; (b₂) no large precipitate; (c₂) no pearlite segregation band

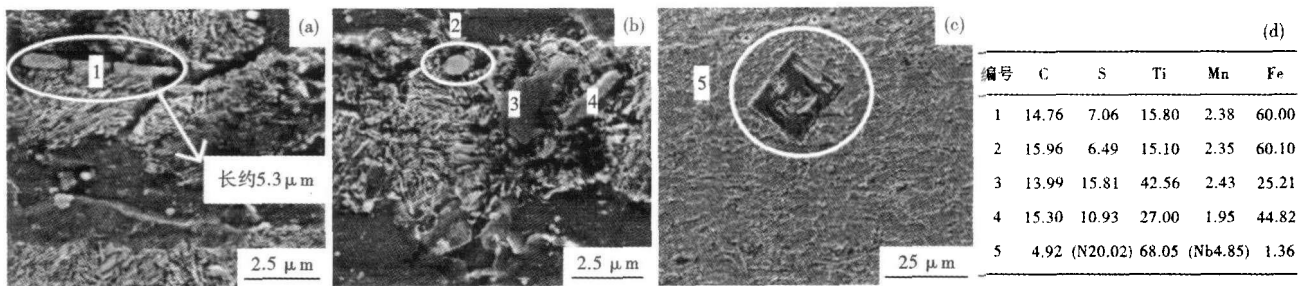


图 4 有拉伸断口分层的试样中心珠光体偏析带上的夹杂物形貌(a, b, c)和能谱分析(d)

Fig. 4 Morphology (a, b, c) and energy spectrum analysis (d) of inclusions in pearlite segregation band in center of sample with tensile fracture layering

3 数据统计分析

运用 Minitab 软件统计钢厂 2010 年 9 月 ~ 12 月 HG70C 钢热轧中加热炉工艺数据共 514 组,其中分层的 44 组。统计分析表明,均热段温度未分层钢板的均值为 1 264.34 ℃,分层钢板的均值为 1 267.27 ℃,相差不到 3 ℃,同时影响钢中析出物较为关键的两个因素终轧温度和卷取温度,其分层与未分层的统计均值相差也不大,而且出炉温度和在炉内总时间对分层的影响也不是很大,但是装炉温度、预热段温度和一加热段温度对钢板的分层影响是较大的。总的来说,未分层的装炉温度为 247 ℃,出炉温度为 1 264 ℃,总温升为 1 017 ℃;分层的装炉温度为 296 ℃,出炉温度为 1 267 ℃,总温升为 971 ℃,比未分层的总温升高。而分层与未分层的钢板

在加热炉内总时间均为 182 min,所以初步认为未分层的板坯在加热炉内加热速度大,这样奥氏体转变时的过热度越大,奥氏体的实际形成温度就越高,导致奥氏体的形核率越高^[6],起始晶粒越细,越利于板坯质量控制。

从另一个方面分析,未分层的装炉温度低,说明连铸后的铸坯的冷却强度更大,而冷却强度大,不仅有利于减轻铸坯的中心偏析,而且也有利于晶粒细化。

4 分析与讨论

无论是从分层的断口形貌扫描电镜图还是断口根部抛光腐蚀后的金相图和电镜图,均能在试样中心部位发现尺寸范围在 1 ~ 14 μm 的碳氮化钛夹杂颗粒,说明中心部位的大型碳氮化钛和 Ti、C、S、Mn

的复合夹杂是导致钢板拉伸中心分层的直接因素。

这是因为当 TiN 夹杂尺寸达到 $6\ \mu\text{m}$ ^[7] 左右时, 由于其高熔点 ($2\ 930\sim 2\ 950\ \text{℃}$), 连铸过程中很难消失, 且 TiN 是一种坚硬的菱状不变形夹杂物, 在轧制过程中易在基体的交界处产生微裂纹, 使轧板韧性下降, 对成品钢的抗疲劳性能产生较大影响, 从而导致拉伸分层, 研究认为其危害与平均尺寸为 $25\ \mu\text{m}$ 的氧化物夹杂相当。而且在均热前铸坯中已经析出碳氮化钛夹杂物, 该粒子应是钢水中析出的液析 TiN, 由于尺寸较大 ($>0.5\ \mu\text{m}$ ^[8]), 是钢液凝固过程中的析出相, 既不能阻止奥氏体晶粒长大, 也不起沉淀强化作用。并在缺陷部位发现夹杂有明显被拉伸后断裂的痕迹, 这也应该是形成微裂纹的裂纹源。故应采取降低中间包过热度, 减小连铸拉坯速度等措施以减小析出物尺寸。

对比分层与未分层组织发现, 在分层处中心有珠光体偏析带, 最宽处在 $22\ \mu\text{m}$ 左右, 而且偏析带上有大量大颗粒微米级液相析出物夹杂物; 而未分层处中心条带较浅, 并无明显的大颗粒析出物与夹杂。虽然分层与未分层的钢板在加热炉内总时间均值都为 $182\ \text{min}$ 左右, 但是分层的钢板数据区间跨度较大, 说明数据波动大, 在炉内总时间有不足 $3\ \text{h}$ 的, 这样铸坯中元素在加热炉中扩散不充分, 导致元素分布不均匀, 在轧制后钢板出现平行于轧制方向的富 Mn 带和贫 Mn 带^[9], 由于 Mn 含量会对奥氏体向铁素体的转变温度有影响, 在贫 Mn 带先发生铁素体转变, 后在富 Mn 带上形成珠光体带, 且 C、Mn 等元素易在铸坯中心区域富集, 最终导致在钢板中心区域形成较宽的珠光体偏析带。

因为热轧参数中只有装炉温度对分层有影响,

而其他参数与分层的关系不大, 所以如果把热轧过程中的装炉温度对分层的影响判定为铸坯在冷却过程中冷却强度的不一致而导致装炉温度对分层的影响, 这样可以判定影响分层的因素之一出现在热轧之前。而在热轧工艺条件下, 珠光体转变温度通常在 $700\sim 650\ \text{℃}$ ^[4], 而 HG70C 钢的终轧温度均在 $880\ \text{℃}$ 以上, 由此也可判定, 珠光体中的裂纹形成在终轧结束之后的过程中。

可以认为, 由于中心偏析, 中心部位 C、Ti 等元素较高, 在凝固过程中形成珠光体偏析带, 而大量的 Ti 元素更易促使中心珠光体带上的 Ti(C, N) 颗粒长大, 而大颗粒的 Ti(C, N) 等夹杂物易在基体的交界处产生微裂纹^[4], 在韧性较好的轧板上成为钢板进一步疲劳破坏的疲劳源, 从而导致拉伸分层现象的发生。

5 结论

(1) 该钢种带状组织的级别不高, 引起拉伸分层的主要原因为中心珠光体偏析带以及中心珠光体偏析带上的大颗粒较硬的 Nb、Ti 碳氮化物夹杂和硫化物夹杂。

(2) 钛微合金高强度钢在连铸后均热前的铸坯中就已有 $2\ \mu\text{m}$ 左右的氮化物和硫化物析出。

(3) 该低合金钢中的液析 TiN 尺寸在 $1\sim 7\ \mu\text{m}$, 成为降低钢性能的非金属夹杂物。为减少该夹杂对钢性能的影响, 需控制 TiN 的生成条件, 首先钢液浇注时过热度要小, 且保证 N、Ti 浓度积低于钢固相线温度下的平衡浓度积。

(4) 通过统计分析表明, 钢板的拉伸分层与热轧工艺参数无关。

参考文献

- 程久姗, 刘静, 张云燕. HG70 钢连铸坯的高温热塑性行为分析[J]. 钢铁研究, 2010, 38(3): 7
- 赵鹏, 乐可襄. 济钢船板分层缺陷形成机制分析[J]. 宽厚板, 2009, 15(3): 36
- 王萍, 罗家明, 尹立新, 等. 船板拉伸断口分层原因分析[J]. 冶金分析, 2008, 28(增2): 1615
- 张乔英, 刘国平, 赵勇, 等. 低合金高强度钢板拉伸断口分层机理分析研究[C]. 第七届中国钢铁年会, 北京, 2009
- 毛新平. 薄板坯连铸连轧微合金化技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 77-85.
- 崔忠圻, 刘北兴. 金属学与热处理原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 185
- 傅杰, 朱剑. 微合金钢中 TiN 的析出规律研究[J]. 金属学报, 2000, 36(8): 801
- 齐俊杰, 黄运华, 张跃. 微合金化钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 41-42
- Teruo Yamashita, Shiro Torizuka, Kotobu Nagai. Effect of Manganese Segregation on Fine-grained Ferrite Structure in Low-carbon Steel Slabs[J]. ISIJ International, 2003, 43(11): 1833-1841.

王芹(1987-), 女, 硕士研究生, 合金钢铸坯、轧材工艺和质量研究。

收稿日期: 2012-03-30