

SA387Gr11CL2 低碳合金钢 150 mm 复合板调质分层开裂原因分析和工艺改进

侯美伶¹ 张艳¹ 孔祥伟² 陈青江¹ 阳日隆¹

(江阴兴澄特种钢铁有限公司 1 特板事业部; 2 研究院, 江阴 214400)

摘要 采用2块365 mm复合坯轧制成150 mm厚钢板,该板经淬火和回火处理后,火焰切割四边时发现在1/2厚度处出现分层开裂。分析结果表明,调质分层开裂是由中心复合面处存在的夹杂物和调质时的淬火应力综合作用导致的。当复合坯焊接的真空度由 5×10^{-2} Pa降低到 1×10^{-2} Pa时,复合面处未发现夹杂物,调质复合板1/2厚度处未出现分层开裂现象。

关键词 低碳合金钢复合板 淬火分层开裂 夹杂物 界面

Analysis on Quenching Delamination Crack of 150 mm Cladding Plates of Low Carbon Alloy Steel SA387Gr11CL2 and Process Improvement

Hou Meiling¹, Zhang Yan¹, Kong Xiangwei², Chen Qingjiang¹ and Yang Rilong¹

(1 Special Steel Plate Division; 2 Research Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Co Ltd, Jiangyin 214400)

Abstract The 150 mm thick steel cladding plate is rolled by two block 365 mm cladding bloom, the delamination crack at 1/2 thickness of quenched-tempered cladding plate occurs when cutting four sides by flame. Analysis results show that quenching delamination crack is induced by the inclusions in central cladding interface together with the quenching stress. When the cladding bloom welding vacuum decreases from 5×10^{-2} Pa to 1×10^{-2} Pa, the cladding plate is not found inclusions in cladding interface and the delamination crack at 1/2 thickness cladding plate does not occur.

Material Index Low Carbon Alloy Steel Cladding Plates, Quenching Delamination Crack, Inclusion, Interface

近年来,特厚钢板越来越广泛地用于大型容器、海洋工程、桥梁建筑以及重型机械等重大技术装备制造。这对特厚钢板内部质量、1/2心部和厚度方向性能的要求极其严格,必然需要通过使用具有高洁净度、低缺陷率内部质量的超厚坯料,配合轧制和热处理工艺来实现^[1]。特厚钢板生产多采用钢锭,但由于内部质量差,生产周期长,成材率低,钢锭已经难以具备市场竞争力^[2];而连铸坯由于压缩比受到限制,很难生产厚度大于120 mm的特厚钢板。目前一些钢厂开始采用连铸板坯经过真空电子束焊接组合制成复合坯,作为特厚钢板轧制生产的新原料。复合坯生产技术以及复合坯轧制特厚钢板技术已经在国内特厚钢板生产领域得到推广和应用^[3]。

江阴兴澄特钢成功采用复合坯批量生产低合金特厚板。现采用规格为365 mm × 1 750 mm × 3 400 mm的2块连铸板坯复合试验生产,成分如下表1,规格为150 mm × 1 800 mm × 12 000 mm的SA387Gr11CL2调质板,发现复合板热处理后边部开裂,直接导致复合失败。为此,通过低倍、金相以及扫描电镜分析手段对

表1 SA387Gr11CL2 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of SA387Gr11CL2 steel/%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb
0.08 ~ 0.13	0.50 ~ 0.80	0.40 ~ 0.65	1.40 ~ 1.65	0.15 ~ 0.35	0.55 ~ 0.80	0.015 ~ 0.040

复合开裂原因进行剖析,并提出针对性的工艺措施。

1 试验生产

生产工艺路线按照铸坯缓冷→铣磨→真空焊接复合→加热($1\ 250 \pm 20$) °C→轧制→钢板(>300 °C)堆缓冷→探伤→(925 ± 10) °C淬火→(670 ± 10) °C回火→火切定尺。生产过程复合与轧制无异常,轧后超声波探伤,未发现复合界面处有明显回波,说明复合效果良好。复合钢板经过淬火处理和高温回火处理后,火切四边定尺时发现边部一侧沿着复合板厚度中心分层,如图1(a),采用超声波探伤定位,钢板内部开裂情况如图1(b)。

根据钢板内部开裂图1(a),采用火焰切割将钢板解剖,a、b、c三处切割位置。切割a线完成后,切

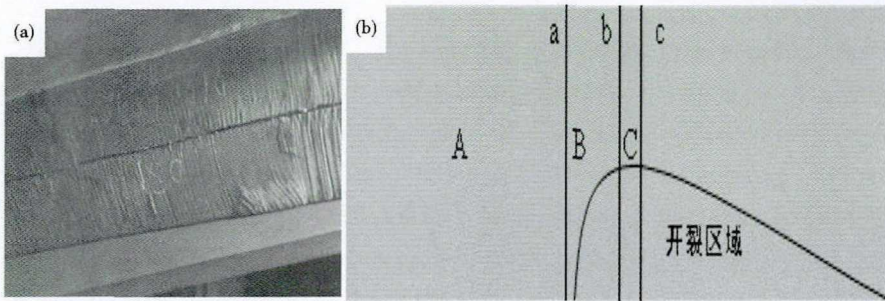


图 1 (a) 钢板分层宏观形貌; (b) 钢板超声定位及切割示意图

Fig. 1 (a) Macro morphology of delamination crack of cladding plate; (b) sketch of cladding plate ultrasonic location and cutting

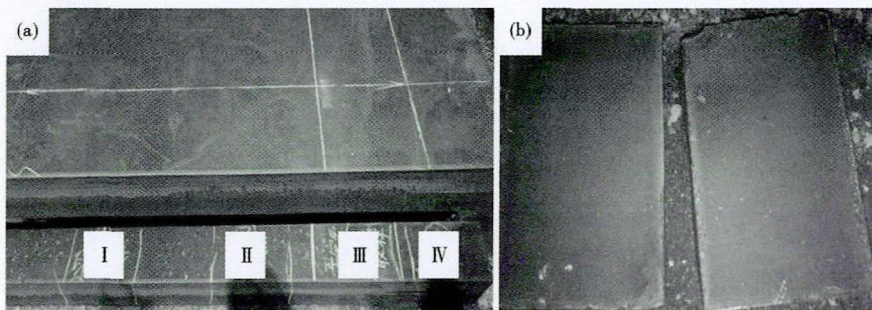


图 2 (a) 火焰切取样照片; (b) IV# 样切后开裂宏观形貌

Fig. 2 (a) Photograph of sampling by flame cutting; (b) macro morphology of crack after cutting of No. IV

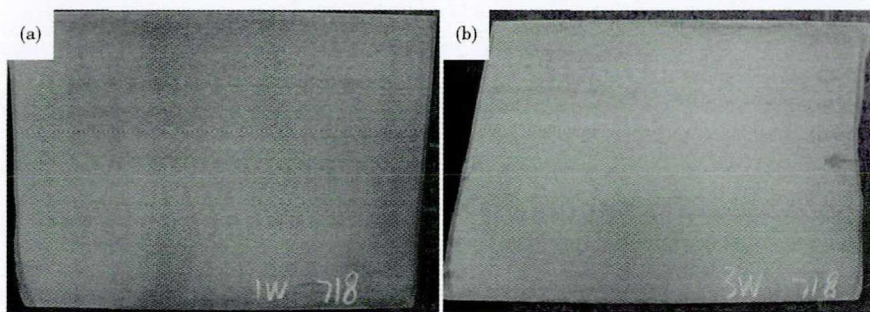


图 3 (a) I# 试样 (b) II# 试低倍组织形貌

Fig. 3 Morphology of macrostructure of sample (a) No. I and (b) No. II

剖面肉眼无明显分层现象, A 板超声波探伤钢板未发现复合界面处有明显回波; 切割 b、c 线完成后, 切割面出现分层, 但未贯穿钢板宽度方向。将 C 板块分段如图 2(a) 取小样 I#、II#、III#、IV#。现场火焰切后 III# 和 IV# 样均直接分层开裂成两部分, 如图 2(b)。

2 试样分析

图 3(a,b) 为 I#、II# 试样的低倍照片。I# 试样无肉眼可见的缺陷; II# 试样芯部存在明显的分层开裂。在钢板中心复合界面取金相小样, 从图 4 观

察金相组织形貌(I# 试样 a), 未发现沿复合界面开裂的现象, 无法辨别复合线, 且整个视野组织一致, 证明复合界面已经达到完美的冶金结合; 图 5(a,b) 显示中开裂末端的金相组织形貌(II# 试样 b), 开裂起始于中心复合界面处, 末端较尖锐且不平整, 有穿晶扩展的特征, 具备热处理淬火时形成淬火裂纹特征^[4]; 图 5(c) 是开裂延伸方向(复合界面方向)的组织形貌(II# 试样 c), 复合界面处碳化物集中, 尺寸略大于周围正常组织。在复合界面可见穿晶分布的细小裂纹, 且在微裂纹附近的复合界面上存在不连续的黑色点状物。利用扫描电子电镜对 II# 试样复合板界面处微裂纹附近点状物进行能谱分析, 结果如图 6 所示, 从能谱结果中发现均为氧化铝、氧化硅和氧化锰夹杂物。

在 I# 样和 II# 样靠近裂纹处分别取 Z 向拉伸试样, 各 3 个试样, 试样尺寸为平行端长度为 90 mm(包含复合线和上下两块钢板的 1/2 芯部)、直径 12.5 mm。试验结果如表 2。

3 结果讨论

对比 I# 样和 II# 样 Z 向性能结果, I# 样断面收缩率达 75.51%, 而 II# 样靠近裂纹处断面收缩率只有 34.26%。试样均出现颈缩现象, 断口均呈现韧窝断口形貌。对比断口微观形貌, I# 样韧窝尺寸小、数量多、深度深、形状更趋于圆形; II# 样在韧窝的底部发现夹杂物, 能谱分析可知为非金属氧化夹杂。在金属材料断裂过程中, 非金属夹杂物及脆性析出颗粒是断裂初期微孔形成的核心^[5]。空洞的出现破坏了基体的连续性, 但由于基体塑性变形能力大, 空洞未长大聚合, 无裂纹萌生, 故仍属于韧性断裂。

由于钢板厚度规格较大, 淬火水冷过程中钢板内外部分冷却速度不同, 导致内外部产生不协调的

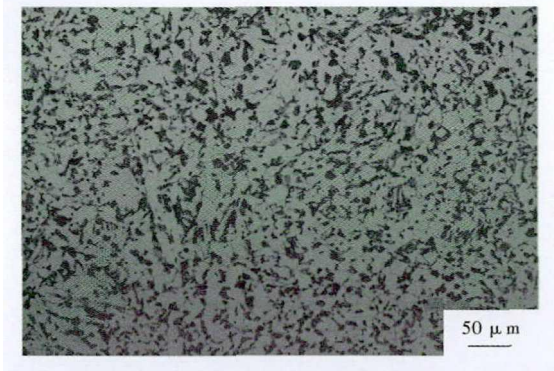


图 4 I#试样 1/2 厚显微组织形貌

Fig. 4 Morphology of microstructure at 1/2 thickness of sample No. I

热胀冷缩和组织转变。淬火水冷初期阶段:表层冷速大,内部冷速小。钢板表层收缩量大于心部,心部阻止表层收缩,表层受拉应力,心部受压应力;随着表层温度的降低,表层发生马氏体转变,体积膨胀,心部阻止表层膨胀使表层处于压力状态,心部处于拉应力状态^[6];随着时间的延续,心部温度降低收缩,此时表层已经形成硬壳阻止心部收缩使心部受拉应力。当心部承受热应力和组织应力迭加形成的淬火拉应力,超过钢板心部的强度极限时,便会从结合最弱区域开裂^[7]。对于复合钢板而言,当复合界面处存在夹杂物时,会削弱母材金属间的结合能力,

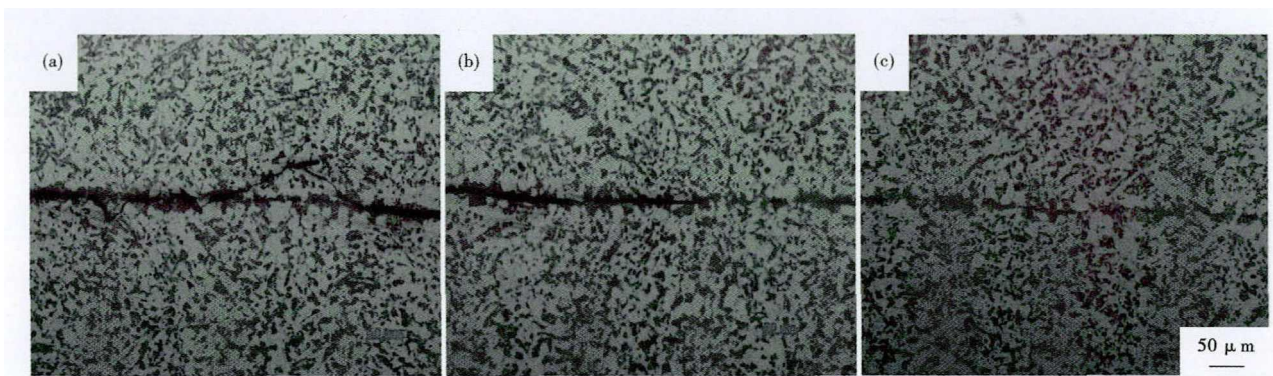


图 5 II#试样 1/2 厚显微组织形貌:(a)开裂形态(b)开裂末端(c)开裂延伸方向

Fig. 5 Morphology of microstructure at 1/2 thickness of sample No. II:(a) Morphology of crack,(b) Crack end(c) Extension direction of crack

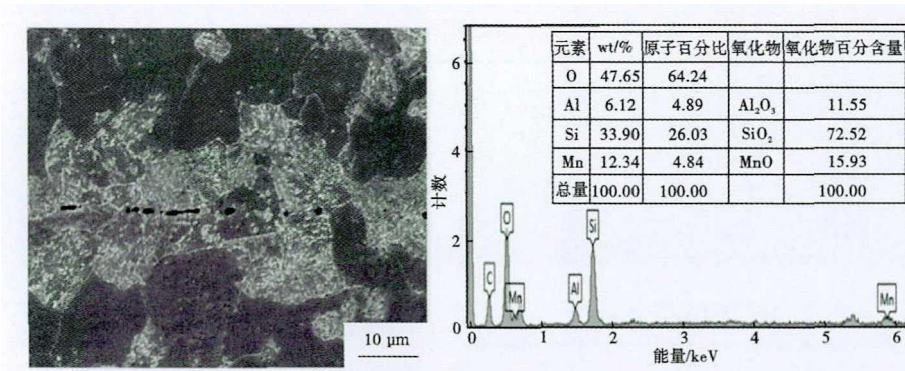


图 6 复合界面夹杂物及能谱分析

Fig. 6 EDS analysis of inclusion on cladding interface

缩程度与钢的不同,极易在夹杂物周围形成空隙,成为开裂的发源地,并沿着强度薄弱的复合界面开裂扩展。因此,是淬火应力和复合界面夹杂物综合作用导致复合板淬火分层。

从夹杂物的来源分析,有两种可能性,一是板坯皮下卷渣夹杂,二是从钢板内部析出的。板坯焊接前采用铣床清理钢坯表面的污物和氧化皮,使

其露出新鲜光亮的金属,且夹杂物中不含保护渣成分的元素,排除板坯皮下夹杂的可能性。坯料熔炼成分含有的铝、硅和锰等元素在 1 200 °C 高温下扩散到复合界面处并氧化,形成氧化铝、氧化硅和氧化锰夹杂物。根据金属氧化反应的 ΔG^0-T 图,Al、Si、Mn、Fe 与氧的亲合力依次降低,当这 4 种元素同时存在时,Al 会被优先选择性氧化,其次是 Si、Mn,最后是 Fe。一方面,夹杂物中无氧化铁的存在,反

表 2 I#样和II#样 Z 向性能

Table 2 Z-direction property of sample No. I and No. II

试样编号	I#样			II#样		
	断前直径/mm	断后直径/mm	收缩率/%	断前直径/mm	断后直径/mm	收缩率/%
1	12.52	6.06	76.57	12.47	9.96	36.21
2	12.49	未断在复合面	无	12.5	10.65	27.41
3	12.48	6.31	74.44	12.5	9.75	39.16

相当于强度最弱区。并随着温度的降低,夹杂物收

映出复合界面中的氧含量较少,没有足够的氧与界面处铁元素发生氧化反应;另一方面,从明火炉回火后分层火切开裂图 3b 可知,上下两块钢板在复合面处仍保留金属光泽,未被氧化(除去火切氧化)。证明轧制、淬火和回火全流程生产过程中整块钢板的复合界面未与外界空气接触,钢板四周焊缝处未漏气。这与所有的开裂处组织如图 3 无脱碳、无氧化现象相一致。

因此表明,经过表面清理的坯料在紧密配合后,虽然钢板四周焊缝处未漏气,但复合面处仍然会有极小的间隙存在,在坯料抽真空过程中,间隙中的空气未被完全排除^[8]。复合板坯高温加热下,板坯中的化学元素会与间隙中残留的氧气发生反应形成复合界面处相应的夹杂物。由于间隙中的氧气有限,夹杂物数量不多,尺寸较小,故在轧后钢板探伤未发现复合界面处有明显回波。但是夹杂物的存在削弱复合面的结合能力,造成淬火冷却时开裂以及 Z 向断面收缩率降低。故此,减少或消除钢板复合面处夹杂物的形成是避免复合板调质分层的主要措施。

参考文献

- [1] 崔风平,崔琦,于秀琴.复合连铸板坯轧制特厚钢板技术的应用[J].宽厚板,2016,22(2):35-37.
 [2] 耿明山,刘艳,黄衍林.大型特厚板坯料制造技术现状和发展趋势[J].中国冶金,2014,24(8):1-8.
 [3] 刘海宽,胡建国,张军.复合坯生产低合金特厚钢板初探[J].宽厚板,2013,19(6):19-22.
 [4] 张丽伟,刘素芬,王凡.50CrVA 钢板簧淬火开裂原因分析[J].金属热处理,2015,40(12):201-203.
 [5] 刘晓美.Q345B 钢 Z 向断面收缩率的研究[D].沈阳:东北大学,2015.
 [6] 彭宾.淬火工艺对耐磨钢板尺寸的影响[J].金属热处理,2016,41(7):118-120.

提高复合板的真空度,减少坯料间的空气残留是最有效的措施。经试验验证,真空室真空度由 5×10^{-2} Pa 降到 1×10^{-2} Pa 时,同工艺调质复合板未发生分层开裂现象,解剖钢板复合面,未发现铝硅锰等氧化夹杂物。另一方面,考虑在真空室内新设置推床设备^[9],抽真空前板坯采用上下错位放置,达到规定的真空度后,将坯料推置上下对齐位置,再进行焊接。避免焊接前上下板坯间存在有微小间隙空气的残留。

4 结论

(1) SA387Gr11CL2 钢板复合界面已经实现了冶金结合,但是由于坯料复合面间隙存在空气残留,在板坯高温加热时反应生成氧化物,削弱了复合界面的结合能力。

(2) 钢板厚度规格较大,淬火过程中芯部承受拉应力,在复合面氧化物生成的薄弱处分层开裂。

(3) 钢板复合焊接真空度由 5×10^{-2} Pa 降低到 1×10^{-2} Pa 时,调质复合板未发生分层开裂现象。

- [7] 陈本文,苏春霞,董恩龙,等.30CrMnMo 高强度钢板分层开裂原因分析[J].鞍钢技术,2014,387:53-56.
 [8] 王洪光.特厚复合板的工艺性研究[D].沈阳:东北大学,2009.
 [9] 东北大学.真空制坯复合轧制技术与工艺[M].北京:冶金工业出版社,2014,17-18.

侯美伶(1989-),女,硕士(2015年东北大学),工程师,2013年中国石油大学胜利学院(本科)毕业,冶金工艺技术研究。
 E-mail: 632630765@qq.com

收稿日期:2019-10-25

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
 行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
 和技术、产品研发宣传广告