

复杂厚板钢结构焊接裂纹分析及对策

朱瑞峰, 张俊宝, 吴崇志, 丛大志
(上海核工程研究院股份有限公司, 上海 200233)

摘要: 在现代发电站结构设计中, 通常采用钢结构和钢板-混凝土结构形成主体结构, 通过协同作用实现建筑抗震, 整个施工过程涉及大量的钢结构焊接工作。大厚板、复杂节点、空间受限等问题导致钢结构焊接出现了冷裂纹和层状撕裂问题, 这些问题的起因既有预热、后热、焊接热输入控制等焊接工艺本身的问题, 也有焊接接头布置及坡口设计不当的问题。该研究针对这些问题的起因进行了深入分析, 采取了针对性措施改进加热方式、控制焊接热输入和优化焊接接头, 解决了上述焊接裂纹问题。该研究积累的经验和提出的改进措施不仅对发电站的复杂厚板钢结构焊接有直接指导作用, 对其他行业钢结构的焊接也有一定的借鉴作用。

关键词: 钢结构焊接; 冷裂纹; 层状撕裂; 对策

中图分类号: TG457.5 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20230411002](https://doi.org/10.12073/j.hj.20230411002)

Analysis and countermeasures of welding cracks in complex thick plate steel structures

Zhu Ruifeng, Zhang Junbao, Wu Chongzhi, Cong Dazhi
(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: In the design of modern power station, steel structure and steel plate-concrete combined structure were usually used to form the main structure, which realized seismic resistance through mutual effect. The whole construction process of steel structure involved a lot of welding work. Cold cracking and lamellar tearing were found in welding of steel structure due to problems such as thick plates, complex joints and limited space. Causes of welding cracks were not only problems of welding process such as preheating, post heating and welding heat input control, but also problems of improper joint layout and groove design. In this study, causes of welding cracks were deeply analyzed, and specific countermeasures were taken to improve heating method, control welding heat input and optimize welded joint, so as to eliminate welding cracks. Experience accumulated in this study and improvement countermeasures proposed not only have direct guidance for welding of steel structure with complex thick plates in power station, but also have a certain reference for steel structure welding in other industries.

Key words: steel structure welding, cold cracking, lamellar tearing, countermeasure

0 前言

在现代发电站结构设计中, 常常采用大量的钢结构和钢板-混凝土结构形成主体结构, 通过协同作用实现建筑抗震, 整个施工过程涉及大量的钢结构焊接工作。国内发电站钢结构焊接主要涉及碳钢(Q235)和低合金钢(Q355, Q390, Q420), 厚度范围一般在12~120 mm之间。由于存在厚板焊接, 再加上

个别区域钢结构布置较为复杂, 施焊难度大且拘束较强, 容易发生焊接裂纹。该研究基于相关工程实例, 对发电站钢结构焊接裂纹进行研究、分析, 并基于问题的原因给出改进措施, 能为类似钢结构的焊接提供有益借鉴。

1 钢结构焊接常见裂纹

焊接裂纹不仅直接降低了焊接接头的有效承载

面积,而且在裂纹尖端还存在较大的应力集中,使裂纹尖端的局部应力远远大于焊接接头的平均应力,十分容易造成脆性破坏。因此在无损检测验收标准中,与圆形显示、线性显示相比,焊接裂纹属于“一票否决”的缺陷类型。

焊接裂纹有2种分类方法:一种是按裂纹产生的部位和宏观形态进行分类;另一种是按裂纹的产生机理进行分类,有热裂纹(结晶裂纹、多边化裂纹、液化裂纹)、冷裂纹(延迟裂纹、淬硬脆化裂纹、低塑性脆化裂纹)、再热裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂纹^[1]。识别裂纹的直观形态和分布特征,能帮助了解裂纹产生原因,分析裂纹产生机理,进而制定相应对策。钢结构焊接工程中,焊接裂纹的产生主要有3种形式^[2]:复杂钢结构体系中的热裂纹、冷裂纹、厚板工程中的层状撕裂。该研究中的发电站钢结构焊接裂纹主要涉及冷裂纹和层状撕裂,不涉及热裂纹。

2 钢结构焊接冷裂纹

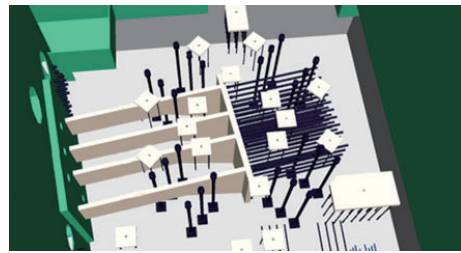
冷裂纹是焊接接头冷却到较低温度下(对钢来说,在 M_s 温度以下)产生的焊接裂纹,可以分为延迟裂纹、淬硬脆化裂纹、低塑性脆化裂纹3种。对于该研究中的碳钢和低合金钢,由于钢种特点,其冷裂纹均为延迟裂纹^[3-5],是由于拘束应力、淬硬组织和扩散氢的共同作用的结果,主要发生在焊接热影响区。

2.1 重型支承板锚固结构焊接冷裂纹

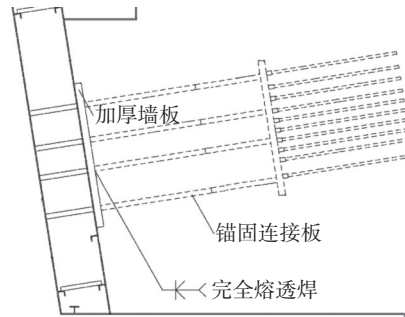
2.1.1 背景分析

某重型支承板锚固结构如图1所示,材质为Q355B,加厚墙板厚度120 mm,锚固连接板厚度75 mm,两者之间的T形接头采用4条K形全熔透焊缝连接,坡口角度45°,组对间隙不大于5 mm。焊接完成后浇筑混凝土,从而实现整个结构的锚固。焊接方法为焊条电弧焊(焊条为E5018),鉴于此处焊接难度较大,施工方采用了针对性的焊接措施:使用超低氢焊条,实际扩散氢含量3.17 mL/100 g;采用履带式加热片,提高最低预热温度至130 ℃,并在每次停焊后立即进行250~350 ℃的紧急后热;4条K形全熔透焊缝采用交替焊接,保持施工进度相近,避免先焊焊缝对后焊焊缝的强约束。但实际效果并不理想,出现了多处如图2所示的裂纹,裂纹均发生在焊趾部位,并往加厚墙板母材上延伸,最大深度约20 mm。

根据无损检测及打磨结果显示,焊接裂纹从焊趾部位沿着热影响区向母材扩展,具有典型的延迟裂



(a) 三维简图



(b) 二维简图

图1 重型支承锚固结构



(a) 裂纹打磨前

(b) 裂纹打磨后

图2 重型支承板锚固结构焊接裂纹

纹特征。对于延迟裂纹产生的3大诱因(拘束应力、淬硬组织和扩散氢),焊接施工时均采取了针对性措施,但仍不能预防延迟裂纹,则必定存在某针对性措施执行不到位的问题。从“人、机、料、法、环”五要素进行逐一排查,最后将原因归因于预热及紧急后热的加热方式不当。对于履带式加热片的加热,一般采用正面加热、背面测温的方式,保证不利部位的温度也能达到预定温度,但由于此处结构复杂,背面为封闭墙体,无法从背面进行测温,且背面保温也无法实施,预热及紧急后热的不均匀且低于要求温度导致了延迟裂纹的发生。

2.1.2 解决对策

根据裂纹分析结果,预热及紧急后热的加热方式不当是导致延迟裂纹的主要原因,需要解决该问题就要改变加热方式。由于此处结构受限,传统履带式加热片和火焰加热均无法从背面加热,且正面加热时也无法进行背面保温。为此,现场配置了一套低频电磁感应加热设备,焊接施工时其布置如图3所示,为了防止高温损伤柔性感应加热片,将保温棉紧贴工件,然后再将柔性感应加热片再从外侧贴紧保温棉。在1:1的实体模型中,250~350℃的紧急后热时正反面温差约20℃,热量的补充与耗散能维持平衡状态。采用上述加热方式,完成了此处接头的裂纹返修,焊后48h后100%超声和磁粉探伤检测均合格。

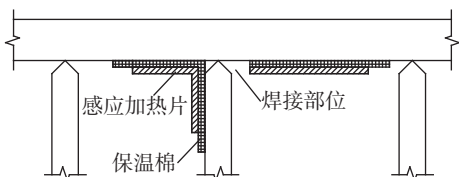


图3 重型支承板锚固感应加热布置

2.2 屋顶钢结构焊接冷裂纹

2.2.1 背景分析

某屋顶钢结构子组件及焊接接头如图4所示,其主体结构为焊接H型钢,材质为Q355B,翼缘厚度60mm,腹板厚度40mm。翼缘与腹板之间的焊缝为K形坡口全熔透和角焊缝的组合形式,焊接方法为熔化极气体保护焊打底(焊丝为ER50S-6),埋弧焊填充、盖面(焊丝-焊剂组合为F5A2-H10Mn2)。该钢结构在制造厂内组焊,并根据GB 50661—2011《钢结构焊接规范》二级焊缝的要求进行20%的超声检测及

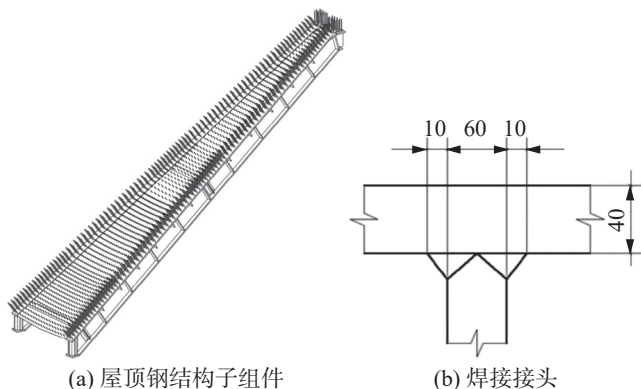
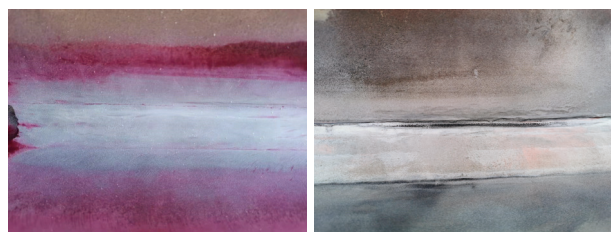


图4 某屋顶钢结构子组件及焊接接头

100%的外观检测,合格后进行涂层防腐。在运抵施工现场存储一段时间后,发现部分角焊缝焊趾区域存在涂层失效问题,对相应区域去除涂层并进行了超声检测和表面检测,超声检测显示焊缝内部无缺陷,表面检测显示焊缝表面存在缺陷,检测结果如图5所示。与液体渗透检测相比,磁粉检测存在明显的线性显示,且显示长度大于液体渗透检测,可以推测此处存在开口和未开口的混合型焊接裂纹。



(a) 液体渗透检测

(b) 磁粉检测

图5 焊接裂纹表面检测

为了进一步确认裂纹特征,对焊缝切取船样进行金相分析,如图6所示,图中左上角为焊缝区域,右下角为母材及热影响区,裂纹均发生在热影响区,为典型的延迟裂纹。焊缝组织为正常的铁素体和珠光体,个别区域先共析铁素体分布于柱状晶界上,但热影响区存在少量的贝氏体和马氏体的混合组织。

针对延迟裂纹三大诱因逐一进行分析:从母材淬硬倾向方面来看,GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》要求Q355B厚度在30~63mm之间时碳当量不超过0.47,查询母材质量证明书得知其实际最大碳当量不超过0.43,该碳当量下Q355B的淬硬倾向一般,焊接难度中等;从焊接接头应力方面来看,H型钢焊接时拘束不大,除了一些辅助焊接工装外,并无其他约束;从扩散氢含量方面来看,查询焊材质量证明书得知所采用的均为扩散氢含量不超过H5的超低氢焊材,且埋弧焊焊接用焊剂含水量均不超过0.10%。从这三个方面来看,此焊接裂纹的产生原因仍不明确,为此又额外进行了截面硬度测试,测点布置及测试结果分别如图7和表1所示。Q355B作为II类钢其热影响区硬度存在超出350HV的情况,此点为紧邻焊缝的热影响区的第一个点,而根据GB 50661—2011《钢结构焊接规范》的要求,II类钢焊接工艺评定时其热影响区硬度不得超过350HV。

结合焊接裂纹均发生在埋弧焊盖面焊道附近,进一步核实实际焊接时的相关参数记录,发现盖面焊

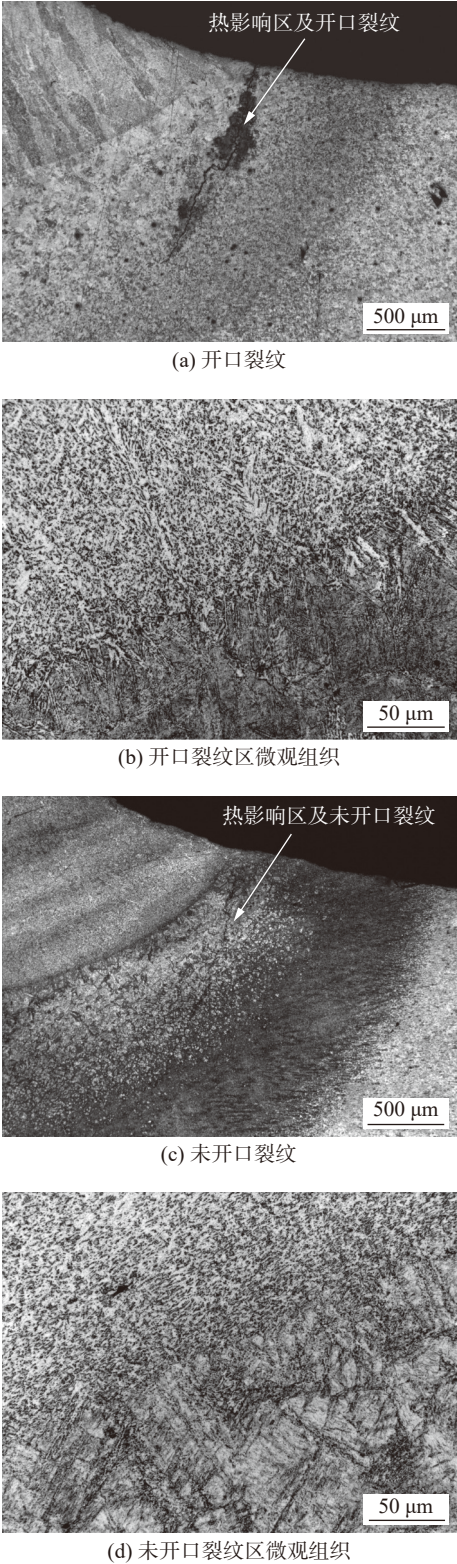


图6 焊接延迟裂纹区域微观组织

道焊接热输入最高,为了用较少的焊道完成大面积的焊缝盖面,焊接速度较慢,从而推高的焊接热输入。焊接热输入越高,高温停留时间越大,热影响区奥氏

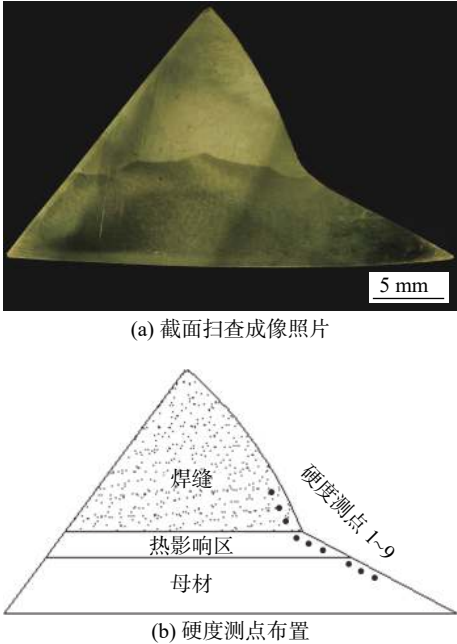


图7 截面硬度测试示意图

表1 截面维氏硬度									HV
测点	焊缝			热影响区			母材		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
截面 1	247	253	248	390	289	261	240	237	239
截面 2	250	245	252	355	267	254	237	240	238

体晶粒越易过热长大,粗大的奥氏体组织稳定性增大,冷却时更容易转化为粗大的淬硬组织,进而容易诱发延迟裂纹。

2.2.2 解决对策

根据裂纹分析结果,盖面焊道的施工是导致延迟裂纹产生的主要原因,为此采用了下述措施解决了焊接H型钢延迟裂纹问题。

(1)增加盖面焊道道数,减少焊接热输入,避免用较少的焊道完成大面积盖面而导致的焊接热输入过大问题,减小热影响区奥氏体长大趋势。

(2)将焊接预热温度提高 30 ~ 50 ℃,通过改变低温参数 t_{100} (熔合区附近从最高温度到 100 ℃ 的冷却时间)使氢充分逸出,降低延迟裂纹概率。

(3)在焊缝冷却到预热温度下限之前进行紧急后热,后热温度为 250 ~ 350 ℃,保温时间应根据工件板厚按每 25 mm 板厚不小于 0.5 h,且总保温时间不得小于 1 h,达到保温时间后缓冷至常温。紧急后热能使焊接接头中的氢低于产生冷裂纹的临界含氢量,起到防止延迟裂纹的作用。

(4)加强施工质量管理,对焊缝坡口及两侧约30 mm范围内的氧化皮、锈蚀、油脂、水等杂质,并且防止已清理过的部位被再次污染,以减少带入焊缝的氢和其他杂质。

3 钢结构焊接的层状撕裂

层状撕裂是焊缝收缩导致高的局部应力以及母材在厚度方向的塑性变形能力差共同造成的。钢内的一些非金属夹杂物(通常是硅酸盐和硫化物)在轧制过程中被轧成平行于轧向的带状夹杂物,严重降低厚度方向金属的塑性变形能力。厚板结构焊接时(特别是丁字接头和角接接头),焊缝收缩会在母材厚度方向产生很大的拉应力和应变,当其超过母材沿厚度方向的塑性变形能力时,分离就会发生在夹杂物与金属之间,形成微裂纹^[6]。微裂纹进一步扩展,通过“平台”和“剪切壁”从而形成连为一体的层状撕裂^[7]。

3.1 背景分析

某钢框架盖板结构如图8所示,材质为Q420B,底板和盖板厚度为100 mm,腹板厚度75 mm。腹板和底板之间的焊缝为K形坡口全熔透,盖板和腹板之间的焊缝为50 mm部分熔透(原设计图纸未注明坡口形式,施工方实际施工时将45°坡口开在了盖板上)。焊接方法为焊条电弧焊(焊条为E5518),焊接完成后在腹板2的顶部中间位置产生了如图9所示的裂纹,该裂纹目视可见,属于典型的层状撕裂。

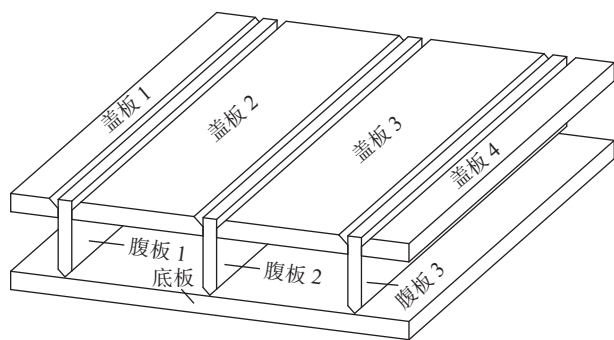
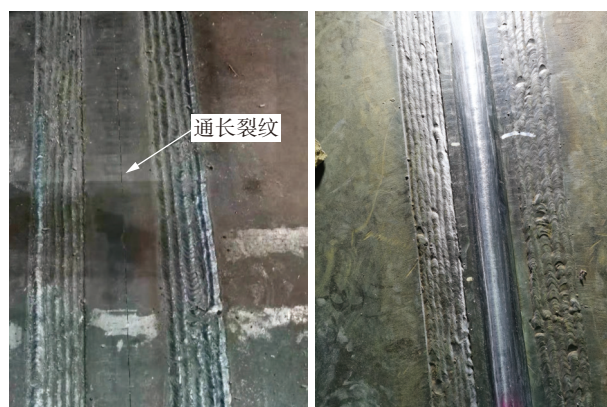


图8 钢框架结构

3.2 解决对策

厚度方向的高应力和材料内部的非金属夹杂物是层状撕裂的两大促成因素,在原设计中已经考虑了此处板厚方向受力较大的情况,对其厚度方向性能级别的要求为Z35。查询母材质量证明书得知其



(a) 裂纹挖掘前

(b) 裂纹挖掘后

图9 厚板顶部层状撕裂

实际厚度方向断面收缩率分别为37%、38%和39%，硫含量为0.003%，满足GB/T 5313—2010《厚度方向性能钢板》中Z35的要求。即使如此，腹板2仍然无法抵抗其两侧50 mm的部分熔透焊缝的焊后收缩产生的强大拉应力，因此只能从焊接接头设计上想办法予以解决。

参考相关文献^[8-11]介绍,对于钢框架结构防层状撕裂焊接接头优化如图10所示。推荐接头1通过端部的伸出扩大了厚度方向的受力范围,避免了中间厚板平齐端部的“撕裂”效应。推荐接头2通过端部削斜,改变了焊缝收缩应力作用在中间厚板的方向,避免了厚度方向受力。对于图9所示的层状撕裂,在现有结构布置的基础上推荐接头3,通过顶端缩进避开层状撕裂部位。

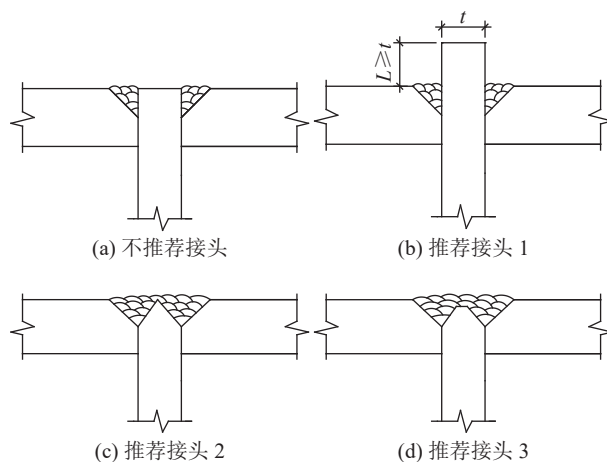


图10 防层状撕裂焊接接头及坡口优化

4 结论

(1)焊接预热及后热至关重要,对于由于结构受

限而无法采用传统履带式加热片和火焰加热进行温度控制的,感应加热是一种优秀的备选工艺,低频感应加热对厚板由内而外的加热能在背面无保温措施的情况下维持预热及后热温度。

(2)焊接热输入是焊接工艺中一个十分重要的参数,其不仅仅在焊接工艺评定中影响冲击性能,在控制焊接裂纹方面也有重要的作用,过大的焊接热输入会劣化接头组织从而诱发裂纹。

(3)对于全熔透焊接接头,标准规范中一般要求进行超声或射线的体积检测,但对磁粉或渗透的表面检测未进行强制要求。从保证质量的角度来看,磁粉或渗透有必要作为补加要求。对于铁磁性材料,磁粉检测灵敏度更高且能检测出未开口的浅表裂纹。

(4)对于厚板焊接的层状撕裂,仅仅控制母材 Z 向性能不足以避免,还要从接头布置和坡口设计方面进行综合优化。合理的接头布置能从源头上避免层状撕裂,当在接头布置上不可避免时,可从坡口设计上予以补偿。

参考文献

[1] 杜则裕. 焊接冶金学——基本原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
[2] 戴为志, 刘景凤, 高良. 建筑钢结构焊接工程应用技术及

案例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
[3] Threadgill P L. Avoiding HAZ defects in welded structures[J]. Metals and Materials, 1985, 1(7): 422 – 430.
[4] 李本勇, 徐越兰, 曹兴华. Q390C-Z15 钢组织性能试验与焊接性预测 [J]. 焊接, 2011(6): 53 – 56.
[5] 徐玉君, 秦建, 梁小梅, 等. 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验方法衍化及工程应用 [J]. 焊接, 2014(2): 27 – 31.
[6] 杜则裕. 材料焊接科学基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
[7] Farrar J C M, Dolby R E, Baker R G. Lamellar tearing in welded structure steels[J]. Welding Journal, 1969, 48(7): 274 – 282.
[8] 段斌, 马德志, 刘景凤. 钢结构焊接规范 (GB50661) 应用指南 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
[9] 史永吉, 王辉, 方兴, 等. 钢材层状撕裂及抗层状撕裂焊接接头的设计 [J]. 中国铁道科学, 2005, 26(6): 69 – 74.
[10] 张建平, 冯天明, 赵巧良, 等. 中厚板防层状撕裂工艺 [J]. 电焊机, 2013, 43(10): 35 – 40.
[11] 邹家生, 刘一程, 严铿, 等. 海洋钻井平台升降腿焊接工艺及抗层状撕裂性能的研究 [J]. 焊接, 2007(5): 39 – 43.

第一作者: 朱瑞峰, 硕士, 高级工程师; 主要从事焊接设计和管理; zhuruifeng@snerdi.com.cn。
(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

朱瑞峰, 张俊宝, 吴崇志, 等. 复杂厚板钢结构焊接裂纹分析及对策[J]. 焊接, 2024(5): 75 – 80.
Zhu Ruifeng, Zhang Junbao, Wu Chongzhi, et al. Analysis and countermeasures of welding cracks in complex thick plate steel structures[J]. Welding & Joining, 2024(5): 75 – 80.

(上接第 74 页)

[8] 封常福, 关小军. Ti、Nb 微合金化 Q345B 钢板夹杂物和析出物分析 [J]. 山东冶金, 2007, 29(1): 43 – 45.
[9] Kerber F, Malczyk P, Stein V, et al. Influence of the MgO grade in MgO-C refractory material and steel melt temperature on the inclusion population in Al-treated steel[J]. International Journal of Ceramic Engineering &

Science, 2022, 4(2): 102 – 111.
[10] 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 (物理分册), 2009, 45(5): 266 – 268, 325.

第一作者: 倪金荣, 工程师; 主要从事桥梁钢结构制造的焊接工艺及试验研究; 648184372@qq.com。
(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

倪金荣, 车平, 吴江波. 钢板夹杂缺欠对焊缝性能的影响[J]. 焊接, 2024(5): 69 – 74, 80.
Ni Jinrong, Che Ping, Wu Jiangbo. Influence of inclusion deficiency of steel plate on properties of weld[J]. Welding & Joining, 2024(5): 69 – 74, 80.