X65Q 钢级管线管焊接缺陷的成因分析*[1]

丰小冬,贺景春,康利明

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 在 X65Q 钢级管线管的焊接过程中,焊缝出现显微裂纹和缩孔缺陷,为此,对管体的化学成分和显微组织进行了检测,并对焊缝的凝固过程进行了分析。分析表明,焊接线能量强度偏高和焊后冷却强度偏低是产生上述焊接缺陷的主要原因,在此基础上,提出相应的改进措施。

关键词: X65Q 钢级; 管线管; 焊缝; 显微裂纹; 缩孔; 凝固过程

中图分类号: TG457.6 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019) 02 - 0050 - 04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.02.015

Cause Analysis on Weld Defects for X65Q Steel Grade Line Pipe

Feng Xiao - dong, He Jing - chun, Kang Li - ming

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the welding process for X65Q steel grade line pipe, there were such defects as microcrack and contraction cavities in the weld joint, so the chemical composition and microstructure of tube body were tested as well as the solidification process of weld joint was analyzed. The results indicated that the higher energy intensity of weld line and the lower cooling intensity after welding were the main causes for the above welding defects. Based on this, the corresponding improvement measures are proposed.

Key words: X65Q steel grade; linepipe; welding seam; microcrack; contraction cavities; solidification process

焊缝中出现裂纹或缩孔将会严重降低焊缝的性能,能够引起焊接接头的脆性破坏,导致灾难性事故的发生。白云鄂博铁精矿浆管道用 X65 钢级无缝钢管,管体规格为 Φ355.6 mm × 15.50 mm,在对焊接区域进行 X 射线检查的过程中发现焊缝存在裂纹缺陷,取回一组问题焊缝管样,以便进行检测并分析裂纹缺陷产生的原因。

1 取样检测

取样状态: 焊接后出现裂纹的管样接口; 缺陷宏观特征: 管体内外表面均无明显的刮伤痕迹; 检测项目: 管体的化学成分和五害元素的含量,焊缝不同部位的金相组织。

2 结果分析

2.1 化学成分检测结果

从成分检测结果(见表 1) 可看出,管体的化学成分和五害元素的含量均控制得比较低,不会对焊接组织构成危害。

2.2 金相组织检测结果

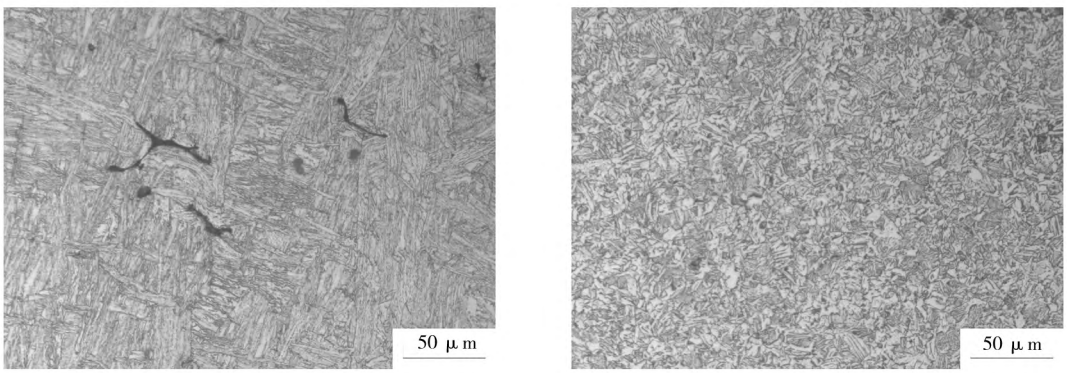
* 收稿日期: 2018 - 04 - 10

作者简介: 丰小冬(1975 -),男,内蒙古包头市人,高级工程师,从事无缝钢管产品研发及质量攻关。

从图 1 的金相组织照片可看出，焊缝的组织均以针状铁素体为主，并含有少量的多边形铁素体和珠光体，且中心部位比边缘部位的组织明显粗大；焊缝中心部位出现多处沿晶界分布的显微裂纹和显微缩孔，焊缝边缘部位不存在任何缺陷。

表 1　管体化学成分及五害元素含量的检测结果（质量分数）　%

C	Si	Mn	Nb，Ti	P	S	Al	As	Sn	Pb	Sb	Bi
0.14	0.26	1.31	适量	0.013	0.003	0.027	0.012	0.017	0.005	0.001	0.000 01



（a）焊缝中心部位的金相组织　　（b）焊缝边缘部位的金相组织

图 1　焊缝在不同部位的金相组织

3　分析与讨论

焊缝组织相对比较粗大，说明焊接线能量强度相对偏高；焊缝组织中存在少量的多边形铁素体和珠光体，说明焊后冷却强度相对偏低。

由于显微裂纹具有弯曲、短小的形貌特征，并且沿着晶界分布，可以初步推断显微裂纹为结晶裂纹；由于熔池金属在凝固过程中伴随着体积的收缩，可以初步推断显微缩孔为凝固缩孔。

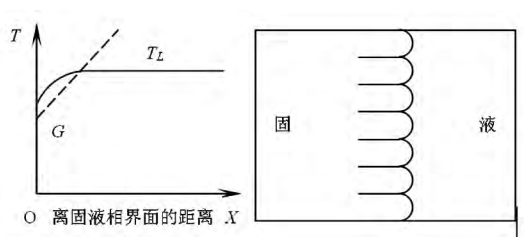
3.1　熔池内钢液的凝固过程

焊缝金属的凝固过程是一个不平衡的冷却过程，先结晶的金属纯度相对较高，析出溶质元素和气体夹杂，并释放出结晶潜热。随着熔池金属从边缘向中心的凝固，温度梯度在逐渐减小，液相温度与固相温度之间的范围在逐渐增大，形成的成分过冷区也在逐渐增大。根据凝固形态，熔池内的钢液的结晶过程先后经历胞状晶、树枝晶和等轴晶三种形成阶段[1]。

3.1.1　胞状晶的形成过程

管线钢管焊缝在实际结晶过程中，熔池内的钢液熔化了外来的夹杂物，减少了非自发形核的晶粒数目，钢液以熔池周围的母材表面为依托，能够大量自发形核，形成联合结晶。

如图 2 所示，熔池与母材交接部分的钢液存在较大的正温度梯度，固、液界面的前沿存在一个很小的成分过冷区，此时晶体表现为均匀长大。固、液界面上的偶然凸起能够深入到该过冷区进行有限的生长，热量经过固体逐步散失，等固、液界面再次获得一定的过冷度后，固体才能继续向前生长。晶体生长速度相对较慢，析出的 C、Mn 元素和气体夹杂富集在两侧的界面，导致两侧界面处的过冷度相对较小，侧向生长速度相对较慢，局部凸起随着周围晶体的快速补长而失去尖端优势，从而形成胞状晶[1-2]。



（a）熔池金属凝固条件　（b）熔池金属凝固形态

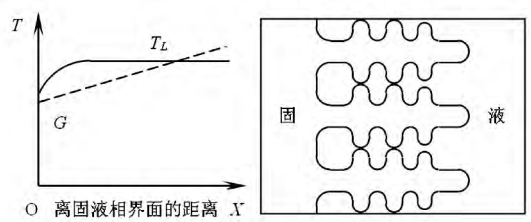
图 2　成分过冷区与胞状晶的形成示意图

在一个晶粒内各个晶胞具有相同的结晶学位向，由于晶胞与晶胞之间没有被分离成晶粒，所以胞状组织是晶粒内的一种亚结构。由于冷却强度相对很大，凝固区间相对很窄，焊缝能够逐层进行凝固，有利于液相的补缩，因此，焊缝边缘层组织致密，不存在疏松。

3.1.2 树枝晶的形成过程

如图3所示，随着胞状晶的生长，析出C、Mn元素和气体夹杂，并释放出结晶潜热，导致固、液界面前沿的成分过冷区进一步增大，此时晶体表现为优先长大。固、液界面上的偶然凸起能够深入到该过冷区域，沿着散热最快的方向进行长距离生长，形成一些伸长的晶柱，析出相对较多的C、Mn元素和气体夹杂，并释放出大量的结晶潜热。在这些晶柱的侧面又会造成新的负温度梯度的分布，这又会生出新的分枝，这些晶轴彼此交错，从而形成树枝晶。受到相邻晶粒的阻碍，树枝晶的侧枝得不到充分的发展[1-2]。

胞状晶层减慢了传热速度，凝固前沿的过冷度在减小，通过周围母材的稳定热流导致柱状晶的优先成长，这种柱状晶是大体沿同一方向伸展的树枝晶的集合组织。较大的冷却强度导致凝固区域变窄，焊缝趋向于逐层凝固，有利于液相的补缩，因此，柱状晶区组织致密，不存在疏松[2]。



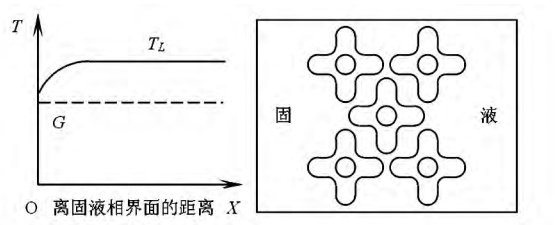
(a) 熔池金属凝固条件 (b) 熔池金属凝固形态

图3 成分过冷区与树枝晶的形成示意图

3.1.3 等轴状树枝晶的形成过程

如图4所示，随着柱状晶的连续生长，传热速度在逐渐减缓，期间不断析出C、Mn元素和气体夹杂，并释放出结晶潜热。凝固前沿富集的C、Mn元素和气体夹杂能够降低钢液的熔点，导致固、液界面的前沿存在相当宽的成分过冷区域。当凝固前沿的钢液温度接近焊缝中心的钢液温度时，中心尚未凝固的钢液开始能够以夹杂物为依托大量形核，此时柱状晶停止生长。由于晶粒之间的界面相对较大，且晶粒的位向也各不相同，因此，晶粒的侧向可以自由生长，从而形成等轴状树枝晶[1]。

晶粒开始以轴向生长为主，主要进行枝干和侧枝的纵向延伸，遇到相邻晶粒的阻碍后则停止轴向生长，转而进行枝干和侧枝的横向生长。这些侧枝比较发达的等轴晶堆砌在焊缝的中心区域，最终形成等轴晶带。因此，等轴晶区组织不够致密，存在明显的气体杂质和疏松。



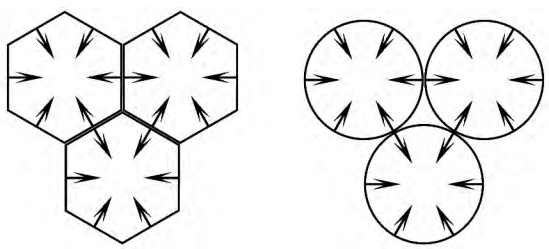
(a) 熔池金属凝固条件 (b) 熔池金属凝固形态

图4 成分过冷区与等轴晶的形成示意图

3.2 结晶裂纹的形成过程

C、Mn元素和气体夹杂在固相中和液相中的溶解度有差异，树枝晶随着凝固界面的推进而生长，期间不断析出的C、Mn元素和气体夹杂被排挤在后凝固的枝晶间，这些夹杂所形成的共晶具有相对较低的熔点，能够降低晶界间的结合强度。

如图5所示，焊缝中心部位的钢液在凝固过程中，每个等轴晶的体积将发生连续收缩，晶粒内部产生一种持续增长的向心力，这对晶界构成一种持续的拉伸效应。遵循能量最低原理，等轴晶最终会缩变为一个球体，当拉应力的强度超过晶界间的结合强度时，将导致该处晶界的开裂。



(a) 凝固前的晶体界面 (b) 凝固后的晶体界面

图5 在凝固过程中晶体界面的变化示意图

3.3 凝固缩孔的形成过程

焊接过程中熔池周围充满成分复杂的气体，在电弧高温的作用下，这些气体不断向熔池内部的钢

液扩散和溶解。结晶过程中绝大部分气体能够溢出，但有少量气体由于析出速度、气泡长大或上浮速度相对较慢，气泡来不及溢出而滞留在焊缝中。

侧枝相互搭接的等轴晶将焊缝中心糊状区进行分割，封闭空间内的钢液在凝固过程中体积发生收缩，受到气体压力和表面张力的作用，钢液无法进行补缩，最终形成弥散分布的凝固缩孔[3]。

焊后冷却强度偏低导致凝固区间增大，C、Mn 元素有充足的时间进行长距离扩散，枝干和侧枝能够得到充分的生长。因此，钢液凝固后所产生的缩孔也相应增大。

4　改进措施

4.1　预防结晶裂纹的技术措施

4.1.1　冶金因素方面的改进措施

P、S 等杂质元素能形成多种低熔共晶，在结晶过程中偏聚在晶界而形成液态薄膜，增大结晶裂纹产生的倾向。因此，应尽可能降低母材和焊接材料中的 P、S 等元素的含量，必要时采用碱性焊条。

C 元素在结晶过程中能够产生成分偏析，并助长其他元素的有害作用，增大结晶裂纹产生的倾向。因此，在保证强度的前提下应尽可能降低母材和焊接材料中的 C 元素含量，必要时采用超低碳焊丝。

在焊缝及母材中添加适量的 V、Ti、A1 或 RE 等金属元素，通过细化晶粒来弱化晶粒之间的位向，以此来提高晶界的强度、降低结晶裂纹产生的倾向。

4.1.2　工艺因素方面的改进措施

采用焊前预热、控制焊接线能量的强度，保证焊缝的层间温度，以降低焊缝金属的热应变速率，能够有效降低裂纹产生的倾向。

在接头处应尽量避免错边、咬肉、未焊透等容易导致应力集中的操作，因为焊缝所承受的应力正好作用在聚集大量杂质的结晶面上。

焊接次序能够影响结晶裂纹产生的倾向，尽量保证多数焊缝能在较小刚度的条件下进行焊接，使焊缝整体所受到的受力达到相对最小。

4.2　预防凝固缩孔的技术措施

选择适宜的焊接电流、焊接电压和焊接速度，适当降低焊接线能量的强度，避免等轴晶粒的过分长大，从而减轻凝固缩孔的程度。

在焊缝及母材中添加适量的 V、Ti、A1 或 RE 等元素，通过增加活性质点的数量来增加晶核的数量，从而实现细化晶粒、减轻凝固缩孔的程度。

适当增加焊后的冷却强度，通过加快焊缝的凝固速度来缩短选分结晶的过程，阻止等轴晶粒的异常长大，从而减轻凝固缩孔的程度。

5　实施效果

经过对后续 X65Q 钢级管线管的对口焊接跟踪，焊缝的质量得到明显地改善，再未出现结晶裂纹或者凝固缩孔，从而证明改进措施是切实而有效的。

6　结论

(1) 焊接线能量强度相对较高，导致焊缝组织比较粗大，枝晶偏析导致等轴晶之间偏聚着大量的 C、Mn 元素和气体夹杂，这些夹杂所形成的共晶熔点相对较低，能够降低晶界间的结合强度；焊缝中的钢液在凝固过程中体积发生收缩，这对晶界构成一种持续的拉应力；当拉应力的强度超过晶界间的结合强度时，将导致该处晶界的开裂。

(2) 焊后冷却强度偏低，C、Mn 元素有充足的时间进行长距离扩散，导致树枝晶的充分生长；焊缝中的钢液在结晶过程中，多数气体能够溢出，但有少量气体滞留在焊缝中；侧枝相互搭接的等轴晶将焊缝中心的糊状区进行分割，封闭空间内的钢液在凝固过程中体积发生收缩，受到气体压力和钢液表面张力的作用，钢液无法进行补缩，最终形成凝固缩孔。

参　考　文　献

[1] 毕宗岳，李超，刘志军. 管线钢管焊接技术[M]. 北京：石油工业出版社，2013.

[2] 王久彬，潘秀兰，张富强. 连铸坯的凝固传输现象[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，1999.

[3] 高义民. 金属凝固原理[M]. 西安：西安交通大学出版社，2010.