

## 某导弹 30CrMnSi 壳体 TIG 焊缝微裂纹分析

## Micro-Crack Analysis on TIG Weld of Missile 30CrMnSi Shell

北京航星机器制造公司 杜昊龙 贺晓军

**[摘要]** 对某 30CrMnSiA 材料 TIG 焊接壳体焊缝区域裂纹进行了分析,利用 X 射线、显微硬度计、金相显微镜、扫描电镜等对断口进行了观察和检测。通过分析断口物、化特征,认为该裂纹为热处理淬火保温过程中出现的再热裂纹,亦有小部分可能为微小尺寸未检出的焊接热裂纹,均属于冶金裂纹,通过一系列措施加以控制,效果良好。

**关键词:** 30CrMnSiA TIG 焊缝 热处理 热裂纹

**[ABSTRACT]** The micro-cracks on TIG welded shell of 30CrMnSiA alloy are analyzed. The fracture is observed and detected by using X-ray, microhardness tester, metallurgical microscope, stereoscan photograph and so on. Based on these analysis, most of the micro-cracks are considered as the reheat cracks generated during thermal retardation of quenching. A little possibility of them are hot welding cracks with microsize that are not checked. All of the cracks belong to the metallurgy cracks. A series of methods are carried out to control the cracks, and the excellent effect could be obtained.

**Keywords:** 30CrMnSiA TIG weld Heat treatment Hot cracking

30CrMnSiA 材料属中碳调质钢,具有较高的强度和韧性,广泛应用于制造航空航天飞行器油箱、气瓶、发动机舱壳体、舱段等产品重要结构零部件。

30CrMnSiA 具有较大的淬透性,焊接性较差。大多数情况下中碳调质钢都是在退火(或正火)状态下进行焊接,焊后再进行整体调质。焊接过程容易出现焊接裂纹,因此焊接工艺多采用焊前充分预热,焊后缓冷,即时去应力回火,严格装配要求,减小焊接线能量及保证原材料质量等方面采取措施,以防止焊接裂纹产生。在焊接薄壁应力集中小的结构时,为简化工艺流程,提高生产效率,可以不采用预热、后热等处理方法<sup>[1]</sup>。本单位在焊接 30CrMnSiA 材料 3mm 以下薄壁焊缝时,通常不采用预热、后热等处理方法,直接焊接。

## 1 事件过程与结果

## 1.1 材料成分及工艺流程

某型导弹某舱体外壳由 30CrMnSiA 材料通过自动钨极氩弧焊焊接制造。焊缝接头形式为 2.5mm+2.5mm 对接接头,环形焊缝结构形式。壳体焊接工艺流程为:(1)焊接环焊缝;(2)退火;(3)X 光无损探伤;(4)喷砂;(5)刷保护涂料;(6)调质;(7)X 光无损探伤;(8)后续加工。

30CrMnSiA 材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 30CrMnSiA 的化学成分(质量分数) %

元素	C	Cr	Mn	Si	P	S	Fe
含量	0.27~0.34	0.9~1.1	0.9~1.1	0.9~1.10	<0.035	<0.035	余量

焊接工艺:采用自动钨极氩弧焊,焊丝材料为 H18CrMoA,电压为 9~10V,电流为 100~120A,焊接速度为 0.18m/min。

去应力退火工艺:650℃ × 120min,空冷。

调质处理工艺:淬火 900℃ × 30min;回火 500℃ × 150min,空冷。

在工序 1、2 后,进行 X 射线探伤检测,未发现裂纹。然后经工序 6 调质后,再进行 X 射线探伤检测,发现环形焊缝处有 2 处微裂纹存在。

对焊缝缺陷处进行了 X 射线探伤和裂纹金相观察,将裂纹打开后对断口进行了宏微观观察,检查了焊接接头及母材的金相组织,确定了裂纹性质,并对裂纹产生原因进行了分析。

## 1.2 裂纹检测

## 1.2.1 X 射线无损检测

对送检的舱壳体采用 X 射线无损检测进行复检,检测发现在环焊缝处有 2 处线性缺陷或微裂纹存在。

## 1.2.2 裂纹金相观察

在 2 处缺陷区域分别切取金相试样,并命名为 1 号试样和 2 号试样。经过磨抛,确定裂纹位置。

1 号试样裂纹位于焊缝区域,靠近表面,长度约为 1.5mm,裂纹形态具有沿晶开裂的特征,如图 1 所示。

2号试样裂纹位于热影响区,处于热影响区表面,长度为1mm左右,裂纹形态具有沿晶开裂的特征,如图2所示。

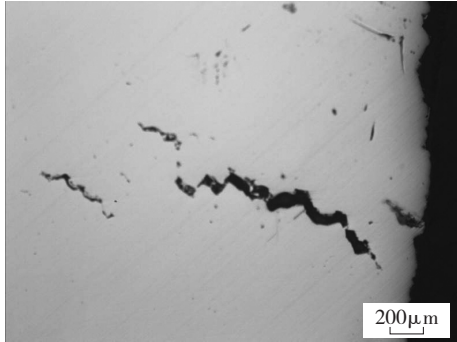


图1 1号试样裂纹形貌  
Fig.1 1st sample crack morphology

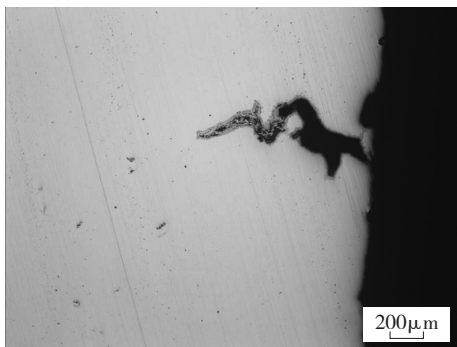


图2 2号试样裂纹形貌  
Fig.2 2nd sample crack morphology

### 1.2.3 硬度检测

对试样组织异常部位进行硬度测试,结果如表2所示。从表2的结果可以看出,组织异常区域硬度要明显低于其他区域。

表2 硬度测试结果 (HV300)

测试位置	1	2	3	平均值
靠近裂纹的氧化区	259.3	273.2	260.3	264.3
远离裂纹的热影响区	304.3	306.2	311.9	307.5

### 1.2.4 断口观察

将裂纹打开,断口经超声波清洗后进行扫描电镜观察。

1号试样裂纹断口低倍形貌如图3所示,可见断口呈沿柱状晶断裂特征,晶面上有轻微氧化特征,如图4所示。而从沿晶形貌上看,柱状晶表面比较圆滑,具有自由表面特征,如图5所示。人为打开断口表面为韧窝形貌,如图6所示。在断口靠近表面处,为韧窝特征,说明该裂纹可能未与表面连通。断口上未见焊接缺陷。

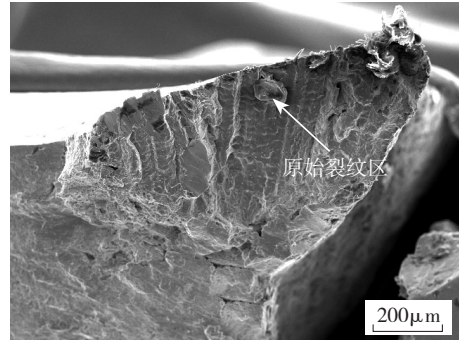


图3 1号试样裂纹断口低倍形貌  
Fig.3 Low magnification morphology of 1st sample crack fracture

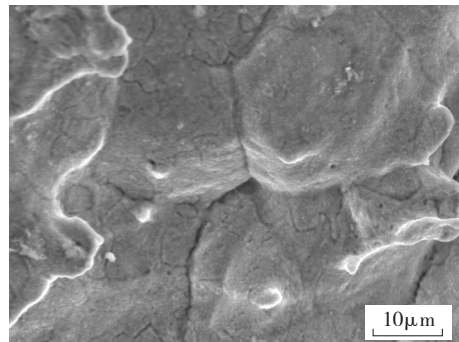


图4 1号试样裂纹断口表面氧化特征  
Fig.4 Surface oxidation characteristics of 1st sample crack fracture

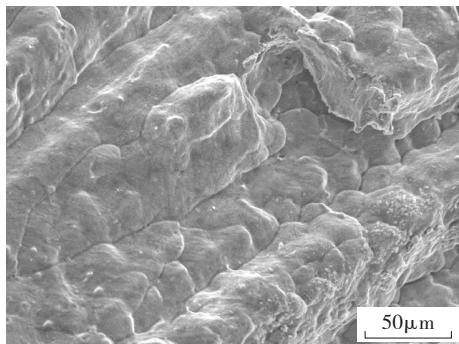


图5 1号试样裂纹断口柱状晶的自由表面特征  
Fig.5 Free surface characteristics of 1st sample crack fracture columnar crystals

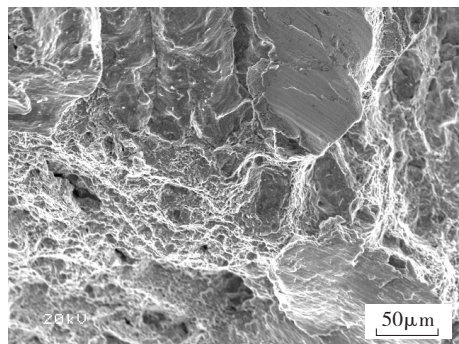


图6 1号试样人工打开区域的韧窝形貌  
Fig.6 Dimple morphology of 1st sample artificial open region

2号试样裂纹断口低倍形貌如图7所示,从图中可见,原始裂纹断口表现为沿晶断裂特征,其高倍形貌如图8所示。断口上有明显的氧化特征,如图9所示。人工打开断口表现为韧窝断裂特征,如图10所示。断口上未见焊接缺陷。

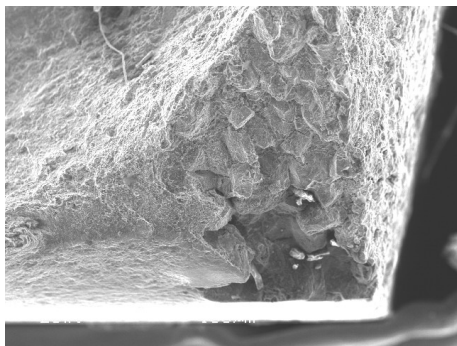


图7 2号试样裂纹断口低倍形貌

Fig.7 Low magnification morphology of 2nd sample crack fracture

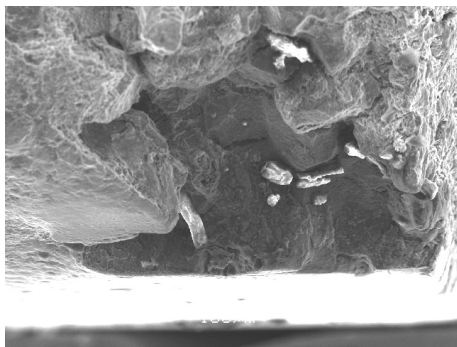


图8 2号试样裂纹断口原始裂纹区沿晶断裂特征

Fig.8 Intergranular fracture characteristics of 2nd sample original crack area

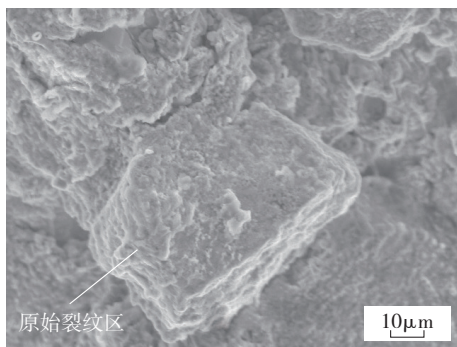


图9 2号试样裂纹断口原始裂纹区氧化物形貌

Fig.9 Oxide morphology of original crack area of 2nd sample fracture

### 1.2.5 金相组织观察

对1号试样平行于焊缝的横截面进行磨抛腐蚀后进行组织观察。观察发现,靠近裂纹区域和远离裂纹区域的组织基本相似,未见异常,如图11和12所示。

对2号试样的热影响区表面进行磨抛腐蚀后进行

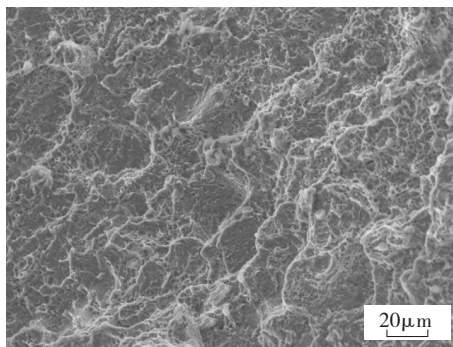


图10 2号试样人工打开区域的韧窝形貌

Fig.10 Dimple morphology of 2nd sample artificial open region

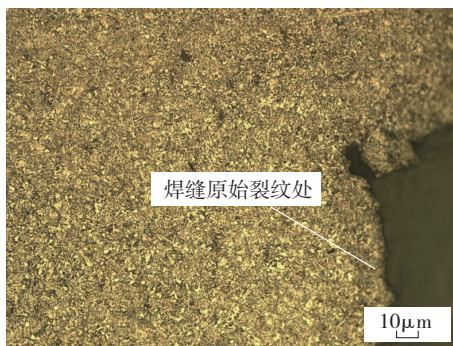


图11 1号试样靠近裂纹区域金相组织

Fig.11 Microstructure of 1st sample near crack region

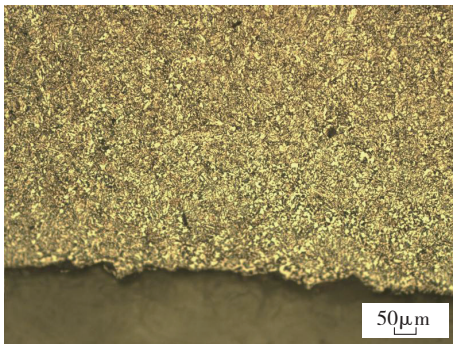


图12 1号试样远离裂纹区域金相组织

Fig.12 Microstructure of 1st sample away from crack region

组织观察。观察发现,靠近裂纹的区域存在明显的氧化脱碳特征,铁素体含量较多,如图13所示。远离裂纹热影响区组织未发现异常,如图14所示。

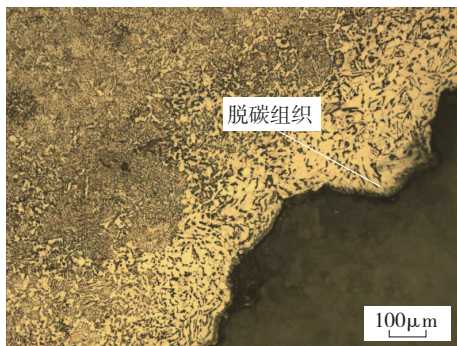


图13 2号试样靠近裂纹区域金相组织

Fig.13 Microstructure of 2nd sample near crack region

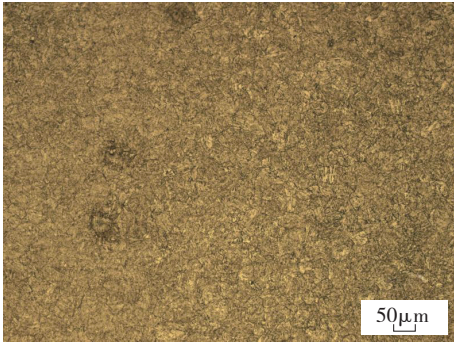


图14 2号试样远离裂纹热影响区金相组织

Fig.14 Microstructure of 2nd sample away from crack heat-affected zone

1.2.6 能谱成分检测

采用能谱分析仪对断口表面进行微区成分分析,结果如表3所示。由表3可见,2个试样原始裂纹区的沿晶断口表面都发生了高温氧化。

2 分析与讨论

检测结果表明,1号试件裂纹出现在焊缝处,断口呈沿柱状晶开裂特征,柱状晶表面比较圆滑,呈自由表面特征,并且表面可见氧化物特征。这些特征均为热裂纹特征。

2号试件裂纹出现在焊接热影响区,裂纹沿晶扩展,裂纹断面上严重氧化,且裂纹两侧已有明显脱碳。根据合金钢脱碳基本理论,造成合金钢脱碳温度必须在大于 $A_1$ 温度并维持一段时间,钢的 $A_1$ 温度在 $727^{\circ}\text{C}$ 左右。

根据产品焊接和热处理工艺过程,焊后退火温度为 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ ,调质处理预热温度为 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ ,淬火保温为 $900^{\circ}\text{C}$ ,回火温度为 $500^{\circ}\text{C}$ ,长时间大于材料 $A_1$ 温度

的阶段只有淬火保温阶段。由此可见,裂纹在热处理淬火保温过程中表面发生氧化,造成裂纹两侧脱碳。由于1号和2号裂纹表面都有氧化特征,而淬火油温低于 $A_1$ 温度,可以排除入油淬火过程产生裂纹的可能性。

根据制造工艺过程分析,温度高于 $A_1$ 温度的阶段共有2个阶段,一为焊接过程在电弧热作用下的金属熔化阶段,一为淬火保温的 $900^{\circ}\text{C}$ 高温区间阶段。裂纹只有可能在2个阶段产生。因此,该焊接裂纹可能为焊接过程中产生的热裂纹或者是热处理淬火保温过程产生的再热裂纹。

如果裂纹是在焊接过程金属熔化状态产生的,则该裂纹为高温液化裂纹。高温液化裂纹多发生在近缝区或多层焊中间部位。液化裂纹是由于焊接高温作用下焊缝层间金属在奥氏体晶界上的低熔点共晶被重新熔化,同时在拉伸应力的作用下沿奥氏体晶间开裂而形成,另外在不平衡的加热和冷却条件下,由于金属间化合物的分解和元素的扩散,造成了局部区域共晶成分偏高,从而发生局部晶间液化,同样会产生液化裂纹。液化裂纹是冶金因素和力学因素共同作用的结果。当母材和焊丝的硫、磷、碳含量偏高时,液化裂纹倾向显著增加<sup>[2]</sup>。

因为在焊接和去应力退火后,经过一次X光无损探伤检测,当时没有发现裂纹,所以说明该裂纹更有可能是淬火保温阶段产生的。虽然并不能完全排除焊接过程产生裂纹,尺寸极为细小,并且呈闭合状态,X光探伤无法检出,调质处理过程中,裂纹进一步扩展和张开并氧化这种情况,但相对来讲可能性较小。

此外,如果裂纹是焊接过程产生的,那么2处裂纹在淬火保温阶段长时间处于 $A_1$ 温度以上,都应该发生严重氧化,而1号裂纹氧化程度较轻,说明裂纹在 $A_1$ 温度停留时间不充分,从另一个侧面说明1号裂纹在淬火保温阶段产生的可能性较大。在淬火保温阶段产生的裂纹为再热裂纹<sup>[3]</sup>。

再热裂纹是指再次加热过程中产生的裂纹。再热裂纹敏感温度约为 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$ ,具有沿晶开裂特征。晶界杂质析集与再热裂纹有密切关系,低熔点共晶在重熔状态受力开裂。同时在再热的过程中伴随着应力松弛,发生蠕变

(下转第118页)

表3 断口能谱分析结果(质量分数)

元素	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe
1号试样原始裂纹区面扫	23.33	6.75	0.18	1.51	0.75	1.99	65.49
2号试样原始裂纹区面扫	17.30	5.51	0.59	0.52	1.01	0.78	74.30
2号试样氧化物点扫	7.89	30.96	4.14	2.48	3.46	0.47	50.59

表4 裂纹\母材\焊丝成分对比(质量分数)

元素	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe
1号试样原始裂纹区面扫	23.33	6.75	0.18	1.51	0.75	1.99	65.49
2号试样原始裂纹区面扫	17.30	5.51	0.59	0.52	1.01	0.78	74.30
2号试样氧化物点扫	7.89	30.96	4.14	2.48	3.46	0.47	50.59
母材	0.28~0.35	-	-	0.9~1.2	0.8~1.1	0.8~1.1	-
焊丝	0.15~0.22	-	-	0.15~0.35	0.8~1.1	0.4~0.7	-

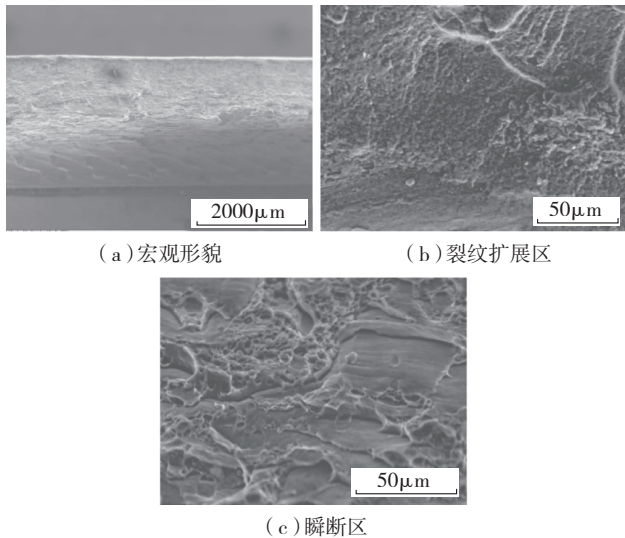


图6 800/400参数接头疲劳断口形貌

Fig.6 SEM images of fatigue fracture under 800/400 welding process

小,搅拌不充分,因此,接头中存在孔洞或未焊合缺陷。

(2) 600/200、800/200、800/400 (r/min, mm/min) 参数下, Al-Li-S4 和 2099 搭接接头静强度均接近母材的 90%,但疲劳性能较差,800/200 参数接头 200 万次疲劳强度仅为 80MPa。

(3) FSW 过程使搭接结构焊核区前进侧界面形成“Y”形交界点,疲劳试验过程中产生应力集中,微裂纹一旦出现,就会向焊核底部迅速扩展,使样品很快发生断裂。通过焊接工艺控制“Y”形交界形貌,将有可能改善搭接结构疲劳性能。

### 参考文献

[1] 张华,林三宝,吴林. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊工艺及应用. 焊接技术,2000,29(2):6-9.

[2] 刘小文,鄢君辉,林随更,等. LY12 搅拌摩擦焊技术. 焊接学报,2001,22(4): 55-57.

[3] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering R,2005,50:1-78.

[4] Cavaliere P, Cabibbo M, Panella F. 2198 Al-Li plates joined by Friction Stir Welding: Mechanical and microstructural behavior. Materials and Design,2009,30: 3622-3631.

[5] Hirasawa S, Badarinarayan H, Okamoto K. Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. Journal of Materials Processing Technology,2010,21: 1455-1463.

[6] James M N, Bradley R, Lombard H. Residual stresses and fatigue performance. Fatigue fract Eng Mater Structure,2005,28: 254-256.

[7] 魏世同,郝传勇. 01420 铝锂合金的搅拌摩擦焊接. 航空材料学报,2006,26(6): 21-25.

[8] 王永,胡捷,胡国平,等. 可焊铝锂合金焊接研究现状. 有色金属,2002,54(1): 16-20. (责编 可岚)

(上接第 114 页)

现象,形成蠕变断裂的再热裂纹。

再热裂纹产生的原因分析:

从母材和焊丝的化学成分能谱分析可以看出,裂纹断口处铝元素含量异常升高,正常的焊缝组织中铝元素含量应该非常低,而测试表明裂纹和氧化物中均含有较高的铝元素成分,这一测试结果非常不合理(表 4)。铝的熔点远低于铁,容易形成低熔点共晶,符合产生裂纹的条件,可能在焊接或热处理的再热过程中产生裂纹。

正常的生产过程不应该有铝元素的添加和含量的升高。结合实际生产过程,发现用来焊接生产该产品的场地和使用的焊接设备同时焊接大量铝合金产品,不排除操作手套、焊丝或设备被细微铝污染,融入焊缝金属,在焊接冶金的过程中偏析形成裂纹的可能性。

无论裂纹是在焊接还是在热处理阶段产生的,该类型裂纹都是热裂纹,属于冶金裂纹,是材料的自身属性和加工工艺容易出现的缺陷类型。

### 3 防止措施

针对裂纹分析,制定了如下措施加以控制:做好焊前清理工作、尽量减少焊接热输入量、装配时均匀分布,减少装配应力、第 1 遍焊接后尽快焊接第 2 遍,保证焊接层间温度;其次焊后调质处理阶段,缓慢升温,提高淬火介质温度,可减小热应力的产生,从而减缓微裂纹的扩展。通过上述措施的落实,基本杜绝了类似裂纹缺陷的发生。

### 4 结论

(1) 1 号裂纹处于焊缝处,2 号裂纹处于热影响区,裂纹沿晶扩展,都属于热裂纹。

(2) 该裂纹可能是焊接过程中产生的微裂纹,在调质阶段得到了扩展,也可能是淬火保温过程中产生的再热裂纹。从本质上都属于冶金裂纹。

(3) 可以通过减小焊接热输入,控制焊接层间温度,加强焊前清理,控制装配状态、优化热处理规范等措施加以控制,能够减少该类热裂纹产生的概率。

### 参考文献

[1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊选手册·材料的焊接. 2 版. 北京:机械工业出版社,2001.

[2] 崔忠圻. 金属学与热处理. 北京:机械工业出版社,1997.

[3] 张文钺. 焊接冶金学. 北京:机械工业出版社,1997.

(责编 良辰)