

文章编号:1003-1545(2020)04-0086-05

**焊接技术**

# 高强钢焊条熔敷金属与对接接头冲击韧性差异分析

何 亮,牛继承,张玉祥

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所,河南 洛阳 471023)

**摘要:**通过化学成分分析、焊道分布及缺口位置分析、显微组织观察等手段,对自制焊条熔敷金属与对接接头的冲击韧性差异的原因进行分析,结果表明:由于母材熔合比不同,熔敷金属与对接接头根部焊缝金属化学成分不同,同时对接接头根部焊缝受再热中温回火作用显著,造成对接接头根部焊缝与熔敷金属的显微组织具有明显差异,从而导致两者冲击韧性的差异;由于熔敷金属与对接接头焊缝的焊道布置不同,先焊焊道受后续焊道再热作用效果不同,形成不同的组织分布特征,从而导致两者冲击韧性的差异。

**关键词:**熔敷金属;对接焊缝;焊道布置;冲击韧性;显微组织

中图分类号:TG111.5 文献标识码:A

## Analysis on Impact Toughness Difference between Butt Weld Metal and Deposited Metal

HE Liang, NIU Jicheng, ZHANG Yuxiang

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** By means of chemical composition analysis, bead distribution and gap position analysis and microstructure observation and other means, the causes of impact toughness difference between deposited metal of self-made electrode and butt weld were analyzed. The results show that the different fusion ratio of the base material, the differences between the chemical compositions of the deposited metal and the butt joint root weld and the significant effects of reheating and tempering on butt joint root weld result in the obvious differences between the microstructures of the butt joint root weld and the deposited metal and the difference in impact toughness, and that because the weld bead layouts of deposited metal and butt joint weld are different, and the reheat effect of the first weld bead subjected to the subsequent weld bead is different, different organizational distribution characteristics is formed, which is the cause of difference of the impact toughness.

**Keywords:** deposited metal; butt weld metal; bead arrangement; impact toughness; microstructure

焊接接头是焊接结构中极为关键的部位,对于很多重要结构来说,其焊接接头不仅要满足强度要求,还应具有良好的冲击韧性。实际应用中,不同强度级别的结构钢焊条,对接接头焊缝金属的-50℃冲击吸收能量与熔敷金属相比均有较大幅度的下降,且部分下降幅度超过30%<sup>[1]</sup>。本研究针对自制的一种屈服强度为800 MPa的焊条,其焊接接头焊缝的冲击吸收能

量与熔敷金属的相比下降幅度达50%以上的情况,通过化学成分分析、缺口位置分析、焊道布置分析和组织分析等手段,对冲击韧性差异原因进行分析和探讨。

### 1 试验材料与方法

试验焊条为自制的屈服强度为800 MPa级焊

收稿日期:2019-07-04

作者简介:何亮,男,1989年生,硕士,从事船体结构钢及焊材研究。

条, 规格为  $\phi 4.0$  mm, 熔敷试板和对接试板焊接均采用表 1 所示的焊接工艺。对接试板母材采用某高强钢, 其成分见表 2。从熔敷试板及对接试板上制取标准夏比 V 型缺口冲击试样, 缺口均开在熔敷金属及对接接头的焊缝中心位置。表 3 列出了焊条熔敷金属和对接接头的基本力学性能。

能。从表 3 可见, 熔敷金属和对接接头的强度和塑性未见明显变化, 但对接接头  $-50$  °C 冲击吸收能量相较于熔敷金属下降幅度高达 54%。采用 ICP 光谱分析仪对熔敷金属、对接接头各区域进行化学成分分析、光学显微镜金相组织观察以及透射电镜微观组织观察。

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

电流/A	电压/V	焊接速度/(cm/min)	预热温度/°C	道间温度/°C	后热
160~180	23~27	15~17	110~130	110~130	250 °C × 2 h

表 2 母材成分

Table 2 Composition of the base metal (w)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
0.06~0.07	0.4~0.6	0.6~0.8	7~9	0.5~0.7	0.5~0.7	0.09

表 3 焊条基本力学性能

Table 3 Basic mechanical properties of the electrode

焊接方式	$R_{p0.2}$ /MPa	$R_m$ /MPa	A/%	Z/%	$KV_2(-50$ °C)/J
熔敷焊接	831	883	20.0	65	79, 84, 73/78
平焊对接	835	890	19.5	64	36, 47, 27/36

## 2 试验结果与分析

### 2.1 化学成分分析

合金成分影响焊缝金属的组织转变, 是决定焊缝力学性能的关键因素。焊条熔敷金属、对接接头焊缝表层及根部的化学成分分析结果如表 4 所示。从表 4 可以看出, 对接接头表层焊缝与熔敷金属化学成分基本相当, 各元素含量基本接

近, 而根部焊缝金属化学成分与熔敷金属相比, C、Si、Mn、Ni 和 Mo 元素含量相差不大, 但 Cr 和 V 元素含量显著增加。根据母材的化学成分可知, 由于对接焊缝根部与母材的熔合程度比较大的原因, 对接接头根部焊缝从母材熔入了较多的 Cr 元素及 V 元素。鉴于 Cr 和 V 元素均为碳化物形成元素, 能够显著提高过冷奥氏体的稳定性, 增加过冷奥氏体淬硬倾向, 使根部焊缝更容易获得硬脆组织, 因而降低了对接接头焊缝金属的低温韧性。

表 4 焊缝金属化学成分

Table 4 Composition of welding metal (w)

取样位置	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
熔敷金属中心	0.037	0.220	1.73	3.77	0.199	0.634	<0.01
对接焊缝表层	0.040	0.216	1.56	4.08	0.220	0.630	<0.01
对接焊缝根部	0.037	0.219	1.59	3.92	0.519	0.627	0.025

### 2.2 焊道分布及缺口位置分析

本试验中熔敷金属和对接焊缝均为多层多

道焊缝, 但采用的焊道分布不同, 这有可能是导致两者冲击韧性巨大差异的原因之一。众所周

知,单道焊缝的组织是粗大的柱状晶组织,而多层次多道焊缝,后焊焊道的热循环会对先焊焊道产生再次加热作用,这样先焊焊道的焊缝金属根据与后焊焊道的距离不同而受到不同温度的热循环,从而形成不同类型的微观组织,这种情况与焊接接头基体热影响区相似,形成不同形态的亚微观组织<sup>[1]</sup>。对于多层次多道焊缝,先焊焊道受后焊焊道再热作用不明显的区域,仍保留着粗大的柱状晶组织特征,具有明显的柱状晶方向性,其韧性显然较差,而受到再热作用较大的区域,粗大的柱状晶被碎化,方向性消失,其组织将得到细化,形成细小的等轴晶,冲击韧性得以改善<sup>[2]</sup>。

图 1(a)是熔敷试板焊道布置及缺口位置示意图,对于熔敷试板而言,焊道在焊缝中心彼此交错,中心部位的焊缝金属受到多次再热循环的作用,该处先焊焊道粗大的柱状晶组织得以细化。因而熔敷金属在开缺口的中心部位基本上以细晶组织为主,粗晶组织相对较少,这种组织分布有利于其冲击韧性。图 1(b)是对接试板焊缝焊道布置及缺口位置示意图,由图 1(b)可见,对接焊缝总焊道数相对较少,并且正反面打底的

两道焊缝是单道叠加,这导致对接焊缝的后焊焊道对先焊焊道再热作用不如熔敷焊缝的充分,先焊焊道的粗大柱状晶组织细化不充分。因此,对接焊缝开缺口处的组织特征为粗大的柱状晶与细小的等轴晶相间分布。柱状晶具有明显的方向性,晶粒也相对粗大,裂纹扩展穿过的柱状晶的晶界面积较少,裂纹扩展阻力较小,因而裂纹一旦在该处萌生,将很快扩展,成为焊缝的薄弱环节,这种组织显然不利于焊缝金属的冲击韧性<sup>[3-4]</sup>。由于熔敷金属和对接焊缝的焊道分布不一致,两者的焊缝金属形成不同的组织分布特征,从而造成两者冲击韧性的巨大差异。

### 2.3 金相组织观察

焊条熔敷金属、对接接头表层焊缝及根部焊缝处的金相组织照片如图 2 所示。焊条熔敷金属和对接接头表层焊缝的金相组织均以针状铁素体组织为主,同时还含有部分贝氏体及少量粒状贝氏体,该种组织具有良好的强韧性。熔敷金属及对接接头表层焊缝的组织基本一样,主要是由于两者化学成分基本相当,而且热循环条件相似,所以得到的金相组织也基本一致。

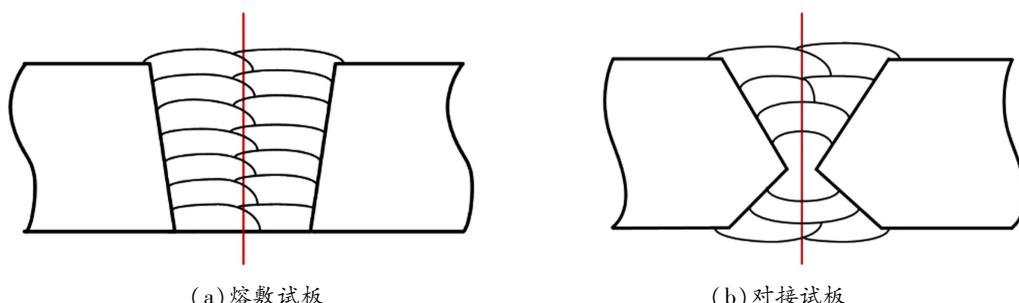


图 1 熔敷试板和对接试板焊道布置及缺口位置

Fig.1 Bead arrangement of deposited metal and butt weld metal

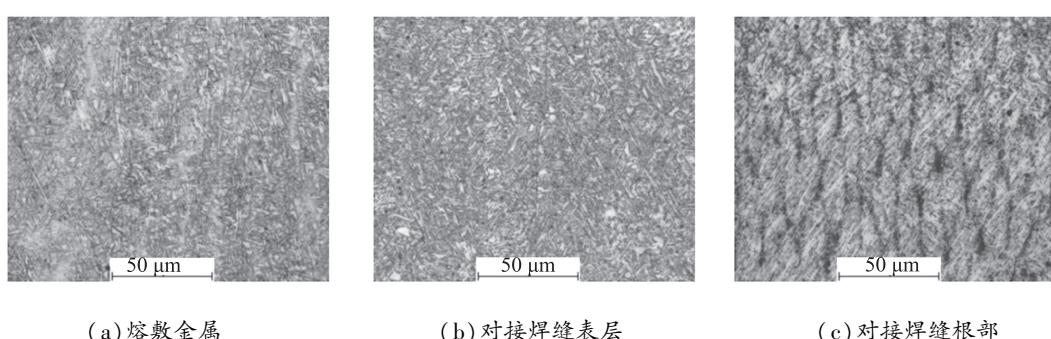


图 2 焊缝金属显微组织

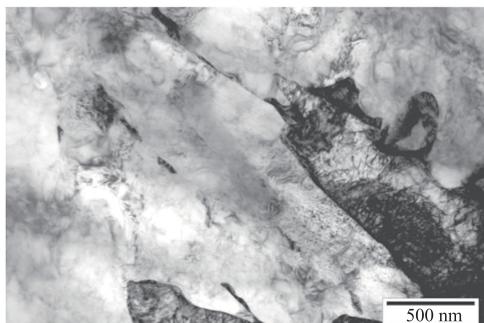
Fig.2 Micro-structure of welded metal

图2(c)是对接接头根部焊缝组织,与熔敷金属及对接接头表层焊缝的组织不同,对接接头根部焊缝组织以贝氏体和屈氏体为主,并含有少量粒状贝氏体,这种组织韧性较差,尤其是低温韧性。形成这种组织主要原因有以下两方面:一方面,对于强度级别达800 MPa的焊缝金属,形成以针状铁素体为主的组织比较困难,需要的条件较为严苛,而焊缝根部熔入较多的Cr和V元素,缩小奥氏体相区,提高了过冷奥氏体稳定性,增加过冷奥氏体淬硬倾向,使焊缝金属更容易形成硬脆组织,因此对接接头根部焊缝出现贝氏体组织;另一方面,焊缝根部受正面和反面两次再热

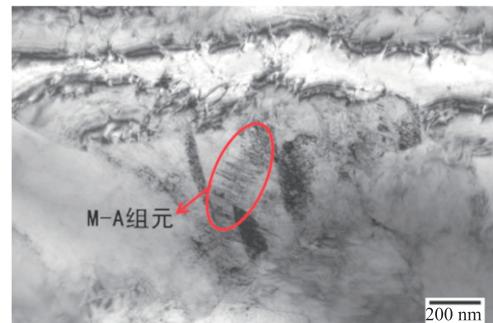
影响,相对其它焊缝金属,其受到类似回火作用的热循环更加明显,由于再热热循环过程中,500 ℃高温以上持续的时间很短,而300~400 ℃中温部分持续时间相对较长,所以导致焊缝根部的贝氏体铁素体相中析出细颗粒状渗碳体碳化物,从而形成中温回火产物,即回火屈氏体。正是由于与熔敷金属及对接接头表层焊缝的组织不同,导致对接接头根部焊缝韧性较差。

#### 2.4 透射电镜组织观察

通过透射电镜观察焊条熔敷金属及对接接头根部焊缝的显微组织如图3和图4所示。



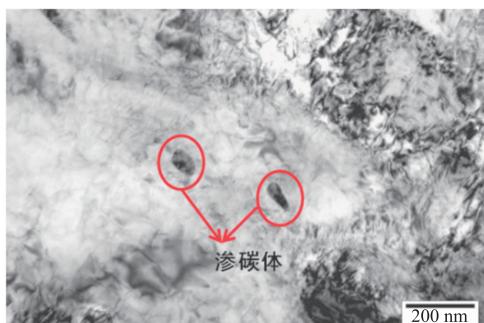
(a)



(b)

图3 熔敷金属根部透射组织

Fig.3 Transmission structure of the deposited metal



(a)



(b)

图4 对接焊缝根部透射组织

Fig.4 Transmission structure of the butt welded root

由图3和图4可知,熔敷金属及对接焊缝透射组织中均发现M-A组元,该结果与金相组织观察中两种焊缝金属均存在少量粒状贝氏体的情况是一致的。不同的是,在对接接头根部焊缝

透射组织中存在较多细小的颗粒状渗碳体,尺寸大约为50~70 nm,这也印证了金相观察中对接接头根部焊缝有较多的回火屈氏体出现的情况。

### 3 结论

(1) 由于母材熔合比不同,高强钢焊条熔敷金属与对接接头根部焊缝金属化学成分不同,对接接头根部焊缝受再热中温回火作用显著,造成对接接头根部焊缝与熔敷金属的显微组织具有明显差异,导致两者冲击韧性的差异。

(2) 由于熔敷金属与对接接头焊缝的焊道布置不同,先焊焊道受后续焊道再热作用效果不同,形成不同的组织分布特征,导致两者冲击韧

性的差异。

#### 参考文献:

- [1] 迟之东. 对接焊缝金属和熔敷金属冲击功差异原因探讨[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008: 19–21, 38–42.
- [2] 吕德林. 焊接金相分析[M]. 北京:北京机械工程出版社, 1987: 170–230.
- [3] 王国珍, 陈剑虹, 王政. C-Mn 钢和焊缝金属韧性数据分散的原因[J]. 甘肃工业大学学报, 1991, 17(3): 34–41.
- [4] 阎澄, 陈剑虹, 罗永春. 高强钢多层焊缝薄弱环节组织及韧性的研究[J]. 金属科学与工艺, 1991, 10(2): 97–103.

(上接第 68 页)

- percapacitor electrode[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(6): 2774–2778.
- [12] XU J J, WANG K, ZU S Z, et al. Hierarchical nanocomposites of polyaniline nanowire arrays on graphene oxide sheets with synergistic effect for energy storage [J]. ACS Nano, 2010, 4(9): 5019–5026.
- [13] 杨志伟, 付玉彬, 郭满, 等. 氨气处理碳毡阳极对海底沉积物微生物燃料电池性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(3): 22–33.
- [14] FEI H L, YE R Q, YE G L, et al. Boron and nitrogen-doped graphene quantum dots/graphene hybrid nanoplatelets as efficient electrocatalysts for oxygen reduction[J]. ACS Nano, 2014, 8(10): 10837–10843.
- [15] ZHOU Z Q, ZHANG X Y, XING L D, et al. Copper-assisted thermal conversion of microporous covalent melamine–boroxine frameworks to hollow B, N-co-doped carbon capsules as bifunctional metal-free electrode materials [J]. Electrochimica Acta, 2019 (298): 210–218.
- [16] 钟耀东, 陶雪钰, 朱磊, 等. 导电聚苯胺电极材料

的制备及其在超级电容器中的应用[J]. 教育教学论坛, 2019(48): 269–270.

- [17] ZHANG L, WANG T M, LIU P. Polyaniline-coated halloysite nanotubes via in-situ chemical polymerization[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 2091–2097.
- [18] LIN X X, PENG P, GUO J N, et al. Reaction milling for scalable synthesis of N, P-codoped covalent organic polymers for metal-free bifunctional electrocatalysts[J]. Chemical Engineering Journal, 2019(358): 427–434.
- [19] ZHOU N, WANG N, WU Z X, et al. Active sites on metal-free, Nitrogen-doped carbons for oxygen electroreduction: a review[J]. Catalysts, 2018, 8(11): 509–524.
- [20] KOYSUREN O, DU C S, PAN N, et al. Preparation and comparison of two electrodes for supercapacitors: Pani/CNT/Ni and Pani/Alizarin-treated nickel[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113(2): 1070–1081.