

# X80 管线钢焊条电弧焊接头组织与耐蚀性分析

赵伟<sup>1,2</sup>, 邹勇<sup>1</sup>, 夏佃秀<sup>3</sup>, 邹增大<sup>1</sup>

(1. 山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061;  
2. 齐鲁工业大学 机械与汽车工程学院, 济南 250353; 3. 济南大学 机械工程学院, 济南 250022)

**摘要:** 利用双熔敷极焊条电弧焊技术对 X80 管线钢进行了焊接, 并在焊接接头成分、组织及耐蚀性方面与传统焊条电弧焊进行了对比分析。结果表明, 双熔敷极焊条电弧焊技术熔敷效率高, 但受其结构及药皮重量系数的影响, 焊缝中合金元素的含量比普通焊接焊缝的低, 且焊缝中多边形铁素体含量较高, 另一方面由于对母材的热输入较低, 使得其粗晶区组织较为细小, 这有利于其性能的提高; 对 0.5 M  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  - 1 M  $\text{NaHCO}_3$  溶液及通饱和  $\text{CO}_2$  的 NACE A 溶液中的耐蚀性研究发现, 焊缝及粗晶区耐蚀性均差于母材, 且采用双熔敷极焊条电弧焊技术有利于提高焊缝及粗晶区的耐蚀性。

**关键词:** 双熔敷极焊条电弧焊; 管线钢; 耐蚀性

中图分类号: TG 444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)10-0051-04

## 0 序言

X80 管线钢是通过控扎控冷技术获得的一种高强度的低合金钢(HSLA), 在西气东输二线段干线工程已经成功应用, 由于其拥有较高的强度及较好的强、韧匹配, 在世界范围内拥有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

焊接是影响管线钢应用及管线安全的关键技术之一, 现有的焊接技术一般都是试板接一极, 焊条或焊丝接一极。为了保证运输速度, 管线钢的壁厚一般较大, 所需要的焊接热输入较大, 以致于热影响区组织粗大, 进而影响其性能, 使得焊接接头成为整个管线综合性能的薄弱环节。另一方面, 腐蚀已经成为管线失效的主要原因之一, 焊接接头存在着组织、成分的变化, 且有残余应力的存在, 耐蚀性较为复杂且为薄弱环节, 现场经验也证明了这一点<sup>[2-5]</sup>。因此, 为了更安全的使用 X80 管线钢, 有必要对其焊接接头的耐蚀性进行研究。

双熔敷极焊条电弧焊是一种新型的焊接技术, 其利用间接电弧对焊件进行焊接, 焊接时被焊金属不接电源, 电弧在两焊芯之间形成, 大量的热量集中在熔化焊芯上, 而仅依靠电弧热和熔滴携带的热量熔化母材, 因此其具有熔合比较小、焊接效率高等优点<sup>[6-8]</sup>, 这正好符合管线钢的焊接要求。文中对比研究了利用传统及双熔敷极焊条电弧焊技术所获得

的 X80 管线钢焊接接头, 研究了其焊缝、粗晶区的成分、组织及耐蚀性的差别, 并分析了其原因。

## 1 试验方法

试验所用钢材为 X80 管线钢, 取自国内某钢厂, 其含碳量为 0.046%, 焊接速度垂直于轧制方向, 试板厚度为 26.4 mm, 坡口设计为 X 形, 焊接前对试板进行机械打磨并在 250 °C 烘干 1 h。试验所用的焊接电源为 ZX7-400S IGBT 逆变焊机, 其电源外特性为恒流带外托, 采用传统 E9018 焊条及双熔敷极 TE9018 焊条分别进行焊接, 后者采用山东大学研制的涂压机压制, 其规格均为  $\phi 3.2 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 双熔敷极焊条双芯间距为 0.8 mm, 两者药皮配方相同。为保证焊接质量与焊接效率, 焊接时普通焊条电弧焊与双熔敷极焊条电弧焊电流分别采用 100 和 150 A, 焊接速度分别采用 330 和 500 mm/min。焊接过程观察可发现, 两者电弧电压维持在 22 和 35 V 左右, 因此后者的名义热输入约为前者的 1.5 倍。

焊后, 对焊接接头分别进行成分测定、金相观察及电化学测试。成分测定采用光谱法; 金相试样经 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀后, 采用 VHX-500F KEYENCE 型显微镜进行金相观察; 电化学测试采用三电极系统, 辅助电极和参比电极分别选用铂电极和饱和甘汞电极, 工作电极为分别取自 X80 管线钢母材、两焊接接头焊缝中心及粗晶区的试样, 各试样均为 10 mm × 10 mm 的正方形, 用金相砂纸逐级打磨

到金相800号,之后依次分别用无水乙醇、丙酮、蒸馏水清洗,硅胶封样待用。试验前工作电极首先置于-1.2 V的电压下阴极极化5 min。待开路电位稳定后,在开路电位下进行交流阻抗谱(EIS)测试,频率范围为 $10^{-2} \sim 10^5$  Hz。试验所用溶液为 $0.5\text{MNa}_2\text{CO}_3 - 1\text{MNaHCO}_3$ 溶液与通饱和 $\text{CO}_2$ 的NACE A( $0.5\% \text{CH}_3\text{COOH} + 5\% \text{NaCl}$ )溶液,试验温度为 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 成分分析

X80管线钢母材及焊缝成分如表1所示,可见母材含有的合金元素,在两组焊缝中均存在,虽然其含量存在差异,但仍实现了较好的匹配;两组焊缝中,TE9018焊缝中Mn、Si、Cu、Cr元素含量明显低于E9018焊缝,这一方面是由于焊芯和母材的成分差异,另一方面也是由于双熔敷极焊条电弧焊技术特殊的结构及药皮重量系数导致的合金元素过渡系数较低所致。

### 2.2 组织分析

图1,图2分别为母材以及E9018、TE9018焊缝中心处、熔合线附近、粗晶区组织。可见母材组织主要由粒状贝氏体及多边形铁素体组成,两者交错分布,使得该钢取得高强度和低屈强比之间的平衡。

两组焊缝组织均以针状铁素体及多边形铁素体为主,与母材组织特征相互匹配,这有利于保持管线整体性能的均匀性。同时TE9018焊缝中的多边形铁素体含量比E9018焊缝多,更重要的是TE9018熔合线处组织与焊缝中心处差别较大,针状铁素体含量减少。这一现象主要是由于采用TE9018焊条焊接过程中,大量的热量用来熔化焊芯,焊接效率高,但对母材的加热作用小,导致焊缝与母材的温差大。此外,由于双熔敷极焊条电弧焊技术大量的热量都用来熔化焊芯,导致熔滴过热程度较高,使得其焊缝组织较传统焊条电弧焊焊缝组织粗大。

两组粗晶区组织均以粒状贝氏体为主,均可以观察到先奥氏体晶界。两者组织主要区别如下:(1)TE9018粗晶区先奥氏体晶粒尺寸比E9018小;(2)虽然两者组织均以粒状铁素体为主,但TE9018粗晶

表1 X80管线钢母材及焊缝成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of X80 base material and welded material

	Si	Mn	Al	Nb	V	Ni	Cr	Mo	Ti	Cu
母材	0.31	1.76	0.058	0.079	0.008	0.225	0.023	0.226	0.015	0.215
E9018-焊缝	0.44	1.27	0.019	0.013	0.014	0.774	0.053	0.392	0.003	0.092
TE9018-焊缝	0.35	1.04	0.016	0.013	0.013	0.808	0.042	0.353	0.001	0.040

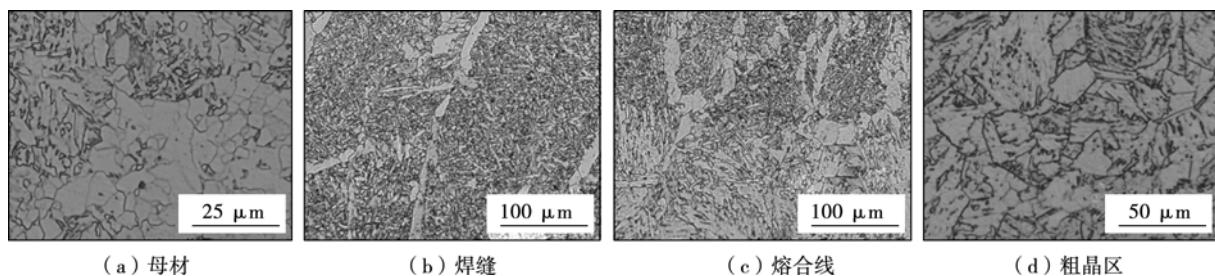


图1 母材及E9018焊接接头组织

Fig. 1 Microstructure of base material and E9018 welded joint

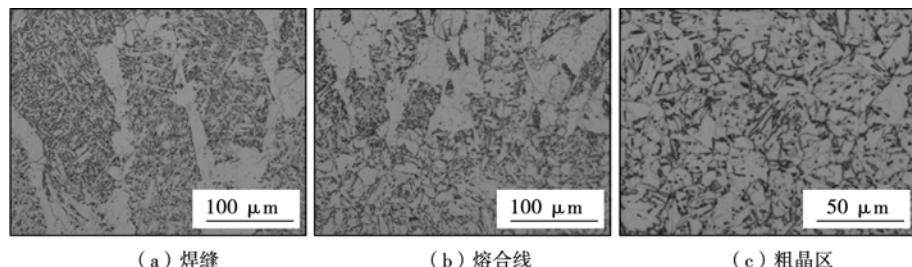


图2 TE9018焊接接头组织

Fig. 2 Microstructure of TE9018 welded joint

区还含有一定量的多边形铁素体及类多边形铁素体,且其尺寸远小于母材中的多边形铁素体。双熔敷极焊条电弧焊技术,是一种间接电弧焊接技术,焊条中相互平行的双芯分别接电源两极,焊接时几乎没有电流通过被焊金属,只是依靠熔滴携带的热量和电弧热加热母材,对母材热输入远小于传统焊接技术,因此其热影响区的组织较为细小。焊接时,双丝产生的间接电弧对母材的加热作用可以认为是一种退火或回火处理,使得组织中保留了母材中的部分多边形铁素体,且起到了细化晶粒的目的,这有利于提高粗晶区的性能。

### 2.3 焊接接头耐蚀性分析

#### 2.3.1 在碱性环境中的耐蚀性

X80 管线钢母材、两焊接接头焊缝与粗晶区在碱性环境( $0.5 \text{ M Na}_2\text{CO}_3 - 1 \text{ M NaHCO}_3$ 溶液)中开路电位下的交流阻抗谱 Nyquist 图如图 3 所示。由图 3 可知,各试样在该模拟溶液中 Nyquist 图均只存在一个容抗弧,因此可采用等效电路  $R(QR)$  进行拟合,其中各元件分别代表溶液电阻  $R_s$ ,双电层常相位角元件 CPE,电荷转移电阻  $R_{ct}$ ,各元件拟合结果列于表 2。其中常相位角元件  $Z_{CPE} = [Q_{dl}(jw)^n]^{-1}$ ,  $\omega$  表示频率,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $n_{dl}$  为常相位角元件的弥散指

数。由拟合结果可知,在该模拟溶液中电荷转移电阻  $R_{ct}$  大小顺序是:母材 > TE9018 粗晶区 > E9018 粗晶区 > TE9018 焊缝 > E9018 焊缝,这也是该溶液中耐蚀性的顺序。说明两种焊接技术中焊缝和粗晶区都是在碱性溶液中耐蚀性的薄弱环节。同时 TE9018 焊缝和粗晶区耐蚀性均优于 E9018 焊缝和粗晶区,说明采用双熔敷极焊条电弧焊技术有助于提高焊接接头在碱性环境中的耐蚀性。

#### 2.3.2 在 NACE A 溶液中的耐蚀性

母材、两焊接接头焊缝与粗晶区在通持续  $\text{CO}_2$  的 NACE A 溶液中开路电位下交流阻抗谱 Nyquist 图如图 4 所示,低频感抗弧的出现说明母材、焊缝以及粗晶区都会产生点蚀,这主要是  $\text{Cl}^-$  的存在导致的,点蚀是一种严重的局部腐蚀,应引起足够的重视。采用如图 5 所示的等效电路  $R(QR(LR))$  进行拟合,各元件分别代表溶液电阻  $R_s$ ,双电层常相位角元件 CPE,腐蚀产物电阻  $R_f$ ,双电层电感  $L$ ,电荷转移电阻  $R_{ct}$ 。其中腐蚀产物电阻  $R_f$  和电荷转移电阻  $R_{ct}$  的拟合结果列于表 3。由表 3 可知,  $R_{ct}$  及  $R_f$  大小顺序即耐蚀性强弱顺序为:母材 > TE9018 粗晶区 > E9018 粗晶区 > TE9018 焊缝 > E9018 焊缝。在该溶液中,虽然 TE9018 粗晶区电荷转移电阻与母材

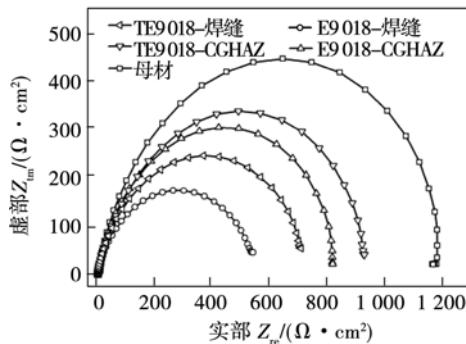


图 3 母材和焊接接头在碱性模拟溶液中的交流阻抗谱

Fig. 3 EIS results of base material and welded joint in simulated alkaline solution

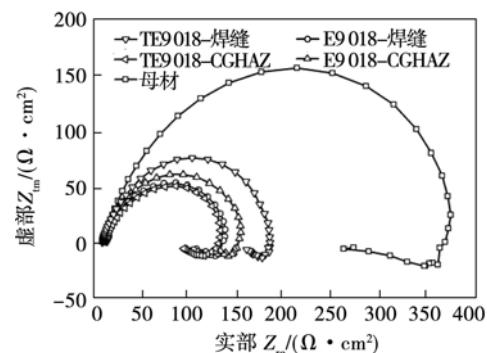


图 4 母材和焊接接头在 NACE A 溶液中的交流阻抗谱

Fig. 4 EIS results of base material and welded joint in NACE A solution

表 2 碱性溶液中交流阻抗谱拟合结果

Table 2 Fitting results of EIS in alkaline solution

元件	溶液电阻 $R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	双电层电容 $Q_{dl}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	弥散 指数 $n_{dl}$	电荷转移 电阻 $R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
母材	6.44	220.7	0.820	1 080.2
E9018-焊缝	6.08	326.3	0.789	528.0
E9018-CGHAZ	5.76	223.7	0.839	821.2
TE9018-焊缝	5.93	258.4	0.818	699.8
TE9018-CGHAZ	6.33	259.0	0.815	934.3

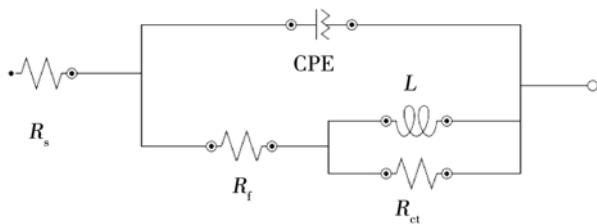


图 5 在 NACE A 溶液中的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit diagram in NACE A solution

表3 NACE A 溶液中交流阻抗谱拟合结果  
Table 3 Fitting results of EIS in NACE A solution

元件	腐蚀产物电阻 $R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	电荷转移电阻 $R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
母材	369.0	2 896
E9018-焊缝	139.9	342.7
E9018-CGHAZ	159.0	684.6
TE9018-焊缝	135.8	241.1
TE9018-CGHAZ	193.3	810.3

最为接近,但相差仍然较大;E9018 粗晶区电荷转移电阻约为 TE9018 粗晶区的一半,耐蚀性相差仍然较大;两组焊接接头中,焊缝仍然是耐蚀性的薄弱环节,两焊缝耐蚀性接近,TE9018 焊缝略好.

### 2.3.3 讨论

母材、两粗晶区、两焊缝在两模拟溶液中耐蚀性顺序呈现出了类似的规律,均表现为母材 > TE9018 粗晶区 > E9018 粗晶区 > TE9018 焊缝 > E9018 焊缝. 这说明焊接接头的耐蚀性均差于母材,而采用双熔敷极焊条电弧焊技术有利于提高 X80 管线钢焊接接头(主要是粗晶区与焊缝)的耐蚀性.

焊缝与母材耐蚀性的差别要远大于粗晶区和母材耐蚀性的差别,这可能主要是由于焊缝与母材成分存在差异所致. 因此有必要对焊芯及药皮的成分进行调整,这有助于进一步提高焊缝的耐蚀性. 此外采用双熔敷极焊条电弧焊技术获得的 TE9018 焊缝耐蚀性好于 E9018 焊缝,这是由于前者组织中含有较多的铁素体所致. 两粗晶区的耐蚀性均比母材差,这主要是由于粗晶区的组织以贝氏体为主,而母材则以铁素体为主所致;而 TE9018 粗晶区耐蚀性好于 E9018,这主要是由于前者奥氏体晶粒细小,可见细化晶粒可以提高耐蚀性.

## 3 结 论

(1) 相对于传统电弧焊而言,双熔敷极焊条电弧焊技术对母材的加热作用较小,使得焊接接头粗晶区晶粒细小,这有利于其焊接接头力学性能的提高,而两者焊缝组织差别不大.

(2) 在碱性环境( $0.5 \text{ M Na}_2\text{CO}_3 - 1 \text{ M NaHCO}_3$  溶液)中及通持续  $\text{CO}_2$  的 NACE A 溶液中,X80 管线钢母材及焊接接头耐蚀性顺序为母材 > TE9018 粗晶区 > E9018 粗晶区 > TE9018 焊缝 > E9018 焊缝. 说明传统电弧焊技术及采用双熔敷极焊条电弧焊技术获得的 X80 管线钢焊接接头耐蚀性均差于母材.

(3) 双熔敷极焊条电弧焊技术有利于提高 X80 管线钢焊接接头(粗晶区及焊缝)在碱性环境( $0.5 \text{ M Na}_2\text{CO}_3 - 1 \text{ M NaHCO}_3$  溶液)及在通持续  $\text{CO}_2$  的 NACE A 溶液中的耐蚀性.

## 参 考 文 献:

- [1] Jia Y Z, Wang J Q, Han E H, et al. Stress corrosion cracking of X80 pipeline steel in near-neutral pH environment under constant load tests with and without preload [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(11): 1039 - 1046.
- [2] Fu A Q, Cheng Y F. Electrochemical polarization behavior of X70 steel in thin carbonate/bicarbonate solution layers trapped under a disbonded coating and its implication on pipeline SCC [J]. Corrosion Science, 2010, 52: 2511 - 2518.
- [3] Zhang G A, Cheng Y F. Micro-electrochemical characterization and Mott-Schottky analysis of corrosion of welded X70 pipeline steel in carbonate/bicarbonate solution [J]. Electrochimica Acta, 2009, 55: 316 - 324.
- [4] Zhang G A, Cheng Y F. Micro-electrochemical characterization of corrosion of pre-cracked X70 pipeline steel in a concentrated carbonate/bicarbonate solution [J]. Corrosion Science, 2010, 52: 960 - 968.
- [5] Li D G, Feng Y R, Bai Z Q, et al. Photo-electrochemical analysis of passive film formed on X80 pipeline steel in bicarbonate/carbonate buffer solution [J]. Applied Surface Science, 2008, 254 (9): 2837 - 2843.
- [6] 韩彬, 邹增大, 曲仕尧. 双电极焊条单弧焊的熔化特性 I. 双电极焊条的加热和熔化 [J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 81 - 84.  
Han Bin, Zou Zengda, Qu Shiyao. Melting characteristic of twin electrode single arc welding I. Heating and melting of twin electrode [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(3): 81 - 84.
- [7] 韩彬, 邹增大, 曲仕尧. 双电极焊条单弧焊的熔化特性 II. 电弧对两焊芯熔化的自调节作用 [J]. 焊接学报, 2006, 27(4): 61 - 64.  
Han Bin, Zou Zengda, Qu Shiyao. Melting characteristic of twin electrode single arc welding II. Self-regulating effect of arc on two cores melting [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(4): 61 - 64.
- [8] 赵伟, 邹勇, 邹增大, 等. 双熔敷极耐磨堆焊焊条焊接稳定性的分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 25 - 28.  
Zhao Wei, Zou Yong, Zou Zengda, et al. Analysis on welding stability of twin deposition surfacing electrode [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 25 - 28.

**作者简介:** 赵伟,男,1989年出生,博士,主要从事新材料连接技术及金属腐蚀的研究,发表论文10余篇. Email: zwapple@yeah.net

**通讯作者:** 邹勇,教授,男,博士研究生导师. Email: yzou@sdu.edu.cn