

## 维修与再制造用 TWE312R 型焊接材料研制与应用 \*

谭 伟

(北京市特种设备检测中心, 北京 100029)

**摘 要:** 针对大拘束、Cl<sup>-</sup> 腐蚀、-10 ℃ 等苛刻条件下裂纹修复问题, 根据维修与再制造焊接特点自主研究开发了维修与再制造用 TWE312R 型系列焊接材料。采用斜 Y 坡口小铁研裂纹试验方法研究了 TWE312R-16 焊条焊接高硬度装甲钢的抗裂性能, 结果表明: 即使环境温度低至 -5 ~ -14 ℃, 焊接试样的表面和断面裂纹率均为零。TWE312R 型系列焊接材料已在装备维修和工模具等行业得到成功应用, 在维修与再制造焊接、异种钢焊接领域显示出良好的应用前景。

**关键词:** TWE312R 型焊接材料; 修复; 维修; 再制造

**中图分类号:** TG42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9289(2011)06-0104-05

### TWE312R Type Welding Consumables for Maintenance-repair-remanufacturing Welding

TAN Wei

(Beijing Special Equipment Inspection and Test Centre, Beijing 100029)

**Abstract:** Aimed at repairing restraint cracks under the conditions of chloride corrosion or at ambient temperature up to 10 ℃ below zero, TWE312R type welding consumable were developed for steel structure repair and remanufacturing. The crack susceptibility of an ultra-high strength armor steel/TWE312R weldment was characterized by means of y-groove crack test. Experiment results showed that crack-free restraint weldment would be satisfied at the ambient temperature range of -5 ~ -14 ℃. Practical examples of TWE312R type welding consumable were illustrated in such fields as equipment maintenance and tool industries, and showed good prospects in the field of dissimilar steel welding or maintenance repair-remanufacturing welding.

**Key words:** TWE312R type welding consumable; repair; maintenance; remanufacturing

## 0 引 言

在维修、再制造领域, 产品常因裂纹、磨损、腐蚀等原因而失效或报废, 采用堆焊等维修与再制造焊接技术对失效或报废的产品进行修复或再制造, 既经济又实用。在船舶、石油化工、核电、电站锅炉、重载车辆、模具等行业, 一些贵重、关键设备及零部件常因裂纹问题而失效, 因此, 解决母材焊接性差、大拘束、有耐热、耐蚀、耐冲击等特殊性能要求的严酷条件下钢裂纹修复问题, 一直是一项艰巨而又富有挑战性的工作。

对于上述严酷条件下的钢裂纹焊接修复问题, 在焊接材料选择上, 必须保证焊缝金属的力学性能与物理化学性能比母材优越, 才有可能

达到或超过制造时所规定的性能要求。因此, 此类钢裂纹的修复涉及到的主要是异种钢的焊接问题。

用于异种钢焊接的奥氏体型材料主要有 Cr25Ni20 型、Cr25Ni13 型、Cr20Ni10Mn6 型、Cr16Ni25Mo6 型、Ni 基或纯 Ni 型等<sup>[1-2]</sup>, 上述材料在各自的适用范围内可作为钢裂纹修复用焊接材料使用。在模具修理行业, Ni 基或纯 Ni 型焊接材料应用较为广泛。与其它高合金填充材料相比, Ni 基或纯 Ni 型焊接材料抗稀释能力强, 焊缝中不会出现马氏体等脆化组织, 在高温运行时无脆化倾向, 热膨胀系数低, 在 0 ~ 400 ℃ 温度范围内, 几乎与铁素体钢的膨胀系数相等。但由于 Ni 为稀缺元素, 价格昂贵。

Cr30Ni10 型异种钢焊接材料的线膨胀系数接近于珠光体钢, 具有对碳、铁等元素良好的接纳能力和优良的抗裂性, 在维修焊接领域有着广

收稿日期: 2011-09-07; 修回日期: 2011-11-08

基金项目: \* 国家自然科学基金资助项目(50574097); 总装备部通用装备保障部项目(代号略)

作者简介: 谭伟(1968—), 男(汉), 湖南湘潭人, 高级工程师, 博士。

阔的应用前景。但是由于塑、韧性较低,多层焊和在高温环境下,Cr30Ni10 型材料具有析出  $\sigma$  相而致脆倾向,制约了该材料的推广应用<sup>[2-3]</sup>。

二十世纪六十年代,MAGNA 公司推出了比较成熟的系列维修焊接材料,其中 MAGNA303 焊条为著名的工程维修品牌,抗裂性能优异,主要解决在不知道被修零件的化学成分或牌号,被修零件沾满油污,操作空间狭小,母材焊接性较差等情况下钢制零部件的修复问题。其合金系统趋向采用高纯净度的高合金系统或超级合金,保证焊缝金属性能尽可能少地受母材金属的影响,获得满意的维修质量。

对 Cr30Ni10 型焊接合金系统进行优化,研制出抗裂性优异、工艺性能优良的 TWE312R 通用型焊接材料,现已定型生产并在装备维修与再制造上推广应用。

## 1 TWE312R 通用型焊接材料设计原则

维修与再制造用 TWE312R 通用型焊接材料设计的指导思想是:保证焊缝金属的强韧性匹配比基体金属更合理、抗裂性更优异并且操作使用容易;同时,还应兼备一些其它特殊性能,如抗应力腐蚀、抗腐蚀疲劳性能等。以保证修复后的零部件或设备能够恢复甚至超过其设计功能。

在上述思想的指导下,着重考虑影响焊缝金属性能的基本因素:母材稀释与元素烧损、焊缝金属铸造状态、焊接气孔、H、C、N、B、O、S、P 等元素控制。

### 1.1 母材稀释与合金元素烧损

由于母材稀释与合金元素烧损,焊缝金属中合金元素的浓度有别于熔敷金属中的浓度,也不同于焊条金属中的浓度;焊缝金属中的浓度可按式(1)计算<sup>[4]</sup>。

$$[X]_w = \theta[X]_p + \eta(1 - \theta)\{[X]_c + K_b[X]_c\} \quad (1)$$

式中, $[X]_w$ :焊缝金属中某合金元素的浓度(质量分数/%) ; $[X]_c$ :焊芯中某合金元素的浓度(质量分数/%) ; $[X]_p$ :母材中某合金元素的浓度(质量分数/%) ; $\theta$ :熔合比;  $\eta$ :某合金元素过渡系数;  $K_b$ :药皮重量系数。

由式(1)可知,若要降低母材对焊缝金属化学成分的影响,就要尽量降低熔合比。这一点对

难焊金属的焊接尤为重要。对于通用型焊接合金而言,必须保证焊缝金属的性能不会因化学成分的变化而发生大的波动,并能控制在一个合理的范围内(10%~30%)。

### 1.2 焊缝金属状态

焊缝金属组织为铸造组织,晶粒粗大。而基体金属一般经过冷、热加工或热处理,其结构、组织与性能得到优化。若两者化学成分相同,显然焊缝金属性能不如基体金属。要使焊缝金属的性能达到或超过基体金属,焊缝金属必须是相对于基体更高级的合金才有可能。

### 1.3 焊接气孔

若保护不当或不充分,焊缝容易产生气孔。焊接气孔导致塑性、韧性显著降低,必须严格控制。

### 1.4 H、C、N、B、O、S、P 等微量元素控制

焊缝金属中 H、C、N、B、O、S、P 等元素含量虽少,但对焊缝金属性能有极为重要的影响。对焊缝金属而言,H、S、P 等为有害元素,通常导致焊缝金属产生焊接裂纹和气孔,必须严格控制<sup>[5]</sup>。C、N、B、O 等元素的作用须具体问题具体分析,尽量趋利避害。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊丝或焊芯研制

通过深入研究分析,设计了独特的合金系统。经冶炼、浇铸、锻造、热轧、冷拔、切丝、清洗等工艺制成  $\Phi 3.2$  mm、 $\Phi 4.0$  mm、 $\Phi 5.0$  mm 埋弧焊丝;  $\Phi 2.0$  mm 氩弧焊丝或  $\Phi 3.2 \sim 4.0$  mm  $\times 350$  mm 焊条芯;该焊芯材料的力学性能如表 1 所示。

表 1 焊芯金属力学性能

Table 1 Mechanical properties of TWE312R electrode metal

规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断裂总伸 长率 $A_1$ /%	断面收缩率 $Z$ /%
535	739	42	76.5

### 2.2 焊条药皮研制

在药皮类型选择上,分别采用酸性药皮和碱性药皮。经过 300 多次配方调试,最终制成 TWE312R-16 酸性焊条和 TWE312R-15 碱性焊条。

## 2.3 TWE312R 焊条电弧物理及工艺特性

### 2.3.1 熔滴尺寸

将水槽中直接收集到的熔滴与熔渣分离,然后用直径 2.5 mm 的筛网将熔滴过筛,分别测定大于 2.5 mm 和小于 2.5 mm 的熔滴质量  $m_1$  和  $m_2$ ,计算比值  $R = m_1 / m_2$ ,取  $R$  的 3 点或 5 点平均值  $R_a$  作为评定熔滴尺寸大小的标准。当直流反接,焊接电流 140 A 时,实测 TWE312-16 焊条的  $R_a = 0.28$ ,表明熔滴颗粒已相当细小。

### 2.3.2 工艺特性

采用 Pentazet-16 高速摄影机、SC16A 型光线示波器和操作者实际观测等方法对 TWE312 焊条的熔滴过渡形式和工艺性能进行研究。TWE312-16 焊条熔滴过渡高速摄影照片如图 1 所示,基本上为细颗粒渣壁过渡形态,过渡频率约 7 次/s。TWE312 焊条电弧电压与电流波形如图 2(a)所示,电弧电压随熔滴的生成、长大和脱离而波动,而电弧电流基本恒定;此外,存在轻微的短路现象(电弧电压与电流发生突变处),上述特点为典型的渣壁过渡特征。图 2(b)为装甲钢用 A147 焊条电弧电压与电流波形,电弧电流和电压波动较大,为典型的短路过渡特征。实际观测表明 TWE312R-16 焊条具有优异的焊接工

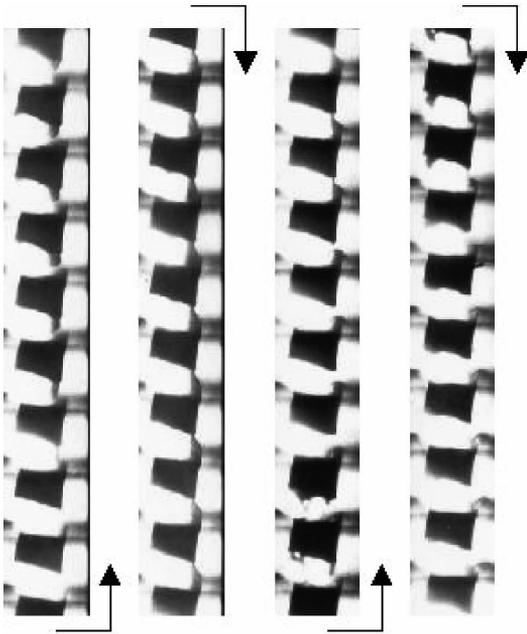
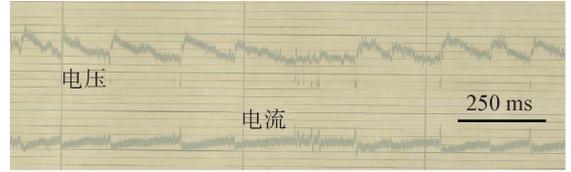


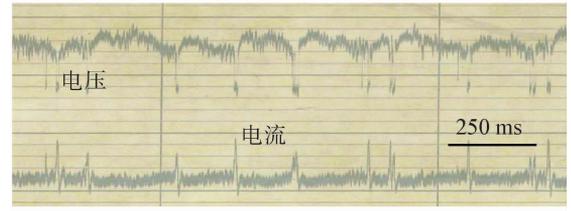
图 1 TWE312R-16 焊条熔滴过渡高速摄影照片 ( $\Phi 4$  mm,  $I_t = 150$  A, 反接, 600 帧/秒)

Fig. 1 Droplet transfer of TWE312R-16 covered electrode ( $\Phi 4$  mm,  $I_t = 150$  A, negative polarity, 600 pictures/sec)

艺性能:电弧燃烧稳定,飞溅很少,无爆炸,熔渣覆盖均匀,熔渣致密、自动翘渣或渣横裂,波纹细密均匀、成型美观,无气孔,药皮有一定发红,但不开裂,直套筒,熔渣包住焊条芯头,交、直流两用,适合于全位置焊接。



(a) TWE312焊条



(b) A147焊条

图 2 焊条电弧电压与电流波形图 ( $\Phi 4$  mm,  $I_t = 150$  A,  $U_t = 30 \sim 34$  V, 反接)

Fig. 2 Arc voltage and current revolution profiles of the covered electrodes ( $\Phi 4$  mm,  $I_t = 150$  A,  $U_t = 30 \sim 34$  V, negative polarity)

## 2.4 TWE312R 焊材技术指标

TWE312R 焊材熔敷金属化学成分和力学性能分别如表 2、表 3 所示。采用日本 Yanaco G-1006 气相色谱仪测定熔敷金属扩散氢  $[H]_D$  含量(体积分数),通常认为氢含量越低越好,当扩散氢  $[H]_D$  含量  $< 5$  mL/100g 均被认为是超低氢焊材,控氢的目的是降低冷裂纹敏感性,由于奥氏体组织的溶氢能力强,只要将氢控制在一定范围,不产生冷裂纹即可。TWE312R-16 焊条扩散氢  $[H]_D$  含量为 2.23 mL/100g,对比用装甲钢焊条 A147(Cr20Ni10Mn6)型焊条,其扩散氢含量为 1.635 mL/100g。

表 2 TWE312R 熔敷金属主要化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical compositions of the TWE312R type deposited metal

元素	C	Cr	Ni	Mn	Si
质量分数	$< 0.12$	22~35	8~12	$< 2.5$	$< 1.5$
元素	S	P	其它	Fe	
质量分数	$< 0.025$	$< 0.025$	$< 3$	余量	

表 3 熔敷金属力学性能

Table 3 Mechanical properties of the deposited metals

名称	$R_{p0.2}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A_t/\%$	$\alpha_k/(J \cdot cm^{-2})$ (常温)
TWE312R	$\geq 520$	$\geq 690$	$\geq 22$	$\geq 72$
E312		$\geq 660$	$\geq 22$	
A147		$\geq 540$	$\geq 25$	$\geq 72$

2.5 TWE312R 焊条的抗裂性

某高硬度装甲钢(超高强度钢)焊接接头抗裂性结果分别如表 4、表 5 所示。当试验温度为 32 ℃、5 ℃、-5~-14 ℃ 时,采用自制 TWE312 焊条焊接的斜 y 坡口焊接,接头表面裂纹率和断面裂纹率均为零;而采用装甲钢专用焊条 Cr20Ni10Mn6 焊接的接头在 32 ℃ 时表面裂纹率达 80%,断面裂纹率 100%。32 ℃ 时,T 型焊接接头均无裂纹。有关抗裂性的初步原因分析见文献[6]。研究表明,微米量级 HAZ/WM 界面区(含熔合区和富奥氏体带)的形成机制、组织结构与焊接材料相关并对抗裂性产生重要影响<sup>[7-9]</sup>,界面区细观力学性能表明,富奥氏体带能够吸收形变而强化,提高界面区的抗裂能力<sup>[9]</sup>。

表 4 某高硬度装甲钢斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果

Table 4 Experiment results from y-groove crack test conducted on the ultra-strength armor steel weldments using the covered electrodes respectively

焊条类型	温度/℃	表面裂 纹率/%	断面裂 纹率/%
	32	0	0
TWE312R-16	5	0	0
	-5~-14	0	0
MAGNA303	-10	13	30
A147(Cr20Ni10Mn6)	32	80	100

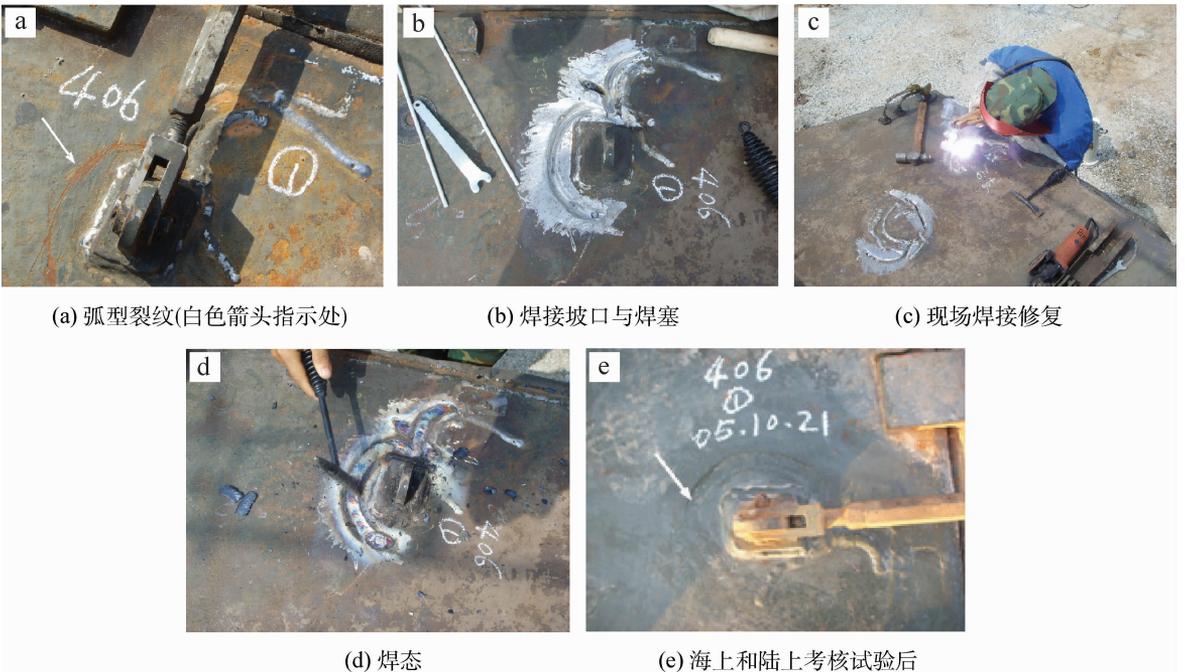
表 5 某高硬度装甲钢 T 型接头焊接裂纹试验结果

Table 5 Experiment results from T-joint crack test conducted on the ultra-strength armor steel weldments using the covered electrodes respectively

焊条类型	温度/℃	裂纹率/%
TWE312R-16	32	0
A147(Cr20Ni10Mn6)	32	0

3 TWE312R 型焊材应用

2003~2004 年,TWE312R 焊条在装备维修中试推广应用,2005 年产品定型并小批量生产,用于大拘束、海水腐蚀条件下装备裂纹的现场焊接修复,效果良好。图 3 是某型装备高硬度装甲



注:海上和陆上考核试验后,焊接接头完好如初。

图 3 某型装备挂钩处弧型裂纹现场焊接修复

Fig. 3 Welding repair the restraint cracks nearby the hook on a heavy-duty vehicle

钢裂纹的现场修复过程照片;图 4 为高碳高合金钢与中碳钢等难焊金属的焊接实物照片。



图 4 电机转子轴承钢与 45 钢焊接(TWE312R-16 型焊条,Φ 4 mm, I<sub>t</sub>=140 A)

Fig. 4 Welding rotor bearing steel and 45 steel using TWE312R covered electrode (Φ 4 mm, I<sub>t</sub>=140 A)

### 4 结 论

(1) 维修与再制造用 TWE312R 通用型焊接材料(含焊条、埋弧焊丝等)具有强韧性匹配合理、抗裂性优异、工艺性能优良、通用性好等特点,其抗裂性不低于 MAGNA303 焊接材料。

(2) 在大拘束、Cl<sup>-</sup> 腐蚀、-10℃ 等苛刻条件下可实现高硬度装甲钢车体裂纹的现场免预热焊接修复,在装备维修、维修与再制造焊接、异种钢焊接等领域具有良好的应用前景。

(3) 微米量级 HAZ/WM 界面区(含熔合区和富奥氏体带)的形成机制、组织结构与焊接材料相关并对抗裂性产生重要影响,富奥氏体带能够吸收形变而强化,提高界面区的抗裂能力。

### 参考文献

[1] 何康生,曹雄夫. 异种金属焊接 [M]. 北京:机械工业出版社,1986,215-307.

[2] 兰光译. 碳钢与高合金钢的熔化焊 [J]. 焊接技术,1977(5):12-19.

[3] 张汉谦,陆文雄,王宝,等. 奥氏体-中、高碳珠光体异种钢接头焊接冷裂纹行为研究 [D]. 太原:太

原理工大学,1987,51-53.

[4] 陈伯鑫. 焊接冶金原理 [M]. 北京:清华大学出版社,1991,265.

[5] 唐伯钢,尹士科,王玉荣. 低碳钢与低合金高强度钢焊接材料 [M]. 北京:机械工业出版社,1987,52-79.

[6] 谭伟,陈超,王海军. TWE312 通用型维修焊条抗裂性研究 [C]. 2006 年第二届七省区市机械工程学会科技论坛暨学会改革与发展研讨会论文集,2006.

[7] 谭伟,韩文政,徐滨士,等. C-Mn-Ti-B 超高强度钢焊接熔合区的形成过程及其组织转变 [J]. 焊接学报,2003,24(3):39.

[8] 谭伟. 两栖装甲车辆车体裂纹与腐蚀综合研究 [D]. 北京:北京航空航天大学,2003(2008 年部分解密).

[9] 谭伟. 装甲钢 HAZ/WM 界面区组织结构及其断裂与增韧机制研究 [R]. 北京:国家自然科学基金委员会,2008.

作者地址:北京朝阳区惠新东街 3 号 100029  
 北京市特种设备检测中心 实验研究室  
 Tel: 136 5122 2875  
 E-mail: tw050400@vip. sina. com

\*\*\*\*\*

### • 本刊讯 •

#### 常任理事介绍

孙正福,1963 年 7 月出生。1985 年毕业于沈阳航空工业学院飞机制造专业,大学本科。1986~1987 年在解放军管理干部学院培训班学习企业管理,1988 年在国家经委、解放军后勤部管理干部班培训,2005 年在上海财经大学研究生班学习工商管理,2006~2009 年在空军工程大学攻读管理科学与工程硕士,获硕士学位。曾担任中国人民解放军 5706 工厂飞机车间技术主任、质量管理处处长、副总工程师兼技术处处长、总工程师等职务,现任中国人民解放军 5701 工厂技术副厂长兼总工程师。主要研究各型飞机、直升机维修工程和表面工程,为航空装备修理技术的发展做出了突出贡献。