

高锰钢与 U71Mn 钢电弧焊对接过渡层合金

魏思宇 丁韦 黄辰奎 刘宪军
(北京 铁道部科学研究院金化所)

摘 要 高锰钢与 U71Mn 钢轨钢的焊接性能差别较大, 将其对接焊时除采用特殊工艺外, 必须使用合适的焊接材料。文中介绍了二种新合金系焊条作为过渡层和对接材料, 并进行了试验, 结果表明: 高锰钢过渡层采用 Mn—Cr—Ni 系合金, 延伸率大于 40%, 夏比冲击功大于 100J; 钢轨过渡层采用 Cr—Ni—Mo 系合金, CaO—CaF₂—SiO₂ 型渣系, 抗拉强度为 855MPa, 延伸率、冲击韧性均高于钢轨, 分别为 20% 和 90J 以上。

关键词: 高锰钢 钢轨钢 对接焊 电弧焊

0 序 言

研究具有高强度、韧性的过渡层焊接材料是高锰钢与钢轨对接的关键。目前国内外普遍采用 Mn—Cr 系或 Ni—Cr 系合金作为焊接的过渡材料, 但连接强度不够理想。高锰钢的焊接性较差, 通常认为采用高合金奥氏体焊接材料加小线能量冷焊的方法较为可行。与高锰钢完全不同, 钢轨属于高碳钢, 焊接时必须将钢轨预热到 M_s 点以上, 焊缝合金要求在热焊条件下具有良好的强度和韧性。

因此, 焊接材料的研究需要从高锰钢、钢轨电弧焊焊接性分析出发, 研究在不同合金系条件下的焊接材料对接头性能的影响。焊接材料在焊接时, 应保证被焊母材所必须满足的冷却或加热条件, 同时焊接接头的整体强度要满足使用要求。

1 试验方法

如图 1 所示, 高锰钢与钢轨对接焊过渡层分为两层: 靠近高锰钢一侧的为高锰钢过渡层; 靠近 U71Mn 钢轨一侧的为钢轨过渡层。在实际接头焊接时, 先进行一侧的过渡层堆焊, 然后再进行对接焊。

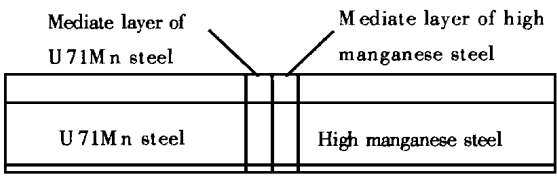


图 1 对接焊试验方法
Fig.1 Method of welding test

2 钢轨过渡层

2.1 U71Mn 钢的焊接性

钢的焊接性与钢本身的淬硬倾向有直接关系, 而钢的淬硬倾向又与钢的化学成分有关, 通常用碳当量(C_{eq})和裂纹敏感性(P_{cm})来表示^[1]。U71Mn 钢的 C_{eq} 和 P_{cm} 值均很高, 焊接性不理想, 采用电弧焊时必须预热^[2]。为避免焊接热影响区出现马氏体, 保证钢轨焊接质量, 焊接时应进行 350℃~400℃的预热^[3~4]。

2.2 钢轨过渡层焊条药皮配方

由于钢轨的强度较高,但韧性较低,所以焊条的韧性应优于钢轨母材,这样有利于钢轨焊接接头在实际使用过程中不易发生脆性断裂。

药皮须有一定的碱度,以便更加有效地向焊缝过渡合金,同时也能净化焊缝金属,提高焊缝韧性。为此设计了 $\text{CaO}-\text{CaF}_2-\text{SiO}_2$ 渣系的药皮配方,并在其中添加了 Cr、Ni、Mo 等元素。

Ni 具有面心立方结构,可改善焊缝金属的韧性;Mo 是良好的细化晶粒元素;Cr 是保证焊缝强度的主要元素,但同时会使焊缝变脆,因此其加入量应适当;为使焊条具有良好的工艺性能,以保证连续焊接时不出现断弧和短路现象,以及焊接轨底时不粘渣且清渣容易,在焊条合金成分中应适当提高 Mn 含量;另外,通过加入少量稀土,进一步细化焊缝金属组织,降低焊缝中非金属夹杂物含量并改善其分布形态。根据每种合金元素在焊缝中的作用及其对焊条工艺性能的影响,对 Cr、Ni、Mo、Mn 的比例和加入量进行了多次调整和反复试验,最终确定了焊条药皮配方。配方中 CaCO_3 与 CaF_2 的比例要适当,过高会使焊接时的药皮套筒过长,使再引弧困难,过低时容易产生粘连。为了避免合金焊缝中产生低熔点共晶物,在焊条原材料方面进行了精选,进一步降低了焊缝中的 P、S 含量。

2.3 钢轨过渡层焊条熔敷金属力学性能

该焊条的熔敷金属力学性能试验结果及与钢轨母材的性能对比列于表 1。焊条的延伸率为 20%,V 型缺口冲击功达到 90J 以上,大大优于钢轨母材。

表 1 钢轨过渡层焊条力学性能试验结果

Table 1 Mechanical properties of deposited metal of electrode for U71Mn steel

	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta_5(\%)$	Akv/J
Base metal	≥ 883	—	≥ 8	—
Deposited metal	855	740	20	98, 98, 88 / 95(Average)

3 高锰钢过渡层

3.1 合金系的选择

高锰钢为奥氏体组织,焊接材料的各种合金成分对焊缝组织的影响可用“镍当量” Ni_{eq} 和“铬当量” Cr_{eq} 确定^[3]。Cr 含量在一定范围内有利于奥氏体组织的形成,过高会出现铁素体,过低则会出现马氏体组织。焊缝金属中铁素体的出现对高锰钢有不良影响,因此应当控制在较合理的程度。另外,在设计焊条成分时,母材金属对焊缝合金的稀释作用也应考虑,否则实际焊缝组织将会有一定的偏差。运用多种合金调整 Ni_{eq} 、 Cr_{eq} 值,有利于获得奥氏体组织。Ni、Cr 比例的适当匹配可降低合金熔点,以便在焊接过程中将焊缝金属填充到高锰钢母材的微小裂纹中去。为此选择了 Mn—Cr—Ni 系合金,并适当加入其它合金元素及稀土以控制焊缝中铁素体含量,降低焊缝的热裂敏感性。

3.2 渣系的选择

高锰钢焊条采用碱性渣系,焊芯为奥氏体钢芯,焊接在不预热条件下进行,对焊条的要求是:

- (1) 有效保证高合金的过渡。如果药皮配方与合金产生大量反应则无法保证焊缝组织的奥氏体化,焊缝中铁素体量的增加将影响焊缝与高锰钢的连接强度;
- (2) 焊条在不预热或泼水冷却焊条件下不产生气孔。焊接高锰钢时,减少碳化物析出的有效方法是降低焊接过程中的温度,因此,焊条应保证在室温下焊接每条焊道都不出气孔;

(3) 良好的抗裂性。奥氏体焊缝热胀冷缩时的变形量大,冷焊时这一问题更加突出,因此应在配方设计时充分考虑,如提高韧性,降低 H 含量等。

高锰钢过渡层焊条配方成分如表 2 所列。在配方的调整过程中,分别进行了化学成分分析、金相组织分析以及焊接工艺试验和焊条气孔试验等。

表 2 高锰钢过渡层电焊条药皮配方(质量分数 %)

Table 2 Components of coating of electrode for high manganese steel (%)					
CaO+MgO	MnO	SiO ₂	CaF ₂	Alloys and RE	Other
25~35	3~10	5~12	15~40	8~18	2~5

表 3 为 8 种不同配方焊条的焊接工艺试验结果,共进行了六项内容的比较。试验条件为:焊条直径 5 mm,直流电源。焊接工艺参数为:电压 22~24V,电流 140~160A。试验结果表明,8 号试验焊条的稳弧、脱渣等各项焊接工艺性能较为理想,焊条熔敷金属的组织为奥氏体,力学性能试验,σ_b 为 640 MPa,δ₅ 为 45%,V 型试样冲击功为 119J。

表 3 高锰钢过渡层焊条焊接工艺性能试验

Table 3 Results of technological property test of electrodes for high manganese steel						
Sample No.	Arc stability	Slag detachability	Viscosity of slag	Melting of coating	Gas pore	Configuration
1	Middle	Bad	Good	Bad	None	Middle
2	Middle	Middle	Middle	Middle	None	Middle
3	Very good	Middle	Good	Middle	None	Middle
4	Very good	Very good	Good	Bad	None	Middle
5	Very good	Middle	Good	Very good	None	Bad
6	Very good	Middle	Middle	Very good	None	Middle
7	The best	Middle	Middle	Very good	None	Good
8	The best	Very good	The best	Very good	None	Very good

由于焊缝金属为奥氏体组织,因此延伸率(δ)高于 40%,夏比 V 型冲击功大于 100J。高锰钢过渡层焊条与钢轨过渡层焊条相比强度显得低一些,并且没有明显的屈服点,但该焊条熔敷金属的机械加工硬化性能很强,表 4 为在其硬化前后采用维氏硬度方法所测试的表面硬度,压头重量为 10 kg,硬化前的平均硬度为 HV274,硬化后的平均硬度为 HV442,硬化效果显著。

表 4 高锰钢过渡层焊条熔敷金属硬度(HV)

Table 4 Hardness of deposited metal of electrode for high manganese steel(HV)						
Before hardening						After hardening
Example No.	1	2	3	4	5	Average of 5 examples
Hardness	252	275	276	275	292	274

Example No.	1 #	2 #	3 #	4 #	5 #	Average of 5 examples
Hardness	439	446	413	441	471	442

4 抗拉强度

为了考察在有拘束条件下,用不同焊接材料焊接钢轨时接头的抗拉强度,进行了模拟对接接头的拉伸试验。试验母材为 U71Mn 钢轨钢并加工成 Φ26mm 的圆棒。作为对比的焊接材料有自保护药芯焊丝和电焊条,焊丝成分分别为 C—Mn—Cr 系、Mn—Cr 系和 Mn—Ni 系,直径 Φ2.8 mm,电焊

条规格为Φ4 mm 和 Φ5 mm。焊接是采用强迫成型电弧焊方法进行, 然后进行拉伸试验, 结果如表 5。

试验结果表明: 奥氏体类型焊条的接头强度主要取决于焊缝合金组成, Mn—Cr—Ni 系优于 Mn—Cr—Mo 系(如 KD286), 也优于 Mn—Cr 系(Mn—Cr 焊丝)和 Cr—Ni 系(如 A312)。奥氏体焊条焊后经 900℃×5min 处理, 熔合区强度下降 10%~20%, 双相不锈钢焊条 TS—2209 的抗拉强度接近高锰钢焊条, 但沉淀硬化不锈钢焊条 TS—630 的强度明显不如高锰钢焊条。高强结构钢焊条焊接接头大多断于焊缝部位, 并且为韧性断口, 接头强度与焊条熔敷金属强度呈正比。部分焊条的焊缝中气孔较为严重, 还有的组织较为粗大, 不适合连续焊接。

表 5 焊接接头强度试验结果

Table 5 Results of strength test of welded joints

Welding material	Thermal processing	Load/ kN	Fractured part	Fracture appearance
J507L	As welded	303	Weld	Ductile
J507L	900℃×5min, after welding	311	Weld	Ductile
ALLOY—110	As welded	391	Weld	Pored
OK75.75	As welded	315	Weld	Pored
TL—120	As welded	263	Weld	Intergranular
C—Mn—Cr(Wire)	As welded	323	Weld	Brittle
C—Mn—Cr(Wire)	Slow cooling, after welding	327	Weld	Brittle
Developed electrode for U71Mn	As welded	384	HAZ	Ductile
Developed electrode for U71Mn	900℃×5min, after welding	365	HAZ	Ductile
A312	As welded	243	Bond line	Partly ductile
TS—630	As welded	215	Bond line	A long bond line
Mn—Cr (Wire)	As welded	242	Base metal	A long bond line
Mn—Ni (Wire)	As welded	224	Base metal	A long bond line
Mn—Ni (Wire)	900℃×5min, after welding	190	Bond line	A long bond line
KD286	As welded	219	Bond line	A long bond line
KD286	900℃×5min, after welding	170	Bond line	A long bond line
TS—2209	As welded	261	Bond line	Partly ductile
Developed electrode for high manganese steel	As welded	274	Base metal	Partly ductile

5 焊接材料气孔

与一般坡口焊接不同, 窄间隙焊的冷却速度较快, 特别是前几道焊缝, 部分焊肉要直接接触冷却的铜模, 很容易产生气孔。另一方面, 在焊接高锰钢时, 焊接是在完全冷却条件下进行的, 这对焊条的抗气孔性能要求也很高, 为此进行了气孔试验。试验使用的焊接材料有钢轨过渡层焊条和高锰钢过渡层焊条, 规格为Φ4 mm 和 Φ5 mm。对比的自保护药芯焊丝(Mn—Cr 系和 Mn—Ni 系), 焊丝直径Φ2.8 mm, 。试验方法是用 20 mm 厚的钢板制成 100 mm×50 mm 的试板, 按图 2 所示方法

进行焊接,焊接参数为:电压 28~30V、电流 130~160A,焊道长 50 mm。焊后先对焊缝表面气孔进行统计,然后打开焊缝,对内部气孔进行统计,试验结果见表 6。从试验结果看,奥氏体类型的焊条无论是否进行烘干,均显示出良好的抗气孔性能,并且明显优于其它类型焊条。钢轨过渡层焊条必须经过烘干才能具有良好的抗气孔性。两种自保护药芯焊丝的抗气孔性较差,焊丝经过烘干后施焊仍出现较多气孔。高效铁粉类型焊条 ALLOY-110 和 ALLOY-90Cr 气孔现象也较为严重。

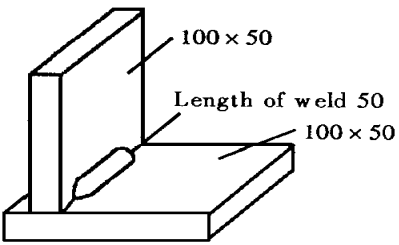


图 2 气孔试验示意图

Fig.2 Test of porosity

表 6 焊接材料气孔试验结果

Table 6 Test of porosity of welding materials

Welding material	Without drying			350℃× 1h		
	Superficial pores	Pores in weld	Max. pore / mm	Superficial pores	Pores in weld	Max. pore / mm
L55	1	4	0.7	0	5	1
OK75.75	4	20	1.5	2	1	1
ALLOY-110	6	17	2	0	10	0.5
ALLOY-90Cr	2	18	2	0	7	0.7
J507Q	0	22	1	0	13	0.8
Developed electrode for U71Mn steel	0	15	1	0	1	0.5
TS-630	2	1	0.7	0	2	0.3
TS-2209	0	1	0.5	0	0	0
A312	1	2	0.6	0	0	0
A132	8	3	1	0	1	0
Mn-Ni(Wire)	0	12	2	0	10	2
Mn-Cr(Wire)	0	20	0.5	0	10	0.5
KD286	20	10	0.8	4	1	0.5
Developed electrode for high manganese steel	0	0	0	0	0	0

6 结 论

- (1) 研制的钢轨过渡层焊条采用 Cr-Ni-Mo 系合金,药皮为 CaO-CaF₂-SiO₂ 型渣系,焊条熔敷金属强度与钢轨匹配,抗拉强度为 855MPa,延伸率、冲击韧性高于钢轨母材,分别为 20%和>90J。
- (2) 钢轨过渡层焊条在预热条件下可保证窄间隙焊无气孔。
- (3) 高锰钢过渡层焊条采用 Mn-Cr-Ni 系合金,碱性渣系,焊条的延伸率大于 40%,夏比冲击功大于 100J。
- (4) 高锰钢过渡层焊条在冷焊条件下可以保持良好的焊接工艺性能,避免焊缝气孔的产生,同时具有良好的抗裂性,适用于高锰钢对接,高锰钢辙叉的补焊,高锰钢与碳钢的对接焊。
- (5) 高锰钢过渡层焊缝硬度为 HV 274,经过硬化处理硬度可达到 HV442。

(1999-02-08 收到初稿,1999-07-08 收到修改稿)

参 考 文 献

1 稻垣道夫等. 高强度焊接实践. 北京: 机械工业出版社, 1992. 50~56.
2 日本钢管株式会社. レー ルのエンク ロー ズアー ク溶接. Tokyo: NKK, 1996.
3 Swedish National Rail. Repair of rails on site by welding. Borlange: SNR, 1992.
4 季关钰等. 钢轨焊修技术. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
5 周振丰等. 焊接冶金与金属焊接性. 北京: 机械工业出版社, 1988. 359~360.

Mediate Layer Alloys for Arc Butt Joining between High Manganese Steel and U71Mn Steel

Wei Siyu, Ding Wei, Huang Chenkui, Liu xianjun
(China Academy of Railway Sciences, Beijing)

Abstract Because of many differences of weldability between high manganese steel and rail steel, suitable welding materials are required besides special technological procedures. In this paper, electrodes made of two different alloy systems are analyzed and tested. The test results indicate that the deposited layer made of electrode of Mn—Cr—Ni alloy system has an extension rate of more than 40% and $A_{kv} > 100J$, the deposited metal made of electrode of Cr—Ni—Mo alloy system and CaO—CaF₂—SiO₂ slag system has an tensile strength of 855MPa, and $\delta_5 > 20\%$, $A_{kv} > 90J$, which are higher than that of rail steel.

Key words high manganese steel, rail steel, butt joining, arc welding

作者简介 魏思宇, 男, 1973 年 1 月生, 1989~1996 年先后在哈尔滨工业大学和乌克兰基辅工学院学习, 工学硕士。主要研究方向为焊接结构力学行为、电弧焊接材料及工艺等。近年来参加了“高锰钢辙叉与钢轨焊接”、“芜湖长江大桥焊接材料及工艺”等铁道部科技攻关项目, 现主持“高速列车蠕墨铸铁制动盘”的研制工作。