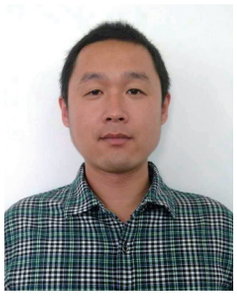


不同保护气体对Q500qE钢GMAW工艺焊缝性能的影响

贝玉成　徐向军

【摘要】针对沪通大桥上研制的高强度、高韧性Q500qE桥梁钢，研究采用富氩气和纯CO_2气两种不同保护气体对GMAW工艺焊接的焊缝力学性能的影响。

1. 概述

沪通长江大桥部分受力大的节段采用Q500qE钢。Q500qE钢为新研发的新型高强度桥梁钢，它采用低碳、微合金成分设计，采用TMCP+回火工艺轧制，高强度（屈服强度≥500MPa，抗拉强度≥630MPa），高韧性（-40℃低温冲击吸收能量≥120J），为我国第六代桥梁用结构钢。

目前实芯焊丝熔化极气体保护焊（GMAW）是桥梁焊接领域广泛应用的焊接方法之一，一般采用纯CO_2气体保护，强度级别达到Q420及以上时，也可能采用富氩混合气（80%Ar+20%CO_2，以下简称富氩气）保护。

从焊接工艺性上比较，富氩气保护焊和纯CO_2气体保护焊各有优缺点。采用纯CO_2气体保护焊接时，电弧熔深大，焊道间熔合好，弧光较弱，但焊接飞溅较大；而采用富氩气保护焊的熔深较浅，焊道间容易产生夹渣缺陷，弧光强，但焊接飞溅小，焊缝外观成形好。从经济性上比较，富氩气比纯CO_2气体贵，价格为CO_2气体的3～4倍。对于Q500qE这种高强度、高韧性结构钢的焊接，为了比较采用富氩气、纯CO_2气体这两种保护气体对焊缝力学性能的影响，采用WH70Q实芯焊丝GMAW焊进行了比较试验。

2. 试验用母材和焊接材料

沪通大桥为三片主桁的钢桁梁斜拉大桥，带整体节点的下弦杆是专用航道桥杆件中比较有代表性的杆件。下弦杆为整体节点结构，纵向与相邻下弦杆连接，横向与横梁、横联连接，上方与腹杆连接，上水平板伸出箱体与桥面板在桥上对接焊接，节点板范围内，在上水平板开长槽口使节点板穿过，从而保持节点板为一个整体。其中横梁翼缘接头板与弦杆竖板间熔透角焊缝、节点板穿出上水平板围焊熔透角焊缝一般采用GMAW工艺焊接。我们主要针对这两类熔透角焊缝进行焊接试验，另外还对采用不同保护气体的对接焊缝熔敷金属力学性能进行对比试验。

（1）母材成分和性能　采用两个钢厂生产的Q500qE钢板进行试验，板厚为20mm、32mm、56mm，试验前分别对三种板厚的Q500qE钢板进行了

表1　Q500qE钢的化学成分（质量分数）　（%）

编号	板厚/mm	C	Si	Mn	P	S	Nb	数据来源
—	—	≤0.08	≤0.40	1.20～1.70	≤0.018	≤0.005	0.015～0.055	标准值
W20	20	0.06	0.21	1.49	0.008	0.003	0.05	复验值
W32	32	0.05	0.20	1.49	0.006	0.002	0.04	复验值
W56	56	0.06	0.19	1.52	0.009	0.003	0.04	复验值
A20	20	0.06	0.30	1.63	0.009	0.002	0.05	复验值
A32	32	0.07	0.36	1.64	0.010	0.001	0.03	复验值
A56	56	0.05	0.36	1.58	0.021	0.004	0.05	复验值

复验，其化学成分如表1所示，力学性能如表2所示，钢板的化学成分和力学性能均满足标准要求。

（2）焊接材料化学成分　针对Q500qE钢板的成分和性能，研究开发了WH70Q气体保护焊高强钢实芯焊丝，焊丝中除了C、Si、Mn等强化元素外，还加入适量的Ni、Mo等合金元素提高强度和韧性。WH70Q气体保护焊高强钢焊丝的化学成分如表3所示。

3. 接头力学性能对比试验

（1）对接焊缝熔敷金属力学性能试验　为了检验当采用不同的保护气时，实芯焊丝气体保护焊熔敷金属的力学性能，我们对ϕ1.2mm的WH70Q焊丝分别采用富氩气和纯CO_2气体保护，焊接20mm板厚的Q500qE钢板对接焊缝各一组，坡口角度45°，组装间隙13mm，焊接参数如表4所示。对接焊缝探伤检测合格后进行熔敷金属拉伸、低温冲击试验和成分分析，力学性能试验结果如表5所示，熔敷金属化学成分试验结果如表6所示。

（2）熔透角焊缝工艺评定试验　针对沪通长江大桥下弦杆上的横梁翼缘接头板与弦杆竖板间熔透角焊缝、节点板穿出上水平板围焊熔透角焊缝进行焊接工艺评定试验，采用两个钢厂生产的Q500qE钢板进行试验，评定试验接头的坡口尺寸、焊接方法如表7所示，焊接参数如表8所示。

焊后对焊缝进行外观检查，表面质量符合TB10212—2009的要求。24h后对熔透角焊缝全长进行超声波探伤检测，焊缝内部质量达到TB10212—2009Ⅰ级要求。之后，对八组熔透角焊缝分别进行焊缝金属拉伸、断面酸蚀、接头硬度和焊缝化学成分分析试验，焊缝金属拉伸、低温冲击试验和接头硬度试验结果如表9所示，焊缝金属化学成分如表10所示，典型接头断面照片如附图所示。

表2　Q500qE钢的力学性能

编号	板厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	弯曲180°	-40℃ KV_2/J	数据来源
—	≤60	≥500	≥630	≥18	d=3a	≥120	标准值
W20	20	567	674	20	合格	290,240,256	复验值
W32	32	540	699	19	合格	260,270,295	复验值
W56	56	570	682	22	合格	215,222,280	复验值
A20	20	597	724	18.0	合格	245,262,293	复验值
A32	32	512	767	22.5	合格	238,205,206	复验值
A56	56	509	687	24.0	合格	238,288,296	复验值

表3　WH70Q焊丝化学成分（质量分数）　（%）

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.08	0.56	1.50	0.016	0.011	0.82

表4　WH70Q焊丝对接焊缝焊接参数

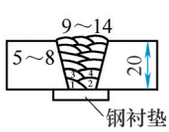
熔敷简图	试件编号	焊道	道间温度/℃	焊接电流/A	电弧电压/V	保护气体流量/L·min^{-1}
	D1	1~14	140~165	220~260	25~29	富氩气 18~20
	D2	1~14	140~165	240~290	30~33	CO_2气 18~20

表5　WH70Q焊丝焊缝金属力学性能

试件编号	保护气	熔敷金属拉伸			熔敷金属冲击吸收能量（-40℃）/J
		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	
D1	富氩气	605	685	23.0	72，82，82，83，68（77）
D2	CO_2气	584	669	24.5	20，18，18，20，20（19）
标准值		≥500	≥630	≥18	≥54

表6　WH70Q焊丝焊缝金属化学成分（质量分数）　（%）

试件编号	保护气	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
D1	富氩气	0.08	0.45	1.42	0.009	0.009	0.08	0.84	0.02	0.41
D2	CO_2	0.08	0.29	1.11	0.010	0.009	0.09	0.76	0.02	0.32

4. 结果分析

根据表5和表9的焊缝力学性

能试验结果，对采用富氩气保护的焊缝与纯CO_2气体保护的焊缝力学性能进行比较。

（1）焊缝的强度和塑性　采用富氩气保护的焊缝与采用纯CO_2气体保护的焊缝强度和伸长率均大于标准值，焊缝拉伸试验结果比较如表11所示。从表11可看出，前者比后者焊缝强度有一定提高，对接焊缝屈服强度提高21MPa，抗拉强度提高16MPa；熔透角焊缝屈服强度提高42MPa，抗拉强度提高33MPa。焊缝金属伸长率均合格，采用富氩气保护的焊缝与采用纯CO_2气体保护的焊缝塑性相比，后者比前者焊缝塑性略有提高。

（2）接头韧性　采用富氩气保护的焊缝与采用纯CO_2气体保护的-40℃低温冲击吸收能量比较如表12所示。由表12可知，焊缝热影响区的冲击韧性均＞54J，前者比后者提高约20J；在焊缝金属的冲击韧性上二者有显著差别，采用富氩气保护焊的对接焊缝和熔透角焊缝冲击吸收能量均＞54J，而采用纯CO_2气体保护的冲击吸收能量只有AR1b平均值刚好达到54J的标准要求，其他对接焊缝和熔透角焊缝的冲击吸收能量均低于标准值。采用富氩气保护比纯CO_2气体保护的冲击吸收能量高很多，对接焊缝前者为77J，后者只有19J；熔透角焊缝前者平均值107J，后者平均值只有46J，采用纯CO_2气体保护的焊缝冲击韧性不合格。

（3）接头硬度　熔透角焊缝的接头硬度均≤380HV10，采用纯CO_2气体保护的接头硬度最

表7　评定试验接头的坡口尺寸、焊接方法

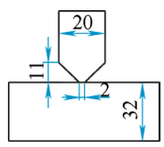
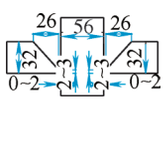
编号	板厚组合/mm+mm	坡口形式	焊接位置	焊接材料	试板状况/mm×mm×mm
WR1a AR1a	32+20		平位	富氩气保护 WH70Q（ϕ1.2mm）	背面清根 20×350×500，1件 32×350×500，1件
WR1b AR1b	32+20		平位	CO_2气保护 WH70Q（ϕ1.2mm）	背面清根 20×350×500，1件 32×350×500，1件
WR3a AR3a	56+32		平位	富氩气保护 WH70Q（ϕ1.2mm）	背面清根 32×250×500，2件 56×350×500，1件
WR3b AR3b	56+32		平位	CO_2气保护 WH70Q（ϕ1.2）	背面清根 32×350×500，1件 56×350×500，1件

表8　熔透角接焊缝焊接参数

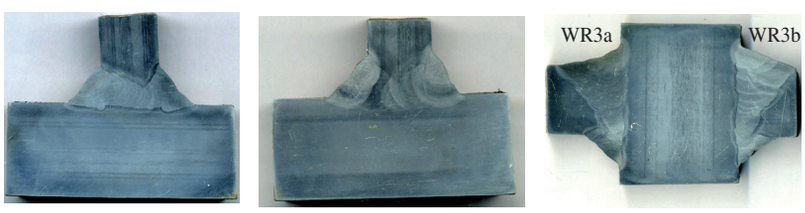
编号	焊道	道间温度/℃	焊接电流/A	电弧电压/V	气体流量/L·min^{-1}	备注
WR1a AR1a	根部	23~120	250~270	25~27	18~20	背面清根 平位焊接 富氩气保护
	其他	110~145	230~290	25~29	18~20	
WR1b AR1b	根部	25~130	240~290	30~33	18~20	背面清根 平位焊接 CO_2气保护
	其他	140~165	240~290	30~32	18~20	
WR3a AR3a	1~4	80~130	220~230	26~30	18~20	预热80℃ 背面清根 平位焊接 富氩气保护
	5~20	130~150	220~260	25~30	18~20	
WR3b AR3b	1~4	80~120	240~270	31~33	18~20	预热80℃ 背面清根 平位焊接 CO_2气保护
	5~22	115~145	240~280	30~33	18~20	

表9　熔透角焊缝力学性能试验结果

保护气	编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	-40℃ 冲击吸收能量/J		接头最高硬度（HV10）
					焊缝金属	热影响区（线外1mm）	
富氩气	WR1a	631	697	23.0	120,150,140（137）	125,80,106（104）	282
	WR3a	605	688	26.0	67,58,72（66）	145,197,163（168）	274
	AR1a	698	757	24.0	102,116,122（113）	190,80,152（141）	324
	AR3a	690	754	20.0	98,125,113（112）	215,168,222（202）	345
CO_2	WR1b	640	713	26.0	29,29,32（30）	70,101,52（74）	281
	WR3b	541	628	26.0	47,47,42（45）	187,127,180（162）	290
	AR1b	663	731	21.0	45,63,54（54）	148,130,142（140）	350
	AR3b	610	691	22.0	54,48,56（53）	215,168,70（151）	306
标准值		≥500	≥630	≥18	≥54	≥54	≤380

表10 熔透角焊缝的焊缝金属化学成分（质量分数） （%）

保护气	编号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
富氩气	WR1a	0.07	0.47	1.47	0.007	0.006	0.76	0.36
	WR3a	0.07	0.42	1.37	0.009	0.009	0.80	0.37
	AR1a	0.06	0.49	1.52	0.008	0.007	0.77	0.35
	AR3a	0.06	0.49	1.46	0.008	0.008	0.84	0.37
CO_2	WR1b	0.06	0.27	1.15	0.008	0.006	0.61	0.31
	WR3b	0.06	0.20	0.88	0.008	0.008	0.81	0.36
	AR1b	0.07	0.33	1.26	0.008	0.006	0.64	0.31
	AR3b	0.06	0.31	1.07	0.008	0.007	0.81	0.36



（a）WR1a （b）WR1b （c）WR3a、WR3b（δ 32+56+32）

典型接头断面照片

表11 焊缝焊缝拉伸试验结果比较

保护气	对接焊缝			熔透角焊缝		
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）
富氩气	605	685	23.0	605~698 平均656	688~757 平均724	20~26 平均23.3
CO_2	584	669	24.5	541~663 平均614	628~731 平均691	21~26 平均23.8

表12 接头低温冲击韧性比较

保护气	对接焊缝-40℃冲击吸收能量/J	熔透角焊缝-40℃冲击吸收能量/J	
	焊缝金属	焊缝金属	热影响区（线外1mm）
富氩气	77	66~137 平均107	104~202 平均154
CO_2	19	30~54 平均46	74~162 平均132

高值在AR1b焊缝的热影响区，为350HV10；采用富氩气保护焊的接头硬度最高值在AR3a焊缝的热影响区，为345HV10。

（4）化学成分 从表6和表10焊缝金属化学成分看，采用富氩气保护焊比采用纯CO_2气保护焊的焊缝金属中硅、锰、镍、钼等合金元素含量高。分析其原因是由于氩气为惰性气体，而CO_2气体为活性气体，采用富氩气保护比采用纯CO_2气体保护的Si、Mn、Ni、Mo等合金元素烧损较少，所以焊缝的强度和韧性前者比后者高，这与接头力学性能比较结果相符。

5. 结语

Q500qE钢板采用WH70Q实芯焊丝富氩气保护焊，接头力学性能满足技术要求，而采用纯CO_2气体保护焊的接头力学性能不能满足技术要求，焊缝金属-40℃低温冲击韧性不合格。由于采用富氩气保护焊比采用纯CO_2气体保护焊的合金元素烧损较少，有利于提高焊缝的强度和韧性，所以实芯焊丝富氩气保护焊更适用于高强度、高韧性结构钢的焊接。

作者简介：贝玉成、徐向军，中铁山桥集团有限公司。

备注：本论文源于中国铁路总公司科技研究开发计划项目，“新材料及轨道形位控制技术研究”（编号：2013G001-A-1）。

MW 20160520

更正

本刊2016年第6期27页《EH36船板钢大热输入焊接接头粗晶区组织及性能分析》一文作者广船国际有限公司的马金军、王超、吴磊磊、李豹更正为广船国际有限公司的马金军、江泽新、王超、吴磊磊，广东省焊接技术研究所的王凯，特此更正。

金属加工编辑部