

Q345qENH耐候桥梁钢焊接试验研究

徐向军，高建忠，刘振刚，范军旗
中铁山桥集团有限公司 河北秦皇岛 066205

摘要：介绍了官厅水库公路特大桥用高性能免涂装耐候桥梁钢Q345qENH钢的应用试验研究，包括母材成分和性能检验、焊接材料试验、热加工试验和钢板焊接性试验等，评价了Q345qENH钢板的综合力学性能、热加工性能和焊接性。

关键词：免涂装；耐候桥梁钢；Q345qENH；应用试验

1 序言

官厅水库公路特大桥为主跨720m的双塔单跨悬索桥，效果图如图1所示。由于大桥跨越北京市饮用水源地——官厅水库，考虑到环保要求，通过技术论证确定本桥钢结构采用免涂装Q345qENH耐候钢。以往耐候桥梁钢都是在中小跨度桥上应用，本项目是我国首次在大跨度悬索桥上采用免涂装耐候钢，且为全焊接连接，为此需要对新开发的Q345qENH耐候钢进行应用试验研究，为官厅水库公路特大桥制造提供技术支持。



图1 官厅水库特大桥效果图

2 Q345qENH钢板技术指标

根据设计需要，官厅水库公路特大桥对Q345qENH钢板的性能指标要求见表1，钢板成分和力学性能符合GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》的要求^[1]，-40℃低温冲击吸收能量 $\geq 120\text{J}$ ，屈强比 ≤ 0.85 ，耐大气腐蚀指数 $I \geq 6.0$ 。

3 Q345qENH钢板母材试验结果

某钢厂采用TMCP工艺生产了Q345qENH钢板，对板厚8mm、16mm、24mm、36mm、44mm、60mm的Q345qENH钢板进行母材复验。试验内容包括母材的化学成分、冷裂纹敏感系数 P_{cm} 、耐大气腐蚀指数 I 以及拉伸、弯曲、-40℃低温冲击、厚度方向性能等力学性能，试验结果见表2、表3。

从表2的化学成分分析可以看出，钢板的C、S、P含量与裂纹敏感系数较小，有益于提高钢板的焊接性。钢板的耐大气腐蚀指数 I 为6.5~6.6，耐候性满足设计要求。从表3的力学性能可以看出，试验结果均满足表1的规定，钢板的抗拉强度、塑性均满足技术要求，屈强比为0.67~0.85，-40℃冲击吸收能

表1 高性能桥梁用Q345qENH钢技术条件

拉伸试验					V型冲击试验		耐候性能
下屈服强度/MPa		抗拉强度 /MPa	断后伸长率 (%)	屈强比	试验温度 /℃	冲击吸收能量 /J	耐大气腐蚀指数 I
板厚 $\leq 50\text{mm}$	板厚 $> 50\sim 100\text{mm}$						
≥ 345	≥ 335	≥ 490	≥ 20	≤ 0.85	-40	≥ 120	≥ 6.0

注：耐大气腐蚀指数 $I=26.01w_{Cu}+3.88w_{Ni}+1.20w_{Cr}+1.49w_{Si}+17.28w_P-7.29w_{Cu}\times w_{Ni}-9.10w_{Ni}\times w_P-33.39w_{Cu}^2$ 。

基金项目：住房城乡建设部研究项目（新型建筑结构技术）《耐候全焊钢-混组合结构加劲梁悬索桥关键技术》（编号：2015-K2-036）。

表2 Q345qENH钢板化学成分

板厚 /mm	化学成分 (质量分数, %)								冷裂纹敏感 系数 P_{cm}	耐大气腐蚀 指数 I
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni		
—	≤0.10	0.15~0.50	1.00~1.50	≤0.020	≤0.005	0.25~0.50	0.40~0.70	0.30~0.40	≤0.20	≥6.0
8	0.05	0.32	1.28	0.012	0.003	0.32	0.43	0.35	0.18	6.6
16	0.06	0.29	1.25	0.012	0.005	0.35	0.43	0.36	0.18	6.6
24	0.05	0.31	1.24	0.010	0.002	0.34	0.42	0.35	0.18	6.6
36	0.06	0.32	1.26	0.013	0.003	0.30	0.46	0.33	0.18	6.6
44	0.06	0.28	1.23	0.010	0.004	0.35	0.42	0.36	0.18	6.6
60	0.06	0.30	1.26	0.011	0.002	0.30	0.42	0.33	0.18	6.5

表3 Q345qENH钢板力学性能

板厚 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	屈强比	伸长率 (%)	弯曲	-40℃纵向冲击 吸收能量/J	厚度方向性能 (%)	数据 来源
≤16	≥345	≥490	≤0.85	≥20	$a=180^\circ$	≥120	≥35	标准值
8	436	648	0.67	28	$D=2a$ 完好	182、216、204	—	试验值
16	384	574	0.67	31	$D=2a$ 完好	230、200、182	—	试验值
>16~50	≥345	≥490	≤0.85	≥20	$D=180^\circ$	≥120	—	标准值
24	476	563	0.85	30	$D=3a$ 完好	325、330、332	79、79、78	试验值
36	443	548	0.81	30	$D=3a$ 完好	300、312、333	76、75、77	试验值
44	477	582	0.82	26	$D=3a$ 完好	308、305、300	64、68、76	试验值
>50~60	≥335	≥490	≤0.85	≥20	$D=180^\circ$	≥120	≥35	标准值
60	439	563	0.78	29	$D=3a$ 完好	342、280、335	75、69、67	试验值

量均>180J，低温冲击性能优良。厚度方向性能均满足GB/T 5313—2010中最高标准Z35级的要求。

4 Q345qENH钢板系列温度冲击试验

对板厚24mm、44mm的Q345qENH钢板进行常温、0℃、-20℃、-40℃、-60℃的系列温度冲击试验，韧脆转变曲线如图2、图3所示。由图2和图3可以看出：板厚24mm、44mm钢板的低温韧脆转变温度ETT50均低于-60℃。

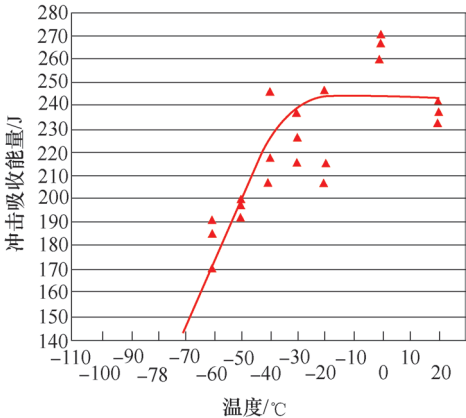


图2 板厚20mm的Q345qENH钢板系列温度冲击韧脆转变曲线

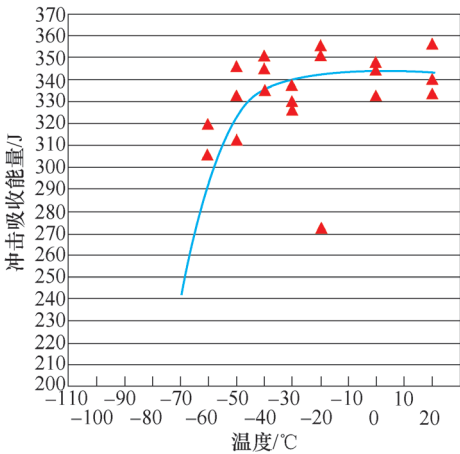


图3 板厚44mm的Q345qENH钢板系列温度冲击韧脆转变曲线

5 Q345qENH钢板热加工工艺性能试验

(1) Q345qENH钢板切割工艺性能试验 在钢桥制造过程中，对钢板需要进行切割下料和焊接变形火焰修整，为了检测Q345qENH钢板切割面质量和火焰矫正对钢板性能的影响，需要对钢板进行热加工工艺性能试验。

对板厚8mm、16mm、24mm、36mm、44mm和

60mm的Q345qENH钢板进行切割面粗糙度检测，切割面光滑、齐整，切割面粗糙度值 $\leq 25\mu\text{m}$ 。通过磁粉检测，切割面没有裂纹或其他危害性缺陷，钢板切割面硬度试验结果见表4。

表4的切割面硬度试验结果表明，Q345qENH钢板火焰切割面最大硬度为297HV10，等离子切割面最大硬度为333HV10，均低于标准值350HV10，表明Q345qENH钢板切割工艺性良好。

(2) Q345qENH钢板热矫形工艺性能试验 针对板厚16mm、24mm、36mm、44mm的Q345qENH

钢板进行了热矫形工艺试验，加热方法为超能气（炳烷+添加剂）+氧气火焰加热，加热区的最高温度分别按700℃、800℃和900℃控制，测试了加热区的拉伸、弯曲、低温冲击力学性能，试验结果见表5。

由表5的试验结果可以看出，16mm、24mm、36mm、44mm的Q345qENH钢板加热700℃、800℃后，力学性能全部合格；加热900℃后，板厚16mm的Q345qENH钢板屈服强度不合格。因此，Q345qENH钢板的热矫形加热温度应不超过800℃。

表4 Q345qENH钢板切割面硬度

切割方法	板厚/mm	硬度值HV10									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	最高硬度
等离子	16	263	259	264	274	288	285	260	271	279	288
	24	296	291	308	320	315	317	333	330	327	333
火焰	8	221	214	207	208	219	223	212	209	220	223
	16	258	279	268	253	244	248	252	242	245	279
	24	275	263	257	258	272	275	272	297	280	297
	32	268	282	276	284	296	291	284	292	280	296
	44	269	271	272	271	273	288	285	274	275	288
	60	217	222	224	225	227	227	231	231	232	232

表5 Q345qENH钢板热矫形后的力学性能试验结果

板厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	弯曲	-40℃纵向冲击吸收能量/J	备注
≤ 50	≥ 345	≥ 490	≥ 20	$\alpha=180^\circ$	≥ 120	标准值
16	384	574	31	$D=2a$ 合格	230、200、182	复验值
	473	551	26	$D=2a$ 合格	283、238、278	加热700℃
	404	533	28	$D=2a$ 合格	253、228、295	加热800℃
	327	526	28	$D=2a$ 合格	173、175、195	加热900℃
24	476	536	30	$D=3a$ 合格	325、330、332	复验值
	428	552	30	$D=3a$ 合格	276、301、271	加热700℃
	444	538	28	$D=3a$ 合格	287、300、302	加热800℃
	451	536	28	$D=3a$ 合格	210、200、218	加热900℃
36	443	548	30	$D=3a$ 合格	300、312、330	复验值
	458	558	31	$D=3a$ 合格	267、273、318	加热700℃
	453	587	28	$D=3a$ 合格	287、318、252	加热800℃
	426	557	30	$D=3a$ 合格	363、230、351	加热900℃
44	477	582	26	$D=3a$ 合格	308、305、300	复验值
	467	548	30	$D=3a$ 合格	353、317、353	加热700℃
	466	539	28	$D=3a$ 合格	352、343、343	加热800℃
	460	550	28	$D=3a$ 合格	252、327、357	加热900℃

6 Q345qENH钢板配套焊接材料试验

由于没有现成的Q345qENH耐候钢板配套焊材，我们根据钢板成分和焊接接头力学性能要求，确定了Q345qENH耐候钢用焊材技术要求，见表6。

为了选择与Q345qENH钢板相匹配的焊接材料，与有关焊材厂联合开发了耐候钢焊材，如CHE507NHQ焊条、CHW-55NHQ3埋弧焊丝、CHF105NHQ埋弧焊剂、CHW-55NHQ1和

TH550-NQ-II实芯气体保护焊丝、CHT71NHQ和JQ.YJ501NiCrCu-1药芯气体保护焊丝。对耐候钢焊材分别进行了熔敷金属化学成分分析和力学性能试验，结果见表7和表8，化学成分分析和力学性能均满足技术条件要求。其中实芯气体保护焊丝保护气体为富氩混合气（80%Ar+20%CO₂），药芯气体保护焊丝保护气为CO₂。

表6 Q345qENH耐候钢用焊材技术要求

熔敷金属化学成分（质量分数，%）								耐大气腐蚀指数 <i>I</i>
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	
≤0.10	0.10~0.64	≤1.50	≤0.025	≤0.010	0.15~1.00	0.20~1.10	0.20~0.51	≥6.2
熔敷金属力学性能								
屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		伸长率（%）		-40℃低温冲击吸收能量/J		
≥400		≥510		≥22		≥41		

表7 焊接材料熔敷金属化学成分

牌号	化学成分（质量分数，%）								耐大气腐蚀指数 <i>I</i>	备注
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr		
—	≤0.10	0.10~0.64	≤1.50	≤0.025	≤0.010	0.20~0.51	0.20~1.10	0.15~1.00	≥6.2	技术条件
实芯焊丝 CHW-55NHQ1（φ 1.2mm）	0.08	0.46	1.28	0.008	0.002	0.46	0.53	0.38	6.97	试验值
实芯焊丝 TH550-NQ-II（φ 1.2mm）	0.07	0.36	1.25	0.013	0.004	0.36	0.46	0.25	6.48	试验值
药芯焊丝 JQ.YJ501NiCrCu-1（φ 1.2mm）	0.03	0.29	1.16	0.011	0.007	0.19	0.67	0.36	6.67	试验值
药芯焊丝 CHT71NHQ（φ 1.2mm）	0.03	0.42	1.56	0.011	0.007	0.37	0.48	0.33	6.86	试验值
埋弧焊丝CHW-55NHQ3 （φ 4.0mm）+焊剂CHF105NHQ	0.036	0.40	1.28	0.011	0.002	0.40	0.44	0.33	6.82	试验值
焊条 CHE507NHQ（φ 4.0mm）	0.04	0.22	0.81	0.006	0.004	0.39	0.47	0.36	6.50	试验值

表8 焊接材料熔敷金属力学性能

牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	-40℃低温冲击吸收能量/J	备注
—	≥400	≥510	≥22	≥41	技术条件
实芯焊丝 CHW-55NHQ1（φ 1.2mm）	593	665	25	118、140、143、92、96	试验值
实芯焊丝 TH550-NQ-II（φ 1.2mm）	577	642	26	87、98、92、95、94	试验值
药芯焊丝 JQ.YJ501NiCrCu-1（φ 1.2mm）	600	653	21	123、98、128、120、90	复验
药芯焊丝 CHT71NHQ（φ 1.2mm）	603	662	23	60、54、88、50、64	复验
埋弧焊丝 CHW-55NHQ3（φ 4.0mm） +焊剂 CHF105NHQ	579	644	26	96、150、58、141、66	复验
焊条 CHE507NHQ（φ 4.0mm）	441	545	32	103、96、95、91、103	复验

7 Q345qENH钢板焊接性试验

(1) Q345qENH钢板焊接热影响区最高硬度试验 对板厚8mm、24mm、36mm、44mm的Q345qENH钢板分别进行焊接热影响区最高硬度试验, 试验按照《焊接热影响区最高硬度试验方法》的规定进行, 采用CHE507NHQ焊条焊接, 焊条直径4mm。焊接热影响区最高硬度曲线如图4~图7所示。

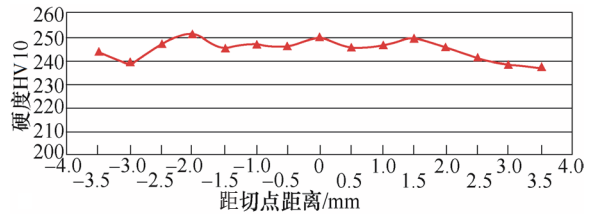


图4 板厚8mm的Q345qENH钢板焊接热影响区最高硬度曲线

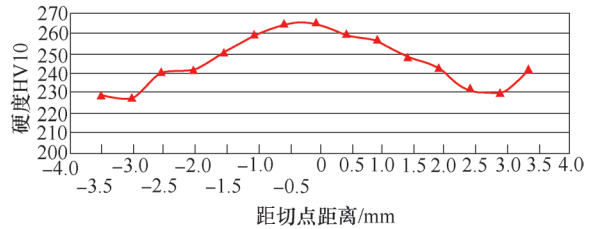


图5 板厚24mm的Q345qENH钢板焊接热影响区最高硬度曲线

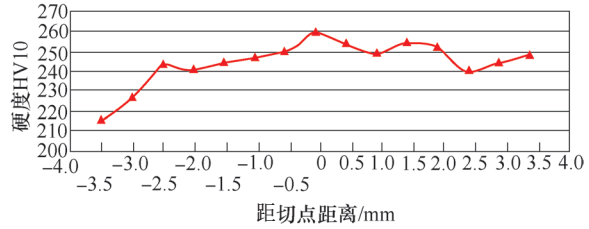


图6 板厚36mm的Q345qENH钢板焊接热影响区最高硬度曲线

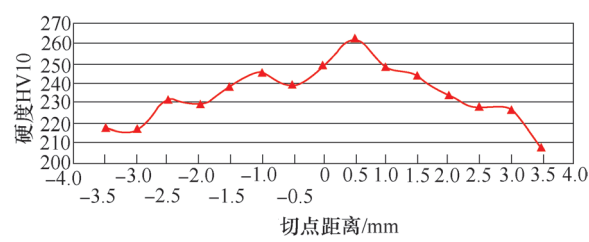


图7 板厚44mm的Q345qENH钢板焊接热影响区最高硬度曲线

由图4~图7可知, 板厚8mm、24mm、36mm和44mm的Q345qENH钢板焊接热影响区最高硬度分别为250HV10、266HV10、260HV10和263HV10, 远低于350HV10, 表明Q345qENH钢板的焊接性良好。

(2) Q345qENH钢板斜Y坡口焊接裂纹试验 对板厚24mm、36mm、44mm、60mm的Q345qENH钢板分别进行斜Y坡口焊接裂纹试验, 参照《焊接性试验 斜Y坡口焊接裂纹试验方法》进行, 采用气体保护焊方法焊接, 焊接材料为 ϕ 1.2mm的CHT71NHQ药芯焊丝。对板厚24mm的钢板不预热, 对板厚36mm、44mm和60mm的钢板分别预热80℃、100℃和120℃后进行焊接试验, 均没有产生裂纹, 焊接参数和试验结果见表9, 斜Y坡口焊接裂纹试件如图8所示。

由斜Y坡口焊接裂纹试验结果可以确定Q345qENH钢板防止产生冷裂纹的预热温度(当环境温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$, 环境湿度 $\leq 80\%$ 时): 板厚 $\leq 24\text{mm}$ 时不需要预热, 板厚 $>24\sim 36\text{mm}$ 时预热 80°C , 板厚 $>36\sim 44\text{mm}$ 时预热 100°C , 板厚 $>44\sim 60\text{mm}$ 时预热 120°C 。

(3) Q345qENH钢板对接焊缝系列温度冲击试验 对板厚组合(36+24)mm、(44+44)mm

表9 Q345qENH钢板斜Y坡口焊接裂纹试验结果

焊接方法及 焊接材料	试件 编号	环境温度 /℃	环境湿度 (%)	预热温度 /℃	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹
药芯焊丝气体保护焊 CHT71NHQ (ϕ 1.2mm)	24-1	16	35	不预热	240	30	290
	36-1	16	35	80	240	30	280
	44-1	16	35	100	240	30	272
	60-1	16	35	120	240	30	270

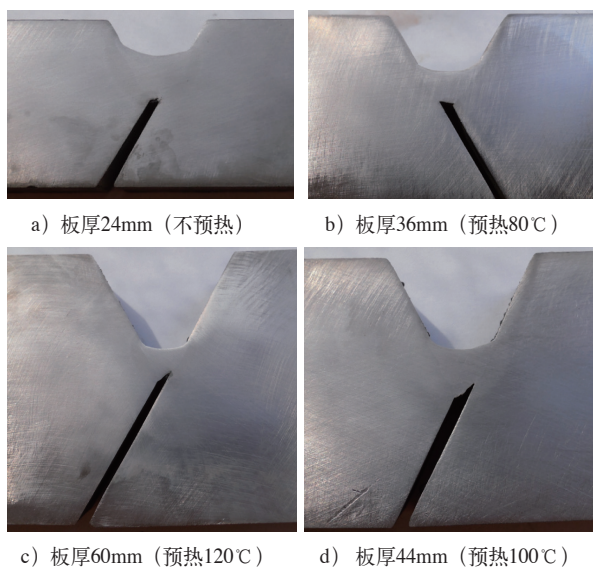


图8 斜Y坡口焊接裂纹试件照片

的Q345qENH钢板对接头的焊缝金属和热影响区（熔合线外1mm处）进行常温至 -60°C 系列温度冲击试验，确定Q345qENH钢板对接头的低温韧脆转变温度ETT50。

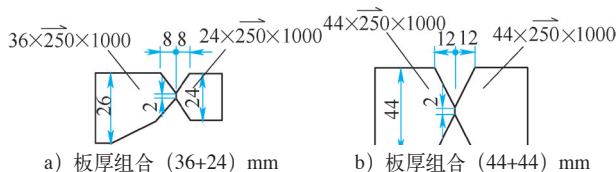


图9 试板和焊缝坡口尺寸

注：试板尺寸中标上划线者为钢板的轧制方向。

对接焊缝采用气体保护焊打底和埋弧焊填充的方法焊接, 气体保护焊采用CHW-55NHQ1 ($\phi 1.2\text{mm}$) 实芯焊丝焊接, 埋弧焊采用CHW-55NHQ3 ($\phi 4.0\text{mm}$) 焊丝+CHF105NHQ焊剂焊接, 对接焊缝焊接参数见表10。

焊接后进行焊缝外观检查,焊缝外观质量满足Q/CR 9211—2015《铁路钢桥制造规范》要求。24h后对焊缝进行超声波检测,焊缝内部质量达到Q/CR 9211—2015 I级要求。之后进行焊缝金属和热影响区常温至-60℃系列温度冲击试验,试验结果见表11,系列温度冲击韧脆转变曲线如图10~图13所示。

由表11和图10~图13可以看出,板厚(36+24) mm

表10 对接焊缝焊接参数

板厚组合 /mm	熔敷简图	焊道	道间温度 /℃	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /m·h ⁻¹	焊接方法	备注
36+24		1	80	220~240	28~30	28	135 (ϕ 1.2mm)	温度: 20℃ 湿度: 35% 平位焊接 背面清根 焊前预热80℃
		2	100	540~560	30~32	28	121 (ϕ 4mm)	
		3、4	120、140	580~600	30~32	26		
		5	80	540~560	30~32	30		
		6、7	140、160	580~600	30~32	26		
		8、9	120、155	580~600	30~32	24		
44+44		1	100	220~240	30~32	14	135 (ϕ 4mm)	温度: 20℃ 湿度: 35% 平位焊接 背面清根 焊前预热 100℃
		2	140	500~520	30~32	21	121 (ϕ 4mm)	
		3~6	120~150	580~600	30~32	24		
		7、8	150、160	580~600	30~32	22		
		9	120	520~540	30~32	20		
		10、11	140、170	580~600	30~32	24		
		12~17	120~150	580~600	30~32	24~26		
		18、19	130、150	580~600	30~32	22		

的焊缝金属韧脆转变温度ETT50为 -45°C ，热影响区的韧脆转变温度ETT50低于 -60°C ；板厚

(44+44) mm的焊缝金属和热影响区的韧脆转变温度ETT50均为 -50°C 。

表11 Q345qENH钢板对接接头系列温度冲击试验结果

板厚 /mm	槽口 位置	冲击吸收能量/J						
		20℃	0℃	-20℃	-30℃	-40℃	-50℃	-60℃
36+24	焊缝 金属	175	175	172	162	105	65	35
		182	170	180	165	102	34	37
		165	174	165	150	140	70	36
		(174)	(173)	(172)	(159)	(116)	(56)	(36)
	热影 响区 (24mm侧)	250	300	300	260	220	190	138
		266	292	225	255	231	210	170
		278	310	208	300	285	172	165
		(265)	(301)	(244)	(272)	(245)	(191)	(158)
44+44	焊缝 金属	186	130	122	141	114	85	48
		160	192	158	145	100	80	49
		180	196	115	130	85	91	45
		(175)	(173)	(132)	(139)	(100)	(85)	(47)
	热影 响区	242	255	202	210	106	79	101
		240	248	260	202	165	75	74
		195	254	215	180	178	172	65
		(226)	(252)	(226)	(197)	(150)	(109)	(80)

注：括号中数据为平均值。

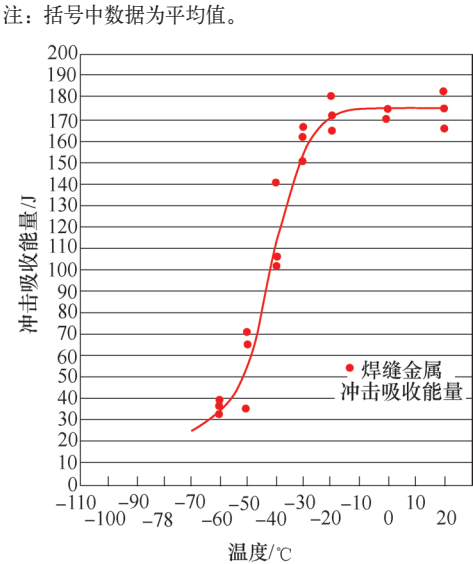


图10 板厚 (24+36) mm对接接头焊缝金属系列温度冲击韧转变曲线

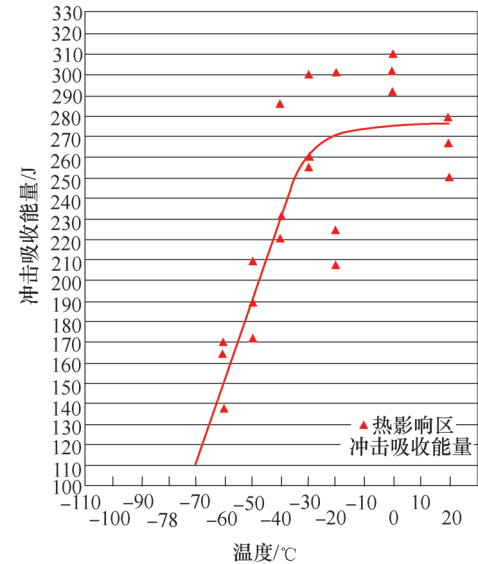


图11 板厚 (24+36) mm对接接头热影响区 (24mm板侧) 系列温度冲击韧转变曲线

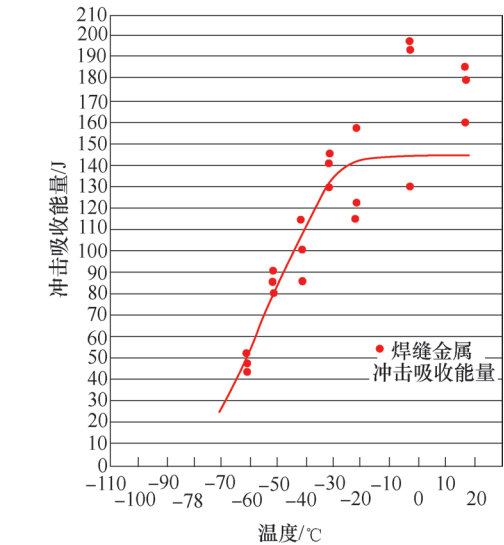


图12 板厚 (44+44) mm对接接头焊缝金属系列温度冲击韧转变曲线

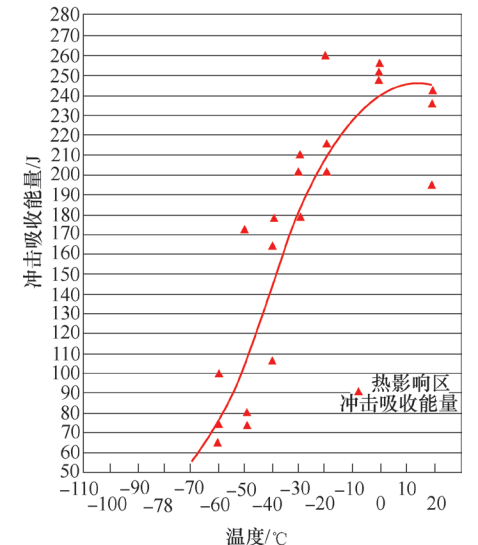


图13 板厚 (44+44) mm对接接头热影响区系列温度冲击韧转变曲线

薄板焊接变形的火焰矫正

黄彦博, 刘智慧

德阳东汽电站机械制造有限公司 四川德阳 618000

摘要: 薄板焊接变形具有复杂性、多元性, 是薄板焊接制造的一个技术难题。由于焊接热源对结构件的作用, 在焊接结构中产生尺寸和形状的变化, 从而严重影响了焊接质量。由于薄板焊接在型钢框架上, 其周边焊缝产生拉应力, 中部产生压应力, 压应力大于临界压应力时, 板面失稳产生变形现象。通过结合风电金属机舱罩焊接变形的矫正方法进行论述, 介绍薄板火焰矫正的施工方法。

关键词: 薄板焊接; 变形; 火焰矫正

1 序言

常规的风电机舱罩多采用复合材料制成, 具有重量轻、易成形等优点, 但同时也存在着成本高、壳体易变形、材料无法回收利用等缺点。因此德阳东汽电站机械制造有限公司对风力发电机组机舱罩采用金属材料进行了优化设计。金属机舱罩设计采用内部骨架支撑、外部包裹薄板的形式, 保证了机舱罩强度。

这种薄板焊接结构易出现波浪变形, 如果火焰矫正方法使用不当, 选择同厚板一样任意火烤捶打

矫正, 还会出现斑点状态的表面。金属机舱罩制作的难点在于如何有效控制焊接变形, 因此生产过程中不仅需要正确的火焰矫正方法, 也需要设计各类工装来保证精度。

2 薄板焊接变形的矫正方法

火焰圆点加热和线状加热产生残余的压缩塑性变形, 使其弯曲的纵横纤维得到收缩, 恢复至直线形, 则薄板的波浪变形得到矫正。

(1) 圆点加热法 圆点加热法是火焰在构件上加热为圆点形面积的一种火焰矫正方法。在板件上

8 结束语

1) 高性能耐候桥梁用Q345qENH钢板化学成分符合GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》的规定, 力学性能满足设计要求。C、S、P含量和裂纹敏感系数较小, 有益于提高钢板的焊接性, 耐大气腐蚀指数 $I \geq 6.5$; 钢板的屈强比为0.67~0.85, -40°C 冲击吸收能量均 $>180\text{J}$, 韧脆转变温度低于 -60°C , 低温冲击性能优良。厚度方向性能满足GB 5313—2010中最高标准Z35级的要求, 抗层状撕裂性能良好。

2) Q345qENH钢板的切割面质量和热矫形温度 $\leq 800^\circ\text{C}$ 的力学性能合格。

3) Q345qENH钢板焊接热影响区最高硬度低

于350HV10; 板厚 $\leq 24\text{mm}$ 时不需要预热, 板厚 $>24\sim 36\text{mm}$ 时预热 80°C , 板厚 $>36\sim 44\text{mm}$ 时预热 100°C , 板厚 $>44\sim 60\text{mm}$ 时预热 120°C , 能够防止焊接冷裂纹的产生; 埋弧焊对接接头焊缝金属的低温韧脆转变温度ETT50为 $-45\sim -60^\circ\text{C}$, 热影响区的低温韧脆转变温度ETT50为 -50°C 。

4) Q345qENH钢板的综合力学性能、热加工性能和焊接性能优良。

参考文献:

[1] 徐向军, 田智杰, 高建忠, 等. 桥梁用新型超低温高性能Q420qFNH耐候钢焊接试验研究[J]. 金属加工(热加工), 2019(11): 1-7.

MW 20201124