

15MnNiNbDR低温调制高强钢船罐产品的焊接工艺研究

王玲　丁娟　王敏

【摘要】根据船级社相关标准，制定15MnNiNbDR低温调制高强钢的焊接工艺方案。通过焊接工艺认可试验和船罐产品的实际生产应用，得出该材料的焊接方法是可行的，对今后15MnNiNbDR材料的船罐产品及其他压力容器产品的焊接起到了借鉴作用。

关键词：焊接工艺认可试验；后热处理；消除应力热处理

1. 概述

我公司承接的某船厂两台LPG/无水氨运输船液罐（见附图），该船罐钢板材料为15MnNiNbDR低温调制高强钢，制造及检测标准按中国船级社《材料与焊接规范》及《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》执行。该设备内部直径9750mm，长度27 716mm，筒体厚度56mm，封头厚度32mm。设计温度为-30～45℃，需要整体热处理。

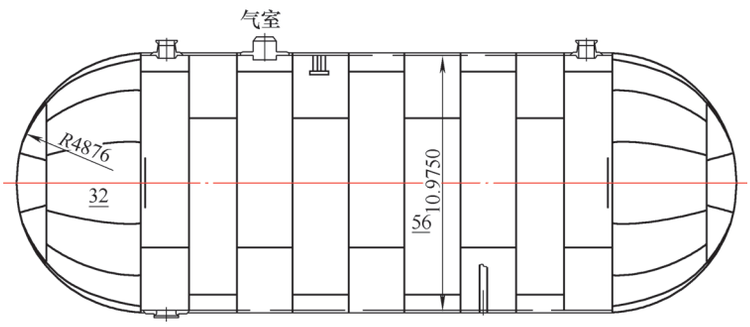
2. 焊接性分析

该产品主体材料为15MnNiNbDR低温高强钢材料，该材料具有良好的低温和较低的焊接冷裂纹敏感性。材料除满足GB3531—2008《低温压力容器用低合金钢钢板》标准外，还应符合技术协议的其他相关规定，并经CCS产品认证，供货状态为正火+回火热处理状态。钢板的化学成分及力学性能指标如表1、表2所示。

3. 焊接工艺认可试验

按中国船级社《材料与焊接规范》及相关规范进行焊接工艺认可试验。考虑到产品体积较大，壁厚较厚，采取在船厂现场安装方式进行，筒体环缝采用埋弧焊焊接，纵缝及封头采用焊条电弧焊焊接。

（1）焊接材料　焊条采用国内知名厂家GEL—557RH焊条，埋弧焊焊丝采用进口焊



结构示意

表1　15MnNiNbDR钢板化学成分（质量分数）　（%）

C	Si	Mn	Ni	Mo	V	Nb	Alt	P	S
≤0.018	0.15～0.50	1.20～1.60	0.30～0.70	—	—	0.015～0.040	—	≤0.020	≤0.008

表2 15MnNiNbDR钢板力学性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率（%）	冷弯试验	试样形状	试验温度/℃	允许一个最低/J	三个平均/J
520～620	≥350	20	b≥35mm 180°，d=3a	2mm，V形	－50	≥42	≥60

剂OK Flux 10.62、焊丝Weld EH14，焊材均经过中国船级社CCS认可。焊接材料熔敷金属化学成分及力学性能如表3、表4所示。

（2）焊接认可试验　按中国船级社《材料与焊接规范》及相关规范对该船罐制定焊接工艺方案。焊接工艺认可试验项目共3项（见表5）。

焊接材料焊前进行烘干，焊条烘干温度为350~400℃，焊剂烘干温度为350℃。试板在焊前进行预热，预热温度100℃以上，焊接时层间温度不得低于预热温度，且不大于180℃。焊接时严格按焊接工艺规程的焊接参数进行焊接，试板焊后立即进行后热处理，200~250℃，保温1h；焊后48h后进行无损射线检测，100%Ⅰ级合格；最终进行消除应力热处理，热处理温度为610℃，保温135min。

（3）试验结果　试板进行机械加工，按中国船级社《材料与焊接规范》进行加工试样，并进行理化性能试验。试验结果如表6所示。

三副试板在焊接接头处将试件垂直于焊缝断截断，长度至少包含热影响区外10mm的母材区域，再将接头处的断面磨平、抛光，经酸洗后检查宏观断面，均未出现裂纹、未焊透、未熔合、较大的夹渣或其他缺陷。

按中国船级社《材料与焊接规范》中规定，对于钢制结构，最小屈服强度≤420MPa的钢材，进行硬度检测应≤350HV。三副试板进行硬度检测结果如表7所示。

通过对三副焊接工艺认可试验试板进行力学性能、硬度及断面宏观检测分析，均满足中国船级社《材料与焊接规范》标准的要求，并形成PQR文件，通过中国船级社船检师的认可。

4. 产品焊接

（1）焊前准备　①焊前对现场焊接的焊工进行培训，按中国船级社《材料与焊接规范》进行焊工考试，考试合格，取得中国船级社颁发的焊工资格证书。②焊前进行详细的安全技术交底，并明确安全施工措施。③焊前严格清除坡口及两侧50mm内

表3　焊材熔敷金属化学成分（质量分数）　（%）

焊材牌号	C	Mn	Si	Ni	P	S	Cu
GEL—557RH	0.1	1.56	0.29	0.74	0.017	0.005	0.02
OK Flux 10.62/ Weld EH14	0.1	1.61	0.22	0.25	0.016	0.005	0.05

表4　熔敷金属力学性能要求

焊材牌号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	-50℃冲击吸收能量/J	伸长率（%）	扩散氢/mL·（100g）$^{-1}$（甘油法）	焊后热处理/℃·min^{-1}
GEL—557RH	660	580	71、99、114	26	≤5.0	610×135
OK Flux 10.62/ Weld EH14	605	515	78、117、94	26	≤5.0	

表5　焊接工艺认可焊接参数

评定编号	材质	规格/mm	焊接方法	焊接材料/mm	焊接位置	焊接参数		
						焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min^{-1}
P1501	15MnNiNbDR	32	SMAW	GEL—557RH/ϕ4.0	H	140~175	22~27	10~16
P1502					V向上	140~170	22~27	9~15
P1503			SAW	OK Flux 10.62/ Weld EH14/ϕ4.0	F	500~600	32~36	40~55

表6　焊接工艺认可试验力学性能

试板编号	抗拉强度/MPa	熔敷金属全焊缝拉伸/MPa	侧弯试验	-50℃夏比V型冲击试验，试样规格10mm×10 mm×55mm					
			180°	母材	焊缝	熔合线		热影响区距熔合线	
						1mm	3mm		5mm
规范	≥520	≥520	D=4a	单个冲击试样值≥34J					
P1501	530/536	705	合格	149/149/136	74/45/45	149/149/86	99/149/149	149/77/149	149/149/149
P1502	551/546	715	合格	149/149/149	61/55/40	70/52/149	132/68/149	149/76/54	139/149/149
P1503	545/547	650	合格	149/149/149	149/149/149	124/136/149	64/134/133	149/135/149	141/149/149

表7　焊接工艺认可试验硬度检测　　（HV）

编号	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
P1501	262	198	176	155	149	141	139	207	180	189	160	155	137	146
P1502	232	220	207	187	168	132	124	241	218	214	176	159	138	130
P1503	235	207	198	174	158	153	159	241	211	202	169	166	156	161

的氧化皮、水锈、油污、油漆及灰尘等。④焊前对焊条进行烘干，烘干温度350~400℃，保温1h，焊剂烘干温度350℃，保温2h。焊工应采用专用保温桶领用焊条，保温桶内焊条如超过4h未用完，应重新烘干，但烘干次数不得超过两次。⑤产品焊前应进行预热，预热温度≥100℃,预热范围应包括焊缝区两侧各170mm范围。

（2）定位焊、工夹具及预焊件焊接　①定位焊、工夹具及预焊件的焊接均采用与主体焊缝相同的焊接材料及焊接工艺。②定位焊长度≥80mm，间隔300~500mm，保证适度的熔深，定位焊的引弧、熄弧均在坡口内。定位焊道如有焊接裂纹，则裂纹必须打磨干净并重新焊接。③工夹具的焊接、引弧点和熄弧点应在工夹具焊道上，严禁在非焊接位置随意引弧和熄弧，工夹具拆除时不得损伤母材，并应将工夹具等临时性附件拆除处的表面打磨平滑后进行无损检测。

（3）焊接工艺　焊接顺序：LPG/无水氨运输船液罐单罐体积为1800m^3，直径较大，筒体和封头采用制造厂压制成形，安装现场分片、分段焊接。先拼单个筒节，再两两筒节相焊，最终组对成整体。单个筒节采用手工焊条电弧焊立向上焊接，组对探伤合格后进行内部加强环和米字支撑，筒节之间环缝采用埋弧焊进行焊接。

焊接参数：焊接时严格按焊接工艺认可试验报告中规定的焊接参数进行焊接，具体参数参照表5。层间温度100～200℃，焊后立即进行消氢处理，加热范围应包括焊缝两侧170mm范围。焊缝清根采用碳弧气刨，打磨渗碳层并经渗透探伤检测合格后，方可继续施焊。

产品焊接试板：按中国船级社《材料与焊接规范》标准要求，液化气船上的受压容器至少50m焊缝应焊制一个试件，该船罐产品共需焊接13副产品试板，纵试板应采用定位焊与筒体壳板相连接，使试板的焊缝成为筒体纵向焊缝的延续。环缝试板应与环缝焊接参数一致，采用模拟环缝焊接形式进行焊接。

5. 焊接检测

（1）外观与焊缝检测　焊接后焊缝应进行外观检查，焊接接头表面应均匀、致密，不应有裂纹、焊瘤、气孔、夹渣、咬边、弧坑和未填满等缺陷。

（2）表面处理　壳体表面不应有伤痕，筒体与封头上的工卡具割除时应预留2～3mm，不得伤及母材，然后用砂轮机打磨至母材平齐。

（3）焊缝无损检测　焊接接头的无损检测应在焊后 48h 进行，壳体的对接接头应按 JB/T4730.2 进行 100%射线检测，符合Ⅱ级为合格。并按JB/T4730.3 进行10%的超探复检，符合Ⅰ级为合格。

6. 整体消除应力热处理

船罐整体焊接完成，避免产生延迟裂纹，进行整理消除应力热处理。

热处理保温温度（610±20）℃，保温时间135min，400℃以下可不控制升温速度，在 400℃以上升温速度控制在 50~80℃/h，在恒温温度和时间达到要求后，应缓慢降温速度控制在 30~50℃/h，400℃以下随空气自然冷却。

7.结语

（1）该船罐通过无损探伤合格，并进行整体消除应力热处理后，对13副产品试板进行力学性能试验，结果均满足中国船级社《材料与焊接规范》标准及相关技术条件要求。

（2）通过对15MnNiNbDR钢板焊接性能研究，现场实地施工实践，证明对于该材料在焊接材料选型、焊接参数选择等方面是可行的。

到目前为止，在国内具备大容积LPG船用带压运输罐建造技术、大型压力罐的成形与组装经验的厂家寥寥无几。该项目的深入研究以及建造技术将促进国内LPG事业的加速发展，为公司后续LPG项目大规模开发和实施奠定基础。

作者简介：王玲等，荆门宏图特种飞行器制造有限公司。

MW 20170716