



07MnNiMoDR钢制大型低温球罐 焊接技术



合肥通用机械研究院有限公司

2019年11月





前言

乙烯是石油化工的基本有机原料，其产量已成为衡量一个国家石油化工工业发展水准的标志。近十年来，我国的乙烯工业发展迅速，已成为国民经济的支柱产业之一。乙烯球罐作为乙烯装置中的关键设备，其球壳板先后用过多种钢板，如SA537CL.1(2)、N-TUF490、REVER ACR610L、JFE-HITEN610U2L、07MnNiMoVDR、15MnNiNbDR等。



07MnNiMoDR调质高强钢

B610CF-L2钢板化学成分 wt%

钢号		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Pcm
B610CF-L2	技术要求	≤ 0.09	0.15 ~ 0.40	1.20 ~ 1.60	≤ 0.01 2	≤ 0.005	0.25 ~ 0.60	≤ 0.30	0.10 ~ 0.30	0.02~ 0.06	≤ 0.03	≤ 0.22
JFE-HITEN 610U2L	技术要求	≤ 0.09	0.15 ~ 0.40	1.20 ~ 1.60	≤ 0.01 5	≤ 0.005	0.30 ~ 0.90	≤ 0.30	≤ 0.30	0.02~ 0.06	≤ 0.03	≤ 0.20

注：Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B (%)。



试验用钢板力学性能及弯曲性能

钢号		拉伸试验			冲击试验		弯曲试验 180°
		R _{eL} / MPa	R _m / MPa	A/ %	KV ₂ J		
B610CF-L2	要求值	≥ 490	610~ 730	≥17	-50℃	≥100	d=3a
JFE-HITEN610U2L	要求值	≥ 490	610~ 730	≥ 20 ^[注]	-50℃	≥100	d=3a
注：JIS Z No. 4试样							

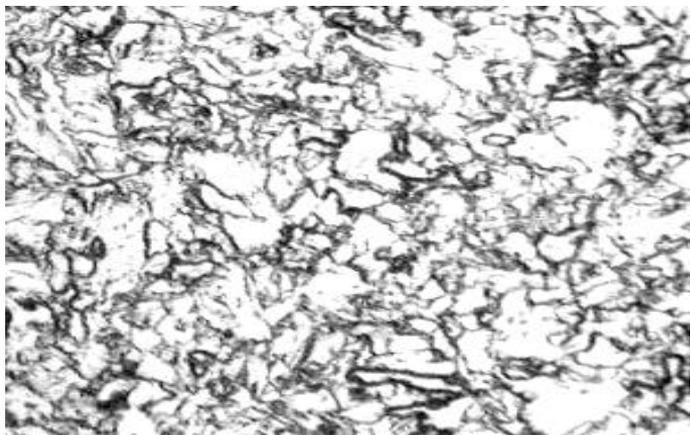


图 B610CF-L2钢板t/4处的金相组织



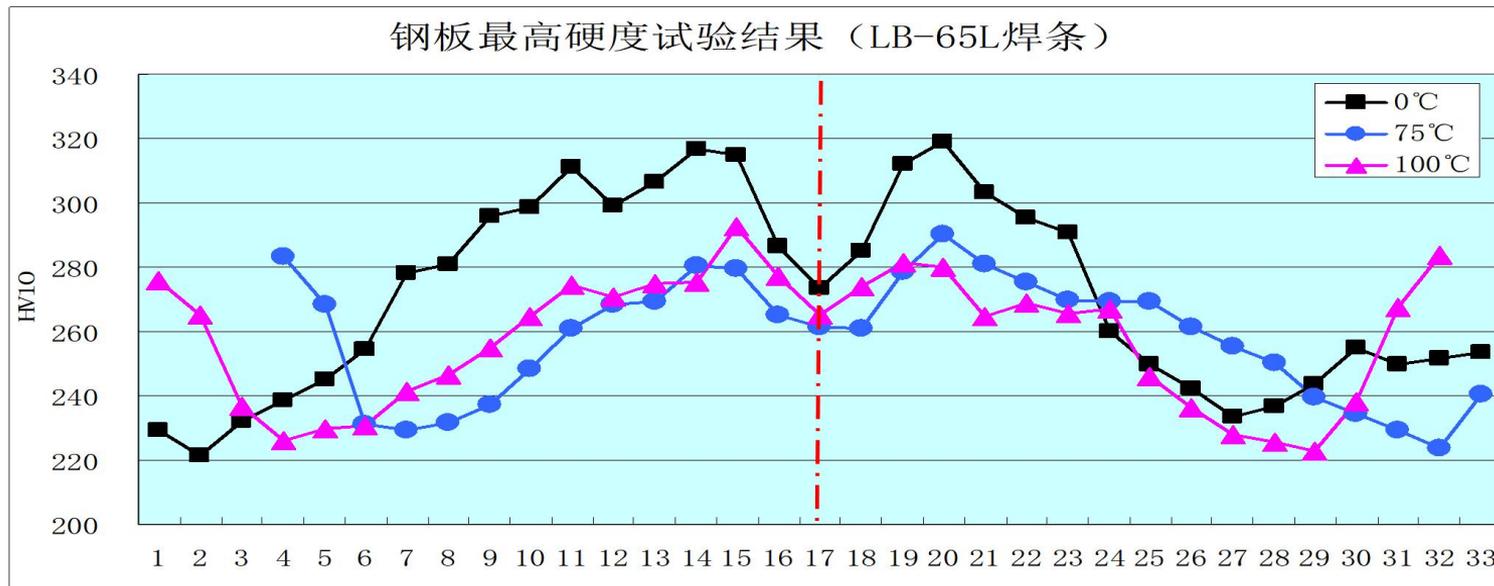
图 B610CF-L2钢板t/2处的金相组织

B610CF-L2钢交货状态为淬火+回火，图分别为试验钢板不同厚度处的500倍金相照片，其组织均主要为低碳贝氏体，形态随着板厚方向的增加低碳贝氏体的形态略有增大。



07MnNiMoDR钢板的焊接性

07MnNiMoDR钢最高硬度法



07MnNiMoVDR钢板最高硬度试验硬度分布图



斜Y型坡口焊接冷裂纹试验

试板采用原板厚，比标准20mm板厚要求更严

斜Y坡口焊接裂纹试验结果

钢号	焊前预热温度 °C	表面裂纹率 %	根部裂纹率 %	断面裂纹率 %
B610CF-L2	室温	0, 0	3.2, 2.8	7.1, 5.4
	50	0, 0	2.3, 4.9	5.3, 8.8
	75	0, 0	0.7, 0.9	4.5, 3.7
	100	0, 0	0.2, 0.4	1.3, 2.1
	125	0, 0	0, 0	0, 0

实践中在板厚较厚或焊接接头拘束度较大时，常推荐采用100°C以上的预热措施即可防止冷裂纹的产生。



插销应力松弛再热裂纹敏感性试验

插销应力松弛再热裂纹敏感性试验参照GB 9446《插销冷裂纹试验方法》，采用“断裂”准则，即试样在高温下经一定时间不断裂所承受的最大应力评定钢材的再热裂纹敏感性。

(a) 再热裂纹“C”形曲线

测定再热裂纹“C”形曲线加载初应力 σ_0 按Murray推荐的公式计算。

$\sigma_0 = \sigma_{EH} / ER$ [σ_0 —加载初应力值， σ —拘束应力（Murray推荐为 $0.8ReL$ ，本试验选取 $1.256 ReL$ ）， ER 、 EH —钢材在室温、高温下的弹性模数]

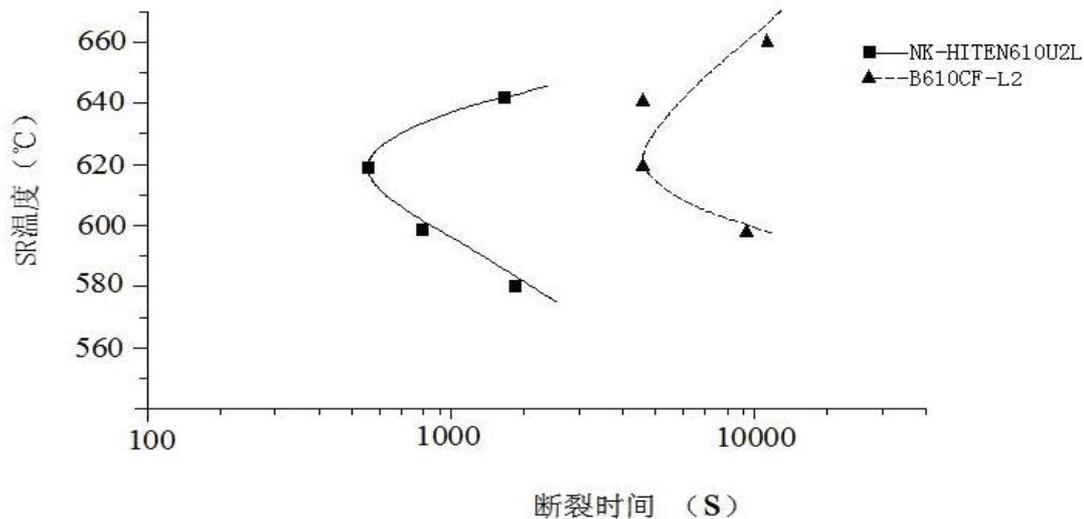


插销再热裂纹试验时的加载初应力 σ_0

SR温度 (°C)		580	600	620	640	660
E_H/E_R		0.6191	0.5727	0.5327	0.4881	0.4405
σ_0 (MPa)	B610CF-L2	-	424	395	362	326
	JFE-HITEN610U2L	443	410	383	349	-

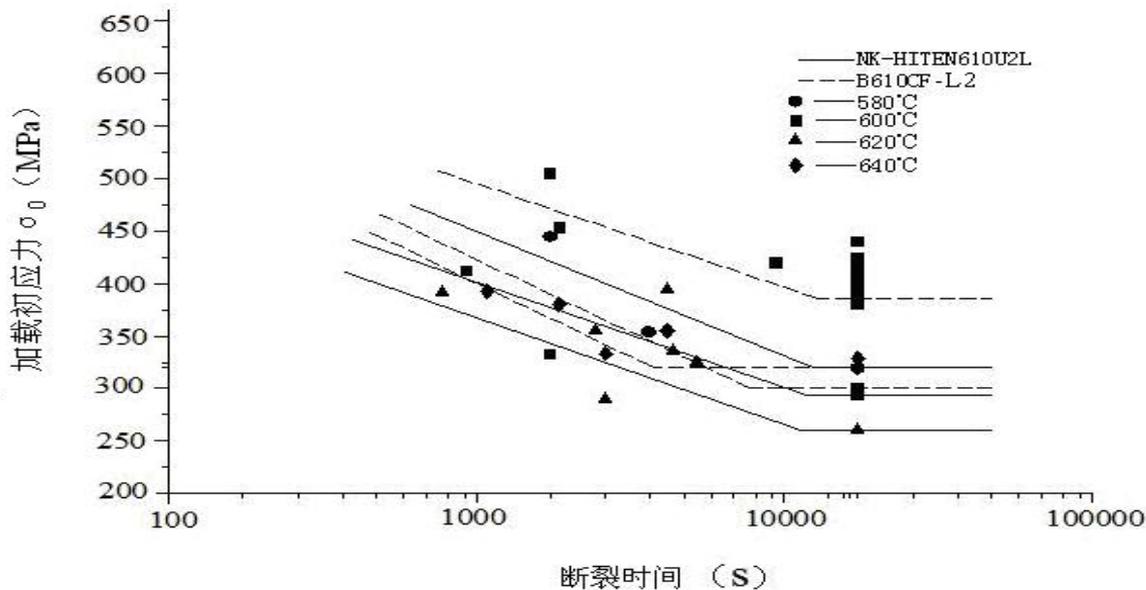


根据不同SR温度下的加载初应力，进行不同SR温度下应力松弛试验，测得再热裂纹“C”形曲线。





利用插销应力松弛试验测定出不同焊后SR处理温度下焊接热影响区粗晶区的加载初应力与断裂时间，得出的各试验温度下的临界断裂初应力值。



再热裂纹应力松弛曲线

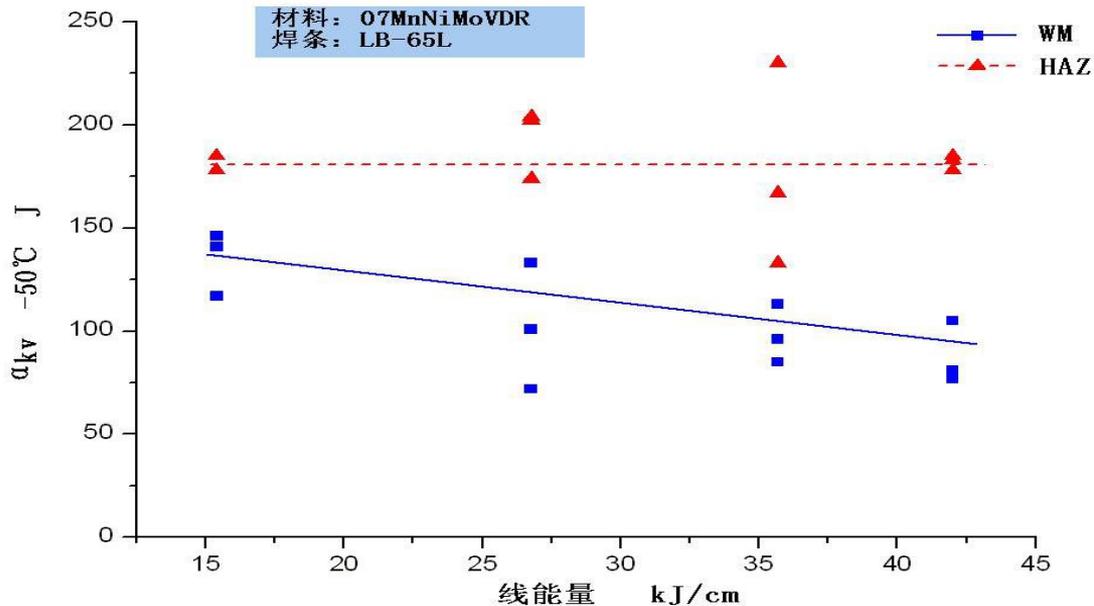


各试验温度下的临界断裂初应力

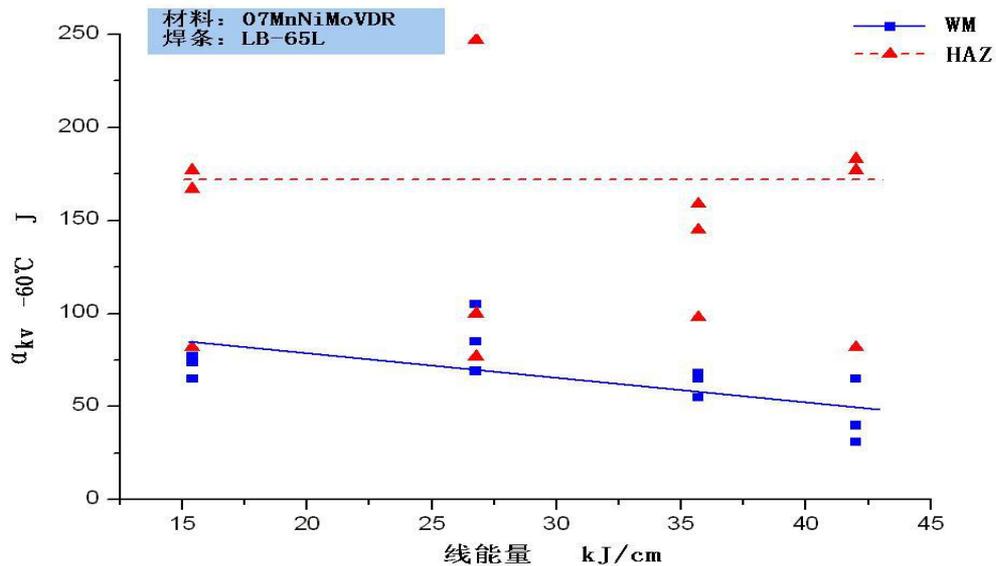
SR温度 (°C)		580	600	620	640
临界断裂初应力 (MPa)	B610CF-L2	—	438	307	324
	JFE-HITEN610U2L	318	294	260	—

根据再热裂纹应力松弛曲线保持载荷120min以上而不发生断裂者就认为该钢种在该温度下不会产生再热裂纹，这两种钢在600°C以下进行热处理，只要措施得当，产生再热裂纹的可能性较小。

焊接接头力学性能试验

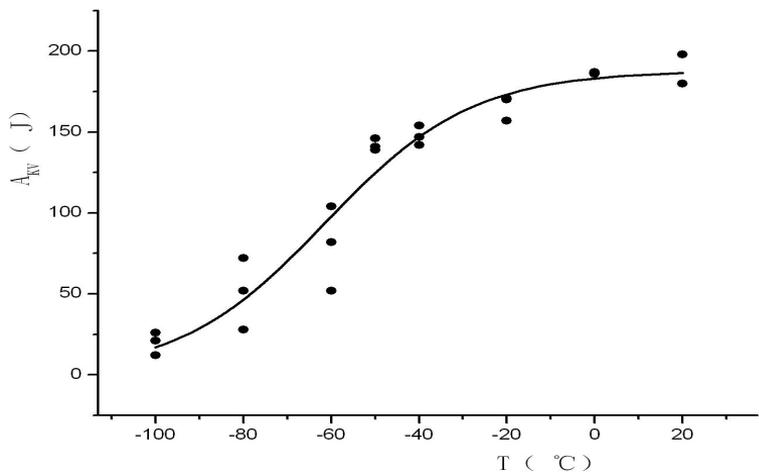


焊接线能量对焊缝和HAZ-50°C冲击性能的影响

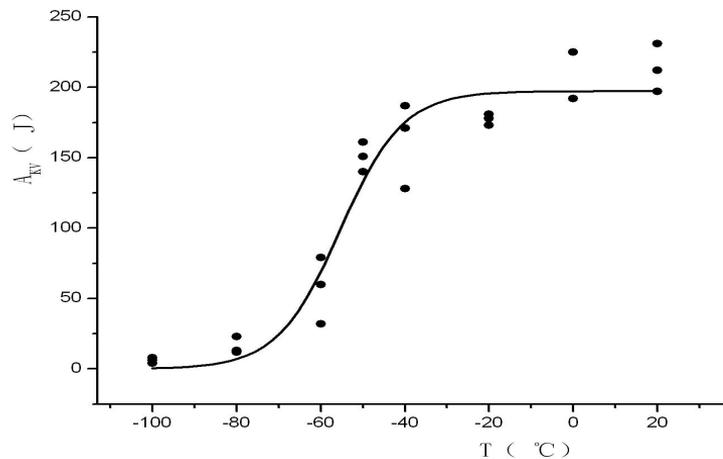


焊接线能量对焊缝和HAZ-60°C冲击性能的影响

焊接接头系列冲击试验



焊缝热处理态 A_{KV} — T 曲线



热影响区热处理态 A_{KV} — T 曲线



不同判据确定的焊接接头的韧脆性转变温度

板厚 mm	取 样 部 位	热处理 状态	vT_E °C	vT_S °C
46	热影响区	热处理态	-71	-77
	焊缝		-55	-55

注： vT_E 为50%KV2上平台能所对应的温度； vT_S 为50%剪切断面率所对应的温度。



焊接接头无塑性转变温度NDTT

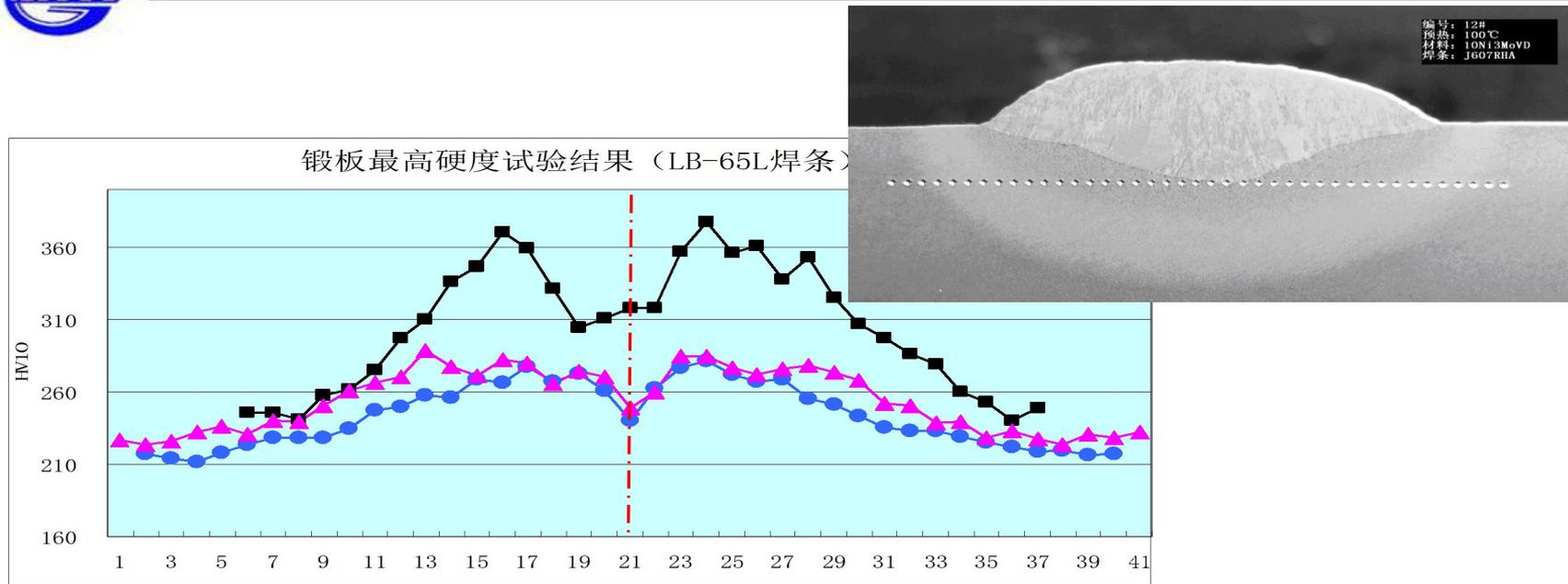
落锤试验按照GB/T6803-86《铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法》进行。B610CF-L2焊接接头具有较低的无塑性转变温度，且焊接接头延性止裂能力较佳。

B610CF-L2焊接接头落锤试验结果

板厚 mm	试验温度 °C						NDTT °C
	-55	-60	-65	-70	-75	-80	
46	O	O	O, O	O, O	×	×	-75



10Ni3MoVD锻件的焊接性

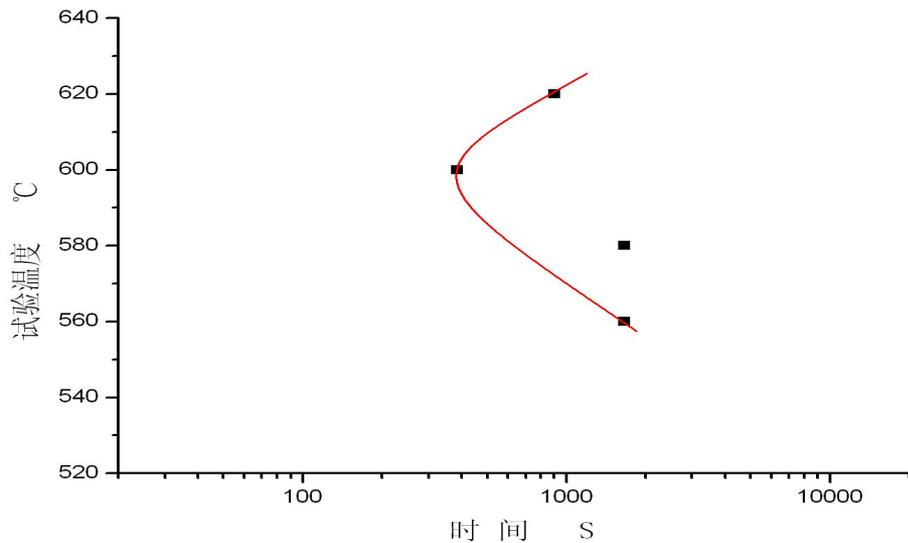


10Ni3MoVD锻板最高硬度法试验硬度分布图

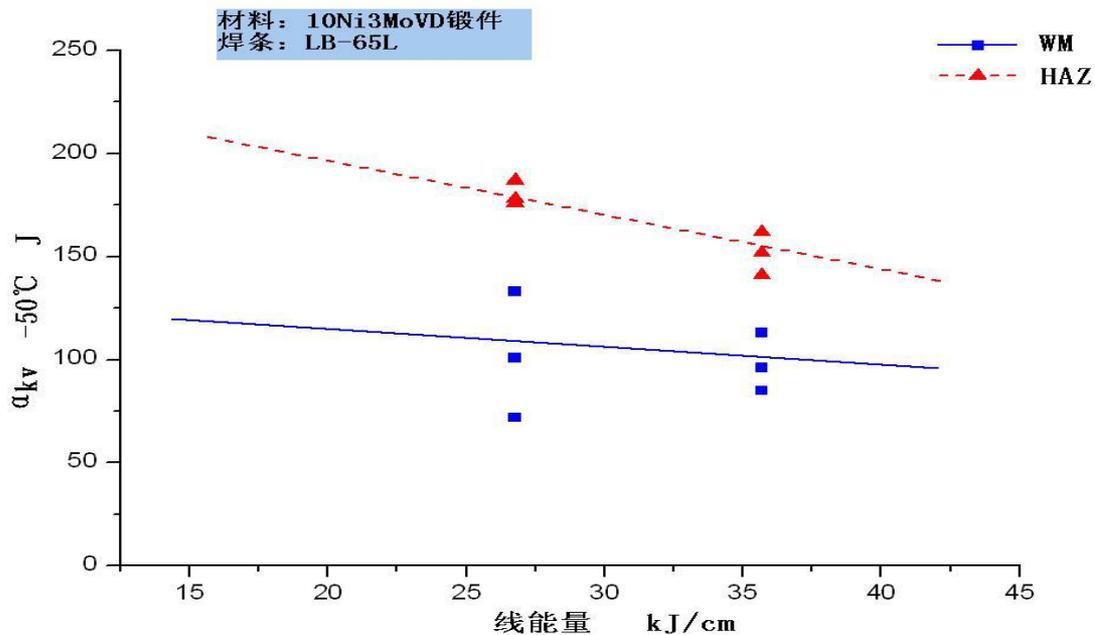


10Ni3MoVD锻板斜Y坡口焊接裂纹试验结果

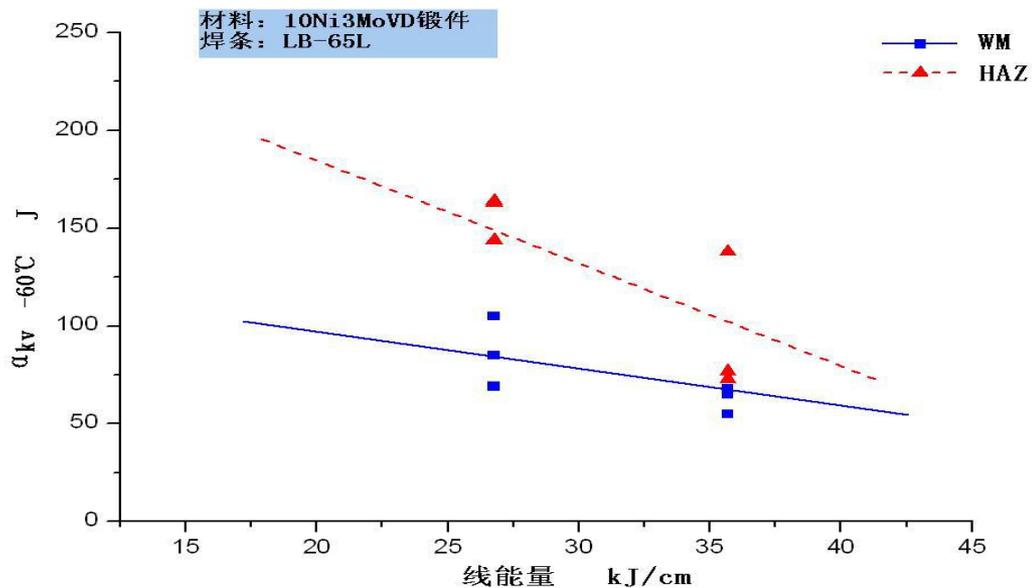
焊条	预热温度 (°C)	表面裂纹率 (%)	断面裂纹率 (%)	根部裂纹率 (%)
LB-65L	室温	0	100	100.00
LB-65L	室温	0	100	100.00
LB-65L	75	0	0	0
LB-65L	75	0	0	0
LB-65L	100	0	0	0
LB-65L	100	0	0	0



10Ni3MoVD锻板插销再热裂纹试验结果



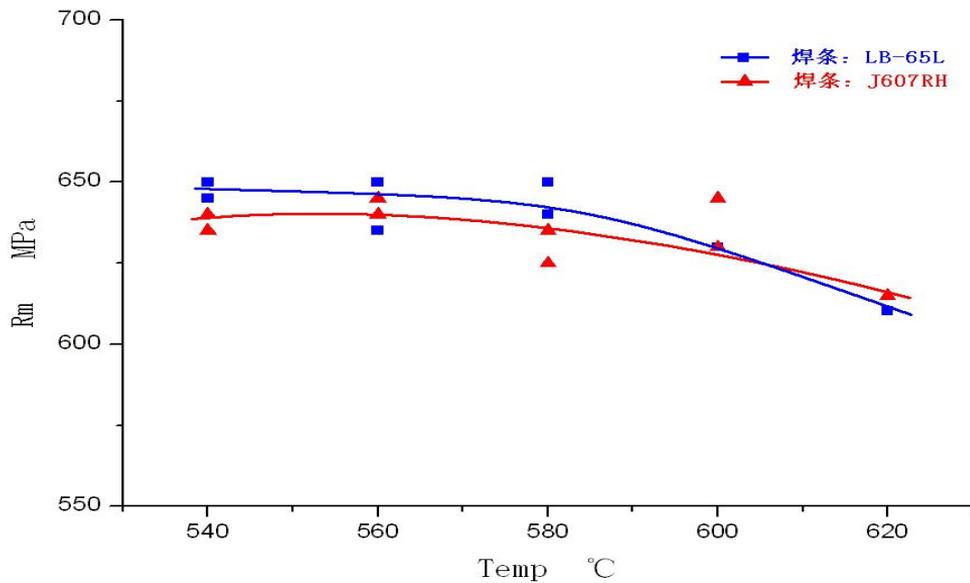
焊接线能量对锻板焊缝和HAZ-50°C冲击性能的影响



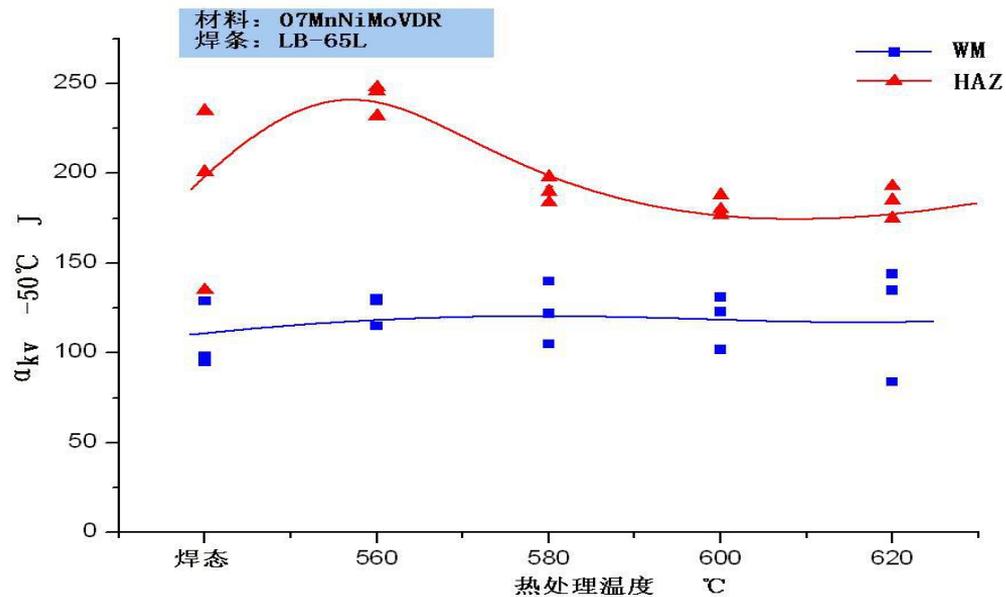
焊接线能量对锻板焊缝和HAZ-60°C冲击性能的影响



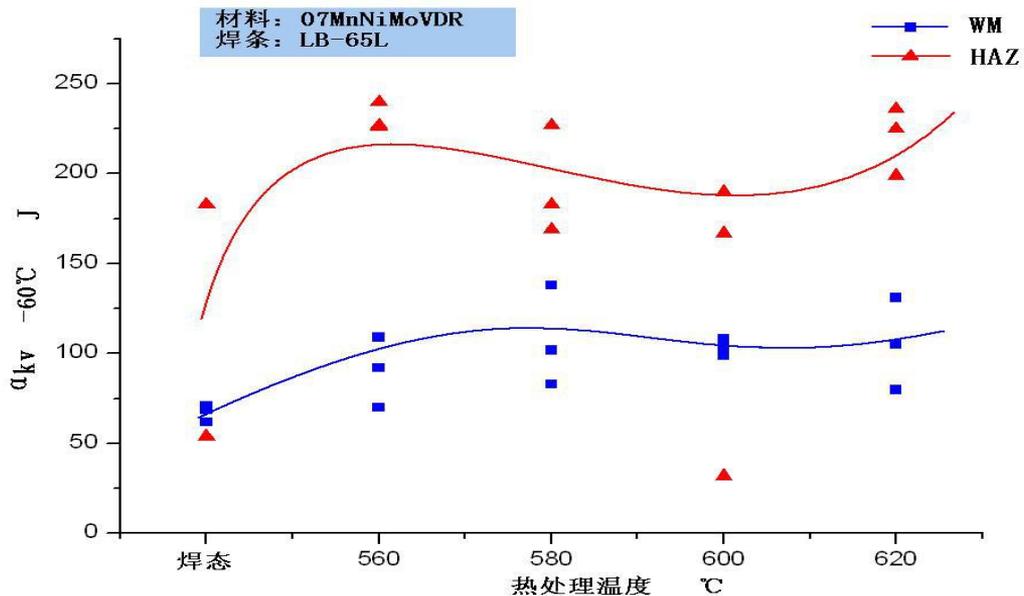
焊后热处理试验



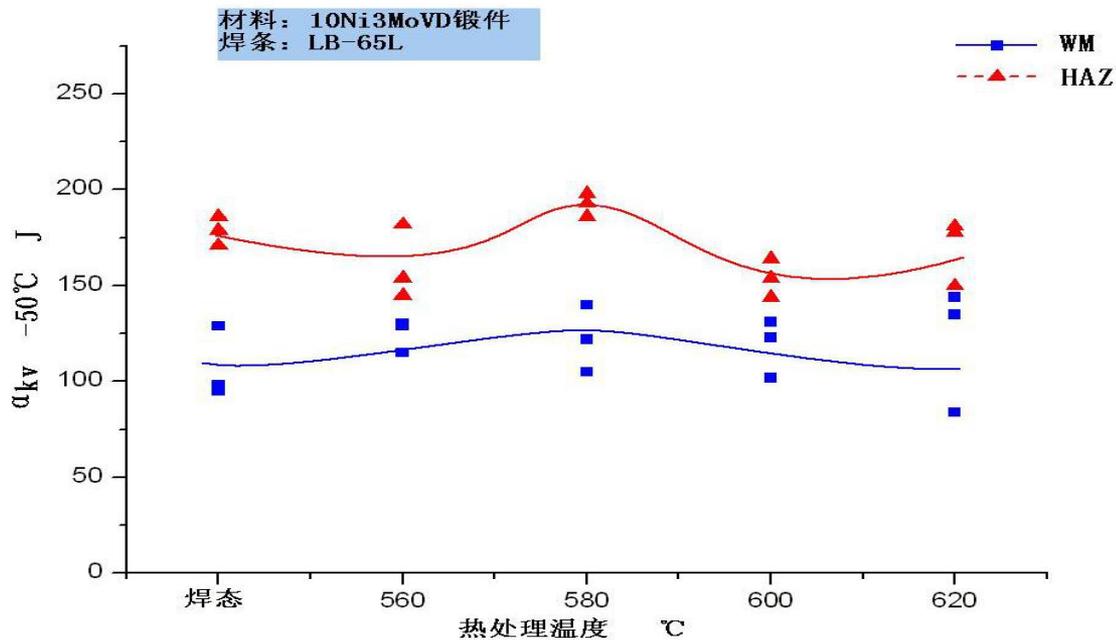
热处理参数对07MnNiMoDR焊接接头拉伸性能的影响



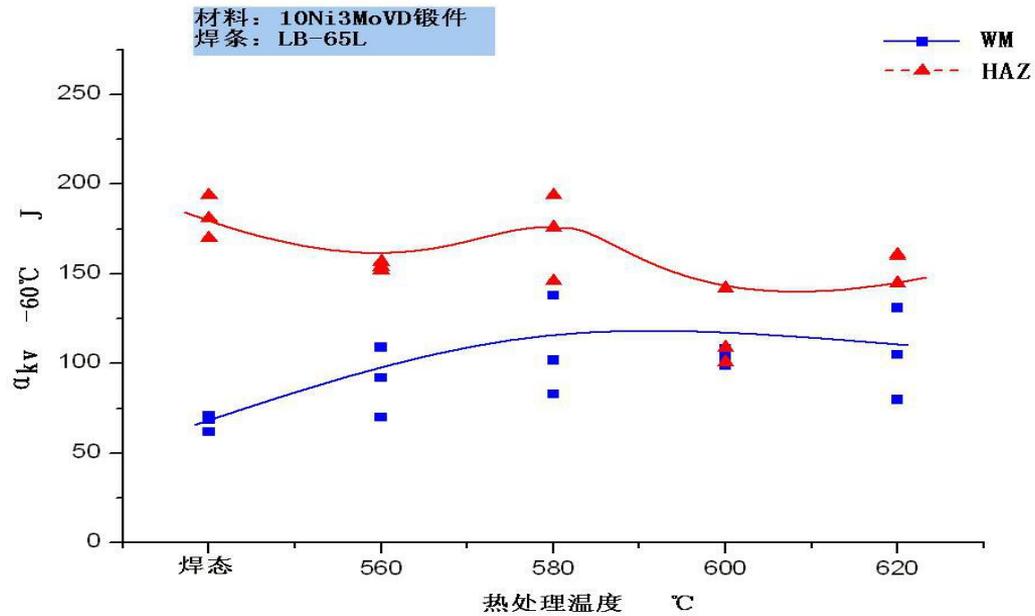
热处理参数对07MnNiMoVDR焊接接头-50°C冲击韧性的影响



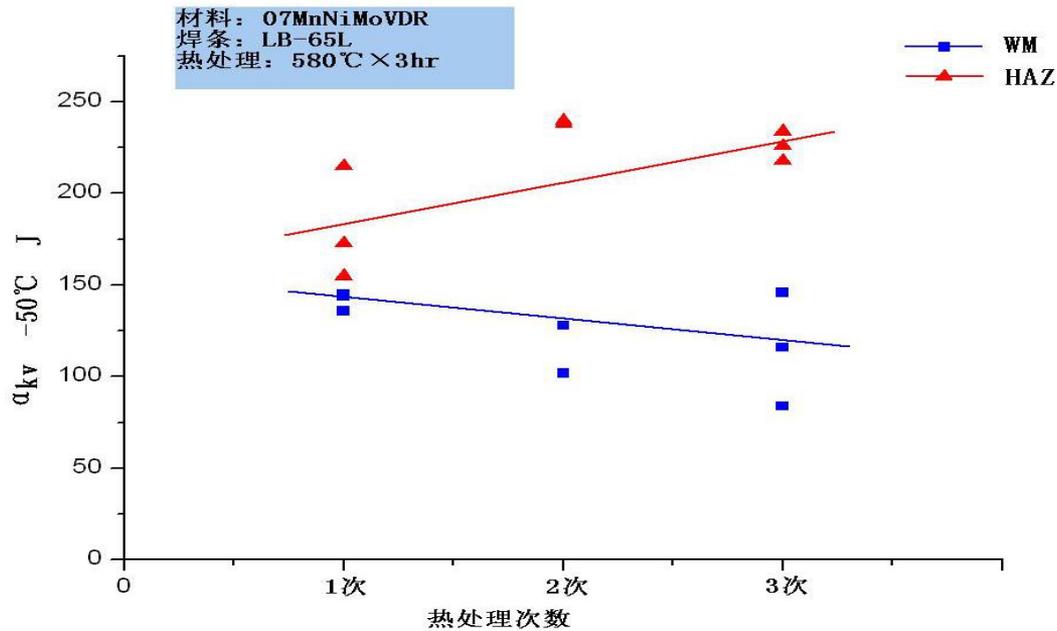
热处理参数对07MnNiMoVDR焊接接头-60°C冲击韧性的影响



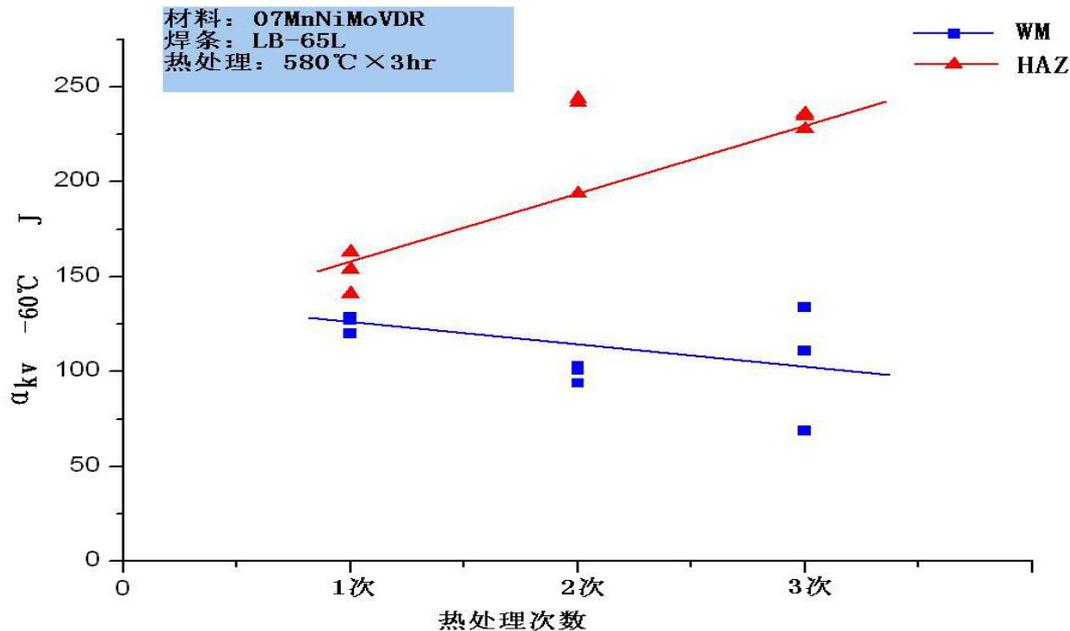
热处理参数对10Ni3MoVD锻板焊接接头-50°C冲击韧性的影响



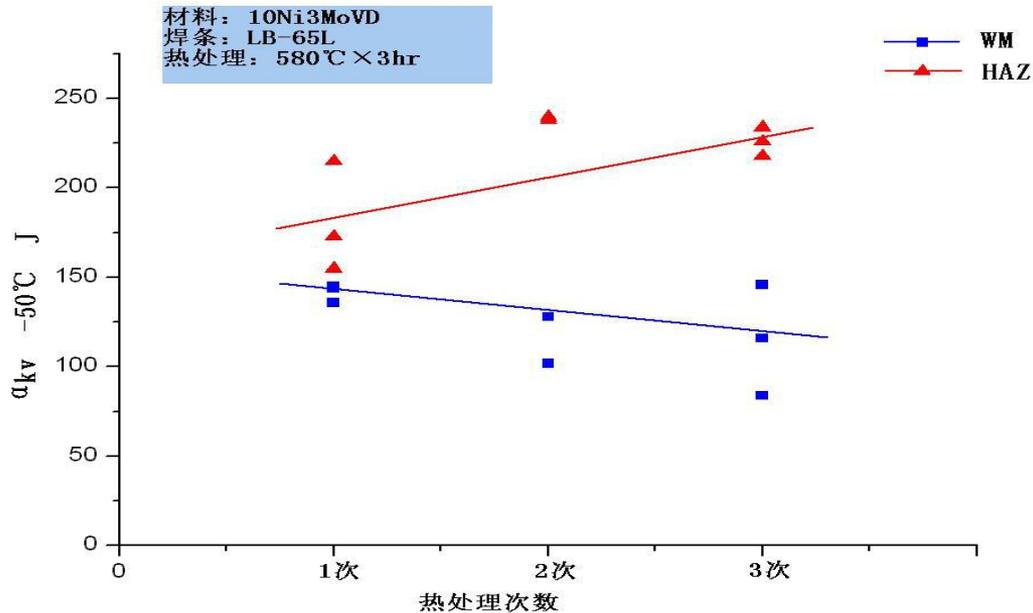
热处理参数对10Ni3MoVD锻板焊接接头-60°C冲击韧性的影响



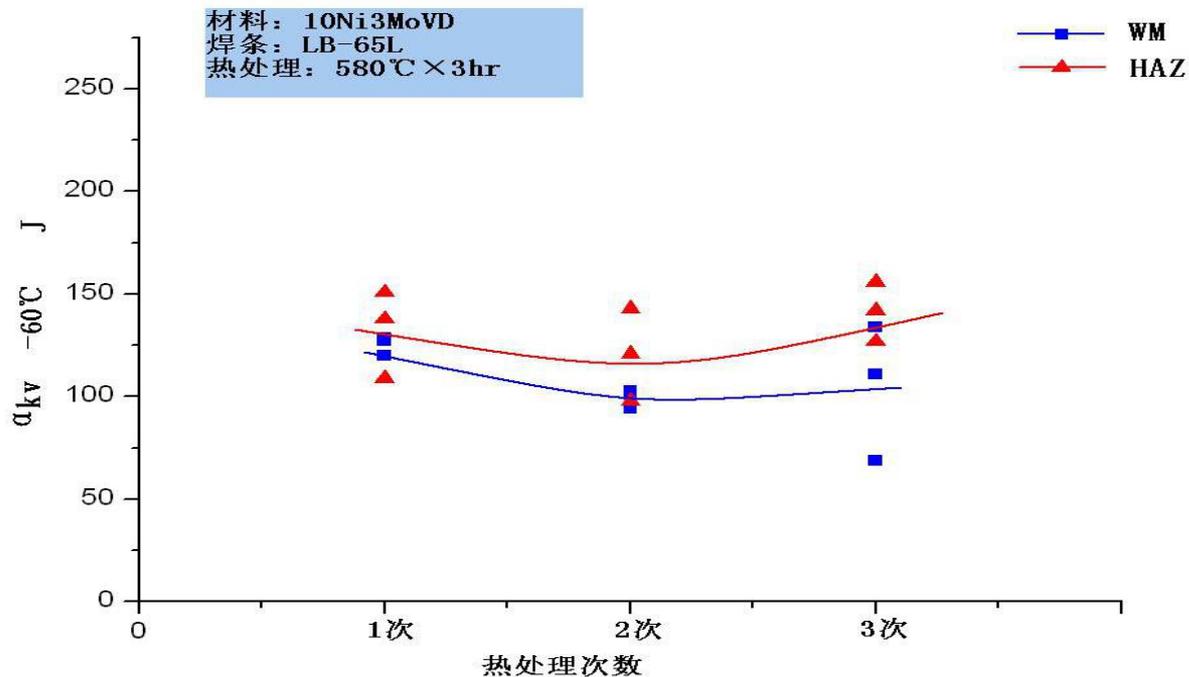
多次热处理对07MnNiMoVDR焊接接头-50°C冲击韧性的影响



多次热处理对07MnNiMoVDR焊接接头-60℃冲击韧性的影响



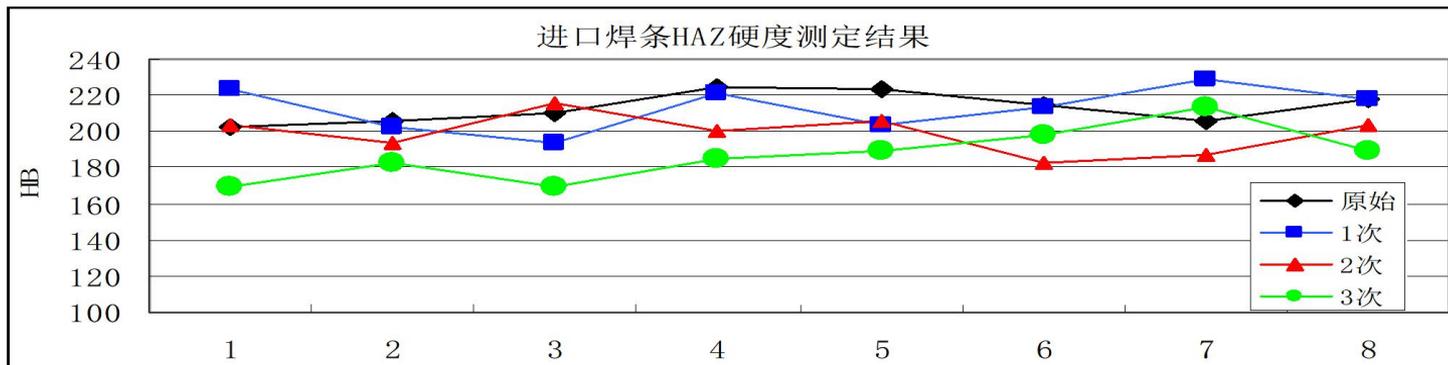
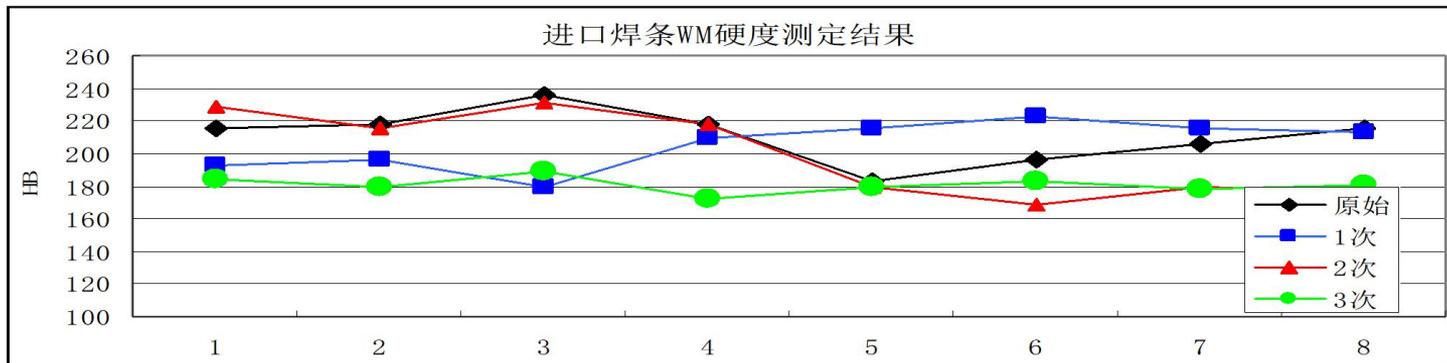
多次热处理对10Ni3MoVD锻板焊接接头-50°C冲击韧性的影响



多次热处理对10Ni3MoVD锻板焊接接头-60℃冲击韧性的影响



多次返修试验





07MnNiMoVDR钢板3次返修试板力学性能试验结果

焊条 牌号	焊缝冲击功 J						HAZ冲击功 J					
	-50°C			-60°C			-50°C			-60°C		
LB-65L	84	131	108	120	139	88	240	232	230	236	230	239

经过3次返修后，07MnNiMoVDR钢焊缝及焊接热影响区的硬度变化不大，且有所下降，焊缝和HAZ的冲击韧性变化不大。



10Ni3MoVD锻板3次返修试板力学性能试验结果

焊条 牌号	焊缝冲击功 J						HAZ冲击功 J					
	-50°C			-60°C			-50°C			-60°C		
LB-65L	84	131	108	120	139	88	172	148	149	172	140	148



07MnNiMoDR钢制-50℃低温球罐用 GER-N27M焊条



-50℃低温球罐用调质高强钢板由于我国在2007年~2008年受日本的制裁，宝钢抓住天赐良机，首次实现了国产化，但焊条一直依赖日本神钢。2012年昆山京群公司与我院经过3年的艰苦努力，开发成功了07MnNiMoDR钢制-50℃低温球罐用GER-N27M焊条，打破了神钢长期的垄断地位，目前已应用了200多台低温球罐，应用的**首台球罐开罐检查后，安全状况等级定为一級**，该焊条于去年取得了俄罗斯的HAKC认证，成功应用于意大利某公司总承包的俄罗斯3000m³低温球罐。但受到国内顽固习惯势力的影响，该焊条只占市场份额的一半。



Center for Certification of Welding Consumables ACSM-3
OOO NPP SKUNTC
23H-1, Narodnogo Opolcheniya 213
Rostov-on-Don, 344018 Russia
Telephone: +7 (863) 333-01-23
Website: www.svarka-ug.ru



August 30, 2018
No 005-3008H
To Kunshan Gintune Welding Co., LTD

LETTER

This letter is to inform that OOO NPP SKUNTC, as a member of the Self-regulatory organization Non-commercial partnership "National Agency of Welding Control" (SRO NP NAKS) of Russia, received applications from Kunshan Gintune Welding Co., LTD (Kunshan City, Jiangsu, China) for certification of the following welding consumables:

Product name	Diameter, mm	Classification
GER-N27M	3.2, 4.0, 5.0	ISO 18275-A: E 55 6 Z B 3 2 H5
GTR-W55Ni2	2.4	ISO 636-A: W 46 6 2Ni2
GWR-WEF1	3.2, 4.0	ISO 26304-A: (S3Ni1Mo)
GXL-121T	--	ISO 14174: S A FB 1

Center for Certification of Welding Consumables ACSM-3 of OOO NPP SKUNTS performed relevant evaluations (technical delivery conditions) and tests (chemical composition, mechanical properties) on the above mentioned consumables. It was concluded that the consumables satisfy requirements of NAKS RD 03-613-03 as well as requirements of the respective ISO standards.

Currently tests results and supplied documents undergo final verification in Department for Science and Methodology of NAKS in Moscow. It is expected that Certificates of Welding Consumables Attestation will be issued in the middle of September.

Should there be any need for further information, please contact OOO NPP SKUNTC.

With best regards,

Anton Lukyanov
Director, OOO NPP SKUNTS





GER-N27M焊条的特点

- 1、GER-N27M焊条采用 $\text{CaO-TiO}_2\text{-CaF}_2$ 高碱度渣系，熔敷金属扩散氢含量实测值通常低于 $2.5\text{mL}/100\text{g}$ ；
- 2、以Mn-Ni-Mo为合金体系。Ni含量在 $2.00\%\sim 2.75\%$ 之间，熔敷金属随Ni量增加先共析铁素体减少，针状铁素体增多，并使针状铁素体的长宽比发生改变，使板条变得更加多角化，有利于提高低温韧性。
- 3、在锰含量较高的焊缝金属中，高Ni助长M-A形成，必须采用微合金化技术。但如加入量过多，易形成夹杂物，形成上贝氏体组织，反而降低韧性；微合金元素形成的氧化物夹杂可加速针状铁素体形核，细化晶粒，且可钉扎在晶界上，防止了晶粒长大，降低了焊缝金属对焊接线能量敏感性，这对球罐现场立焊至关重要。



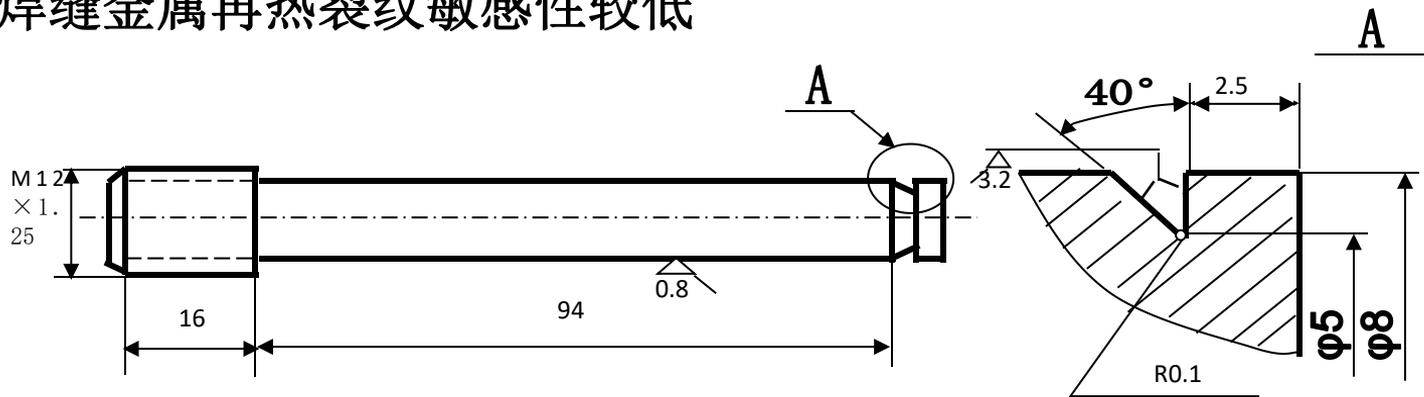
4、焊缝金属在全位置下脱渣性等工艺性能良好

焊缝金属脱渣率

直径(mm)	电流/电压 (A/V)	焊道总长 (mm)	未脱渣总长 (mm)	脱渣率 (%)
4.0	160/25	210	37	82.3



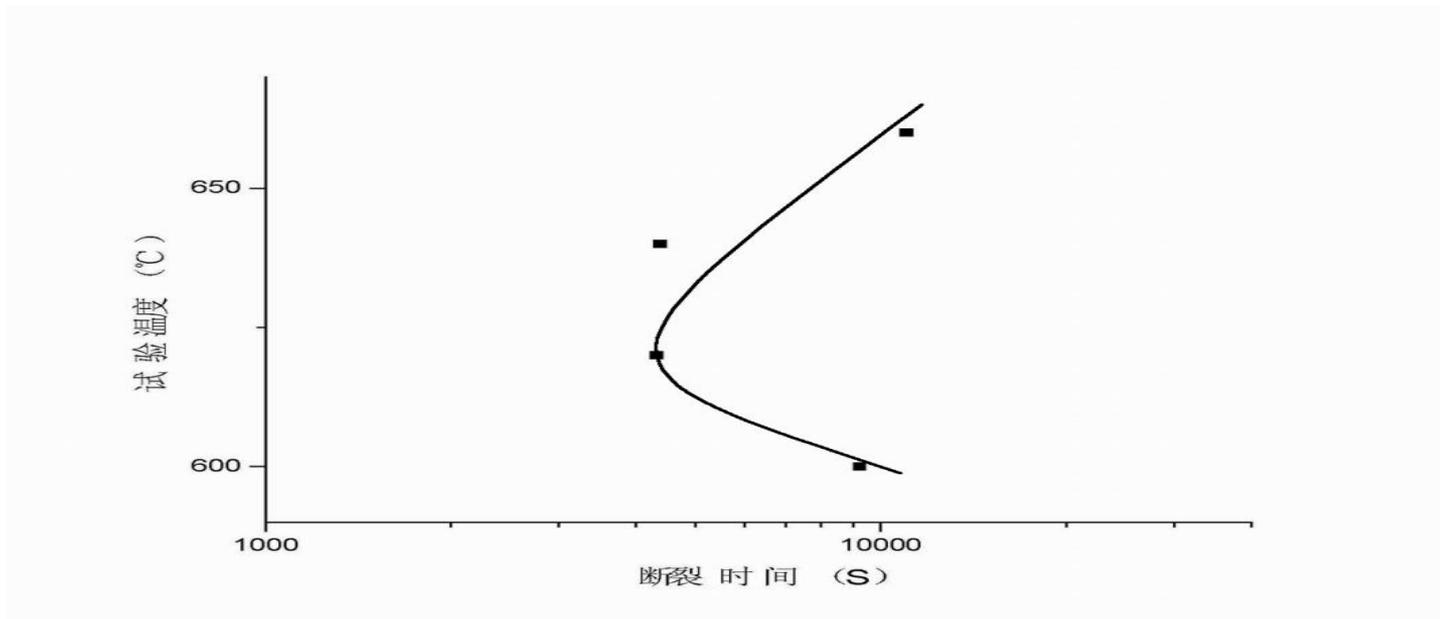
5、焊缝金属再热裂纹敏感性较低



试验采用“断裂”准则，即试样经一定时间不断裂所承受的最大应力为焊缝金属抗裂能力。

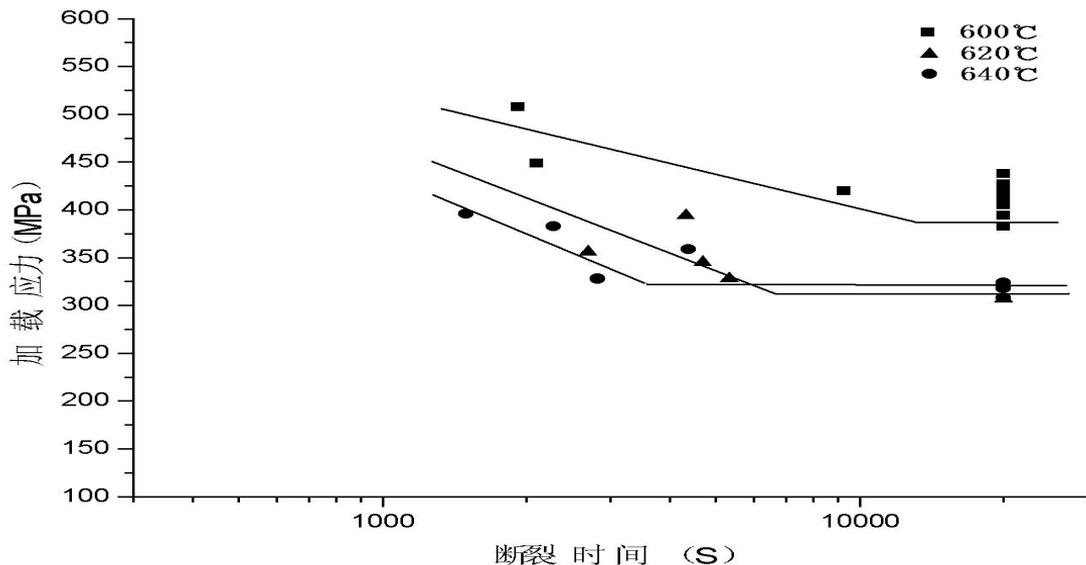
$$\text{初应力值 } \sigma_0 = 1.256 R_{eL} E_H / E_R$$

（ E_H —钢材在高温下的弹性模数， E_R —钢材在室温下的弹性模数）。



焊缝金属插销再热裂纹试验结果

焊缝金属再热裂纹敏感温度约为**625°C**左右。



焊缝金属再热裂纹应力松弛曲线

焊缝金属在敏感温度下的临界断裂初应力较高。表明该焊缝金属再热裂纹敏感性较低。



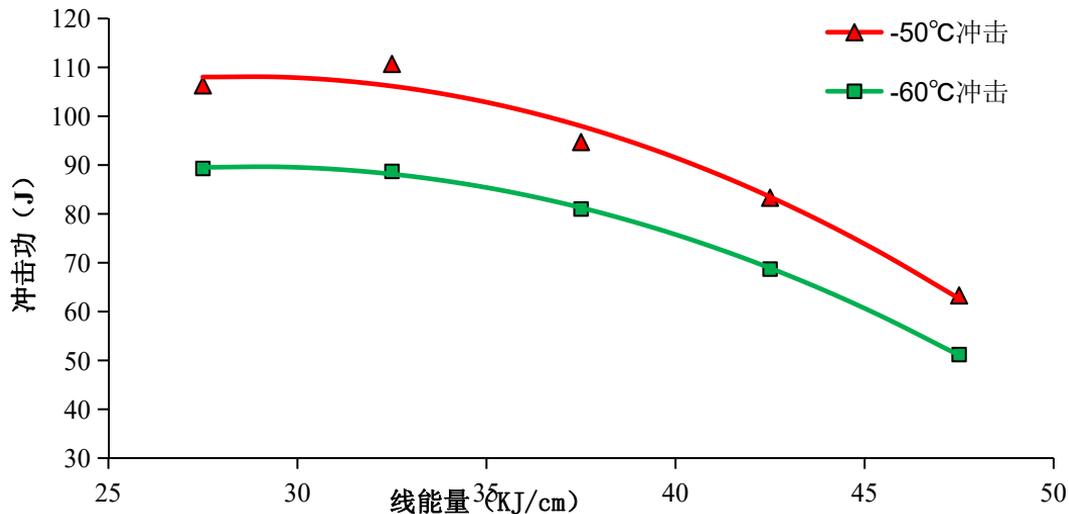
6、焊后热处理规范范围较宽

热处理规范对立焊位置焊接接头性能影响

热处理规范	Rm		-50℃	KV ₂	/J
580℃×4h	610~730		≥54（平均值）		
580℃×4h	640	628	焊缝 金属	110/93/101	101
580℃×8h	619	628		80/63/64	69
580℃×12h	639	620		104/98/96	99
580℃×16h	611	618		76/83/80	80

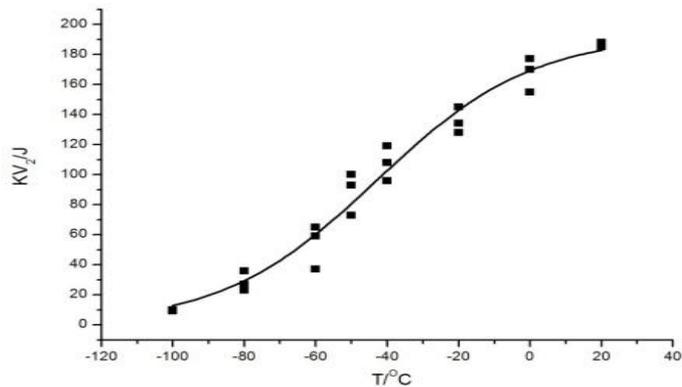


7、对焊接线能量敏感程度较低

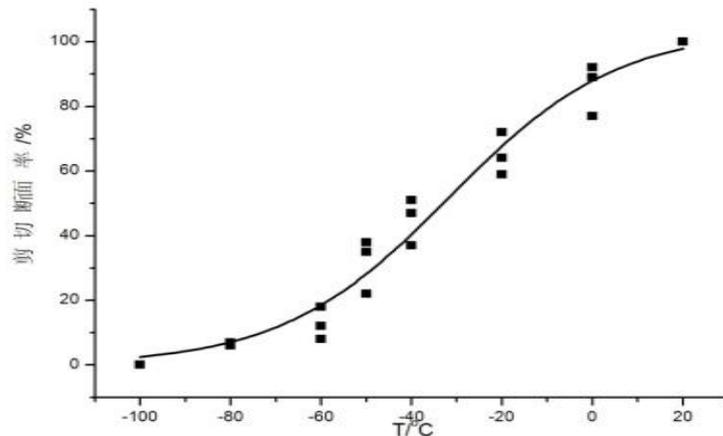


该焊条有较宽的工艺规范范围，完全适应球罐全位置焊接，只要焊接线能量控制在40KJ/cm以下，焊缝金属韧性可满足技术条件要求

8、立焊位置焊缝金属韧脆性转变温度较低



焊缝金属KV₂与温度的关系



焊缝金属剪切断面率与温度的关系

立焊位置焊缝金属的韧脆性转变温度 $\sqrt{V}T_E$ 、 $\sqrt{V}T_S$ 分别为 -53.2°C 、 -51.7°C ，表明低温韧性优良。



9、焊缝金属无塑性转变温度较低，止裂能力较强

焊缝金属落锤试验结果

缺口位置	取样部位	试验温度 / °C			NDTT / °C
		-50	-55	-60	
焊缝中心	表层	0, 0	0, 0	0, ×	-60

立焊位置试板经 $580 \pm 15^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$ 焊后热处理，制取落锤P2试样。试验结果见表，表明该焊缝金属止裂能力较强。

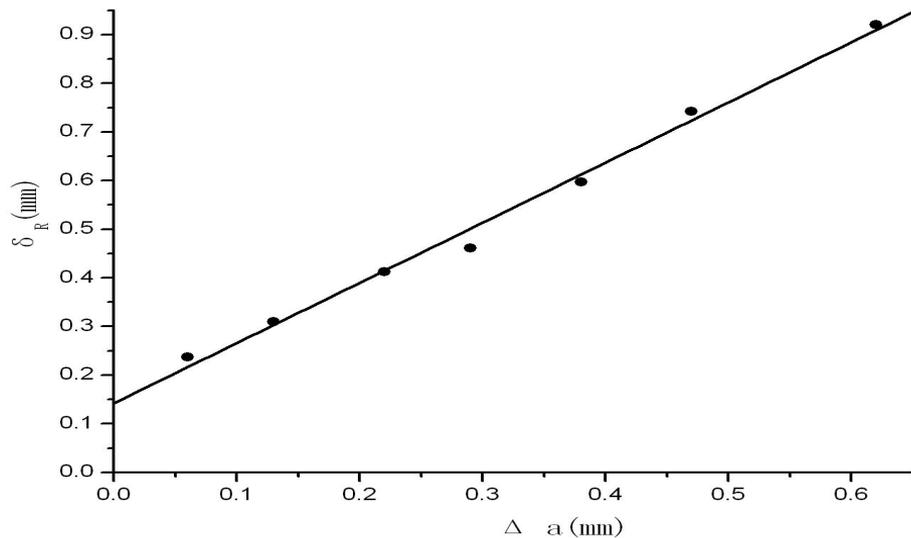


10、焊缝金属-50°C低温断裂韧性（CTOD特征值）较佳

焊缝金属-50°C的CTOD特征值及其阻力曲线方程

$\delta_{0.05}$ (mm)	$\delta_{0.2}$ (mm)	$\delta_R-\Delta a$ 阻力曲线方程	回归相关 系数 (R)
0.22	0.38	$\delta_R=1.237(0.115+\Delta a)$	0.996

-50°C试验温度下该焊缝金属CTOD特征值较佳，试样均未脆性断裂。



焊缝中心SR态 (-50°C) CTOD曲线

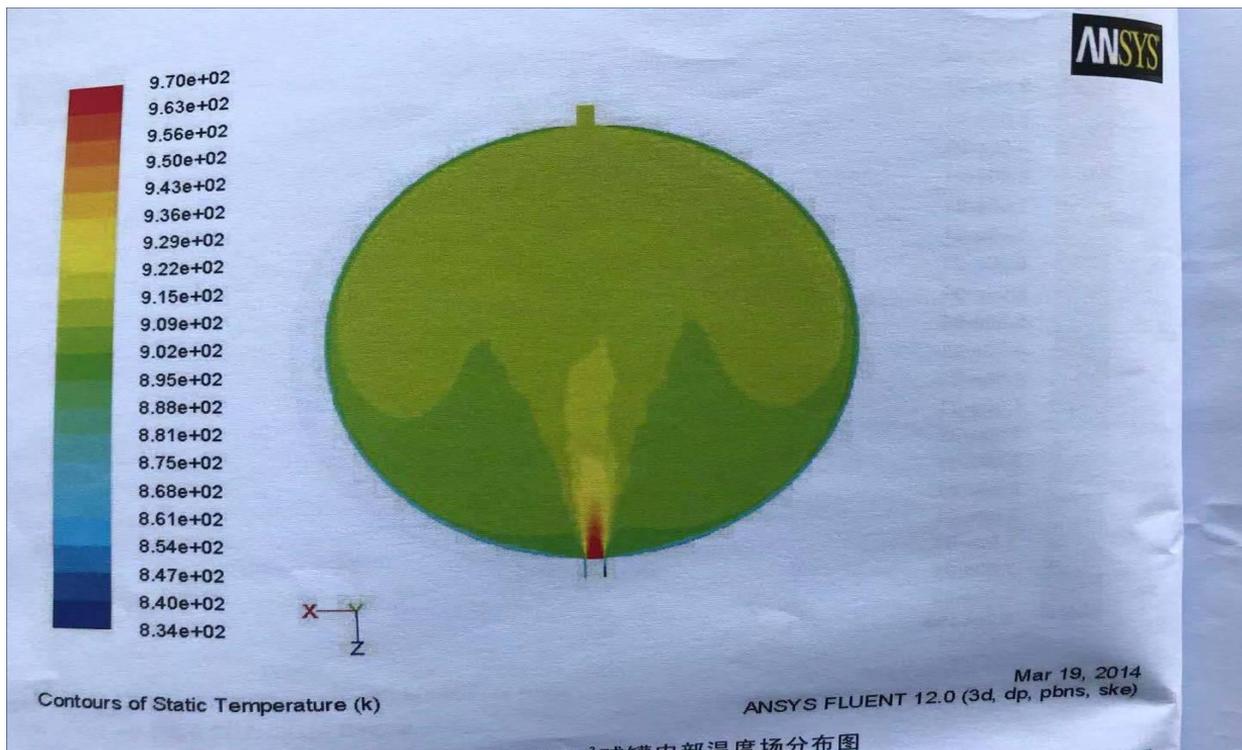


07MnNiMoDR球罐的焊接



球罐现场焊接重点

- 1、球罐容积较大，壁厚较厚。
- 2、球罐采用07MnNiMoDR钢板，对焊接线能量较敏感，要求采用多道多层、小焊接线能量焊接，尤其立焊位置焊接线能量不易控制，尽可能利用后续焊道对前焊道进行回火，进一步细化晶粒，提高焊缝的韧性；横焊时线能量不可过小，因该钢有淬硬倾向。
- 3、球罐的焊接工艺评定和产品焊接试件的低温冲击韧性比标准规定作了大幅度的提高，因此对焊接过程中的焊接工艺参数必须进行严格控制，焊接线能量不得超过焊接工艺评定中的焊接线能量最大值与《技术条件》要求不大于35KJ/cm中的较严者；焊评时热处理时间按上极控制，还需要考虑球罐开罐检查，焊接返修后的焊后热处理时间。



球罐整体热处理温度场分布



某球罐焊后热处理保温时间

测温点在 (600±25) °C范围内的 时间	4小时11分	4小时1分	3小时41分	3小时21分	3小时1分
测温点数	1	5	21	38	22
	2小时51分	2小时31分	2小时40分	2小时10分	2小时
	5	12	14	5	1



- 4、球罐焊后几何尺寸控制较严，因此在焊接过程中要密切关注焊缝的变形程度，采取适当措施，以防焊后几何尺寸不满足《技术条件》要求；
- 5、焊缝无损检测次数和比例比标准作了大幅度提高，焊接过程中焊工要高度重视焊道/层间的焊渣的清理、打磨以及运条的方法，努力提高焊接一次合格率，减少不必要的焊接返修；
- 6、球罐容积较大，热处理温度误差仅为 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ，因此对热处理保温层材料及厚度、设备及工艺水平等要求更严。



焊工资格认定

- 1) 焊工合格证必须在有效期内，所施焊的钢种、焊接方法、焊接位置需满足该球罐施焊的需要；
- 2) 按业主规定的焊工考试办法，对所有施焊焊工进行焊工考试，由业主根据考试结果核发焊工上岗证



焊条复验

规格 $\phi 3.2\text{mm}$ 、 $\phi 4.0\text{mm}$ ，按批复验熔敷金属化学成分、力学性能和扩散氢[H],满足技术条件要求



焊接工艺评定及焊接工艺规程审查

审查焊接工艺评定报告：立焊、横焊、平焊+仰焊三种位置分别评定，其钢材类别、焊条型号、焊接工艺参数、焊后热处理规范等重要因素和补加因素须符合NB/T47014的规定，尤其是焊接接头的冲击韧性指标须符合技术条件要求。

审查焊接工艺规程：焊条型号及牌号、预热温度、层间温度、消氢处理、焊后热处理规范及焊接工艺参数、焊接操作等须符合NB/T47015及技术条件规定。



定位块组焊、定位焊

定位块与球壳板组焊应符合技术条件及施工组织设计要求。

定位焊应焊在初焊层背面（小坡口侧），长度、厚度、间距符合GB12337、技术条件及施工组织设计要求；



焊工布置及焊接顺序

焊工布置应均匀，并同步焊接；先纵后环，先外后内。



焊条烘干与发放

- 1、焊条使用前应经 $350\sim 400^{\circ}\text{C}\times 1\sim 2\text{hr}$ 烘干，然后置于 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 恒温箱内，随用随取。焊工应使用焊条保温筒，保温筒内的焊条须在4小时内用完，否则应重新烘干，但烘干次数不宜超过两次，超过两次的焊条不得用于球壳板及受压元件的焊接。
- 2、焊条的烘干发放回收制度严格记录控制。



施焊环境

施焊环境出现下列任一情况且无有效防护措施时，禁止施焊：

- 雨天和雪天；
- 手工焊时风速超过8m/s；
- 环境湿度在80%以上；
- 环境温度在0°C以下。



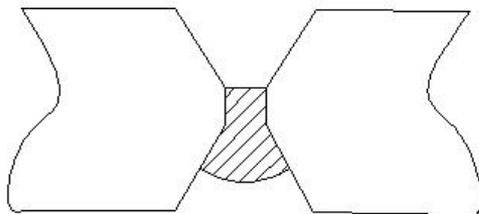
预热、后热及层间温度

- 1、预热温度不低于 100°C ，预热宽度应为焊缝中心两侧各取3倍板厚，且不少于 170mm ；预热温度的测量按GB/T 18591的规定进行，预热温度应距坡口边缘不超过 50mm 的距离处对称测量，每条焊缝测点不少于三对；
- 2、层间温度应不低于焊前预热温度，最高不超过 180°C ；
- 3、焊缝焊后应立即进行后热消氢处理，后热规范为 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ 保温1小时；其加热范围、温度测量等应与预热相同。

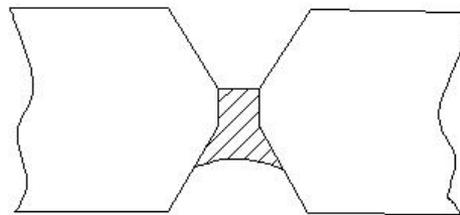


球罐焊接

应清除坡口表面和两侧至少50mm范围内的铁锈、水分、油污和灰尘。施焊时，尽量避免在非焊接处起弧以免造成电弧擦伤而产生微裂纹，对不慎造成弧疤或弧坑，均进行了打磨消除，所有打磨处经测厚均须满足有关规范要求，并经表面检测合格。焊接时采用短弧操作，在坡口内焊接时，一定要避免焊道中间的突起、两边凹陷的形状。



焊缝不合适成形



焊缝合适成形



焊道始端采用后退起弧法，即每根焊条焊接时在始焊点前10mm处引弧，然后迅速拉回到始焊点处进行焊接，收弧时采用划圈法将弧坑填满，下一根焊条尽快引弧，尽可能减少间隔时间，以防焊缝冷却而产生焊接缺陷，各层之间的接头错开50mm以上，防止每层起、收弧点小的焊接缺陷的累积而在该截面形成超标缺陷，每一层焊完后，焊渣均清除干净。

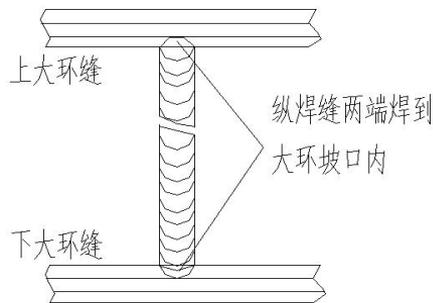


纵缝的立焊

Φ4.0焊条上爬波焊时控制在180A以下，中间位置焊接电流控制在170A以下，仰脸爬坡时焊接电流可控制160A以下。为了使焊缝金属与两侧母材更好地熔合，可适当摆动焊接，采用月牙形运条方法，要注重层间打磨，焊缝金属宽度超过时分道焊接，每层焊缝金属厚度控制在4mm以下，盖面时防止产生咬边，焊接电流可比填充时相应小10A左右，两侧停留的时间也要相应地缩短。



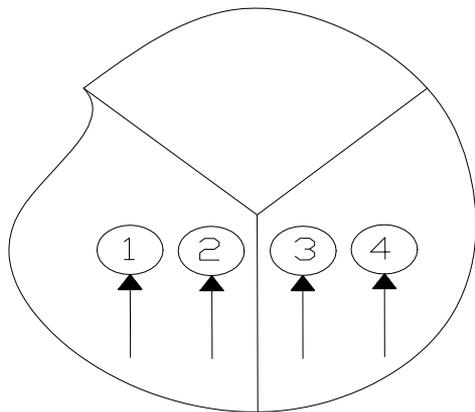
月牙形运条法



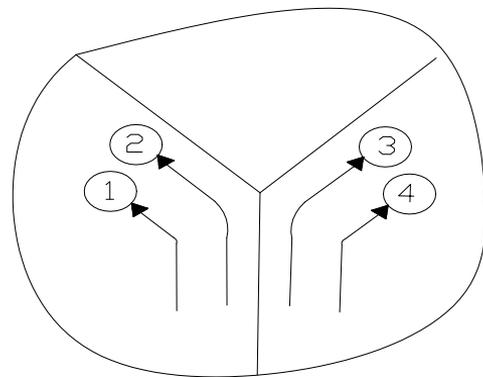
立焊两端起弧收弧

上、下极板的各4个Y形交叉口焊缝

在球罐残余应力测试时显示该处残余应力水平最高，是球罐最薄弱的部位



不正确



正确



极板的平焊

球罐上平焊以直线运条为主，可适当摆动，以往返运条法为宜，有利于控制焊缝成型， $\Phi 4.0$ 焊条焊接电流宜控制在200A以下，否则焊接电流过大，熔池搅动过大，易产生气孔。



直线往返形运条法

极板的仰焊

仰焊位置的焊接电流控制在150A以下为宜，因铁水较黏，熔池不易摊开，铁水易下坠。仰焊采用爬坡焊，使铁水一直在运条的后方，焊工能随时观察到熔池，以锯齿状运条较好。



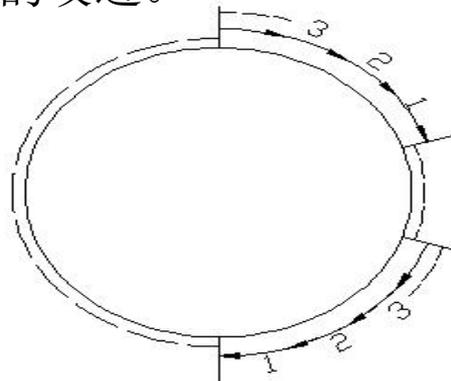
锯齿状运条

环缝的横焊

横焊时 $\Phi 4.0$ 焊条焊接电流可控制在190A以下，以斜圆圈法运条较好，这样在施焊过程斜圆圈下部的铁水先凝固，而托住斜圆圈上部铁水不下淌，焊缝成型更加美观，道与道之间的搭接较平整，也不会产生过深的咬边。



反向斜圆圈法运条



环缝分段追尾焊示意图



焊接线能量控制

- 1、应严格控制焊接线能量不超过35KJ/cm，施焊时，应采用窄焊道、薄层多层焊，每一焊道宽度不大于焊芯直径的4倍；
- 2、不同位置下线能量见下表
- 3、应将焊接线能量换算成每根焊条焊接的最小焊道长度。

焊接位置	平焊	立焊	横焊	仰焊
焊接线能量 KJ/cm	12~35	12~35	12~30	12~30



焊缝清根

- 1、清焊根时应将定位焊的焊缝金属清除干净；
- 2、采用碳弧气刨法清完焊根后应采用砂轮磨除渗碳层、修整刨槽，使其呈U型，槽底半径应大于5mm，同时长度方向宽窄一致。
- 3、清根后应经渗透检测确认无裂纹、未焊透、未熔合及夹渣等缺陷时方可施焊。



产品试板焊接

平+仰焊、立焊、横焊三种位置的试板焊接符合标准和设计技术条件要求



焊缝返修

- 返修前应提出相应返修方案，制定详细返修工艺；
- 焊接返修工艺按焊接工艺卡执行；
- 对返修部位应按对球罐该部位原无损检测的方法进行重新检查，直至合格；
- 焊缝同一部位的返修次数不宜超过两次，如超过两次，应经制造单位技术总负责人批准；

修补次数、部位和修补情况应记入球罐质量说明书。



定位块的去除

按GB12337及技术条件要求，尽可能采用打磨方式除去，避免伤及球壳板。



焊缝外观检查

- 1、焊缝表面不得有裂纹、气孔、咬边、弧坑和夹渣等缺陷，且不得保留有熔渣与飞溅物；
- 2、对接焊缝表面采用砂轮打磨方法消除焊波。球壳外表面焊缝余高应为 $0\sim 1.0\text{mm}$ ，球壳内表面焊缝余高应为 $0\sim 0.5\text{mm}$ ，但不得低于母材；对接焊缝在焊接接头每边的覆盖宽度为 $2\pm 1\text{mm}$ 。
- 3、角焊缝应与母材呈圆滑过渡。



球罐焊后整体热处理





测温系统

- 1、测温点应均匀布置在球壳表面，相邻测温点的间距宜不大于4500mm。
- 2、距人孔与球壳板焊缝边缘200mm以内及产品焊接试板上，必须设测温点。
- 3、温度记录宜采用连续自动记录仪表。仪表精度应达到1%的要求。



保温要求

- 1、球罐的人孔、接管、连接板以及从支柱与球壳连接焊缝的下端算起向下至少1000mm长度的支柱应进行保温；
- 2、热处理时，保温层外表温度应不高于60°C



热处理工艺

- 1、400℃以上升温速度50~80℃/h，保温温度和时间580℃±15℃×2.5h，降温速度宜控制在30~50℃/h，至400℃自然冷却；
- 2、400℃以上升温和降温过程中，球壳表面上相邻两点的温差不得大于120℃。



柱脚位移

- 1、热处理前应在支柱底板下部设置移动装置。
- 2、热处理过程中，应监测柱脚位移，并按计算位移及时调整柱脚位移。一般温度每变化 100°C 应调整一次。
- 3、热处理后，应测量并调整支柱垂直度，其允许偏差应符合图样的要求。



热处理效果评定

实际热处理记录曲线、产品焊接试板性能数据等满足
NB/T47016及技术条件要求



球罐的失效分析



球罐焊接工艺评定不符合实际需要



焊接工艺评定报告

焊接工艺代号 Q370R-B56— SMAW.X.3G

工艺评定代号 2018-43



预焊接工艺规程编号： 2018-43 日期： 2018.07.09 所依据焊接工艺评定报告编号： 2018-43

焊接方法： SMAW

机械化程度： 手工

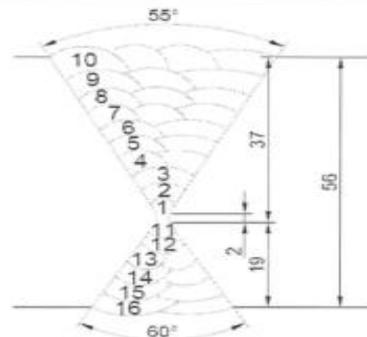
焊接接头：（坡口型式及焊接层次见右图）

坡口形式： X形

垫板（材料及规格）： /

其他： /

简图：



母材：

类别号 Fe-1 组别号 Fe-1-3 与类别号 Fe-1 组别号 Fe-1-3 相焊或

标准号： GB/T713-2014 材料代号： Q370R 与标准号： GB/T713-2014 材料代号： Q370R 相焊

对接焊缝焊件母材厚度范围： 16-200mm

角焊缝焊件母材厚度范围： 不限

管子直径、壁厚范围： 对接焊缝 / 角焊缝： /

其他： /



填充金属:			
焊材类别	焊条	焊丝	焊剂
焊材标准	GB/T 5117-2012	/	/
填充金属尺寸	Φ3.2/Φ4.0	/	/
焊材型号	E5515-N2	/	/
焊材牌号(金属材料代号)	CHE557RH	/	/
填充金属类别	FeT-1-3	/	/
其他: /			
对接焊缝焊件焊缝金属厚度范围: SMAW ≤ 200mm 角焊缝焊件焊缝金属厚度范围: 不限			



焊接位置： 对接焊缝的位置 <u>3G</u> 立焊的焊接方向（向上、向下） <u>向上</u> 角焊缝位置 <u>/</u> 立焊的焊接方向（向上、向下） <u>/</u>	焊后热处理： 保温温度（℃） <u>610±15</u> 保温时间范围（h） <u>5</u>
预热： 最小预热温度： <u>125</u> 最大道间温度： <u>180</u> 保持预热时间 <u>/</u> 加热方式 <u>火焰加热</u>	气体： 气体种类 混合比 流量（L/min） 保护气 <u>/</u> <u>/</u> <u>/</u> 尾部保护气 <u>/</u> <u>/</u> <u>/</u> 背面保护气 <u>/</u> <u>/</u> <u>/</u>
电特性： 电源种类： <u>直流</u> 极性： <u>反接</u> 焊接电流范围（A）： <u>100-190</u> 电弧电压（V）： <u>22-26</u> 焊接速度（范围） <u>6-16</u> 钨极类型及直径 <u>/</u> 喷嘴直径（mm） <u>/</u> 焊接电弧种类（喷射弧、短路弧等） <u>/</u> 焊丝送进速度（cm/min） <u>/</u> (按所焊位置和厚度，分别列出电流和电压范围，记入下表)	



焊道/ 焊层	焊接方法	填充金属		焊接电流		电弧电压 (V)	焊接速度 (cm/min)	线能量 (kJ/cm)
		牌号	直径	极性	电流(A)			
1	SMAW	CHE557RH	Φ3.2	直流反接	100-140	22-25	6-11	12-35
2-9	SMAW	CHE557RH	Φ4.0	直流反接	130-190	22-26	8-16	12-35
10	SMAW	CHE557RH	Φ4.0	直流反接	130-190	22-26	9-16	12-35
11	SMAW	CHE557RH	Φ4.0	直流反接	130-190	22-26	8-16	12-35
12-15	SMAW	CHE557RH	Φ4.0	直流反接	130-190	22-26	8-16	12-35
16	SMAW	CHE557RH	Φ4.0	直流反接	130-190	22-26	9-16	12-35

技术措施:

摆动或不摆动焊: 不摆动 摆动参数: /
焊前清理和层间清理: 砂轮打磨 背面清根方法: 碳弧气刨+打磨
单道焊或多道焊(每面): 多道焊 单丝焊或多丝焊: /
导电嘴至工件距离(mm) / 锤击: /



背面保护气	___/___	___/___	___/___
填充金属:			
焊材类别: _____	FeT-1-3		
焊材标准: _____	GB/T 5117-2012		
焊材型号: _____	E5515-N2		
焊材牌号: _____	CHE557RH		
焊材规格: _____	Φ 3.2/ Φ 4.0		
焊缝金属厚度: _____	56mm		
其它: _____	/		
焊接位置:			
对接焊缝位置: _____	3G 方向: (向上√、向下)		
角焊缝位置: _____	/ 方向: (向上、向下)		
技术措施:			
焊接速度 (cm/min) _____	10.2-15.7		
摆动或不摆动: _____	不摆动		
摆动参数: _____	/		
多道焊或单道焊 (每面): _____	多道焊		
多丝焊或单丝焊: _____	/		
其它: _____	/		
预热 (后热):			
预热温度 (℃): _____	125		
道间温度 (℃): _____	139-172		
其它: _____	/		



焊接参数

焊道/ 焊层	焊接方 法	焊缝金属 厚度(mm)	焊材 规格	道间 温度	电弧电 压 (V)	焊接电 流 (A)	焊接电 流极性	焊丝送进 速度 (cm/min)	焊接速度 (cm/min)	气体流量 (L/min)	线能量 (KJ/cm)
1	SMAW	2	Ø3.2	147	22	110	直流 反接	/	10.2	/	14.2
2	SMAW	3	Ø4.0	152	23	145	直流 反接	/	15.7	/	12.7
3	SMAW	3	Ø3.2	142	24	155	直流 反接	/	14.9	/	15.0
4	SMAW	3	Ø3.2	156	24	145	直流 反接	/	15.2	/	13.7
5	SMAW	4	Ø4.0	172	24	160	直流 反接	/	14.3	/	16.1
6	SMAW	4	Ø3.2	139	25	165	直流 反接	/	15.2	/	16.3
7	SMAW	4	Ø3.2	159	25	155	直流 反接	/	13.9	/	16.7
8-9	SMAW	4	Ø4.0	162	24	160	直流 反接	/	15.1	/	15.3
9	SMAW	4	Ø3.2	171	24	155	直流 反接	/	13.2	/	16.9
10	SMAW	4	Ø3.2	154	24	160	直流 反接	/	13.5	/	17.1
11	SMAW	3	Ø4.0	171	25	165	直流 反接	/	14.6	/	17.0
12-13	SMAW	3	Ø3.2	168	25	160	直流 反接	/	13.8	/	17.4
14-15	SMAW	4	Ø3.2	149	24	155	直流 反接	/	13.5	/	16.5
16	SMAW	4	Ø4.0	161	24	160	直流 反接	/	14.2	/	16.2



-50°C N-TUF490Q钢制低温球罐

选用焊条不当



新日铁L-60LT+N-TUF490焊条球罐 产品焊接试板试验结果

焊接位置	缺口位置	冲击试验		
		温度 (°C)	KV ₂ (J)	
立焊	焊缝中心	-50	25	29 22 /25
	熔合线		43	28 136 /69
	热影响区		151	42 105 /99
	焊缝中心	-45	31	28 32 /30



对施工单位的施工过程资料,包括焊接材料质量证明文件、焊接材料复验、焊接工艺评定、焊接施工记录、热处理记录等进行审查,除发现如下疑点外,未发现其他问题:

(1)焊接材料质量证明文件提供的熔敷金属冲击值为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,127 J,球壳板制作厂家复验值为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,68 J,安装单位复验值为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,74 J,差距较大,焊接材料制造厂焊接试件采用交流电源,焊材复验时采用了直流电源,焊条接正极。

(2)施工单位在焊接工艺评定试验时,第一次评定,立位焊冲击试验未达到设计要求;进行了第二次工艺评定,评定合格。

(3)球罐热处理规范为 $580\text{ }^{\circ}\text{C}\times 120\text{ min}$,保温时间是按照 GB 12337《钢制球形储罐》计算的,每25 mm 厚度保温1 h;设计要求热处理保温时间为3.6 h(216 min)。



(2) 给定冲击温度, 冲击要求值的推算
推算冲击要求值的公式如下:

$$A_{KV} = \left| \frac{1}{19} \left[25 + 75 \exp\left(\frac{T_S - T_R}{60}\right) \right] \right|^2 \quad (7)$$

令使用温度 = 设计温度, 即 $T_S = -45\text{ }^\circ\text{C}$, 分别
将利用式(2)求得的设计温度下不同载荷时的冲击
试验温度代入式(7)中得:

冲击载荷时: $T_R = -69.6\text{ }^\circ\text{C}$, $A_{KV} = 52.8\text{ J}$

中速加载时: $T_R = -45.4\text{ }^\circ\text{C}$, $A_{KV} = 28.0\text{ J}$

静载荷时: $T_R = -31.2\text{ }^\circ\text{C}$, $A_{KV} = 19.8\text{ J}$

由上述计算结果, 并对照产品试板冲击试验结
果, 得知: 以 K_{IC} 为基础的关系式进行推算, 受冲击载
荷时, 该球罐不能安全使用; 受中速载荷, 冲击韧性
值没有安全裕度; 受静载荷时球罐可以安全使用。



L-60LT焊条熔敷金属力学性能（某大企业球罐课题）

订货技术要求及 焊条批号	热处理 状态	拉伸试验			冲击试验		
		R _{eL} MPa	R _m MPa	A %	试验温 度 ℃	KV ₂ J	
						平均值	单个值
订货技术 要求	焊 态	≥490	610~730	≥20	-50	≥49	≥34
4V2320180 8	焊 态	568	622	25	-50	129 158 155	
复验	焊 态	564	630	26	-50	120 100 132	



07MnNiMoDR与10Ni3MoVD+L-60LT对接焊接头冲击试验结果 (某大企业球罐课题)

热处理 状态	冲击试验 KV ₂ , J		
	缺口位置	-50 °C	-60 °C
焊态	焊缝中心	86 100 70	46 35 40
	钢板侧热影响区	276 239 223	176 133 168
	锻件侧热影响区	245 233 240	185 120 179
1次SR处理	焊缝中心	56 64 65	39 32 45
	钢板侧热影响区	198 234 241	143 120 162
	锻件侧热影响区	227 230 158	147 109 125
3次SR处理	焊缝中心	52 53 59	31 30 38
	钢板侧热影响区	146 89 170	119 134 80
	锻件侧热影响区	227 185 184	125 164 132

焊接线能量：不大于**30KJ/cm**



山东某企业Q370钢制球罐 氢致冷裂纹



- 1、对V-3101球罐罐体外部上下环形焊缝、罐体内部焊缝100%进行检测；
检测发现罐外部下环形焊缝23处裂纹；罐体内部上环形焊缝10处裂纹；罐体内部下环形焊缝25处裂纹；罐体内部赤道纵焊缝10处；
- 2、11月22日对V-3101/V-3103球罐外部上下极板焊缝检测（测厚、磁粉探伤、硬度测试）。
检测发现：V-3101球罐球罐下极板104处裂纹，上极板2处裂纹；
检测发现：V-3103球罐下极板31处裂纹，上极板无裂纹等缺陷。



3、裂纹缺陷汇总

V-3101球罐裂纹缺陷（罐体外部上下环形焊缝、上下极板焊缝、罐体内部100%焊缝）共计174处。

V-3103球罐裂纹缺陷（罐体外部上下环形焊缝、上下极板焊缝、罐体内部100%焊缝）共计63处。











Q370R钢制3000m³液氨球罐 应力腐蚀裂纹成因分析及修复



贵州某公司3000m³液氨球罐应力腐蚀裂纹

材料：Q370R

设计温度：-19/50℃

设计压力：2.16MPa

壁厚：50mm

直径：18000mm

建成时间：2013年6月

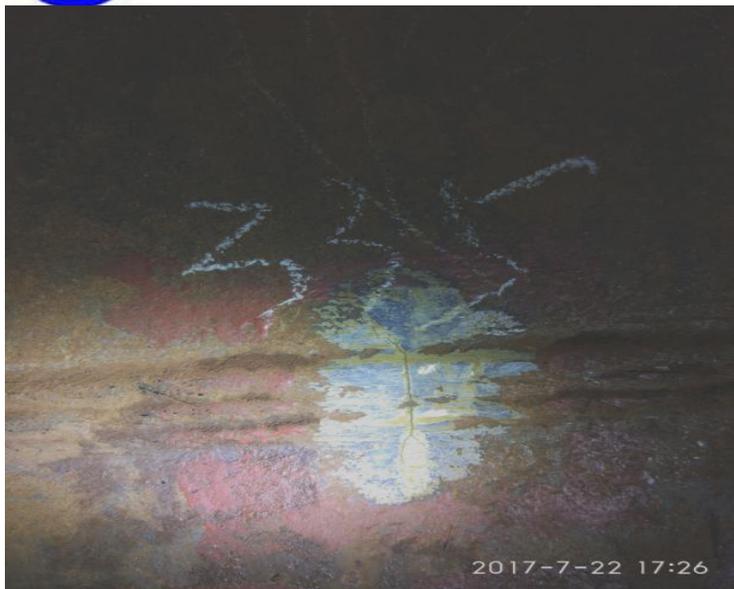
2016年7月首次开罐检查发现了100多条裂纹，未分析原因，即进行了焊接返修。

2017年7月第二次开罐检查，发现了300多条裂纹，方才引起了重视。



Q370R钢制3000m³液氨球罐第二次开罐检查情况

- 1 宏观检查：最大错边量达5mm，无均匀腐蚀。
- 2 对接焊缝进行100%UT检测，未发现超标缺陷。
- 3 外壁：所有焊缝采用MT检测，未发现缺陷磁痕显示；
内壁：荧光磁粉进行100%检测，共发现**378处**线性缺陷显示，其中有10多处缺陷数量为多条密集横向缺陷。



氢致冷裂纹



应力腐蚀裂纹



裂纹方向：有横向、纵向

裂纹在焊接接头中位置：焊缝、热影响区

裂纹在球罐上位置：大多数集中在上、下极大环缝及下极板方环上。卡具处，深度较浅。

横向裂纹：集中在焊缝上，长度5mm左右居多，深度1.0mm，长度超过10mm的起止点在熔合线处，深度超过3.0mm；

纵向裂纹：除了母材外，绝大多数在热影响区，深度1.0mm，少数几条深度超过3.0mm。



4 硬度检测

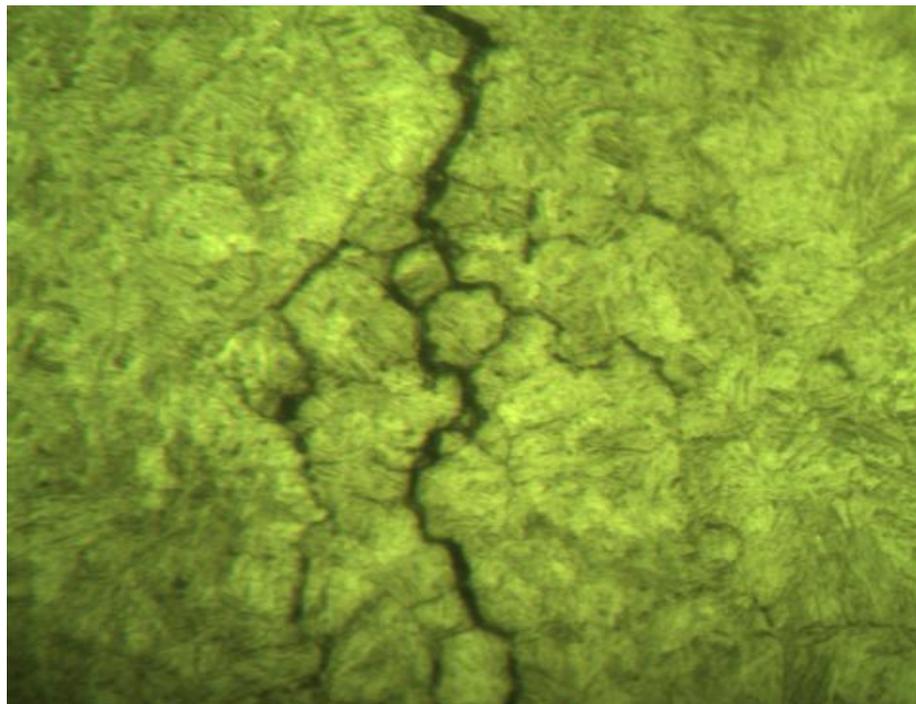
裂纹区域：热影响区251HB~**373HB**，焊缝196HB~**259HB**。

非裂纹区域：焊缝与裂纹区域相比未有明显变化，

热影响区与裂纹区域相比有明显下降，221HB~ **298HB**

。

5 微观金相



纵向裂纹：位于熔合线上，基本上与熔合线走向一致，以沿晶扩展为主，有少量分叉，裂纹末端较细。

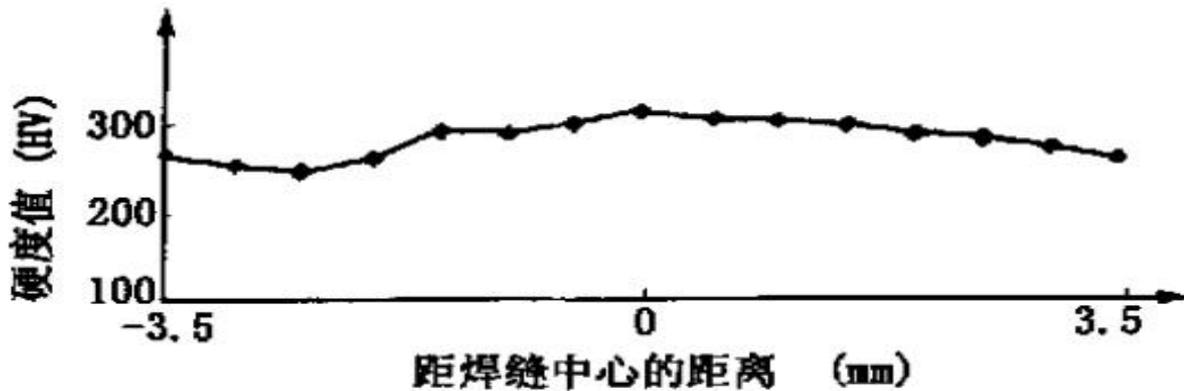


检测结论

378条裂纹：大部分为应力腐蚀裂纹，小部分为氢致冷裂纹



焊接热影响区最高硬度试验



Q370R最高硬度法试验硬度值

预热: 100 °C

最高硬度:

310HV10

(约294HB)



SR态钢板及焊接接头恒负荷拉伸应力腐蚀试验

恒负荷拉伸H₂S应力腐蚀试验结果

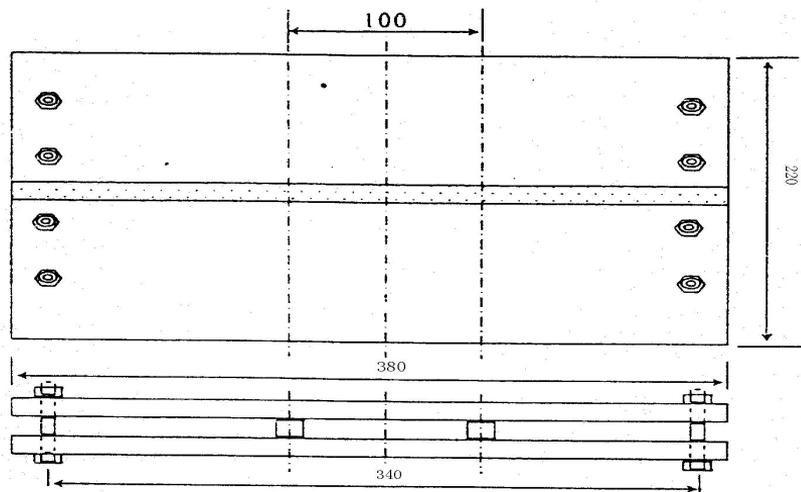
试样部位及状态	应力水平 σ/R_{eL}	试验时间t/h	断否	试验结果
钢板 (SR状态)	0.80	96	断	回归方程: $\sigma=1.208-0.89\ln t$ 相关系数R=0.95 $\sigma_{th}=0.62 R_{eL}$
	0.70	384	断	
	0.70	720	否	
	0.65	402	断	
	0.65	720	否	
	0.60	720	否	
	0.50	720	否	
焊接接头 (SR状态)	0.80	69	断	回归方程: $\sigma=1.086-0.075\ln t$ 相关系数R=0.85 $\sigma_{th}=0.59 R_{eL}$
	0.70	88	断	
	0.70	228	断	
	0.65	544	断	
	0.65	685	断	
	0.60	720	否	
	0.50	720	否	

如果以 $\sigma_{th} \geq 0.45 R_{eL}$ 为合格标准, SR状态的Q370R钢板及焊接接头均具有较优良的抗应力腐蚀性能。

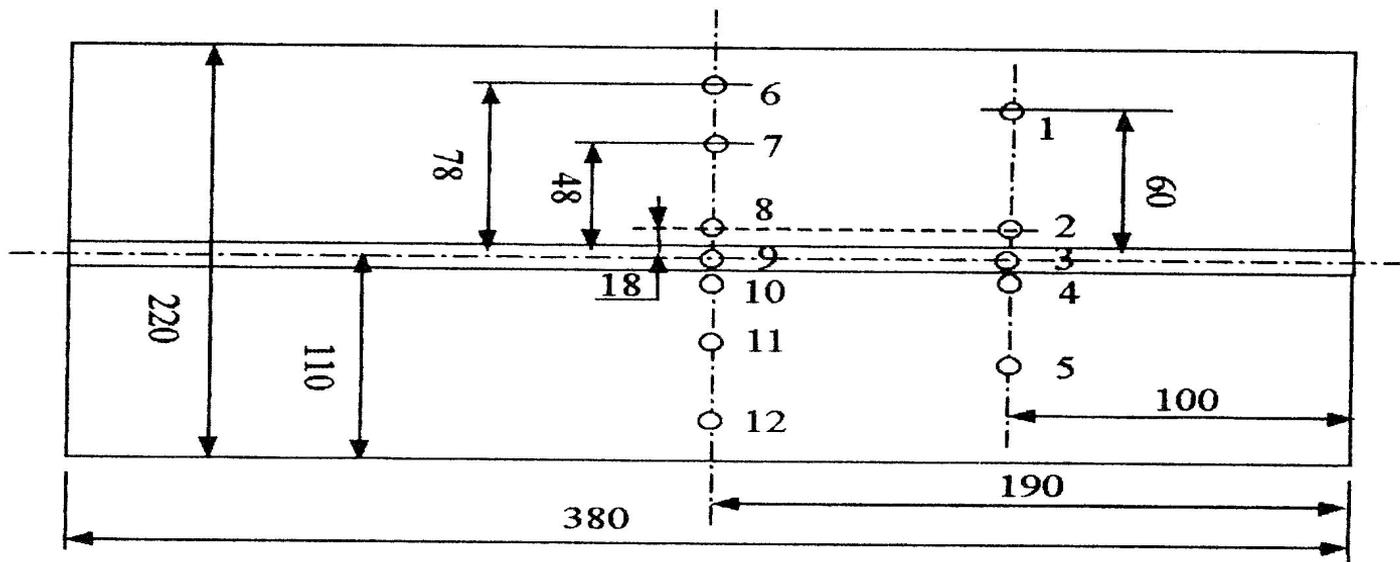


模拟服役工况条件下的应力腐蚀试验

试板用螺栓进行四点弯曲加载并浸入湿 H_2S 含量为500ppm的腐蚀介质中，观察试板的破坏行为，以近似模拟实际工况条件下的母材、焊缝及热影响区抗硫化氢应力腐蚀性能。



模拟服役
工况SCC
试板几何尺
寸及加载方式



SCC试板应力测点分布图



焊态试板残余应力测试结果

编号	加载前	加载后	编号	加载前	加载后
1	-104	+24	7	-131	+84
2	+160	+210	8	+148	+177
3	+148	+288	9	+342	+378
4	+176	+210	10	+146	+90
5	-154	+12	11	-36	+162
6	-107	+78	12	-134	+36

两个月后取出，检测结果未发现任何裂纹。

试验结果表明，Q370R钢板及其焊接接头抗应力腐蚀性能较优良。



液氨球罐裂纹成因分析

1) 材料组织

热影响区硬度检测硬度高达**373HB**，这远高于HG20583标准中“盛装氨介质容器的低合金钢焊接接头硬度 $HV_{10} \leq 245$ （约233HB）”规定，同时这也远高于最高硬度法中的**294HB**。这表明球罐现场焊接时预热措施严重失控，导致焊接接头冷却速度过快， $t_{8/5}$ 过短，在焊接接头中产生了淬硬组织，而淬硬组织对应力腐蚀开裂尤其敏感，是本球罐产生严重应力腐蚀裂纹的最直接原因。



横焊位置均采用直线法施焊，俗称“拉条子”，焊缝外观质量差，焊接线能量偏小，增加了在环缝焊接接头中产生淬硬组织倾向。

目前GB12337-2014标准中对具有应力腐蚀球罐的焊接接头并未提出硬度指标要求值，鉴于目前球罐的焊接工艺纪律失控较严重，应在该标准中对该类球罐增加此项内容。



2) 球罐残余应力

球罐焊接顺序均为先纵后环，因此后焊的环缝由于受先前焊接完毕纵缝的拘束，环缝残余应力较大，再加上环焊缝线能量偏小，因此环缝应力腐蚀情况比纵焊缝严重。当焊后热处理效果不佳，对应力腐蚀也会产生一定的影响。



3) 介质

应力腐蚀开裂属于电化学腐蚀，100%的液氨是不会产生应力腐蚀，当介质中含有少量水时，在阳极

$M \rightarrow M^+ + e$ ，在阴极 $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$ 。

当 CO_2 的体积分数达到 $118 \sim 154 \times 10^{-6}$ 时，也增加液氨应力腐蚀裂纹倾向。

我们检查了该公司该球罐运行记录，介质条件具备。

材料、介质及应力都具备应力腐蚀条件



焊接返修重点内容

- 1 本次不仅对所有表面裂纹处进行全面返修，**还需对硬度大于 245HV10的焊接接头进行返修。**
- 2对球罐内表面硬度进行全面检查，标注出硬度超过245HV10 的焊接接头部位。
- 3将该部位的焊缝、两侧的热影响区及部分母材从表面往下刨除10mm。采用J557RH高韧性超低氢焊条施焊，预热温度大于125℃，焊后立即进行200～250℃×0.5h消氢处理。



斜圈法运条焊接示意图

环焊缝由直线施焊法改为斜圈法施焊，这样焊缝成型美观，关键是增大了热输入，焊接接头 $t_{8/5}$ 时间延长，对预防横焊焊接接头产生淬硬组织有一定的作用，同时可避免焊接线能量过小热影响区低温冲击韧性较低现象。



返修过程中新产生的裂纹



谢谢大家!