



# 《压力容器 分析设计》修订版

## 对焊接材料规定的探讨

房 务 农

合肥通用机械研究院

2019年11月

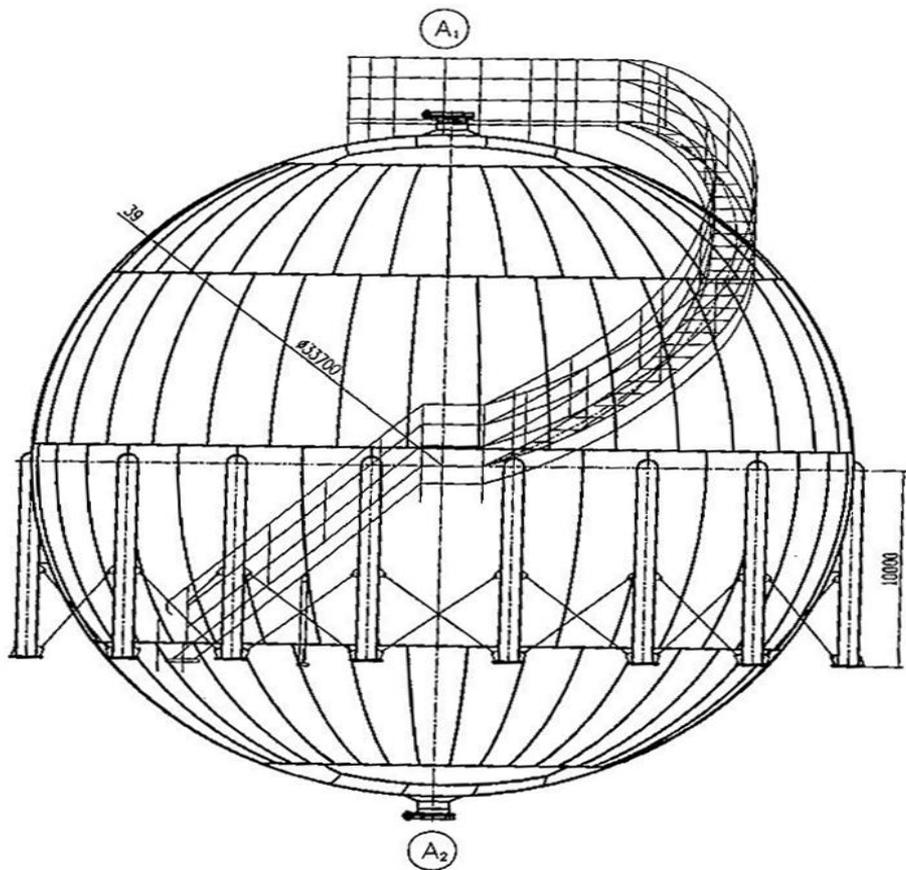


## 前 言

我国压力容器向大型化、高参数化方向发展，为实现轻量化，容器的壁厚必须减薄。在材料已定的前提下，需采用分析设计标准进行设计。分析设计安全系数为**2.4**，低于常规设计的**2.7**，对材料（包括焊接材料）来言,需适当提高韧性等指标。我国钢厂冶炼、轧制等水平近十年来大幅提升，微合金化+TMCP技术得到广泛应用。而作为钢铁“针线”焊接材料用量较少，未得到应有的重视，已严重滞后于钢板的发展。



长70米、外径5.4米、重2400吨



20000m<sup>3</sup>球罐:  
直径33700mm,  
重1263335kg



## 什么叫分析设计

压力容器规则设计（**GB150**）以弹性失效为准则，以材料力学薄膜应力理论为基础，通过理论公式及经验系数进行计算和校核。由于无法对压力容器局部应力进行精确分析计算，为安全起见，主要通过提高材料的安全系数（安全系数为**2.7**）来确保压力容器安全。

分析设计（**GB××××-20××/原JB4732**）以塑性失效及弹塑性失效准则为基础，采用大型应力分析软件（如**ANSYS**）对压力容器各受力部位进行精确的模拟计算，据结果对结构进行合理的优化以降低高应力部位的应力水平。分析设计对压力容器各受力部位的应力计算较为准确，可根据导致结



构破坏的危险程度对应力进行分类，对各类应力取不同的许用值进行评定，可以做到该减薄处薄，该加厚处厚。因此，虽然分析设计材料安全系数比规则设计低（安全系数为**2.4**）。

分析设计可以降低压力容器总重量，减少总投资。尤其在具有较复杂的压力、温差波动，需要考虑压力容器的疲劳寿命和需要进行疲劳校核的情况下，分析设计会发挥更大的作用。

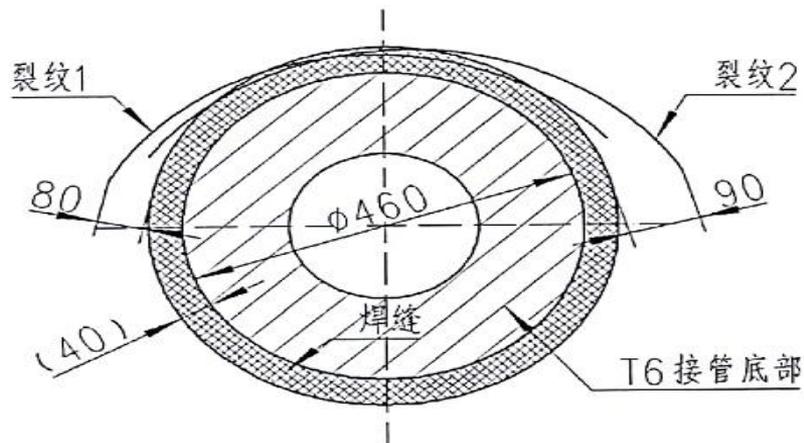
在新修订的《压力容器 分析设计》中对焊接接头的冲击功比**GB150**提高了一个档次，并首次将焊接材料纳入到材料篇，对焊接材料的要求也相应地提高。



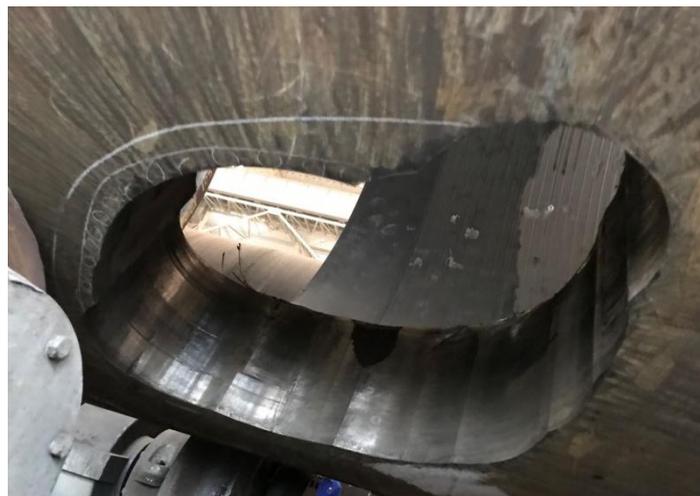
# 压力容器焊缝质量不容乐观

## 1、在制压力容器

在制的加V钢制加氢反应器



筒节与 T6 接管焊缝裂纹示意图



裂纹1为穿透性裂纹，裂纹2深度距离筒体外表面80~296mm。



## 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 <sub>2</sub> (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

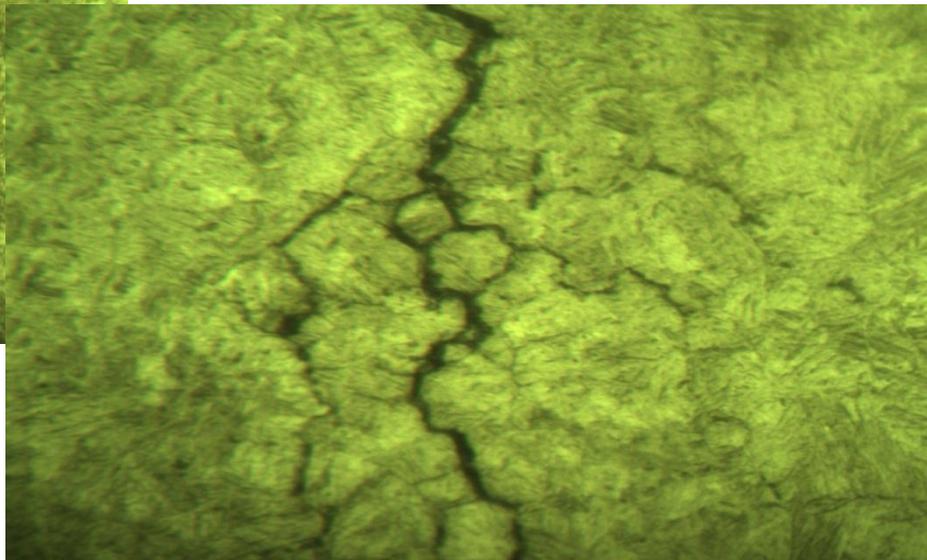
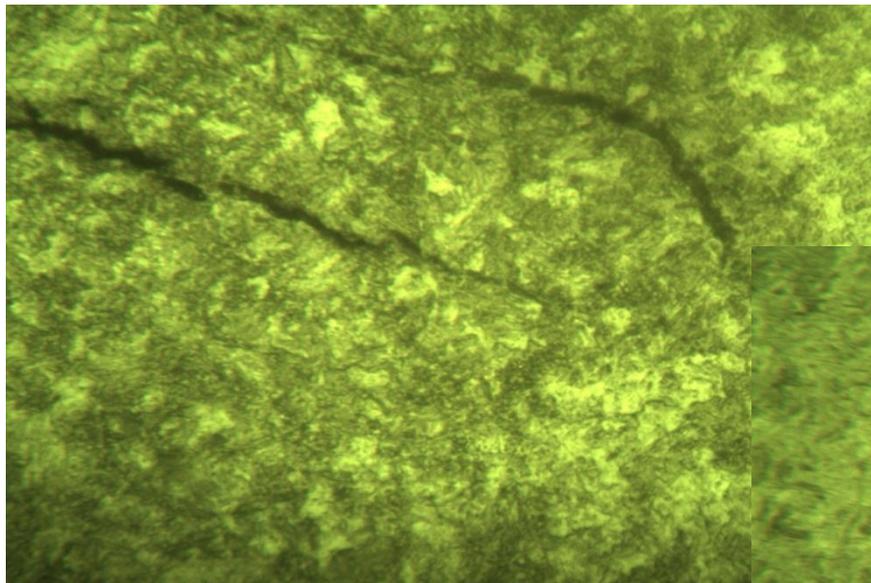


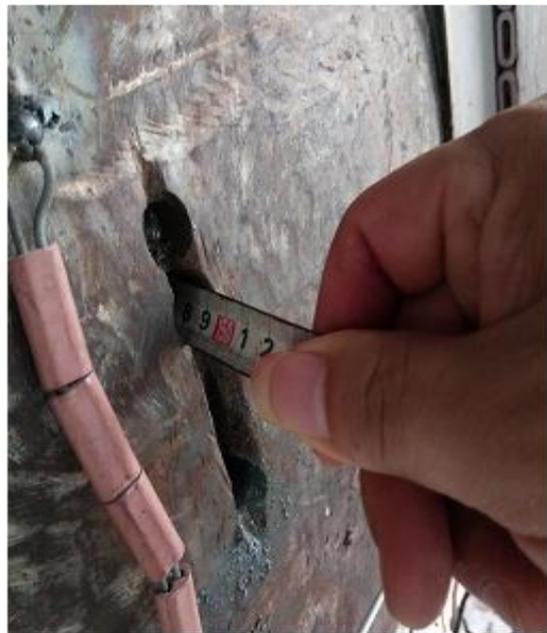
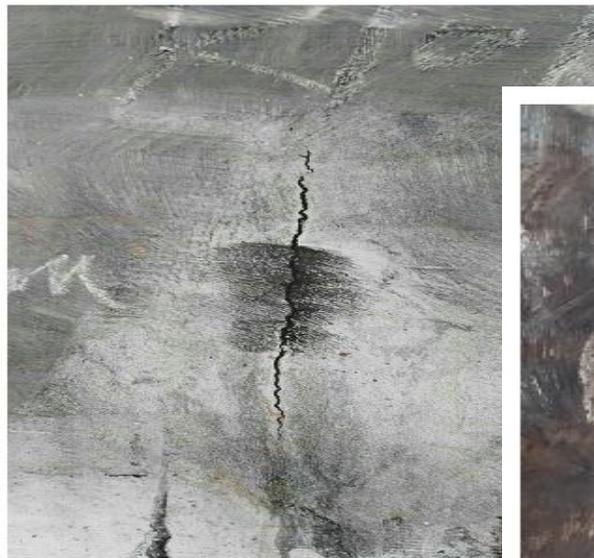
## 2、在役的压力容器

开罐检查表明，几乎所有裂纹类缺陷集中在焊接接头，80%的裂纹产生在焊缝上。



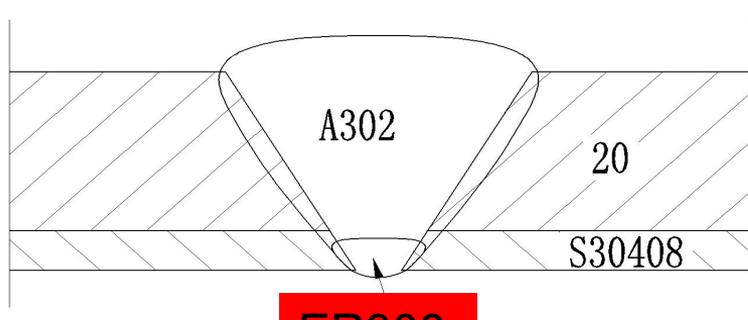
## 某Q370钢制3000m<sup>3</sup>液氨球罐





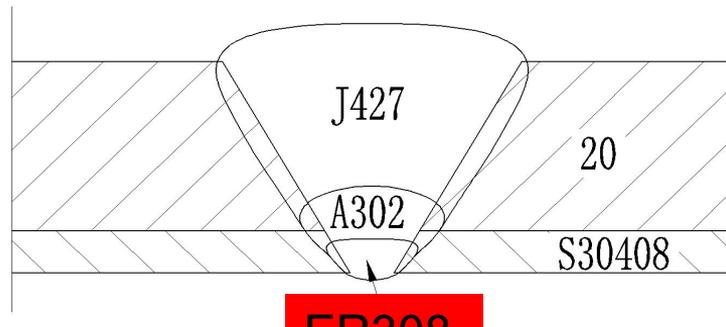
某在役的2.25Cr-1Mo钢制加氢反应器

## 中石化课题“不锈钢复合管焊接技术开发项目”



ER308

a)



ER308

b)



## 我国压力容器标准规范对**选择**焊接材料的规定

Nb/T47018-2017 《承压设备用焊接材料订货技术条件》

回答  
不了

压力容器如何合理选择焊接材料



## TSG 21-2016 《固定式压力容器安全技术监察规程》

### 2.2.6 焊接材料

用于压力容器受压元件焊接（的）材料，应当保证焊缝金属的拉伸性能满足母材标准规定的下限值；冲击吸收能量满足本规程表2-1的规定；当需要时，其他性能也不得低于母材相应要求；

钢材 $R_m$ /MPa	KV <sub>2</sub> /J
≤450	≥20
>450~510	≥24
>510~570	≥31
>570~630	≥34
>630~690	≥38



- 2、焊接材料应当满足相应焊材标准和产品标准的要求，并且附有质量证明书和清晰、牢固的标志；
- 3、压力容器制造、改造、修理单位应当建立并且严格执行焊接材料验收、复验、保管、烘干、发放和回收制度。



## GB12337-2014 《钢制球形储罐》

### 1、焊条

用于制造球罐受压元件的焊条应符合NB/T47018.2的有关规定。用于球壳主体焊缝的焊条熔敷金属冲击功指标应不低于相应母材标准规定的下限值。

### 2、气体保护电弧焊用钢焊丝和埋弧焊用焊丝和焊剂

用于球壳受压焊缝的气体保护电弧焊钢焊丝、埋弧焊焊材熔敷金属冲击功指标应不低于相应母材标准规定的下限值。



GB/T 150-2011 《钢制压力容器》

原JB/T4732-1995 《压力容器分析设计》（2005确认版）

材料篇列入了钢板、锻件、钢管、螺母  
和螺栓用钢棒

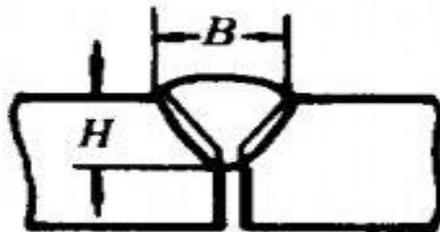
**未列入焊接材料**



# 《压力容器——分析设计》标准 对焊接材料选用的规定

# 1、压力容器受压元件焊接材料熔敷金属抗拉强度

低匹配：与焊缝成形系数有关





GB/T 5117: 430、490、550、570MPa

GB/T 32533: 590、620、690……MPa

GB/T 5118: 490、520、550、620MPa

**NB/T47018: 熔敷金属抗拉强度上限  
不能高于规定下限值120MPa。**



与“固容规”相一致:

压力容器受压元件焊接材料熔敷金属抗拉强度应不低于母材 标准规定的  
下限值。



## 2、压力容器受压元件焊接材料熔敷金属低温冲击吸收能量的规定

出发点：焊缝金属的韧性要与  
母材相匹配。

但焊缝组织及性能无法与母材相媲美，低温冲击功实物水平远低于母材。



## GB713-2014 《锅炉压力容器用钢板》

牌号	P /%	S /%	温度/°C	冲击吸收能量 KV <sub>2</sub> /J
Q370R	≤0.020	≤0.010	-20	≥47
<b>Q420R</b>	<b>≤0.020</b>	<b>≤0.010</b>	<b>-20</b>	<b>≥60</b>
18MnMoNbR	≤0.020	≤0.010	0	≥47
<b>13MnNiMoR</b>	<b>≤0.020</b>	<b>≤0.010</b>	<b>0 /-20</b>	<b>≥47</b>
15CrMoR	≤0.025	≤0.010	20	≥47
14Cr1MoR	≤0.020	≤0.010	20	≥47
12Cr2Mo1R	≤0.020	≤0.010	20	≥47
12Cr1MoVR	≤0.025	≤0.010	20	≥47
<b>12Cr2Mo1VR</b>	<b>≤0.010</b>	<b>≤0.005</b>	<b>-20</b>	<b>≥60</b>
07Cr2AlMoR	≤0.020	≤0.010	20	≥47



## GB3531-2014 《低温压力容器用钢板》

牌号	P /%	S /%	温度/°C	冲击吸收能量KV <sub>2</sub> /J
16MnDR	≤0.020	≤0.010	-40/-30	≥47
15MnNiDR	≤0.020	≤0.008	-45	≥60
15MnNiNbDR	≤0.020	≤0.008	-50	≥60
09MnNiDR	≤0.020	≤0.008	-70	≥60
08Ni3DR	≤0.015	≤0.005	-100	≥60
06Ni9DR	≤0.008	≤0.004	-196	≥100



## GB19189-2011 《压力容器用调质高强度钢板》

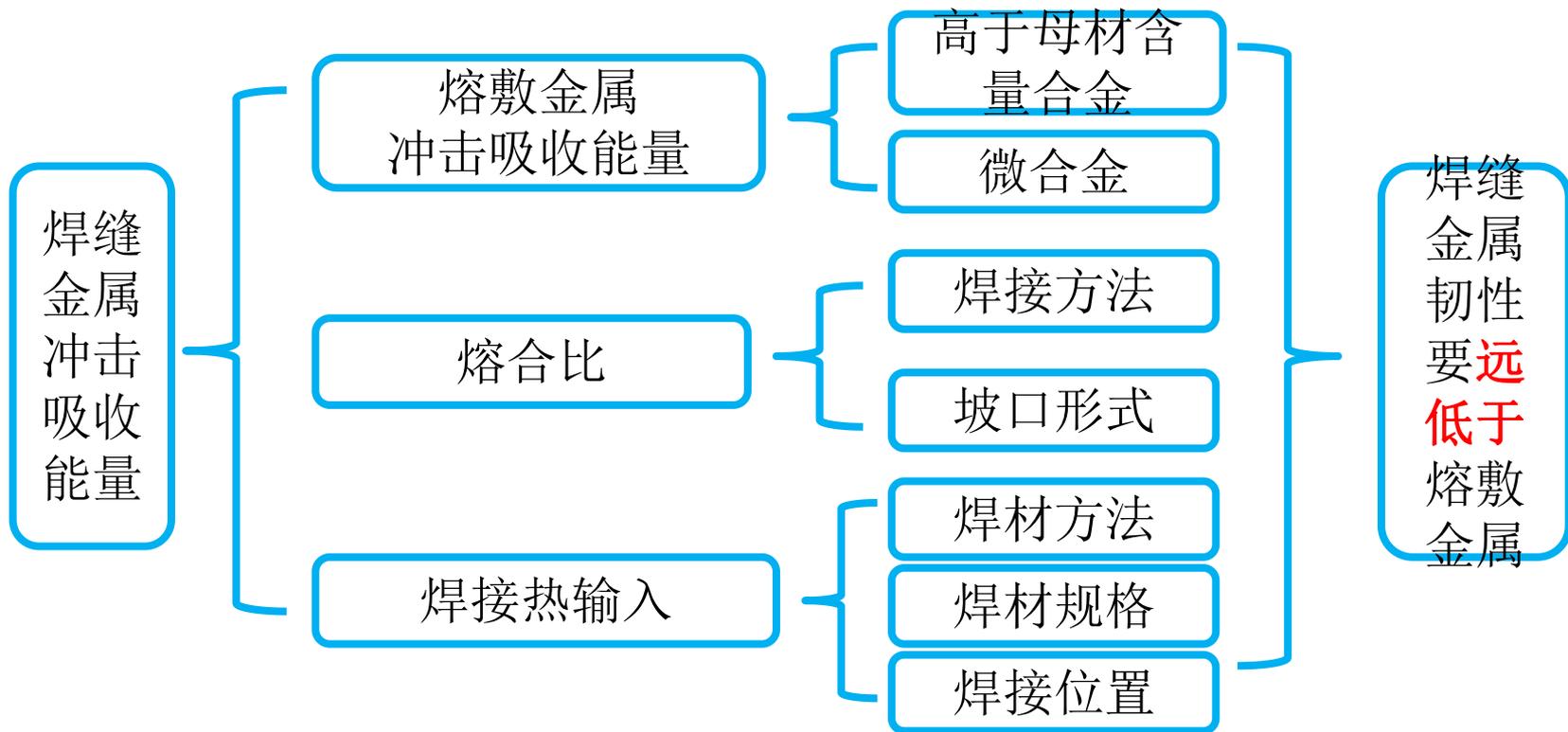
钢板牌号	P /%	S /%	温度/°C	冲击吸收能量 KV <sub>2</sub> /J
07MnMoVR	≤0.020	≤0.008	-20	≥80
07MnNiVDR	≤0.018	≤0.008	-40	≥80
07MnNiMoDR	≤0.015	≤0.005	-50	≥80
12MnNiVR	≤0.020	≤0.010	-20	≥80

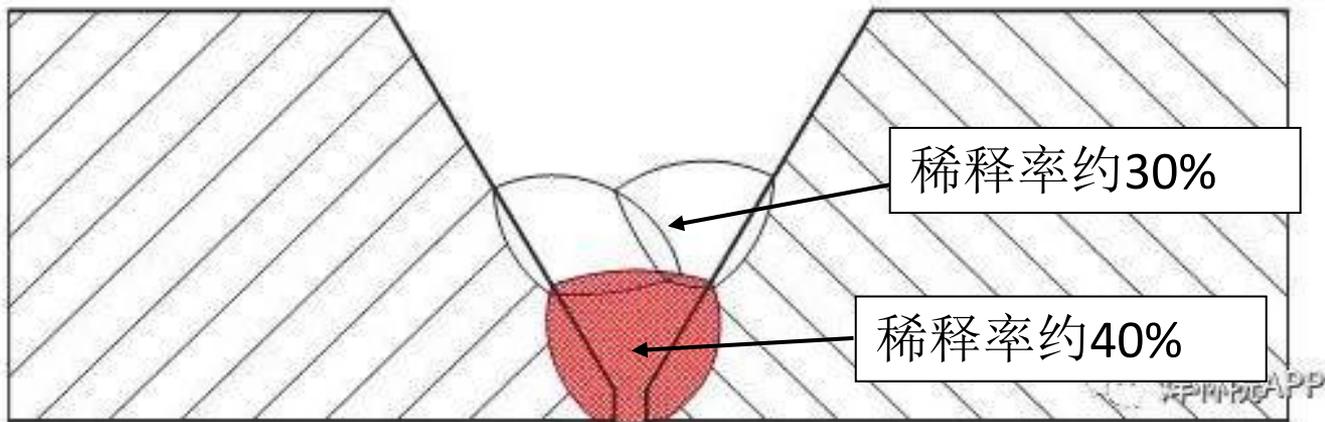


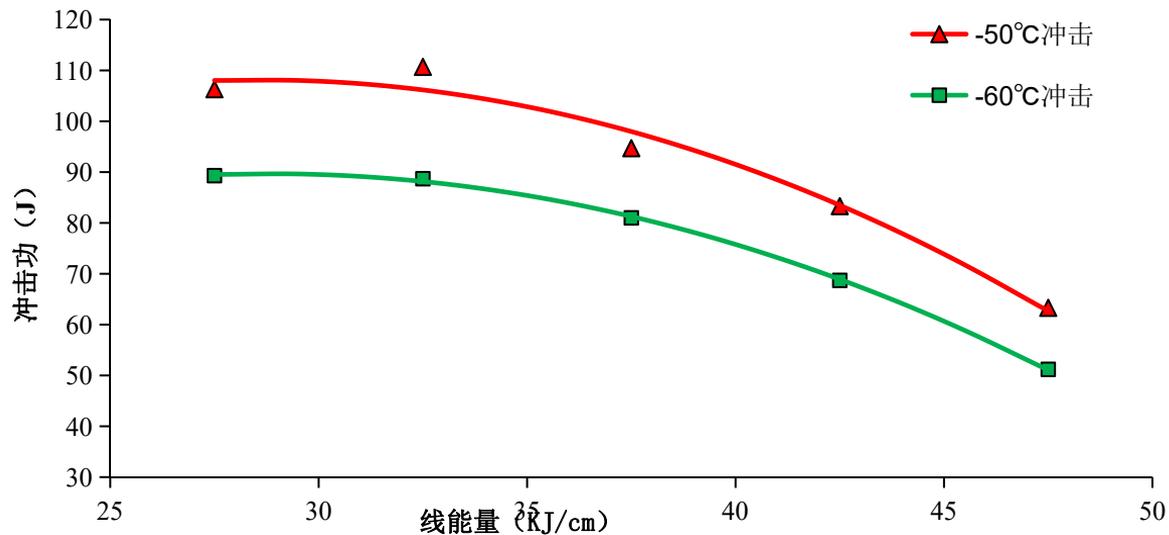
钢板			配套焊条		
牌号	温度/°C	KV <sub>2</sub> /J	型号	温度	KV <sub>2</sub> /J
Q345R	0	≥41	E5015	-30	≥54
Q370R	-20	≥47	E5015—N1(N2)	-40	≥54(60)
16MnDR	-40/-30	≥47	E5015-N1	-40	≥54
09MnNiDR	-70	≥60	E5015-N5	-75	≥54 (60)
07MnNiMoDR	-50	≥80	E6215-N5M1	-60	≥54 (60)
				(-50)	(≥80)
15CrMoR	20	≥47	E5515	0 (-20)	≥54
12Cr2Mo1R	20(-30)	≥47 (54)	E6215	0 (-30)	≥54
12Cr2Mo1VR	-20(-30)	≥60 (54)	E62151MV	-20 (-30)	≥68 (54)



钢板			配套焊条		
牌号	温度/°C	KV <sub>2</sub> /J	型号	温度	KV <sub>2</sub> /J
Q345R	0	≥41	E5015	-30	≥54
Q370R	-20	≥47	E5015-N1(N2)	-40	≥54(60)
16MnDR	-40/-30	≥47	E5015-N1	-40	≥54
09MnNiDR	-70	≥60	E5015-N5	-75	≥54 (60)
07MnNiMoDR	-50	≥80	E6215-N5M1	-60	≥54 (60)
				(-50)	(≥80)
15CrMoR	20 (-20)	≥47(54)	E5515	0 (-20)	≥54
12Cr2Mo1R	20(-30)	≥47(54)	E6215	0 (-30)	≥54
12Cr2Mo1VR	-20(-30)	≥60(54)	E62151MV	-20 (-30)	≥68 (54)







07MnNiMoDR钢制球罐用GER-N27M焊条线能量对焊缝金属冲击功的影响



标准中规定：焊材熔敷金属低温冲击吸收能量  
不低于母材标准规定的下限值



## 焊材熔敷金属低温冲击吸收能量

### 低于母材规定的下限值

“参照NB/T47014规定来制作焊接试件，其焊缝金属冲击吸收能量须满足该标准表1的规定”，制造时只允许使用该批号的焊材。

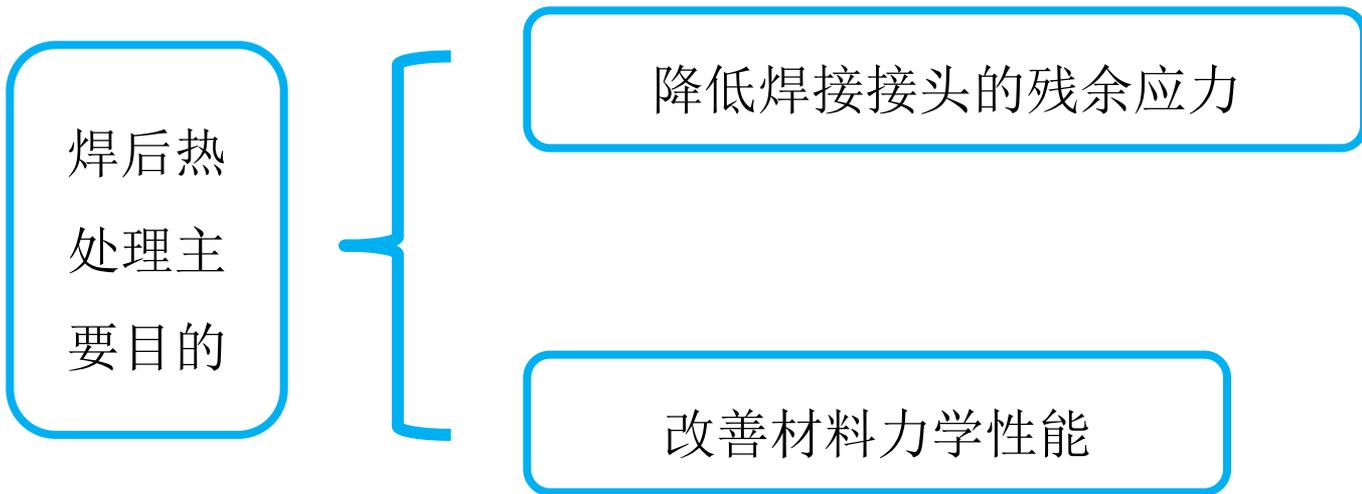
在制造厂焊材直径和焊接位置等不同，焊工采用的热输入不同，尤其立焊时焊接热输入更大，因此必须采取制造厂焊接工艺（**最大热输入**）来考核该批焊材。同型号（或牌号）的焊材，焊材生产厂采用**微合金化体系**不同，对焊接热输入**敏感程度**不同。

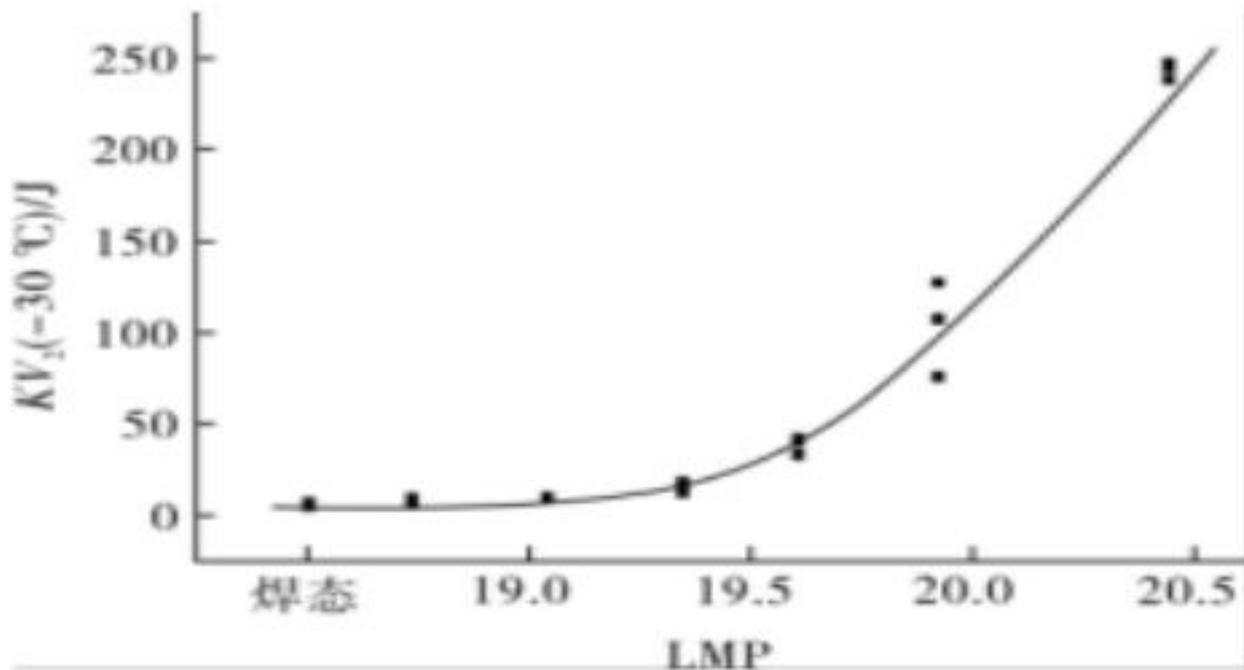


钢材标准抗拉强度下限值 Rm (MPa)	KV2 (J)
≤450	≥24
>450~510	≥31
>510~570	≥34
>570~630	≥38
>630~690	≥47 (LE≥0.53mm)
>690	≥54 (LE≥0.53mm)



### 3、压力容器受压元件焊接材料熔敷金属的焊后热处理规范





LMP: Larson-Miller参数



## 焊后热处理温度的选取

母材（公称成分）	GB/T30583	设计图纸	GB/T5118
1Cr-0.5Mo	$\geq 650^{\circ}\text{C}$	$675 \pm 15^{\circ}\text{C}$	$690 \pm 15^{\circ}\text{C}$
1.25Cr-0.5Mo	$\geq 650^{\circ}\text{C}$	$690 \pm 14^{\circ}\text{C}$	$690 \pm 15^{\circ}\text{C}$
1.25Cr-0.5Mo-0.25V		$\times 6\text{h}$	$730 \pm 15^{\circ}\text{C}$
2.25Cr-1Mo	$\geq 680^{\circ}\text{C}$	$690 \pm 14^{\circ}\text{C}$	$690 \pm 15^{\circ}\text{C}$
2.25Cr-1Mo-0.25V		$\times 8\sim 32\text{h}$	$\times 1\text{h}$
	$\geq 730^{\circ}\text{C}$	$705 \pm 14^{\circ}\text{C}$	$740 \pm 15^{\circ}\text{C}$
		$\times 8\sim 32\text{h}$	$\times 1\text{h}$
9Cr-1Mo	$\geq 730^{\circ}\text{C}$	$760 \pm 14^{\circ}\text{C}$	$740 \pm 15^{\circ}\text{C}$
9Cr-1Mo-0.25V		$\times 4\text{h}$	$\times 1\text{h}$
			$760 \pm 15^{\circ}\text{C}$
			$\times 2\text{h}$



热强钢焊材标准是从熔敷金属性能最优化角度出发的，为充分回火，焊后热处理温度相对较高，而目前压力容器用钢通常是正火+回火或调质状态，压力容器焊后热处理温度要低于焊材标准上的温度，以防损伤母材。

熔敷金属焊后处理规范应与产品相一致，保温时间不得少于产品在制造过程中累计保温时间的80%。目前加氢反应器和球罐早已率先采用此规则（制造过程中累积的时间+一次开罐检查后焊接返修的热处理时间）。



## 4、焊接材料熔敷金属杂质元素含量的规定

NB/T47018标准上熔敷金属S、P杂质元素含量已低于国家标准，但考虑分析设计对焊材性能要求更严、更稳定，因此对于标准抗拉强度下限值大于**540MPa**的钢材或设计温度低于**-40°C**的压力容器用焊接材料，规定其熔敷金属杂质元素 $P \leq 0.020\%$ ， $S \leq 0.010\%$ 。



## 5、熔敷金属扩散氢含量及NDTT温度

落锤试验是将焊缝金属的一组（6~8个）试样（其试样表面带有的脆性裂纹源位于焊缝中心）中的每一个试样分别在一系列温度下施加单一冲击（落锤）载荷，以测定标准试样断裂时最高温度即无塑性转变（NDT）温度，它表征含有小裂纹的铁素体焊缝金属在动态加载屈服应力下发生脆断的最高温度。该试验实际是一种裂纹传播试验，也可称为止裂试验。



厚度大于**36mm**的标准抗拉强度下限值大于**540MPa**的高强钢，焊接接头拘束度较大，在焊缝金属中产生冷裂纹几率较高，因此用于此类产品的焊接材料熔敷金属扩散氢含量规定不大于5mL/100g。

对**此类设备**或设计温度低于**-40°C**压力容器用焊材，还应附加落锤试验，无塑性转变温度合格指标由设计文件规定，这主要从焊材角度考虑焊缝金属的止裂性能。



## GER-N27M焊条熔敷金属扩散氢含量（水银法）ml/100g

	要求值	实测值
GER-N27M	$\leq 5.0$	2.28



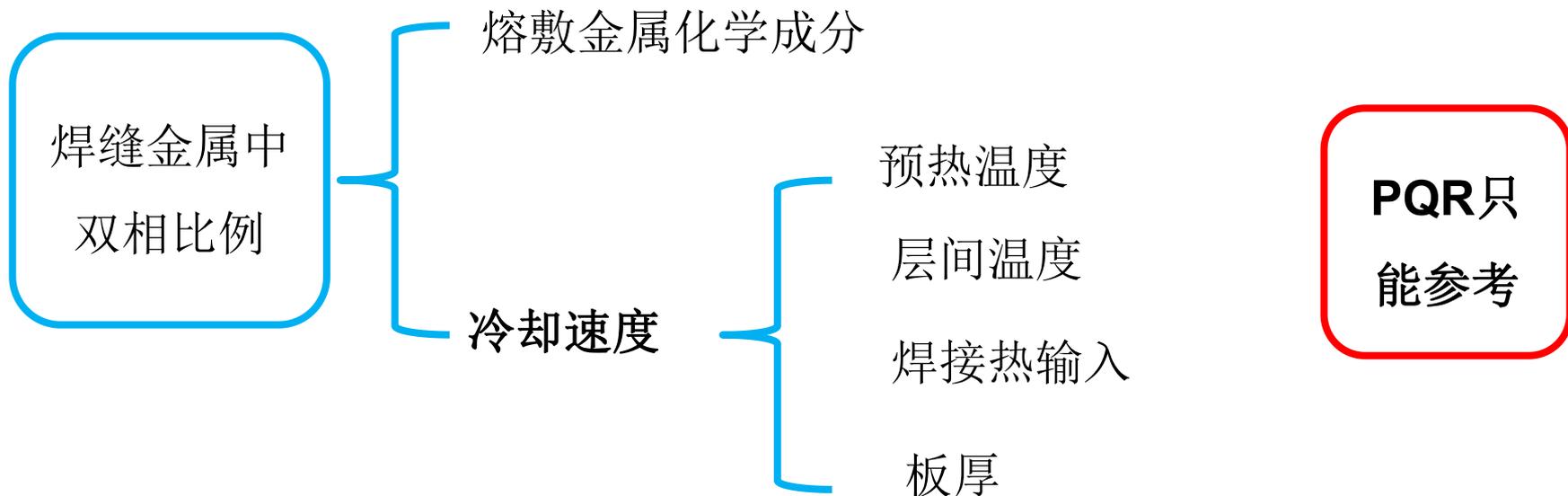
表 GER-N27M 焊条焊缝金属落锤试验结果

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, ×	<b>-60</b>



## 6、双相不锈钢用焊接材料熔敷金属

双相不锈钢钢板在标准中规定奥氏体-铁素体相比例40~60FN，规定“熔敷金属奥氏体-铁素体相比例宜控制在40~60FN”。





7、当需要时，用于压力容器受压元件焊接材料熔敷金属的高温性能、耐腐蚀性能等其它性能也不低于母材相应要求。

8、焊接用气体应分别符合GB/T 4842（《氩》）、GB/T 6052（《工业液体二氧化碳》）、GB/T 4844（《纯氮》）、GB/T 3863—2008（《工业氧》）、GB/T 3864（《工业氮》）的规定。HG/T4984 《焊接用混合气体 二氧化碳—氧 / 氩》、HG/T4985 《焊接用混合气体 氮 氩》、HG/T4986 《焊接用混合气体 氧 氩》。



## 制造篇

### Fe-5A、Fe-5C加氢反应器焊接材料

Fe-5A、Fe-5C类别钢用焊接材料基本参照了目前“2.25Cr-1Mo (0.25V) 钢制加氢反应器技术条件”来制订。

设计温度高于350 °C

熔敷金属需进行脆化评定

$VTr54 + \alpha \triangle VTr54 \leq 10$  或  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$



设计温度  
高于440°C

A类焊接  
接头

PWHT<sub>max</sub>

1/2T处

不加V钢

焊缝金属

焊接接头

$\sigma (510 \quad 650)$   
=210MPa

加V钢

焊缝金属

焊接接头

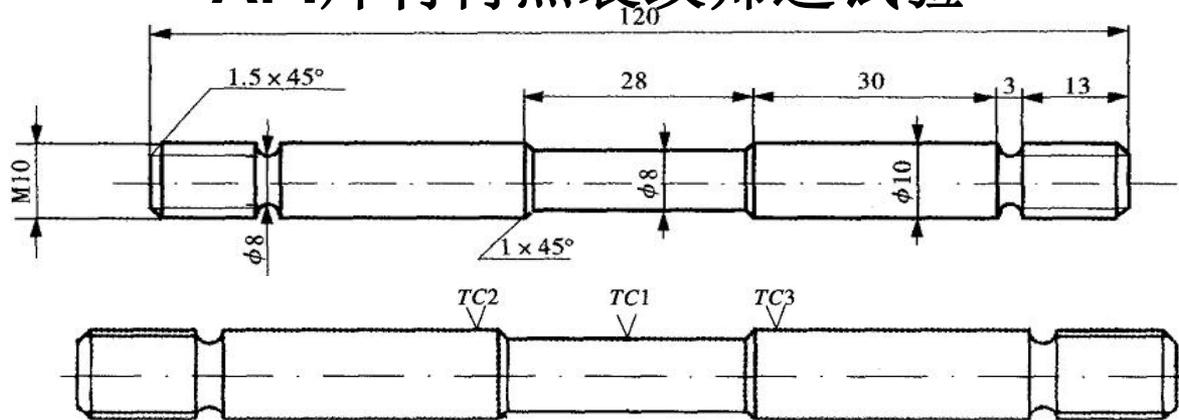
$\sigma (540 \quad 900)$   
=210MPa



由于Fe-5C类别材料焊缝金属具有再热裂纹倾向，主要是由焊剂中杂质元素引起的，每批次焊剂中杂质元素含量均不一样，因此对埋弧焊的熔敷金属应按批进行再热裂纹敏感性评定。

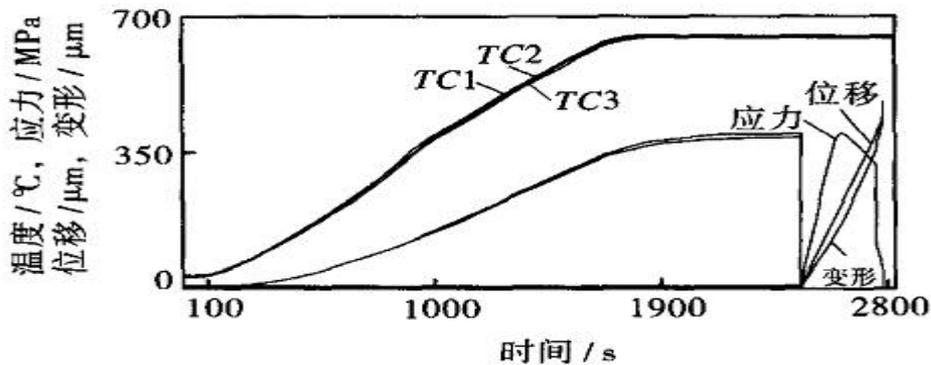


# API焊材再热裂纹筛选试验



高温拉伸试样

热电偶的位置  
(3个点的测  
温偏差不大于  
 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ )



典型高温缓慢  
拉伸试验过程  
(试样A)



## 在承压设备上使用药芯焊丝的建议

- 1、Cr-Mo耐热钢上不得使用；
- 2、低温容器上不得使用；
- 3、疲劳分析的压力容器上不得使用；
- 4、现场组装的压力容器不得使用；
- 5、不允许使用自保护型药芯焊丝；
- 6、对熔敷金属化学成分及力学性能加倍复验，且所有的性能与相对应的焊条一致；
- 7、优先药芯焊丝的品牌；



- 8、应加强药芯焊丝焊工焊前培训工作；
- 9、药芯焊丝的储存环境必须符合JB/T3223《焊接材料质量管理规程》，当药芯焊丝拆封后，如当天未使用完，应取下放回二级库采用塑料袋进行密封包装，第二天尽快使用完，超过两天的焊丝不得用于主体焊缝的焊接。 .



汇报完毕

谢谢