

管道焊接及无损检测技术交流

王维国13583847077

微信同号

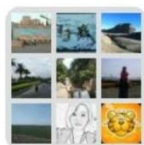
青岛泰捷焊接科技有限公司

内容提要

设计院网简介

- ✖ 设计院网（www.shejiyuan.com），一站式能源化工领域（技术、咨询、交易）服务平台。聚合行业技术资源，分享干货专业知识。本网站承接各类设计项目、招聘各类专业兼职设计人员、专家评聘和专业协同设计人员。
- ✖ 设计院网网址：<https://www.shejiyuan.com/>
- ✖ 设计院网公众号：更多资源，更多专业知识请关注公众号：设计院网
- ✖ 焊接及无损检测交流群：

焊接及无损检测交流群:



焊接及无损检测英派尔交流
群



该二维码7天内(5月29日前)有效，重新进入将
更新

内容提要

- ✘ 一、压力管道检测无损检测相关知识
- ✘ 二、整体热处理的设备为何不能再次焊接支架垫板，焊接后会有何后果？
- ✘ 三、异种钢的焊接问题？（例如：碳钢和不锈钢）
- ✘ 四、损伤模式识别介绍（二氧化碳、硫化氢、氢气、氢氧化钠、硫氢化钠、氯离子）
- ✘ 五、焊接工艺评定参数及控制要求

一、压力管道无损检测相关知识

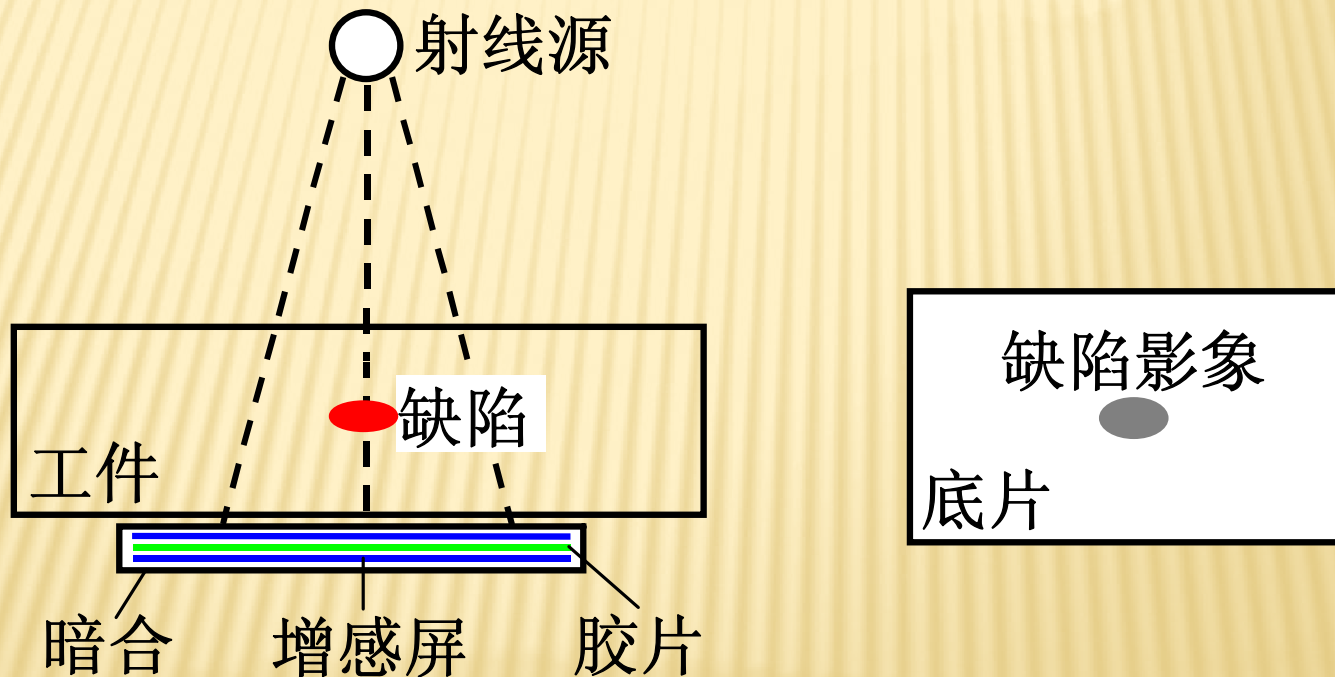
- × 1、国内已开展核准的无损检测项目（CG）（TSG Z7015-2015《特种设备无损检测机构核准规则》）
- × (1) 常规项目CG：包括4中无损检测方法：
 - × 射线检测（RT）
 - × 超声检测（UT）
 - × 磁粉检测（MT）
 - × 渗透检测（PT）
- × (2) 涡流检测（ECT）
- × (3) 衍射时差法超声检测（TOFD）
- × (4) 声发射检测（AE）
- × (5) 漏磁检测（MLF）

✘ 特种设备无损检测人员资格考核项目、方法分类：

无损检测方法、项目和级别

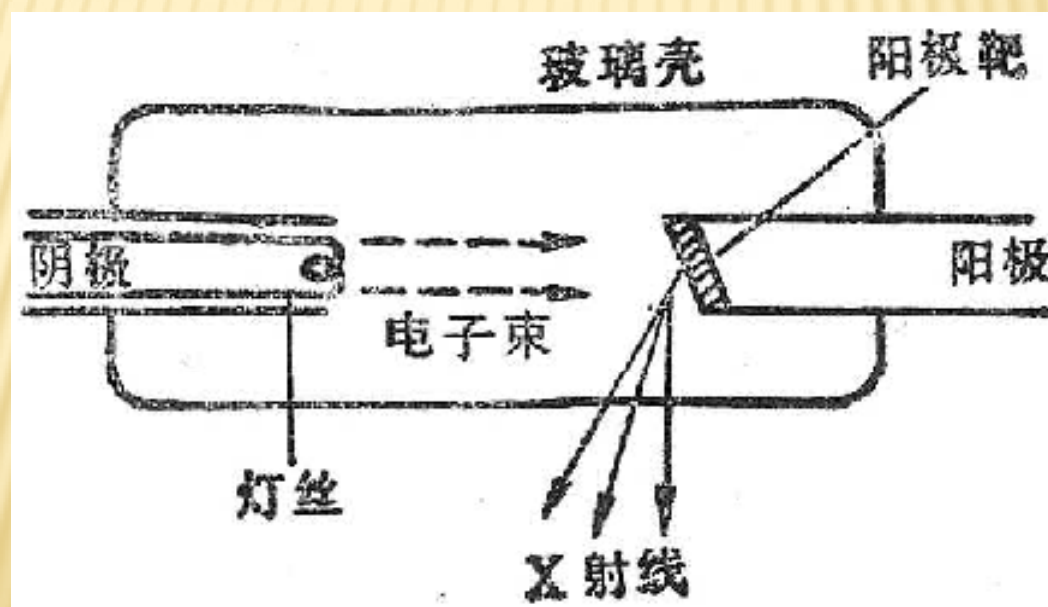
方 法	项 目	代 号	级 别
射线检测	射线胶片照相检测	RT	I、II、III
	射线数字成像检测	RT(DR+CR)	I、II、III
	射线检测(自动)	RT(AUTO)	I、II
超声检测	脉冲反射法超声检测	UT	I、II、III
	衍射时差法超声检测	TOFD	I、II、III
	超声检测(自动)	UT(AUTO)	I、II
磁粉检测	磁粉检测	MT	I、II、III
渗透检测	渗透检测	PT	I、II、III
声发射检测	声发射检测	AE	I、II、III
涡流检测	涡流检测	ECT	I、II、III
	涡流检测(自动)	ECT(AUTO)	I、II
漏磁检测	漏磁检测(自动)	MLF(AUTO)	I、II

- × 2、各种无损检测方法的原理及特点
- × (1) 射线检测 (RT)
- × 原理：射线透过被检物体时，有缺陷部位与无缺陷部位对射线上的吸收能力不同



✕ X射线的获得

- ✕ X射线是由一种特制的X射线管产生的，由阴极、阳极和高真空的玻璃或陶瓷外壳组成，阴极是一加热灯丝，用于发射电子，阳极靶是由耐高温的钨制成。工作时在两极之间加有高电压，从阴极灯丝发射的高速电子撞击到阳极靶上，其动能消耗于阳极材料原子的电离和激发，然后转变为热能，部分电子在原子核场中受到急剧阻止，产生所谓韧致X射线，即连续X射线。



✕ γ 射线的获得

- ✕ 放射性同位素是一种不稳定的同位素，处于激发态，原子核能级高于基级，向基级转变同时释放出 γ 射线，其能量等于两个能级间差。
- ✕ 射线检测中所用的 γ 射线源，是由核反应制成的人工放射源，应用较广的 γ 射线源有钴60、铱192、铯137、铊170等。

× 射线检测能力范围：

- × a 能检测出焊接接头中存在的未焊透、气孔、夹渣、裂纹和坡口未熔合等缺陷；
- × b 能检测出铸件中存在的缩孔、夹杂、气孔和疏松等缺陷；
- × c 能确定缺陷平面投影的位置，大小以及缺陷的性质；
- × d 射线检测的穿透厚度，主要由射线的能量确定。

× 射线检测局限性：

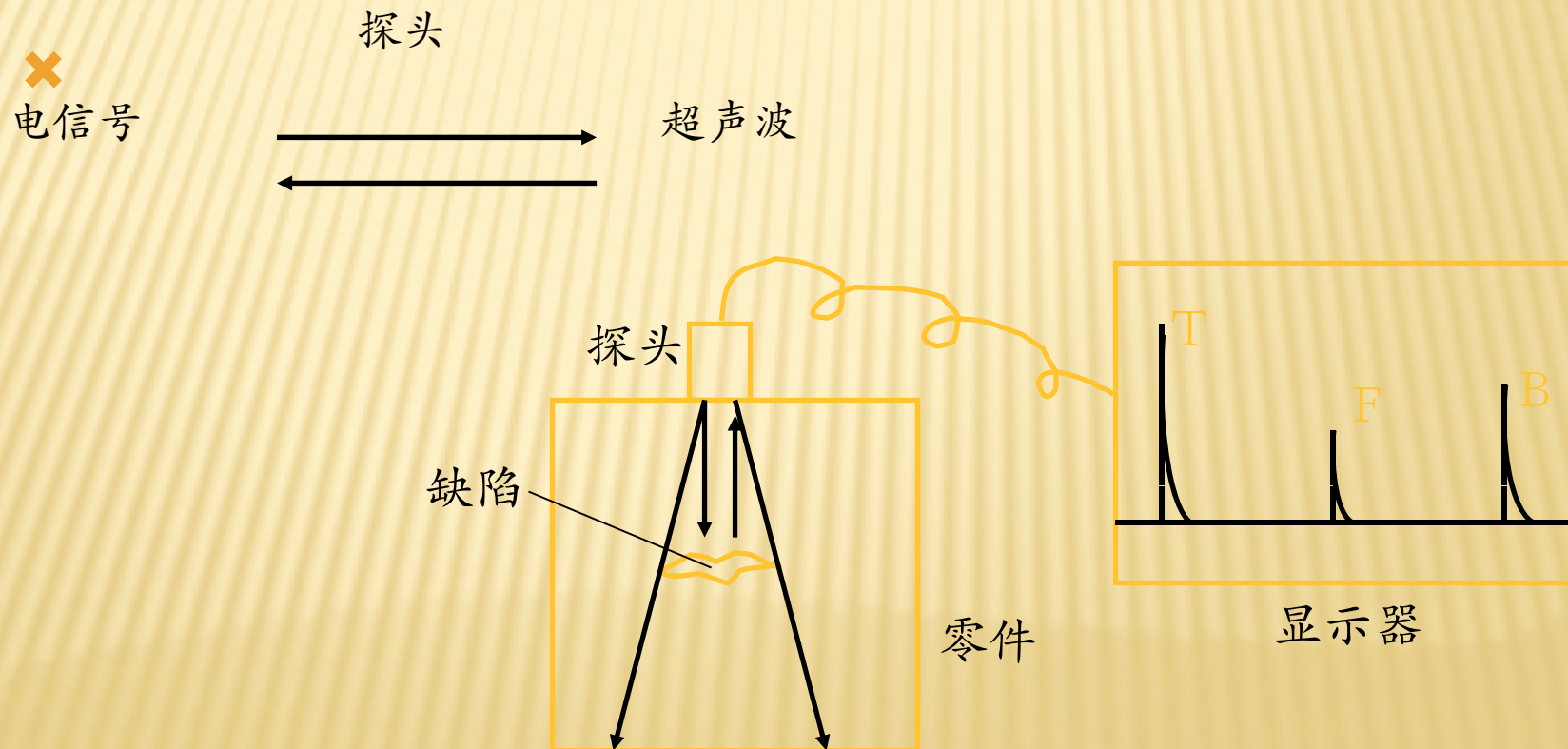
- × a 较难检测出厚锻件、管材和棒材中存在的缺陷；
- × b 较难检测出T型焊接接头和堆焊层中存在的缺陷；
- × c 较难检测出焊缝中存在的细小裂纹和层间未熔合；
- × d 当承压设备直径较大采用 γ 射线源进行中心曝光法时较难检测出焊缝中存在的面状缺陷；
- × e 较难确定缺陷的深度位置和自身高度。

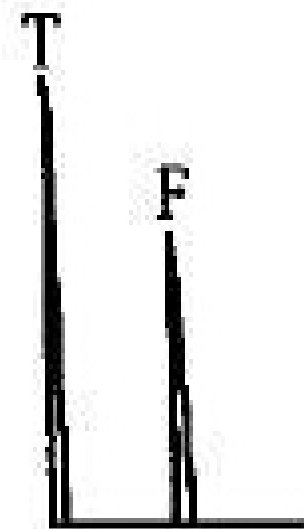
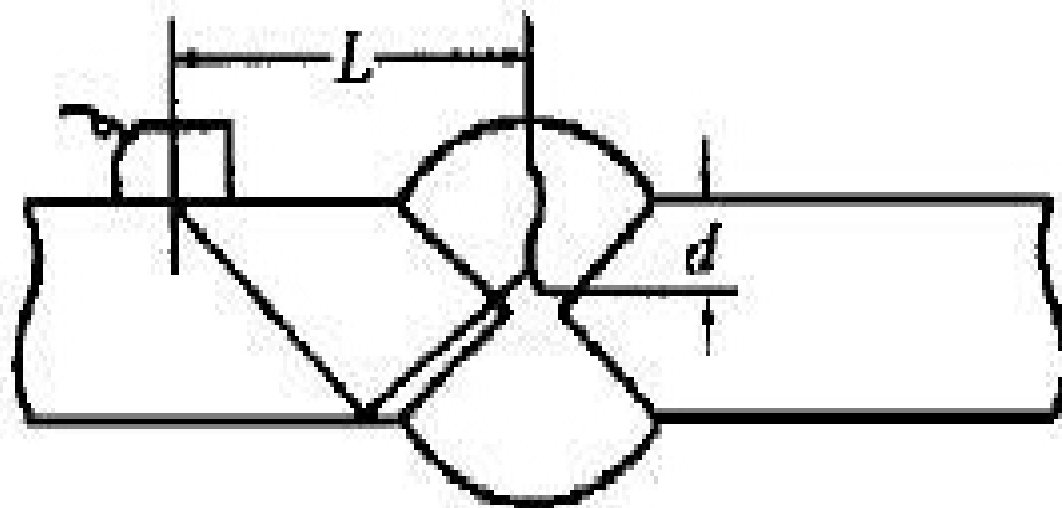
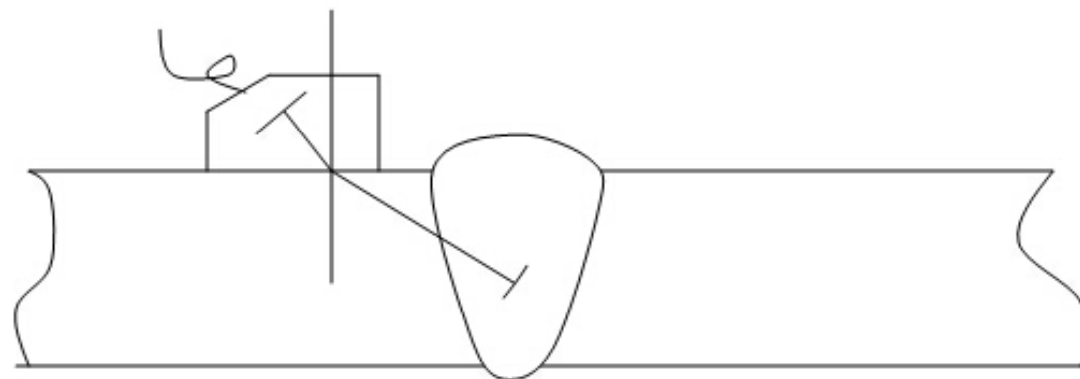
× (2) 超声检测 (UT)

× 基本原理

× 电信号→探头→超声波→零件——超声波发射；

× 零件内超声波→探头→电信号——超声波接收；





× 超声检测能力范围：

- × a 能检测出原材料（板材、复合板材、管材、锻件等）和零部件中存在的缺陷；
- × b 能检测出焊接接头内存在的缺陷，面状缺陷检出率较高；
- × c 超声波穿透能力强，可用于大厚度（100mm以上）原材料和焊接接头的检测；
- × d 能确定缺陷的位置和相对尺寸。

× 超声检测局限性：

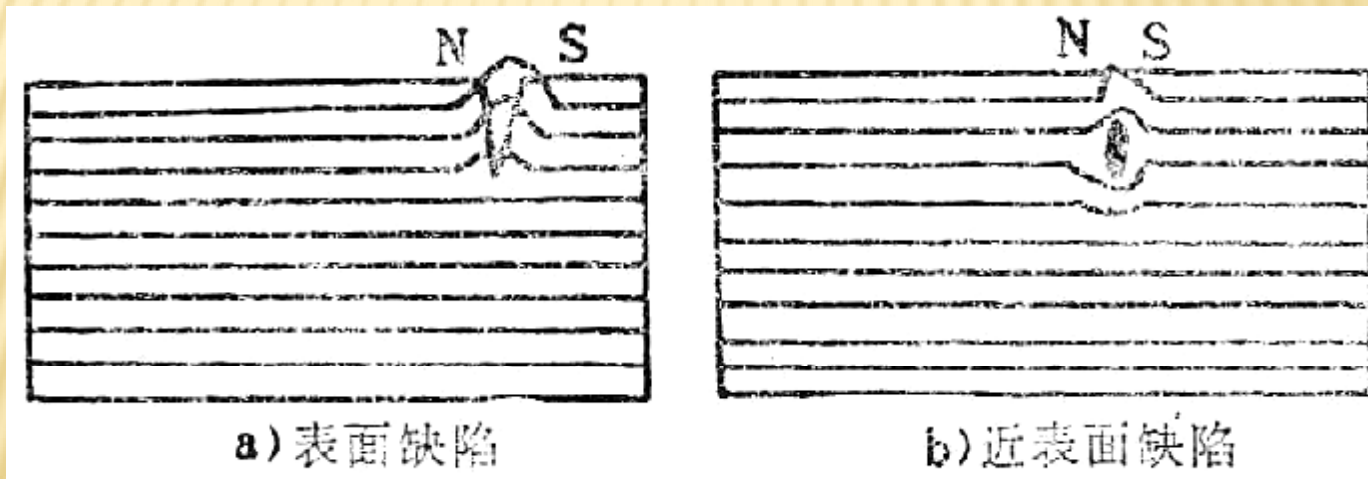
- × a 较难检测粗晶材料和焊接接头中存在的缺陷；
- × b 缺陷位置、取向和形状对检测结果有一定的影响；
- × c A型显示检测不直观，检测记录信息少；
- × d 较难确定体积型缺陷和面积型缺陷的性质。

× 3、磁粉检测 (MT)

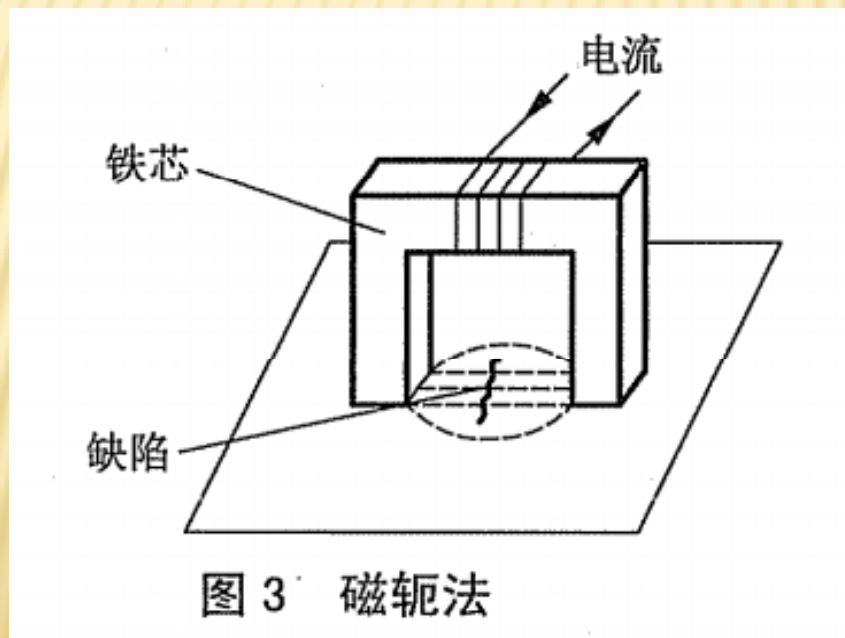
× 基本原理:

- × 磁粉检测是用于检测铁磁性材料(包括铁、镍、钴等)表面上或近表面的裂纹以及其它缺陷。
- × 磁粉检测对表面缺陷最灵敏，但对表面以下的缺陷随埋藏深度的增加检测灵敏度迅速下降。
- × 磁粉检测方法检测磁性材料的表面缺陷，比采用超声波或射线检测的灵敏度高，而且操作简便、结果可靠、价格便宜。
- × 因此，被广泛用于磁性材料表面和近表面缺陷的检测。
- × 铁磁性材料上存在非磁性层涂，只要其厚度不超过 $50\mu\text{m}$ ，对磁粉检测灵敏度影响很小。
- × 对于非磁性材料如有色金属、奥氏体不锈钢、非金属材料等并不能采用磁粉检测方法。

磁粉检测的原理是，当工件被磁化后，如果表面或近表面存在裂纹、冷隔等缺陷，便会在该处形成一漏磁场。施加磁粉后，漏磁场将吸引磁粉，而形成缺陷显示。



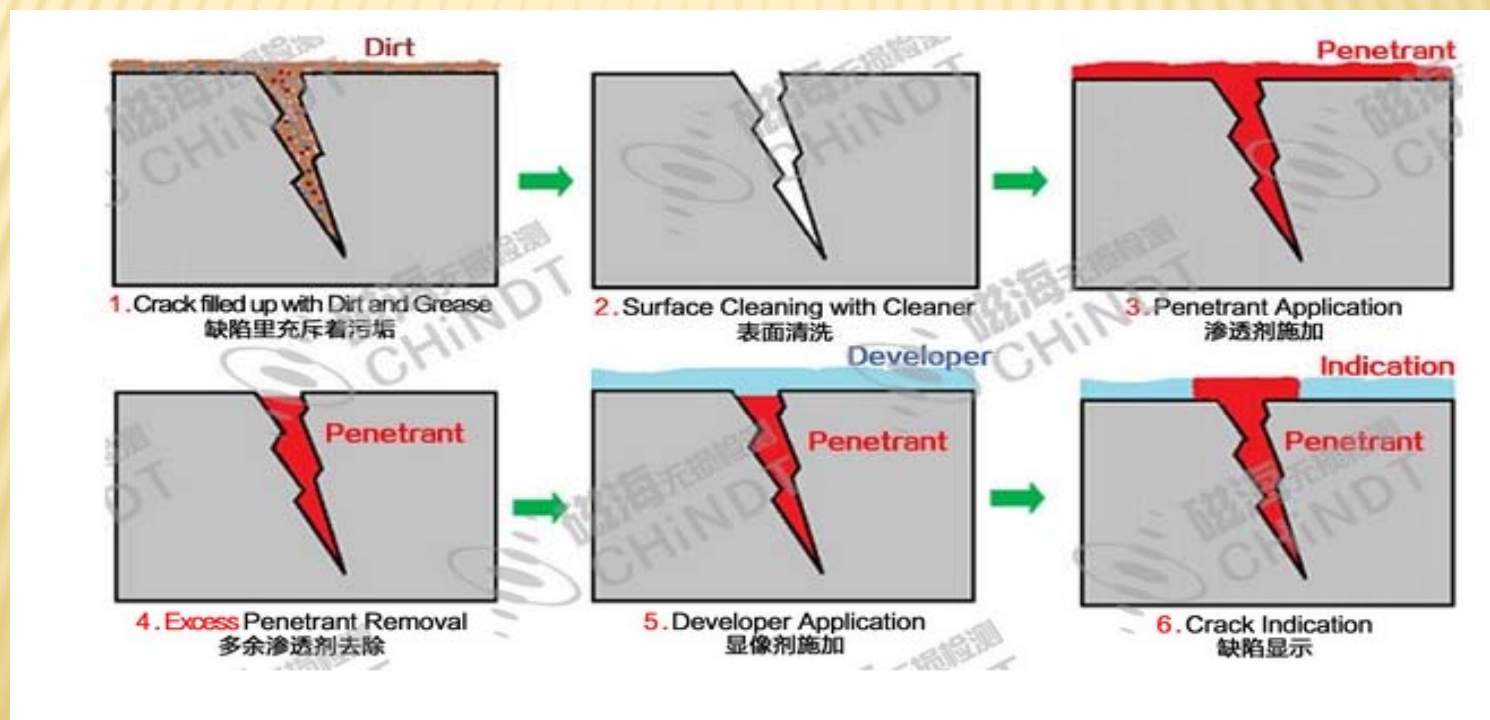
- ✗ 能力范围：
- ✗ 能检测出铁磁性材料的表面开口缺陷和近表面缺陷。
- ✗ 局限性：
- ✗ a 难以检测几何结构复杂的工件；
- ✗ b 不能检测非铁磁性材料工件。



✘ 4、渗透检测 (PT)

✘ 基本原理

- ✘ **液体渗透探伤**是利用物理学中毛细管渗透吸附现象的原理，将黄绿色荧光渗透液或有色非荧光渗透液，渗入工件开口缺陷的缝隙，经清洗、显像，从而检测工件表面开口缺陷的一种探伤方法，简称PT。



- × 渗透检测

- × 能力范围：

- × 能检测出金属材料中的表面开口缺陷，如气孔、夹渣、裂纹、疏松等缺陷。

- ×

- × 局限性：

- × 较难检测多孔性材料。

× 5、衍射时差法超声检测 (TOFD)

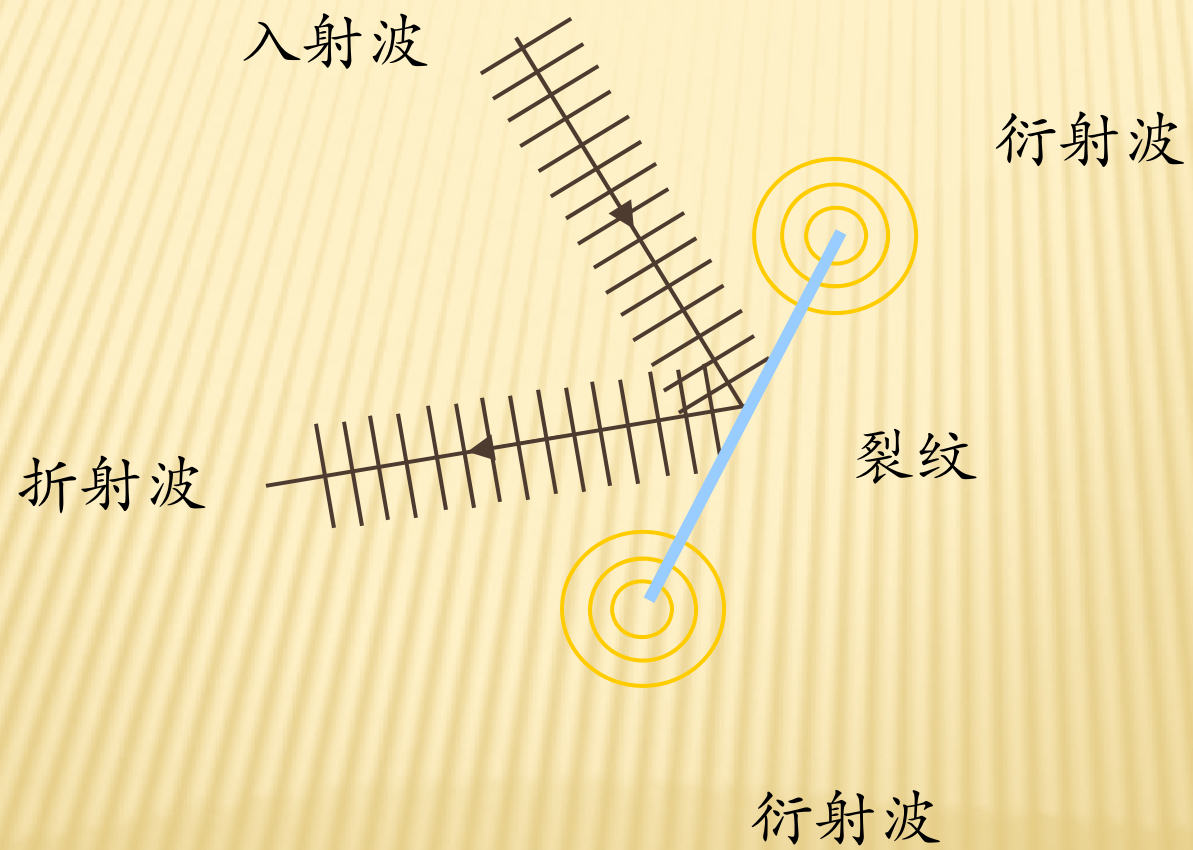
×

× 基本原理:

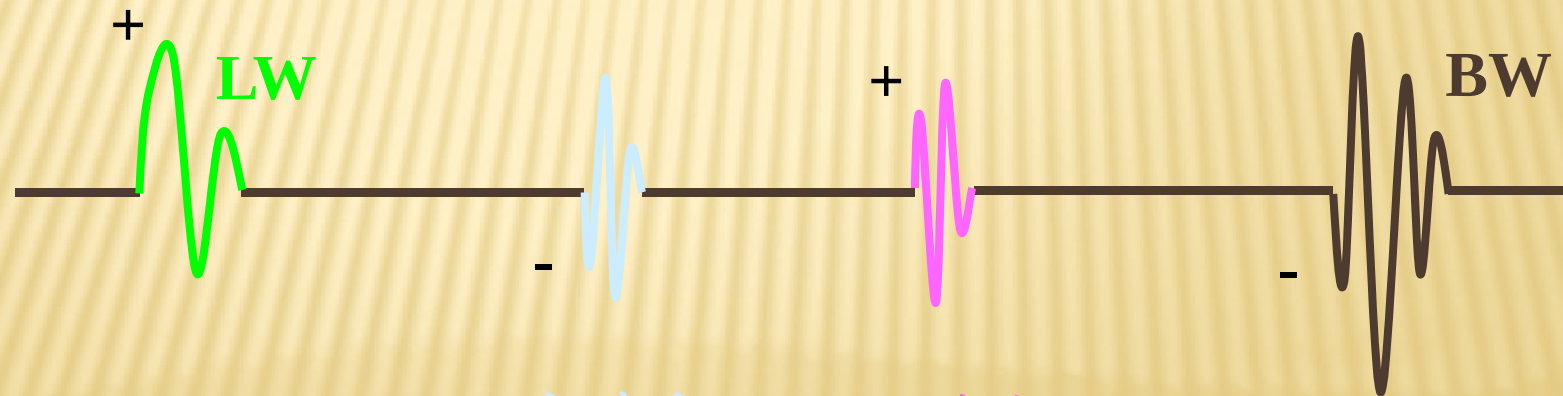
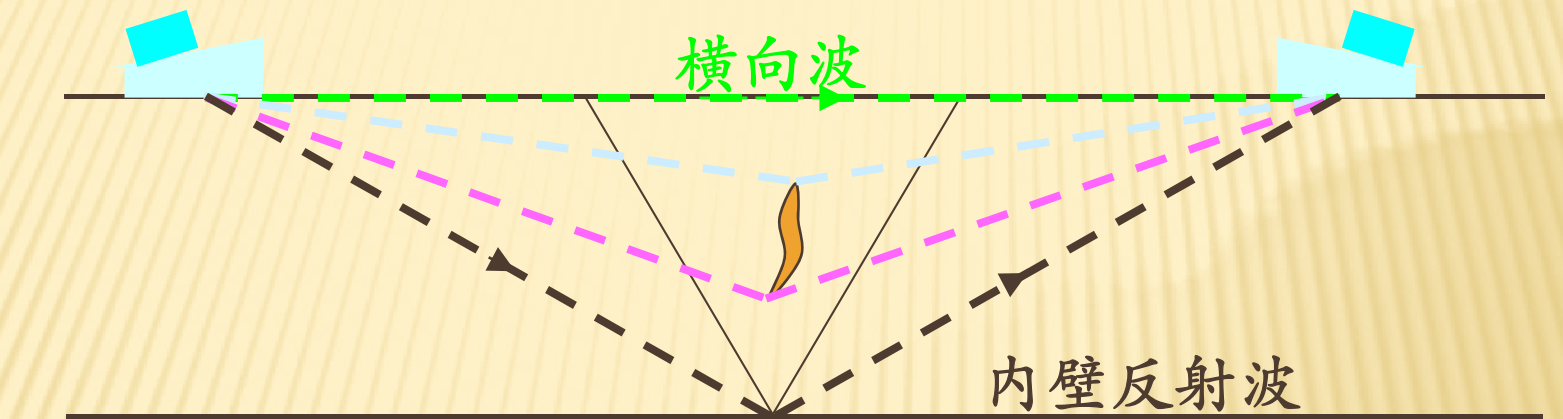
× 衍射时差法 (TOFD) 是一种依靠从待检试件内部结构（主要是指缺陷）的“端角”和“端点”处得到的衍射能量来检测缺陷的方法。

× 超声TOFD法可用于材料探伤、缺陷定位和定量。与常规的超声技术不同，TOFD法不用脉冲回波幅度对缺陷大小做定量测定，而是靠脉冲传播时间来定量。

衍射现象



相位变化

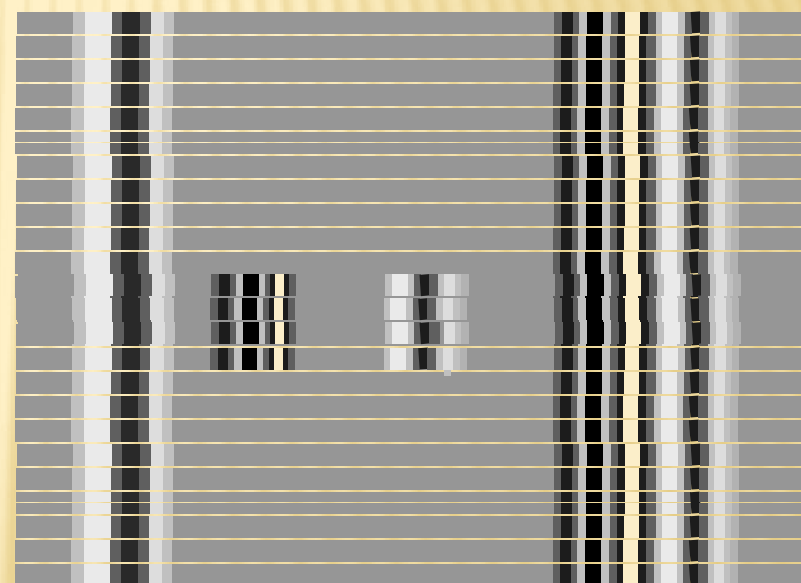
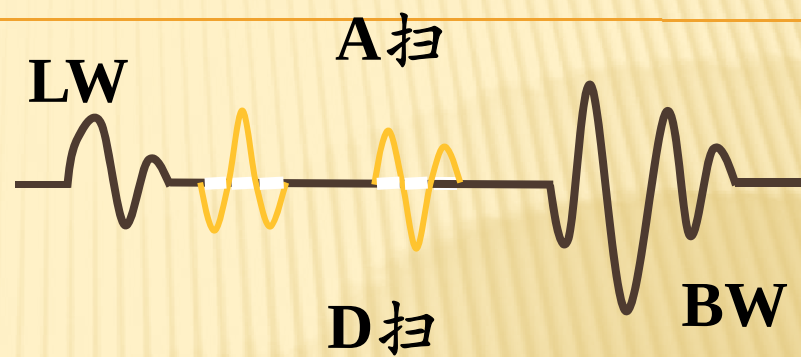
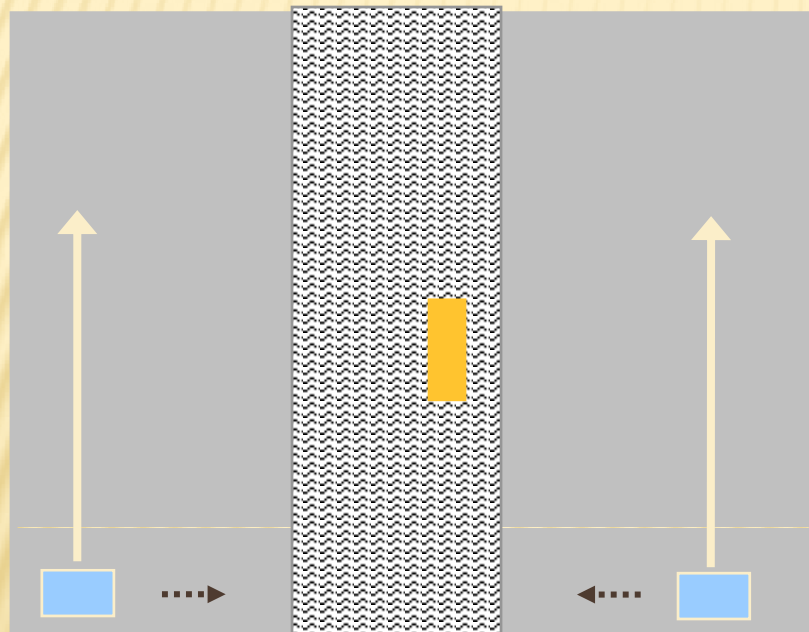
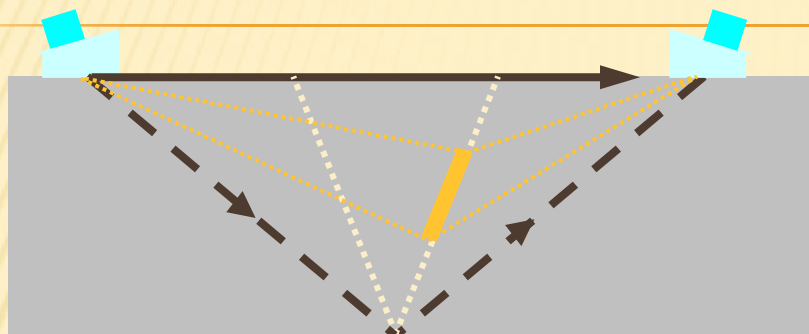


上端点

下端点

需要不检波的A扫来显示相位的变化

数据显示



上表面

内壁

× 衍射时差法超声检测

× 能力范围：

- × a 能检测出对接接头中存在的未焊透、气孔、夹渣、裂纹和未熔合等缺陷，且检出率较高；
- × b 能确定缺陷的深度、长度和自身高度；
- × c 厚壁工件缺陷检测灵敏度高；
- × d 检测结果较直观，检测数据可记录和储存。

✗ 局限性:

- ✗ a 较难检测出扫查面表面和近表面存在的缺陷;
- ✗ b 较难检测粗晶粒焊接接头中存在的缺陷;
- ✗ c 较难检测复杂结构工件的焊缝;
- ✗ d 较难确定缺陷的性质。

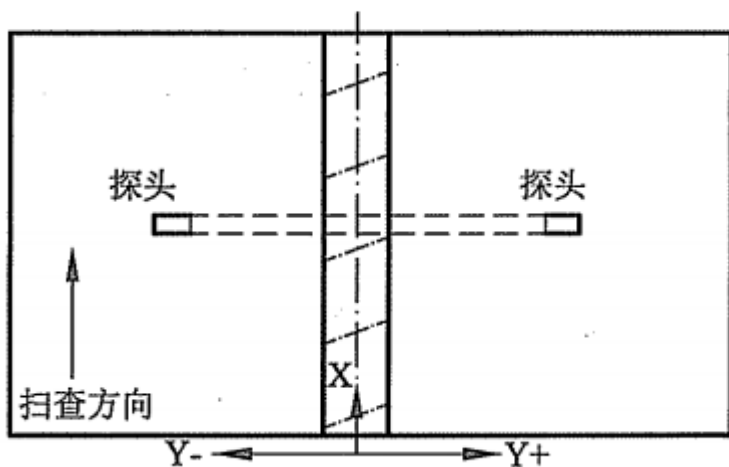


图2 非平行扫查

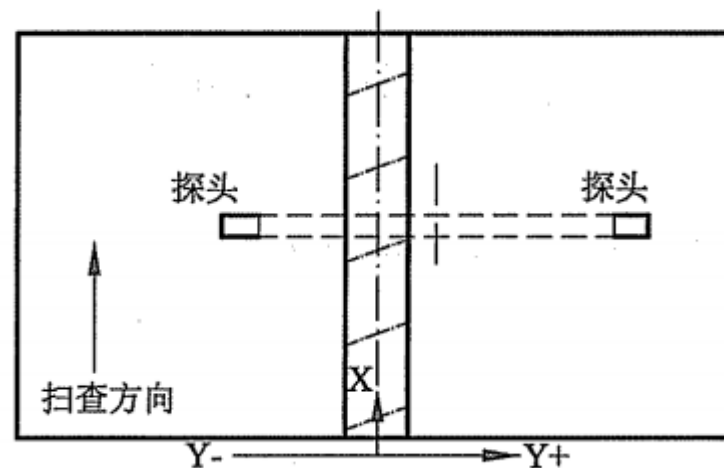


图3 偏置非平行扫查

6、各种无损检测方法的使用原则：

- ✘ 1、每一种无损检测方法都有其能力范围和局限性，且应保证足够的实施操作空间；
- ✘ 2、仅能检测表面开口缺陷和近表面缺陷的检测方法包括磁粉检测和涡流检测；磁粉检测主要用于铁磁性材料，涡流检测主要用于导电金属材料；
- ✘ 3、可检测材料中任何位置缺陷的无损检测方法包括射线检测、超声检测、衍射时差法超声检测和X射线数字成像检测。
- ✘ 一般而言，超声检测、衍射时差法超声检测对于表面开口缺陷和近表面缺陷检测能力低于磁粉检测、渗透检测或涡流检测。

- ✘ 4、对于铁磁性材料，为检测表面或仅表面缺陷，优先采用磁粉检测，确因结构形状等原因无法采用磁粉检测时方可采用其他无损检测方法；
- ✘ 5、当采用一种无损检测方法按不同检测工艺进行检测时，如果检测结果不一致，应以危险度大的评定级别为准；
- ✘ 6、当采用两种或两种以上检测方法对承压设备同一部位进行检测时，应按各自的方法评定级别。

- ✘ 7、国内相关法规对承压设备无损检测方法之间相互替代的具体规定

- ✘

- ✘ (1) TSG D0001-2009 《压力管道安全技术监察规程-工业管道》：

- ✘ 第八十五条

- ✘ (一) 名义厚度小于或等于30mm的管道，对接接头应采用射线检测，如果采用超声检测代替射线检测，需要取得设计单位的认可，并且检测数量应当与射线检测相同，管道名义厚度大于30mm的对接接头可以采用超声检测代替射线检测。

× TSG 21-2016 《固定式压力容器安全技术监察规程》

× 3.2.10.2.1 无损检测方法的选择:

×

× (1) 压力容器的对接接头应当采用射线检测（包括胶片感光或者数字成像）、超声检测[包括衍射时差法超声检测（TOFD）、可记录的脉冲反射法超声检测和不可记录的脉冲反射法超声检测];

× 当采用不可记录的脉冲反射法超声检测时，应采用射线检测或者衍射时差法超声检测进行附加局部检测；当大型压力容器的对接接头采用r射线全景曝光检测时，还应当另外采用X射线检测或者衍射时差法超声检测进行50%的附加局部检测，如果发现超标缺陷，则应当进行100%X射线检测或者衍射时差法超声检测复查；

- ✘ (2) 有色金属制压力容器对接接头应当优先采用X射线检测；
- ✘ (3) 焊接接头的表面裂纹应当优先采用表面无损检测；
- ✘ (4) 铁磁性材料制压力容器焊接接头的表面无损检测应当优先采用磁粉检测。

二、整体热处理的设备为何不能再次焊接支架垫板，焊接后会有何后果？

× 1、焊后热处理种类

× 按照NB/T47014-2011《承压设备用焊接工艺评定》焊后热处理类别如下：

× 对于低碳钢、低合金钢、耐热钢、低温钢、马氏体不锈钢、双相不锈钢

× 1) 不进行焊后热处理

× 2) 低于下转变温度进行焊后热处理

× 3) 高于上转变温度进行焊后热处理（如正火）

× 4) 先在高于上转变温度，而后在低于下转变温度进行焊后热处理（如正火或淬火后回火）

× 5) 在上下转变温度之间进行焊后热处理

× 对于奥氏体不锈钢、有色金属，其焊后热处理类别为：

× 1) 不进行焊后热处理

× 2) 在规定的温度范围内进行焊后热处理

× 2、整体热处理的方法

× 低于下转变温度的热处理（消除应力热处理）

× 无金相组织的变化

× 3、整体热处理的目的

× 1) 消除焊接残余应力；

× 2) 有利于扩散氢的逸出。

× 4、焊接过程

× 液相-固相-固态相变-室温组织（碳钢、低合金钢）

× 应力种类：组织应力、热应力

× 5、整体热处理后的设备施焊造成的影响

- × 1) 重新产生焊接应力
- × 2) 形成淬硬组织（如马氏体、贝氏体）
- × 3) 重新产生扩散氢
- × 4) 产生焊接冷裂纹

× 6、整体热处理后施焊的处理方法

- × 1) 重新进行整体热处理；
- × 2) 对焊接部位周围一定范围进行局部热处理
- × 注：上述处理方法均应有相应的焊接工艺评定支持。

× 7、整体热处理后施焊的要求（焊接返修）

× GB150.4-2011规定：

- × 7.4.3 下列容器在焊后热处理后如进行任何焊接返修，应对返修部位重新进行焊后热处理：
 - × a) 盛装毒性程度为极度或高度危害介质的容器；
 - × b) Cr-Mo钢制容器；
 - × c) 低温容器
 - × d) 图样注明有应力腐蚀的容器

- ✘ 7.4.4 热处理后的返修需征得客户同意。除7.3.3外要求焊后热处理的容器，如在热处理后进行返修，当返修深度小于钢材厚度的 $\frac{1}{3}$ ，且不大于13mm时，可不再进行焊后热处理。
- ✘ 返修焊接时，应先预热并控制每一焊层厚度不得大于3mm，且应采用回火焊道。
- ✘ 在同一截面两面返修时，返修深度应为两面返修的深度之和。
- ✘ 7.4.5 有特殊耐腐蚀要求的容器或受压元件，返修部位仍需保证不低于原有的耐腐蚀性能。

三、异种钢的焊接问题

× 1. 异种钢焊接的概念

- × 广义概念：两种牌号不同的钢之间的焊接称之为异种钢焊接。
- × 异种钢焊接接头又可分为两种情况：
- × 第一类为同类异种钢组成的接头：
- × 这类接头的两侧母材虽然化学成分不同，但都属于铁素体类钢或都属于奥氏体类钢；
- × 第二类接头为异类异种钢组成的焊接接头：
- × 即接头两侧的母材不属于同一类钢，例如一侧为铁素体类钢，另一侧为奥氏体类钢（如奥氏体不锈钢）。
- × 注：对于母材都属于铁素体类钢，其焊缝采用奥氏体不锈钢焊条或镍基焊条焊接的接头，也属于第二类接头。

× 2.焊接主要问题

× 1) 焊接应力:

- × 在焊接热循环或使用温度下，由于两种材料抗膨胀系数和导热性不同（或热膨胀系数和导热性近似，但由于强度等级不同而带来的形变差异）引起的热应力，焊接后残余应力较大且在热处理后不能消除。碳钢、低合金钢和珠光体耐热体的热膨胀系数大体相同，而奥氏体不锈钢热膨胀系数比碳钢等材料大30~50%，而导热系数却只有碳钢等材料的1/3。

× 2) 焊缝金属化学成分的不均匀:

- × 如碳钢+耐热钢，碳钢+低温钢，碳钢+低合金钢，碳钢+奥氏体不锈钢，低合金钢+耐热钢，低合金钢+奥氏体不锈钢

- ✗ 3) 焊缝金属金相组织发生变化

- ✗ 碳钢+奥氏体不锈钢，低合金钢+奥氏体不锈钢，耐热钢+奥氏体不锈钢

- ✗ 在焊接热循环的影响下，接头内的各区域组织是不同的，而且在个别区域内还会出现复杂的组织结构。

- 4) 焊接时合金元素的稀释

- 由于合金元素的稀释，会出现对裂纹相当敏感的马氏体组织。 例如：当低碳钢、低合金钢和不锈钢焊接时，若用一般不锈钢焊材，由于焊缝金属被低碳钢或低合金钢稀释，往往会产生奥氏体和马氏体组织，而熔合线附近，会产生马氏体带；

- 若用低碳钢或低合金钢焊材，不锈钢一侧被稀释部分及焊缝金属会产生马氏体和奥氏体组织，从而引起开裂的危险。

- × 5) 碳迁移过渡层的形成:
- × 当铁素体钢和奥氏体钢焊接后，焊接接头重复加热或高温使用时，在铁素体钢一侧，由于碳原子的迁移（扩散），使含碳量减少而形成软化带；
- × 而在奥氏体钢一侧却由于碳的过剩而形成硬化带，对于焊接碳稳定化元素不同的材料时，也应注意高温运行条件下的脱碳影响焊接接头强度；
- × 奥氏体钢一侧由于碳的扩散造成含碳量增加，影响其耐腐蚀性能。
- × 注：各元素对奥氏体不锈钢性能的影响
- × 注1: 碳对奥氏体不锈钢性能的影响：
- × 碳在奥氏体不锈钢中是强烈形成并稳定奥氏体且扩大奥氏体区的元素，碳形成奥氏体的能力约为镍的30倍；

- ✘ 奥氏体不锈钢中碳含量增加，强度增加；还能提高奥氏体不锈钢在高浓氯化物中的耐应力腐蚀性能。
- ✘ 但是在奥氏体不锈钢中，碳通常被视为有害元素，因为在焊接或被加热到 $450\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，碳可以和钢中的Cr元素形成 Cr_2C_6 碳化物，导致耐晶间腐蚀性能下降。
- ✘ 注2：铬对奥氏体不锈钢性能的影响
- ✘ 在奥氏体不锈钢中，铬是强烈形成并稳定铁素体的元素，可以缩小奥氏体区域；
- ✘ 铬能增大碳的溶解度而降低铬的贫化度，有利于提高奥氏体不锈钢的耐晶间腐蚀能力；
- ✘ 铬还能有效地改善奥氏体不锈钢的耐点蚀及缝隙腐蚀性能。
- ✘ 铬对奥氏体不锈钢性能影响最大的是耐蚀性。

- × 注3：镍对奥氏体不锈钢性能的影响
- × 镍是奥氏体不锈钢中主要合金元素，其主要作用是：
- × 形成并稳定奥氏体，获得完全奥氏体组织；
- × 使奥氏体不锈钢具有良好的强度、塑性和韧性；
- × 使奥氏体不锈钢具有优良的冷热加工性能、可焊性及耐低温、无磁性；
- × 可以显著降低奥氏体不锈钢的冷加工硬化倾向；
- × 由于镍能改善铬的氧化膜成分、结构和性能，从而提高奥氏体不锈钢耐氧化性介质的性能。
- 整个异种钢焊接接头是一个成分、组织和性能严重不均的非均匀体，是构件的局部薄弱地带，这种非均匀体在力学检验和运行中均会出现应力、变形集中和失效的局域化，因此在选择焊接材料时，要充分考虑其焊接工艺性、常温力学性能和长期运行性能，更重要的是要考虑其长期运行性能。

× 3、异种钢焊接注意事项

× 1) 焊接材料的选择的一般原则

- × a) 焊缝金属性能只需要符合两种母材中的一种，即可认为满足使用技术要求。一般情况下，选用焊材使焊缝金属的力学性能及其他性能不低于母材中性能较低一侧的指标，即认为满足了技术要求。但在某些情况下还应从焊接工艺性能（如抗裂性等）方面来考虑。
- × b) 结构钢的异种钢号焊接（同类异种钢焊接）时，对相同强度等级的结构钢焊条，一般应选用抗裂性能好的低氢焊条。对于金相组织差别比较大的异种钢接头（异类异种钢焊接），如珠光体-奥氏体异种钢接头，则必须充分考虑填充金属受到稀释后焊接接头性能仍然得到保障。
- × c) 在满足性能要求的条件下，选用工艺性能好、价低、易得的焊材。
- × d) 对于异类异种钢接头，一般均选用高铬镍奥氏体不锈钢焊条或镍基合金焊条。对于工作条件苛刻的重要接头，首推选用**镍基合金焊条**，因为虽然它价格较贵，但可以减少或避免碳迁移，且其焊缝金属的线膨胀系数介于铁素体钢和奥氏体钢之间，对接头的组织及力学性能都有好处。

- × 2) 熔合比的控制

- × 影响熔合比的因素:

- × a) 预热温度

- × b) 焊接工艺参数: 焊接电流、焊接速度

- × c) 焊接坡口尺寸

- × d) 焊接电弧的角度

- × 3) 异种钢焊缝金属成分、组织的控制

- × 异种钢焊接由于选用的焊材与母材不同, 需要推算焊缝金属的成分、组织及性能。

- × 可通过舍弗勒相图来实现

- × 奥氏体形成元素的镍当量计算公式:

$$Nieq = wNi + 30wC + 0.5wMn$$

铁素体形成元素的铬当量计算公式:

$$Creq = wCr + wMo + 1.5wSi + 0.5wNb$$

也可以由母材、填充金属的成分和稀释率求出焊缝金属的成分。

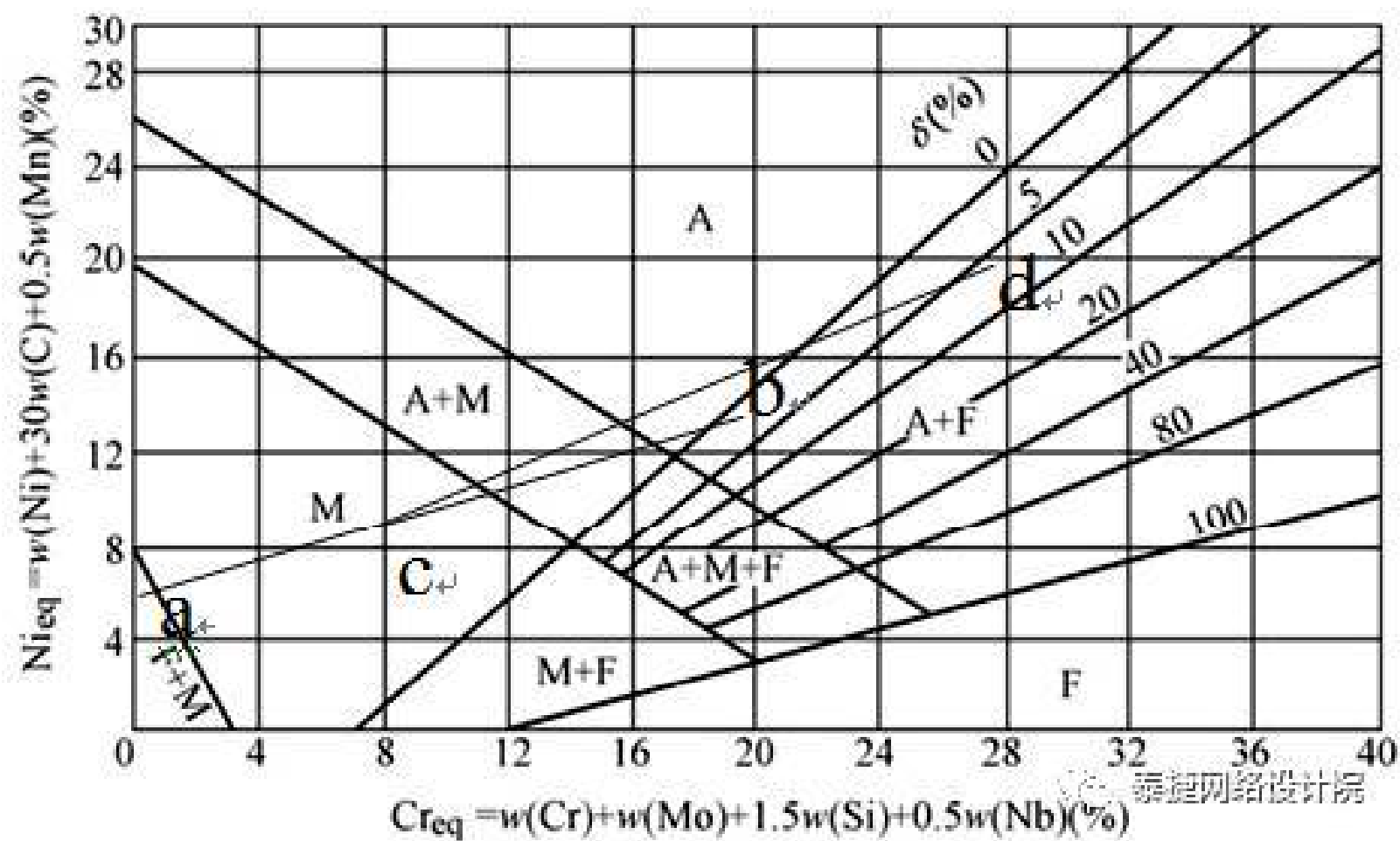


图1 舍弗勒相图

× 四、损伤模式识别

× 根据GB/T30579-2014《承压设备损伤模式识别》

× 损伤模式分为：腐蚀减薄、环境开裂、材质劣化、机械损伤，无法归入上述损伤模式或非单一损伤的归入其他损伤

× 腐蚀减薄：在腐蚀性介质的作用下金属发生损失造成的壁厚减薄；

× 环境开裂：在腐蚀性介质作用下材料发生的开裂；

× 材质劣化：由于服役环境作用下材料微观组织或力学性能发生了明显退化；

× 机械损伤：材料在机械载荷或热载荷的作用下，发生的承载能力下降。

表 A.1 腐蚀减薄

序号	损 伤	GB T 26610.1- 2011 附录 A 的对应内容		本标准 章条号	本标准附录 B 的 对应编号
1	盐酸腐蚀	表 A.1	盐酸腐蚀	4.1	②
2	硫酸腐蚀	表 A.1	硫酸腐蚀	4.2	⑥
3	氢氟酸腐蚀	表 A.1	氢氟酸腐蚀	4.3	⑫
4	磷酸腐蚀	表 A.1	磷酸腐蚀	4.4	无此项
5	二氧化碳腐蚀	表 A.1	二氧化碳腐蚀	4.5	⑩
6	环烷酸腐蚀	表 A.1	环烷酸腐蚀	4.6	⑪
7	苯酚腐蚀	表 A.1	苯酚(石炭酸)腐蚀	4.7	无此项
8	有机酸腐蚀	无此项	无此项	4.8	无此项
9	高温氧化腐蚀	表 A.1	氧化	4.9	⑪
10	大气腐蚀(无隔热层)	表 A.1	大气腐蚀	4.10	无此项
11	大气腐蚀(有隔热层)	表 A.1	保温层下腐蚀(CUI)	4.11	⑥
12	冷却水腐蚀	表 A.1	冷却水腐蚀	4.12	⑨
13	土壤腐蚀	表 A.1	土壤腐蚀	4.13	无此项
14	微生物腐蚀	表 A.1	微生物引起的腐蚀	4.14	⑪
15	锅炉冷凝水腐蚀	表 A.1	锅炉冷凝水腐蚀	4.15	③
16	碱腐蚀	表 A.1	碱性腐蚀	4.16	⑬
17	燃灰腐蚀	表 A.1	燃灰腐蚀	4.17	⑭
18	烟气露点腐蚀	表 A.1	烟气露点腐蚀	4.18	③
19	氯化铵腐蚀	表 A.1	氯化铵腐蚀	4.19	⑤
20	胺腐蚀	表 A.1	胺腐蚀	4.20	⑤
21	高温硫化物腐蚀(无氢气环境)	表 A.1	高温硫化物腐蚀(不含 H ₂)	4.21	①
22	高温硫化物腐蚀(氢气环境)	表 A.1	高温硫化物腐蚀(含 H ₂)	4.22	①
23	酸性水腐蚀(碱式酸性水)	表 A.1	硫氢化铵腐蚀(碱式酸性水)	4.23	⑦
24	酸性水腐蚀(酸式酸性水)	表 A.1	酸性水腐蚀(酸性)	4.24	⑬
25	甲铵腐蚀	无此项	无此项	4.25	⑭

表 A.2 环境开裂

序号	损 伤	GB/T 26610.1—2011 附录 A 的对应内容		本标准 章条号	本标准附录 B 的 对应编号
1	氯化物应力腐蚀开裂	表 A.2	氯化物开裂	5.1	③
2	碳酸盐应力腐蚀开裂	表 A.2	碳酸盐应力腐蚀开裂	5.2	⑪
3	硝酸盐应力腐蚀开裂	表 A.2	硝酸盐应力腐蚀开裂	5.3	无此项
4	碱应力腐蚀开裂	表 A.2	碱应力腐蚀开裂	5.4	⑬
5	氨应力腐蚀开裂	表 A.2	氨开裂	5.5	⑮
6	胺应力腐蚀开裂	表 A.2	胺开裂	5.6	⑯
7	湿硫化氢破坏	表 A.2	氢致开裂与应力导向开裂	5.7	②
8	氢氟酸致氢应力开裂	表 A.2	氢应力开裂——HF(氢氟酸)	5.8	④
9	氢氰酸致氢应力开裂	无此项	无此项	5.9	无此项
10	氢脆	表 A.2	氢脆	5.10	⑥
11	高温水应力腐蚀开裂	无此项	无此项	5.11	无此项
12	连多硫酸应力腐蚀开裂	表 A.2	连多硫酸腐蚀	5.12	⑤
13	液体金属脆断	表 A.3	液态金属脆化	5.13	⑦

表 A.3 材质劣化

序号	损 伤	GB/T 26610.1—2011 附录 A 的对应内容		本标准 章条号	本标准附录 B 的 对应编号
1	晶粒长大	表 A.3	晶粒增长	6.1	无此项
2	渗氮	表 A.3	渗氮	6.2	无此项
3	球化	表 A.3	软化(球化)	6.3	无此项
4	石墨化	表 A.3	石墨化	6.4	⑮
5	渗碳	表 A.3	渗碳	6.5	⑭
6	脱碳	表 A.3	脱碳	6.6	⑰
7	金属粉化	表 A.3	金属粉化	6.7	⑱
8	σ 相脆化	表 A.3	σ 相脆化	6.8	⑫
9	475 ℃ 脆化	表 A.3	475 ℃ 脆化	6.9	⑬
10	回火脆化	表 A.3	回火脆化	6.10	⑯
11	辐照脆化	无此项	无此项	6.11	无此项
12	钛氢化	表 A.3	钛氢化	6.12	⑮
13	再热裂纹	表 A.3	再热裂纹	6.13	⑮
14	脱金属腐蚀	表 A.3	脱金属腐蚀	6.14	⑩
15	敏化-晶间腐蚀	无此项	无此项	6.15	⑮

表 A.4 机械损伤

序号	损 伤	GB T 26610.1-2011 附录 A 的对应内容		本标准 章条号	本标准附录 B 的 对应编号
1	机械疲劳	表 A.4	机械疲劳	7.1	⑤
2	热疲劳	表 A.4	热疲劳	7.2	⑫
3	振动疲劳	表 A.4	振动引起的疲劳	7.3	无此项
4	接触疲劳	无此项	无此项	7.4	无此项
5	机械磨损	无此项	无此项	7.5	无此项
6	冲刷	无此项	无此项	7.6	⑥
7	汽蚀	表 A.4	汽蚀	7.7	无此项
8	过载	表 A.4	过载	7.8	无此项
9	热冲击	表 A.4	热冲击	7.9	⑦
10	蠕变	表 A.4	蠕变/应力断裂	7.10	③
11	应变时效	表 A.3	应变老化	7.11	无此项

表 A.5 其他损伤

序号	损 伤	GB/T 26610.1—2011 附录 A 的对应内容		本标准 章条号	本标准附录 B 的 对应编号
1	高温氢腐蚀	表 A.3	高温氢腐蚀	8.1	⑩
2	腐蚀疲劳	表 A.4	腐蚀疲劳	8.2	无此项
3	冲蚀	表 A.1	冲蚀/冲蚀腐蚀	8.3	⑫
4	蒸汽阻滞	表 A.4	蒸汽阻滞	8.4	⑪
5	低温脆断	表 A.4	脆断	8.5	⑪
6	过热	表 A.4	短时过热	8.6	③
7	耐火材料退化	表 A.4	耐火材料退化	8.7	⑭
8	铸铁石墨化腐蚀	表 A.1	石墨腐蚀	8.8	无此项
9	微动腐蚀	无此项	无此项	8.9	无此项

× 1、二氧化碳腐蚀：

× 腐蚀机理： $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{FeCO}_3 + \text{H}_2$

× 损伤形态：

× a 形成液相的部位会发生腐蚀，二氧化碳从气相冷凝出来的部位容易发生腐蚀；

× b 腐蚀区域减薄，可能形成蚀坑或蚀孔；

× c 在紊流区，碳钢发生腐蚀时可能形成较深的点蚀坑和沟槽；

× d 腐蚀一般发生在紊流和液体冲击区域，有时也会发生在管道焊缝根部。

× 受影响的材料：

× 碳钢、低合金钢

× 主要影响因素:

- × a PH值: 二氧化碳分压增高, PH值下降, 腐蚀性增强;
- × b 温度: 温度未达到溶液中二氧化碳气体逸出温度前, 随温度的升高, 腐蚀速率增大;
- × c 如果铬含量未达到12%以上, 增加钢中铬含量不能明显提高耐腐蚀能力。

× 易发生的装置或设备:

- × a 所有锅炉给水和蒸汽冷凝系统;
- × b 制氢装置: 在变换器排出系统中, 当排出气流温度降至露点 (大约149℃) 以下时, 腐蚀比较常见, 根据已知检测结果, 腐蚀速率可高达25.4mm/年。
- × c 二氧化碳脱除装置: 再生器顶部系统;
- × d 空分装置: 压缩空气经冷却后的低点凝液部位;
- × e 油/气田集输的油气管道。

× 主要预防措施:

- × a 缓释剂: 在蒸汽冷凝水系统中加入缓释剂;
- × b PH值: 液相的PH值提高到6.0以上可有效降低蒸汽冷凝水系统的腐蚀速率;
- × c 选材: 300系列不锈钢可有效抵抗二氧化碳腐蚀, 能用于产生二氧化碳和脱除二氧化碳设备; 同时应注意避免300系列不锈钢在现场焊接施工可能造成的敏化。400系列不锈钢和双相不锈钢也具有良好的耐腐蚀性。

✕ 2、氢氧化钠腐蚀-腐蚀减薄（碱腐蚀）

✕ 损伤机理：

- ✕ 氢氧化钠引起的腐蚀，多在蒸发浓缩或高传热条件下发生；有时因碱性物质或碱液浓度不同，可能发生均匀腐蚀。

✕ 损伤形态：

- ✕ a 多表现为局部腐蚀，如锅炉管的腐蚀沟槽或隔热垢层下的局部腐蚀；
- ✕ b 水汽界面介质浓缩区域会形成局部沟槽，立管可形成环形槽，水平或倾斜管会在管道顶端或两侧形成纵向槽；
- ✕ c 温度高于79℃的高浓度碱液可引起碳钢的均匀腐蚀，温度高于93℃时，腐蚀速率非常大

✘ 受影响的材料:

- ✘ 碳钢、低合金钢、300系列不锈钢

✘ 主要影响因素:

- ✘ a 碱（氢氧化钠）浓度越高，腐蚀越严重。多数情况下工艺物料中碱液浓度很低，但如果存在蒸发、沉积、分离等浓缩过程，可形成局部高浓度；
- ✘ b 碱（氢氧化钠）的主要来源有中和或反应用工艺注碱、锅炉水加入的低浓度碱、锅炉水软化器再生期间因疏忽而混入的碱、冷凝器或工艺设备泄漏而混入工艺流体的碱，中和和脱除硫化物而注入的苛性碱液。

✘ 易发生的装置或设备

- ✘ a 锅炉和蒸汽发生器（包括热交换器）；
- ✘ b 常减压装置原油进料的注碱部位可能会出现苛性碱浓缩情况，如注入的碱不能和油气有效混合，会加剧常减压装置预热热交换器、加热炉炉管和转油线的局部腐蚀；
- ✘ c 乙烯裂解装置：压缩系统的注碱管道、碱洗塔三段碱洗段；
- ✘ d 使用碱进行产品脱硫的装置。

✘ 主要预防措施:

- ✘ a 优化设计: 蒸汽发生设备设计时进行优化, 如减少游离苛性碱的量、注入足量的水、控制加热炉炉膛的燃烧强度以减少炉管的过热, 或减少进入凝气器的碱盐量。设计时还应当考虑使注入的碱和其他介质能有效混合, 避免碱在器壁高温部位发生浓缩;
- ✘ b 碳钢、低合金钢、300系列不锈钢在66℃高浓度苛性碱液中会产生严重腐蚀, 合金400和一些其他镍基合金腐蚀速率较低。
- ✘ 推荐选择高合金不锈钢、合金400、钛及钛合金、镍基合金

× 3、碱应力腐蚀开裂-环境开裂

× 损伤机理:

- × 与碱溶液接触的设备 and 管道表面发生的应力腐蚀开裂，多出现在未进行消除应力热处理焊缝附近，可在几小时或几天内穿透整个设备或管线的壁厚。

- × 碳钢在高温下与水蒸气产生如下的化学反应：



- × 在这个反应中，如存在氢氧化钠，可起催化作用，反应生成的四氧化三铁覆盖在钢材表面，形成一层保护膜，局部拉伸应力过高时会破坏保护膜，在金属表面形成最初的腐蚀裂纹。氢氧化钠可在裂纹中富集，形成电偶腐蚀。

- × 裂纹尖端区域为阳极，周围的保护层为阴极，形成小阳极大阴极，加上拉伸应力的作用，使裂纹迅速扩展，最终发生断裂。

× 损伤形态:

- × a 碱应力腐蚀开裂通常出现在靠近焊缝的母材上, 沿着与焊缝平行的方向扩展, 也可能出现在焊缝和热影响区;
 - × b 碱应力腐蚀开裂裂纹细小, 多呈蜘蛛网状, 起源于有局部应力集中的焊接缺陷处;
 - × c 碳钢和低合金钢的开裂主要呈沿晶扩展, 裂纹内常充满氧化物;
 - × d 300系列不锈钢的开裂主要呈穿晶型扩展, 和氯化物应力腐蚀开裂裂纹形貌相似, 难以区分。
- ## × 受影响的材料:
- × 碳钢、低合金钢、300系列不锈钢较为敏感, 镍基合金耐碱应力腐蚀开裂能力较强。

× 主要影响因素：

- × a 浓度：碱液浓度超过5%（质量分数）时开裂就可能发生，随碱液浓度升高，开裂敏感性升高。存在介质浓缩条件时（如：干湿交替、局部加热或高温蒸汽吹扫等），碱浓度达到 50×10^{-6} - 100×10^{-6} 时，就足以引发开裂。
- × b 温度：随温度继续升高，开裂敏感性增高。
- × c 残余应力：焊接或冷加工（如弯曲和成型）参与应力均可成为开裂的应力条件，通常应力要达到屈服应力时开裂才会发生。
- × d 伴热：工厂经验表明有伴热的管线，或未经焊后热处理的碳钢管道和设备蒸汽吹扫时开裂可能性较高。

✘ 易发生的装置或设备:

- ✘ a 苛性碱处理的设备和管线，包括脱硫化氢和脱硫醇装置，以及硫酸烷基化和氢氰酸烷基化装置中使用的碱中和设备。常减压装置的常压塔进料有时注入苛性碱来控制氰化物含量。
- ✘ b 伴热设置不合理的设备和管线，以及加热盘管和其他传热设备可能发生开裂。
- ✘ c 在苛性碱环境中使用，然后进行蒸汽吹扫的设备。
- ✘ d 锅炉中锅炉给水过热，使锅炉管局部出现干湿交替，产生碱液浓缩的部位。
- ✘ e 乙烯裂解装置中裂解与急冷系统：急冷水塔釜的急冷水回流流程，包括急冷水塔釜及相连管道；工艺水汽提塔塔釜工艺水部分回流、部分去稀释蒸汽发生系统的流程，包括工艺水汽提塔釜、蒸汽发生器底部、凝液分离罐底部、热交换器管程及流程中的管道。

× 主要预防措施:

- × a 合理选材; 如镍基合金
- × b 消应力热处理;
- × c 未消应力热处理的碳钢管线和设备, 不能直接进行蒸汽吹扫, 应在蒸汽吹扫前水洗, 如无法水洗就只能用低压蒸汽进行短时间吹扫;
- × d 常减压装置的高温原油预热流程的注碱系统, 可通过优化设计, 以及合理进行注入操作使碱与原油在到达预热段前充分混合;
- × e 尽可能不设伴热线, 如设伴热线也不能间歇使用。

× 3、氯化物应力腐蚀开裂（环境开裂）

× 损伤机理

处于氯化物水溶液环境中的300系列不锈钢或部分镍基合金在拉应力、温度和氯化物水溶液的共同作用下产生起源于表面的开裂。

× 损伤形态：

- × a 裂纹起源于表面，无明显的腐蚀减薄；
- × b 裂纹多呈树枝状，有分叉；
- × c 裂纹一般穿晶扩展，但发生敏化的300系列不锈钢应力腐蚀断口也可能呈沿晶特征；
- × d 断口通常为脆性断口；
- × e 300系列不锈钢焊缝组织通常会含有一些铁素体，形成双相组织结构，出现氯化物应力腐蚀开裂的可能性会小一些。

× 受影响的材料:

- × a 300系列不锈钢属于敏感材料;
- × b 双相不锈钢的耐氯化物腐蚀开裂能力比300系列不锈钢强;
- × c 镍基合金具有极强的耐氯化物应力腐蚀开裂的能力

× 选材注意事项:

- × 镍基合金镍含量在8%-12%时, 开裂敏感性最大, 镍含量高于35%时具有较高的氯化物应力腐蚀抗力, 镍含量高于45%时, 基本上不会发生应力腐蚀开裂;
- × 双相不锈钢耐氯化物应力腐蚀开裂能力高于300系列不锈钢;
- × 碳钢、低合金钢、400系列不锈钢则对氯化物应力腐蚀开裂不敏感。

× 4、高温硫化物腐蚀（氢气环境）- 腐蚀减薄

× 损伤机理：

- × 碳钢和低合金钢等在高温且临氢介质条件下与硫化物反应发生的腐蚀，即氢的存在加速了高温硫化物腐蚀，又称高温硫化氢/氢气腐蚀。

× 损伤形态：

- × a 通常表现为均匀腐蚀，同时生成硫化亚铁锈皮，厚度大约是被腐蚀掉金属体积的5倍，并可能形成多层锈皮结构；
- × b 金属表面的锈皮粘合牢固，且有灰色光泽，易被误认为是没有发生腐蚀的金属基体。

× 受影响的材料:

- × 按耐蚀性递增的顺序排列：碳钢、低合金钢、400系列不锈钢、300系列不锈钢

× 主要影响因素:

- × a 温度：通常镍基合金温度超过260℃时开始发生高温硫化物腐蚀，随温度升高，腐蚀速率增大；
- × b 合金元素：一般而言，铬元素含量越高，合金耐硫化物腐蚀能力越强，当铬含量达到7%-9%（质量分数）时，即使增加铬含量，材料耐腐蚀性提高也不明显。铬含量相近的不锈钢，其耐腐蚀能力相近，镍基合金同样如此。
- × c 氢分压：氢分压较高，腐蚀速率比无氢环境下腐蚀速率大得多；

- × d 硫化氢分压：随硫化氢分压的提高，腐蚀速率增大；
- × e 与石脑油脱硫装置相比，煤油脱硫装置和加氢劣化装置的腐蚀更严重，腐蚀速率几乎可以达到前者的2倍。

× 易发生的装置或设备

- × a 接触含高温氢气/硫化氢介质的设备和管道易发生这种腐蚀，如脱硫装置、加氢精制装置和加氢劣化装置等所有炼油厂的加氢装置；
- × b 注氢点下游腐蚀明显加剧；
- × c 乙烯裂解装置：裂解与急冷部分的急冷锅炉的管程出口-急冷器-汽油分馏塔进料及流程相连管道、减粘塔顶至汽油分馏塔流程。

× 主要预防措施：

- × a 使用铬含量高的合金可降低腐蚀程度，300系列不锈钢如304L，316L，321和347等，使用中未超温时耐腐蚀能力较强；
- × b 优化工艺，降低氢分压。

× 5、湿硫化氢破坏-环境开裂

×

× 损伤机理：

- × 在含水和硫化氢环境中碳钢和低合金钢所发生的损伤，包括氢鼓包、氢致开裂、应力导向氢致开裂和硫化物应力腐蚀开裂4中形式：
- × a 氢鼓包：金属表面硫化物腐蚀产生的氢原子扩散进入钢中，在钢中的不连续处（如夹杂物、裂隙等）聚集并结合生成氢分子，当氢分压超过临界值时会引发材料的局部变形，形成鼓包；
- × b 氢致开裂：氢鼓包在材料内部不同深度形成时，鼓包长大导致相邻的鼓包不断连接，形成台阶状裂纹；

- ✘ c 应力导向氢致裂纹：在焊接残余应力或其他应力作用下，氢致开裂裂纹沿厚度方向不断相连，形成穿透至表面的开裂；
- ✘ d 硫化物应力腐蚀开裂：由于金属表面硫化物腐蚀过程中产生的原子氢吸附，在高应力区（焊缝和热影响区）聚集造成的一种开裂。

× 损伤形态

- × a 氢鼓包：在钢材表面形成独立的小泡，小泡与小泡之间一般不会发生合并；
- × b 氢致开裂：在钢材内部形成与表面平行的台阶状裂纹，裂纹一般沿轧制方向扩展，不会扩展至钢材的表面；
- × c 应力导向氢致开裂：一般发生在焊接接头的热影响区，由该部位母材上不同深度的氢致开裂裂纹沿厚度方向相连形成；
- × d 硫化物应力腐蚀开裂：在焊缝热影响区和高硬度区表面起裂，并沿厚度方向扩展。

× 受影响的材料:

- × 碳钢、低合金钢

- ×

× 主要影响因素:

- × a PH值: 溶液的PH值小于4.0, 且溶解有硫化氢时, 易发生湿硫化氢破坏。此外, 溶液的PH值大于7.6, 且氰化氢浓度大于 20×10^{-6} 时并溶解有硫化氢时, 湿硫化氢破坏容易发生;
- × b 硫化氢分压: 溶液中溶解的硫化氢浓度大于 50×10^{-6} 时, 湿硫化氢破坏容易发生, 或潮湿气体中硫化氢气相分压大于0.0003MPa时, 湿硫化氢破坏容易发生, 且分压越大, 敏感性越高;

- ✘ c 温度：氢鼓包、氢致开裂、应力导向氢致开裂损伤发生的温度为室温到150℃，有时可以更高，硫化物应力腐蚀开裂通常发生在82℃以下；
- ✘ d 硬度：硫化物应力腐蚀开裂与硬度相关，炼油厂常用的低强度碳钢应控制焊接接头硬度在HB200以下；氢鼓包、氢致开裂和应力导向氢致开裂损伤与硬度无关；
- ✘ e 钢材纯净度：提高钢材纯净度能够提升钢材抗氢鼓包、氢致开裂和应力导向氢致开裂的能力；
- ✘ f 焊后热处理：焊后热处理可以有效地降低焊缝发生硫化物应力腐蚀开裂的可能性，对防止应力导向氢致开裂起到一定的减缓作用，但对氢鼓包和氢致开裂不产生影响；
- ✘ g 杂质：加氢装置的溶液中，如果硫化铵浓度超过2%（质量分数），会增加氢鼓包、氢致开裂和应力导向氢致开裂的敏感性。

× 易发生的装置或设备:

- × a 装置: 常减压装置、加氢装置、流化床催化劣化装置、延迟焦化装置、制硫装置的轻油分馏系统和酸性水系统, 乙烯裂解装置的压缩系统以及裂解与急冷系统的急冷部分;
- × b 设备: 湿硫化氢环境中使用且未采用抗氢致开裂钢制造的塔器、热交换器、分离器、分液罐、球罐、管线等。

× 主要预防措施:

- × a 选用合适的钢材或合金, 或设置有机防护层;
- × b 用冲洗水来稀释氢氰酸浓度;
- × c 采用高纯度的抗氢致开裂钢;
- × d 控制焊缝和热影响区的硬度不超过HB200;
- × e 焊接接头部位进行焊后消除应力热处理;
- × f 使用专用缓蚀剂。

× 6、氢脆-材质劣化

× 损伤机理:

- × 制造、焊接或服役等过程中氢原子扩散进入高强钢中，使其韧性下降，在残余应力及外部载荷的作用下发生的脆性断裂，是氢引起的滞后开裂。

× 损伤形态:

- × a 氢脆引起的开裂以表面开裂为主，也可能发生在表面下；
- × b 氢脆发生在高残余应力或三向应力部位（缺口、拘束区）；
- × c 微观而言，与不含氢试样相比，氢致滞后开裂断口的韧性断裂区减小；宏观而言，有些材料会产生脆断面，但多数情况下不明显；
- × d 强度较高的钢中氢脆裂纹一般沿晶扩展。

× 受影响的材料:

- × 碳钢、低合金钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢和部分高强度镍合金。

× 主要影响因素:

- × a 同时满足三个条件时氢脆易发生: 钢或合金中的氢达到临界浓度, 钢及合金的强度水平和组织对脆断敏感, 残余应力和外加载荷共同作用造成的应力高于氢脆开裂的临界应力;
- × b 氢的来源: 焊接、酸溶液清洗和酸洗、高温临氢环境渗入后又未能及时逸出的氢、湿硫化氢或氢氟酸环境、电镀、阴极保护;
- × c 金属温度高于 82°C 时, 氢脆通常不会发生;

- ✘ d 氢脆在静态载荷下对断裂韧性的影响较大，材料中渗入足量的氢且承受临界压力时，失效会迅速发生；
- ✘ e 渗氢量取决于环境、表面化学反应和金属中存在的氢陷阱（如微观不连续、夹杂物、原始缺陷或裂纹）；
- ✘ f 厚壁部件更容易发生氢脆；
- ✘ g 随着材料强度升高，氢脆敏感性增大；
- ✘ h 与同等强度的回火马氏体相比，未回火马氏体和珠光体材质更容易发生氢脆。

✘ 易发生的装置和设备

- ✘ a 催化劣化装置、加氢装置、胺处理装置、酸性水装置和氢氟酸烷基化装置中在湿硫化氢环境下服役的碳钢管线和容器；
- ✘ b 采用高强度钢制造的球罐；
- ✘ c 高强度钢制螺栓和弹簧十分容易发生氢脆，甚至在电镀过程中深入的氢也会导致氢脆；
- ✘ d 加氢装置和催化重整装置的铬钼钢制反应器、缓冲罐和热交换器壳体，尤其是焊接热影响区硬度超过HB235的部位。

× 主要预防措施:

- × a 选用低强度钢，或采用焊后热处理降低残余应力和硬度；
- × b 在焊接过程中，选用低氢材料焊接，并使用干电极和预热工艺；如果氢可能渗入金属，可在焊接前预热至204℃或更高温度的方法把氢释放出来；
- × c 对在高温临氢环境下工作的设备和管线，停工时应先降压后降温，开工时先升温后升压；
- × d 对设备和管线内部施加涂层、堆焊不锈钢或设置其他保护衬里。

× 7、高温氢腐蚀-其他损伤

× 损伤机理:

- × 碳钢和合金钢在高温临氢环境中，氢进入钢材中并与碳反应生成甲烷气体，甲烷进入晶界或夹杂界面的缝隙形成气泡，随气泡压力的增大，靠近钢材表面的气泡会发生变形而鼓凸成为甲烷鼓包，相邻晶界内气泡会长大并连接形成裂纹，腐蚀部位的钢材同时出现脱碳



× 损伤形态:

- × a 氢腐蚀大致分为3个阶段:

- × 1) 孕育期: 氢与碳反应会使钢材表面脱碳，若碳向表面扩散速度慢，脱碳就会向内部发展，在晶界，或夹杂界面的缝隙形成甲烷鼓包，可通过扫描电镜观察到鼓包;

- ✘ 2) 腐蚀期（快速发展期）：鼓泡长大到某一临界点后沿晶界连接起来形成裂纹，钢的体积膨胀，强度和塑性迅速下降，超声波测厚时可能表现为异常增厚；
- ✘ 3) 饱和期：在显微镜下观察试样，可看到脱碳和/或裂纹，有时现场金相分析也能观察到，裂纹彼此连接，裂纹力学性能和体积变化渐趋停止；
- ✘ b 碳钢的裂纹呈沿晶扩展，并靠近珠光体组织；
- ✘ c 分子氢或甲烷在钢材中的夹层处聚集，形成的鼓包有些通过目视就能发现。
- ✘ 受影响的材料
- ✘ 碳钢、钼钢、铬钼钢等，按照耐高温氢腐蚀能力递增排序：碳钢、C-0.5Mo、Mn-0.5Mo、1Cr-0.5Mo、1.25Cr-0.5Mo、2.25Cr-1Mo、2.25Cr-1Mo-V、3Cr-1Mo、5Cr-0.5Mo及具有不同化学成分的类型钢。

✘ 主要影响因素

- a 温度：温度越高，氢腐蚀越严重；
- b 氢分压：氢分压越高，氢腐蚀越严重；
- c 材质：钢中碳含量越高，氢腐蚀越严重；
- d 时间：从损伤开始发生到用合适的检测技术能发现的这段时间为孕育期，孕育期可能是极端苛刻工况下的几小时或若干年；
- e Nelson 曲线给出了常见钢材不发生氢腐蚀的温度/氢分压最高容限，选材时应参考该曲线；300系列不锈钢以及5Cr、9Cr、和12Cr的合金钢，在炼油装置常见工况下很少发生高温氢腐蚀。

✕ 易发生的装置和装备:

- ✕ a 合成氨装置: 热电偶套管、触媒冷却管、转换器和设备衬里;
- ✕ b 加氢精制 (加氢脱硫)、加氢裂化、重整加氢等各种加氢装置, 以及变压吸附式制氢装置及脱氧装置;
- ✕ c 甲醇装置: 变换反应器;
- ✕ d 超高压蒸汽发生装置的过路管;
- ✕ e 乙烯裂解装置: 甲烷化反应器进出料温度高于 220°C 流程, 包括甲烷化反应器、进出料热换热器管壳程及相连管道。

✘ 主要预防措施:

- ✘ a 元素成分: 添加铬、钼元素可以提高碳化物的稳定性, 减少甲烷的产生, 明显改善钢的耐氢腐蚀能力, 其他能形成稳定碳化物的合金元素 (如钒、钛等元素), 添加后都能提高钢的耐氢腐蚀能力;
- ✘ b 选材: 设计时应参照Nelson曲线并在其基础上增加14-28℃的安全裕度选择合适的材料; 0.5Mo钢的高温氢腐蚀损伤会出现在焊缝热影响区及远离焊缝的母材上, 新建造的设备不宜使用;
- ✘ c 衬里: 300系列不锈钢衬里或300系列不锈钢复合板可用于临氢环境下耐硫化腐蚀能力不足の場合, 堆焊层或复合衬里能降低基材的氢分压;
- ✘ d 催化剂: 采用可以降低反应温度的催化剂, 减少温度的影响。

× 四、焊接工艺评定参数介绍

× 焊接工艺评定现行标准：NB/T47014-2011

× 焊接工艺评定审核的主要内容：焊接工艺规程与焊接工艺评定报告的符合性

× 1、焊接工艺评定因素（重要因素、补加因素和次要因素）

× 重要因素：指影响焊接接头力学性能和弯曲性能（冲击韧性除外）的焊接工艺评定因素；

× 补加因素：指影响焊接接头冲击韧性的焊接工艺评定因素，当规定进行冲击试验时，需增加补加因素；

× 次要因素：指对要求测定的力学性能和弯曲性能无明显影响的焊接工艺评定因素。

✘ 2、焊接工艺评定因素审核的基本要求

- ✘ 1) 当产品需要进行冲击试验时，焊接工艺评定报告中应包含所有的重要因素和补加因素，且焊接工艺规程或焊接工艺卡、焊接操作指导书中的所有重要因素、补加因素均应在焊接工艺评定报告相对应的焊接因素的覆盖范围之内；
- ✘ 2) 当产品不需要进行冲击试验时，焊接工艺评定报告中应包含所有的重要因素，且焊接工艺规程或焊接工艺卡、焊接操作指导书中的所有重要因素均应在焊接工艺评定报告相对应的焊接因素的覆盖范围之内；
- ✘ 3) 不需要冲击试验时，补加因素变为次要因素；
- ✘ 4) 焊接工艺评定报告中可以不包含次要因素，但焊接工艺规程中及预焊接工艺规程中均应包含次要因素。

× 3、不同焊接方法通用焊接因素分类及控制方法：

× 1) 焊接方法及分类

× NB/T47014标准中焊接方法分为以下几类：

× 气焊、焊条电弧焊、埋弧焊、钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊（含药芯焊丝电弧焊）、等离子弧焊、摩擦焊、气电立焊和螺柱电弧焊

× 控制方法：焊接方法类别为重要因素，焊接方法发生改变需要重新进行焊接工艺评定

× 2) 金属材料及分类

× 金属材料分类按NB/T47014表1执行

表 1 焊制承压设备用母材分类分组

母材		牌号、级别、型号	标 准
类别	组别		
Fe-1	Fe-1-1	10	GB/T 699, GB/T 711, GB 3087, GB 6479, GB/T 8163, GB 9948, GB/T 12459
		15	GB/T 710, GB/T 711, GB/T 13237
		20	GB/T 699, GB/T 710, GB/T 711, GB 3087, GB 6479, GB/T 8163, GB 9948, GB/T 12459, GB/T 13237, NB/T 47008
		20G	GB 5310, GB/T 12459
		Q195	GB/T 700
		Q215A	GB/T 700, GB/T 3091

Fe-1-2	25	GB/T 699
	HP295	GB 6653
	HP325	GB 6653
	HP345	GB 6653
	Q345	GB 1591, GB/T 8163, GB/T 12459
	Q345R	GB 713
	Q390	GB/T 1591
	L320	GB/T 9711.1
	L360	GB/T 9711.1

	Fe-1-3	HP365	GB 6653
		Q370R	GB 713
		L450	GB/T 9711.1
		L450QB	GB/T 9711.2
		L450MB	GB/T 9711.2
		15MnNiNbDR	GB 150.2
	Fe-1-4	07MnMoVR	GB 19189
		07MnNiVDR	GB 19189
		07MnNiMoDR	GB 19189
		12MnNiVR	GB 19189

Fe-3	Fe-3-1	15MoG	GB 5310
		20MoG	GB 5310
		12CrMo	GB 6479, GB 9948, JB/T 9626
		12CrMoG	GB 5310
	Fe-3-2	20MnMo	NB/T 47008
		20MnMoD	NB/T 47009
		10MoWVNb	GB 6479, GB/T 12459
		12SiMoVNb	GB 6479
	Fe-3-3	20MnNiMo	NB/T 47008
		20MnMoNb	NB/T 47008
		13MnNiMoR	GB 713
		18MnMoNbR	GB 713
Fe-4	Fe-4-1	09CrCuSb	GB 150.2
		14Cr1Mo	NB/T 47008
		14Cr1MoR	GB 713, GB/T 13401
		15CrMo	GB/T 3077, GB 6479, GB 9948, GB/T 12459, JB/T 9626, NB/T 47008
		15CrMoG	GB 5310
		15CrMoR	GB 713, GB/T 12459, GB/T 13401
		ZG 15Cr1MoG	GB/T 16253
		ZG 20CrMo	JB/T 9625, JB/T 10087
	Fe-4-2	12Cr1MoV	GB/T 3077, JB/T 9626, NB/T 47008

Fe-8	Fe-8-1	022Cr19Ni13Mo3 (S31703)	GB 24511, NB/T 47010
		06Cr19Ni13Mo3	GB 24511
		06Cr17Ni12Mo2Ti (S31668)	GB 24511, NB/T 47010
		07Cr17Ni12Mo2 (S31609)	NB/T 47010
		0Cr18Ni9	GB/T 12459, GB/T 12771, GB 13296, GB/T 13401, GB/T 14976
		1Cr18Ni9	GB 5310, GB/T 12459
		1Cr19Ni9	GB 13296, GB 9948
		00Cr19Ni10	GB/T 12459, GB/T 12771, GB 13296, GB/T 13401, GB/T 14976
		0Cr18Ni10Ti	GB/T 12459, GB/T 12771, GB 13296, GB/T 13401, GB/T 14976
		1Cr18Ni9Ti	GB 13296
		1Cr18Ni11Ti	GB 13296
		0Cr18Ni11Nb	GB/T 12459, GB/T 12771, GB 13296, GB/T 13401, GB/T 14976
		1Cr19Ni11Nb (S34779)	GB 5310, GB 9948, GB/T 12459, GB 13296, NB/T 47010
		00Cr17Ni14Mo2	GB/T 12459, GB/T 12771, GB 13296, GB/T 13401, GB/T 14976
		0Cr17Ni12Mo2	GB/T 12459, GB/T 12771, GB 13296, GB/T 13401, GB/T 14976
		1Cr17Ni12Mo2	GB 13296
		00Cr19Ni13Mo3	GB 13296, GB/T 14976
		0Cr19Ni13Mo3	GB 13296, GB/T 14976
		0Cr18Ni12Mo2Ti	GB 13296, GB/T 14976
		1Cr18Ni12Mo2Ti	GB 13296
		1Cr18Ni12Mo3Ti	GB 13296
		0Cr18Ni13Si4	GB 13296
		015Cr21Ni26Mo5Cu2 (S39042)	NB/T 47010
		CF3	GB/T 12230
		CF3M	GB/T 12230
		CF8	GB/T 12230

× 材料分类控制原则

× 母材类别为重要因素，按下列方式进行控制：

- × a 母材类别号改变，需要重新进行焊接工艺评定；
- × b 等离子弧焊使用填丝工艺，对Fe-1~Fe-5A类别母材进行焊接工艺评定时，高类别号母材相焊评定合格的焊接工艺，适用于该高类别号母材与第类别号母材相焊；
- × c 采用焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊或钨极气体保护焊，对Fe-1~Fe-5A类别母材进行焊接工艺评定时，高类别号母材相焊评定合格的焊接工艺，适用于该高类别号母材与低类别号母材相焊；
- × d 除b)、c)外，当不同类别号的母材相焊时，即使母材各自的焊接工艺都已评定合格，其焊接接头仍需重新进行焊接工艺评定。

× 3)、填充金属分类

- × 填充金属包括：焊条、焊丝、填充丝、焊带、焊剂、预置填充金属、金属粉、板极、熔嘴等。

表 2 焊条分类

分类代号	分 类 依 据	标准及型号示例
FeT-1-1	熔敷金属抗拉强度 $\geq 420\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-1 组的 E43 系列焊条	NB/T 47018.2 E43××
FeT-1-2	熔敷金属抗拉强度 $\geq 490\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-2 组的 E50 系列焊条	NB/T 47018.2 E50×× E50H××H
FeT-1-3	熔敷金属抗拉强度 $\geq 540\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-3 组的 E55 系列焊条	NB/T 47018.2 E55××-×
FeT-1-4	熔敷金属抗拉强度 $\geq 590\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-4 组的 E60 系列焊条	NB/T 47018.2 E60××-D1
FeT-2	—	—
FeT-3-1	熔敷金属公称成分与 Fe-3-1 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-1 组的低合金钢焊条	NB/T 47018.2 E55××-B1
FeT-3-2	熔敷金属公称成分与 Fe-3-2 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-2 组的低合金钢焊条	NB/T 47018.2 E55××-G
FeT-3-3	熔敷金属公称成分与 Fe-3-3 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-3 组的低合金钢焊条	NB/T 47018.2 E60××-D1
FeT-4	熔敷金属公称成分与 Fe-4 类钢材类似, 用于焊接 Fe-4 类钢的低合金钢焊条	NB/T 47018.2 E55××-B2 E55××-B2-V
FeT-5A	熔敷金属公称成分与 Fe-5A 类钢材类似, 用于焊接 Fe-5A 类钢的低合金钢焊条	NB/T 47018.2 E60××-B3
FeT-5B	熔敷金属公称成分与 Fe-5B 类钢材类似, 用于焊接 Fe-5B 类钢的低合金钢或不锈钢焊条	NB/T 47018.2 E5MoV-15
FeT-5C	熔敷金属公称成分与 Fe-5C 类钢材类似, 用于焊接 Fe-5C 类钢的低合金钢焊条	—
FeT-6	熔敷金属为马氏体组织的不锈钢焊条	NB/T 47018.2 E410-××
FeT-7	熔敷金属为铁素体组织的不锈钢焊条	—
FeT-8	熔敷金属为奥氏体组织的不锈钢焊条	NB/T 47018.2 E308-×× E347-×× E316L-××
FeT-9B	熔敷金属含 Ni 量不小于 3.5%, 用于焊接 Fe-9B 类钢的低合金钢焊条	—

表 3 气焊、气体保护焊、等离子弧焊用焊丝、填充丝分类

分类代号	分 类 依 据	标准及型号示例
FeS-1-1	熔敷金属抗拉强度 $\geq 420\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-1 组的焊丝、填充丝	—
FeS-1-2	熔敷金属抗拉强度 $\geq 490\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-2 组的焊丝、填充丝	NB/T 47018.3 ER49-1 ER50-6
FeS-1-3	熔敷金属抗拉强度 $\geq 540\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-3 组的焊丝、填充丝	NB/T 47018.3 ER55-D2 ER55-D2-Ti
FeS-1-4	熔敷金属抗拉强度 $\geq 590\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-4 组的焊丝、填充丝	—
FeS-2	—	—
FeS-3-1	熔敷金属公称成分与 Fe-3-1 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-1 组钢的低合金钢焊丝、填充丝	—
FeS-3-2	熔敷金属公称成分与 Fe-3-2 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-2 组钢的低合金钢焊丝、填充丝	—
FeS-3-3	熔敷金属公称成分与 Fe-3-3 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-3 组钢的低合金钢焊丝、填充丝	—
FeS-4	熔敷金属公称成分与 Fe-4 类钢材类似, 用于焊接 Fe-4 类钢的低合金钢焊丝、填充丝	NB/T 47018.3 ER55-B2 ER55-B2-MnV
FeS-5A	熔敷金属公称成分与 Fe-5A 类钢材类似, 用于焊接 Fe-5A 类钢的低合金钢焊丝、填充丝	NB/T 47018.3 ER62-B3 ER62-B3L
FeS-5B	熔敷金属公称成分与 Fe-5B 类钢材类似, 用于焊接 Fe-5B 类钢的低合金钢或不锈钢焊丝、填充丝	—

表 4 埋弧焊用焊丝分类

分类代号	分 类 依 据	标准及牌号示例
FeMS-1-1	熔敷金属抗拉强度 $\geq 415\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-1 组的埋弧焊焊丝	NB/T 47018.4 H08A H08MnA
FeMS-1-2	熔敷金属抗拉强度 $\geq 480\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-2 组的埋弧焊焊丝	NB/T 47018.4 H08MnA H10Mn2 H10MnSi
FeMS-1-3	熔敷金属抗拉强度 $\geq 550\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-3 组的埋弧焊焊丝	NB/T 47018.4 H08MnMoA H10Mn2 H10MnSi
FeMS-1-4	熔敷金属抗拉强度 $\geq 620\text{MPa}$, 用于焊接 Fe-1-4 组的埋弧焊焊丝	NB/T 47018.4 H08Mn2MoA H08Mn2MoVA H08MnMoA
FeMS-2	—	—
FeMS-3-1	熔敷金属公称成分与 Fe-3-1 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-1 组钢的低合金钢埋弧焊焊丝	NB/T 47018.4 H08CrMoA H13CrMoA
FeMS-3-2	熔敷金属公称成分与 Fe-3-2 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-2 组钢的低合金钢埋弧焊焊丝	NB/T 47018.4 H08MnMoA H10Mn2 H10MnSi
FeMS-3-3	熔敷金属公称成分与 Fe-3-3 组钢材类似, 用于焊接 Fe-3-3 组钢的低合金钢埋弧焊焊丝	NB/T 47018.4 H08Mn2MoA H08Mn2MoVA

× 填充金属类别控制方法：

- × 填充金属类别属于重要因素，填充金属类别发生变化需要重新进行焊接工艺评定；同时还应遵循如下原则：
- × a 当用强度级别高的填充金属代替强度级别低的类别填充金属焊接Fe-1、Fe-3类母材时，可不需要重新进行焊接工艺评定；
- × b 埋弧焊、熔化极气体保护焊和等离子弧焊的焊缝金属合金含量，若主要取决于附加填充金属时，当焊接工艺改变引起焊缝金属中重要合金元素成分超出评定范围；
- × c 埋弧焊、熔化极气体保护焊时，增加、取消附加金属或改变其体积超过10%。
- ×

- ✘ 在同一类别填充金属中当规定进行冲击试验时，下列情况为补加因素：
- ✘ a 用非低氢型药皮焊条代替低氢型（含EXX10,EXX11）药皮焊条；
- ✘ b 当用冲击试验合格指标较低的填充金属替代较高的填充金属（若冲击试验合格指标较低时仍可符合本标准或设计文件规定的除外）
- ✘ Fe-1类钢材埋弧多层焊时，改变焊剂类型（中性焊剂、活性焊剂），需要重新进行焊接工艺评定。

× 4)、焊后热处理分类

- × 对于碳钢、低合金钢等材料类别，焊后热处理类别为：
 - × a 不进行焊后热处理；
 - × b 低于下转变温度进行焊后热处理；
 - × c 高于上转变温度进行焊后热处理；
 - × d 先在高于上转变温度，而后在低于下转变温度进行焊后热处理；
 - × e 在上下转变温度之间进行焊后热处理。
- × 对于奥氏体不锈钢及有色金属，其焊后热处理类别为：
 - × a 不进行焊后热处理
 - × b 在规定的温度范围内进行焊后热处理

- × 焊后热处理的控制方法：
- × 焊后热处理类别为重要因素，类别发生改变需要重新进行焊接工艺评定；
- × 还应遵循以下原则：
- × 除气焊、螺柱电弧焊、摩擦焊外，当规定进行冲击试验时，焊后热处理的保温温度或保温时间范围改变后要重新进行焊接工艺评定。
- × 试件的焊后热处理应与件在制造过程中的焊后热处理基本相同，低于下转变温度进行焊后热处理时，试件的保温时间不得少于焊件在制造过程中累计保温时间的80%

×

× 5)、试件厚度与焊件厚度

表 7 对接焊缝试件厚度与焊件厚度规定 (试件进行拉伸试验和横向弯曲试验) 单位为 mm

试件母材厚度 T	适用于焊件母材厚度的有效范围		适用于焊件焊缝金属厚度 (t) 的有效范围	
	最小值	最大值	最小值	最大值
< 1.5	T	$2T$	不限	$2t$
$1.5 \leq T \leq 10$	1.5	$2T$	不限	$2t$
$10 < T < 20$	5	$2T$	不限	$2t$
$20 \leq T < 38$	5	$2T$	不限	$2t (t < 20)$
$20 \leq T < 38$	5	$2T$	不限	$2T (t \geq 20)$
$38 \leq T \leq 150$	5	200^a	不限	$2t (t < 20)$
$38 \leq T \leq 150$	5	200^a	不限	$200^a (t \geq 20)$
> 150	5	$1.33T^a$	不限	$2t (t < 20)$
> 150	5	$1.33T^a$	不限	$1.33T^a (t \geq 20)$

^a 限于焊条电弧焊、埋弧焊、钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊, 其余按表 9、表 10 或 $2T$ 、 $2t$ 。

对接焊缝试件评定合格的焊接工艺适用于焊件厚度的有效范围，一般情况下按上表的规定执行，还应遵循如下原则：

用焊条电弧焊、埋弧焊、钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊和气电立焊等焊接方法完成的试件，当规定进行冲击试验时，焊接工艺评定合格后，若 $T \geq 6\text{mm}$ 时，适用于焊件母材厚度的有效范围最小值为试件厚度 T 与 16mm 两者中的较小值；当 $T < 6\text{mm}$ 时，适用于焊件母材厚度的最小值为 $T/2$ 。如试件经高于上转变温度的焊后热处理或奥氏体材料焊后经固溶处理时，仍按表7的规定。

× 4、各种焊接方法的专用评定因素

× 1) 焊条电弧焊

× 重要因素:

× a 预热温度:

× 控制要求: 实际施焊的温度不得低于焊接工艺评定报告中的预热温度降低 50°C 。

× 补加因素:

× a 焊条直径改为大于6mm;

× b 从评定合格的位置改为向上立焊;

× c 道间温度比经评定记录值高 50°C 以上;

× d 改变焊接电流的种类或极性;

× e 增加线能量或单位长度焊道的熔敷金属体积超过评定合格值;

× f 由每面多道焊改为每面单道焊;

- × 2) 埋弧焊

- × 重要因素:

- × a 改变混合焊剂的混合比例;

- × b 添加或取消附加的填充丝; 与评定值相比, 其体积改变超过10%;

- × c 预热温度比已评定合格值降低50℃以上;

- × 补加因素:

- × a 道间温度比经评定记录值高50℃以上;

- × b 改变电流的种类或极性;

- × c 线能量;

- × d 由每面多道焊改为每面单道焊;

- × e 机动焊、自动焊时, 单丝焊改为多丝焊, 或反之;

× 3)、熔化极气体保护焊

× 重要因素:

- × a 实芯焊丝、药芯焊丝、金属粉之间变更;
- × b 预热温度比已评定合格值降低50℃以上;
- × c 改变单一保护气体种类; 改变混合保护气体规定配比; 从单一保护气体改用混合保护气体或反之; 增加或取消保护气体;
- × d 当类别号为Fe-10I、Ti-1、Ti-2、Ni-1~Ni-5时, 取消焊缝背面保护气体, 或背面保护气体从惰性气体改变为混合气体;
- × e 当焊接Fe-10I、Ti-1、Ti-2类材料时, 取消尾部保护气体; 尾部保护气体从惰性气体改变为混合气体; 或尾部保护气体流量比评定值减少10%或更多;
- × f 从喷射弧、熔滴弧或脉冲弧改变为短路弧, 或反之。

× 补加因素:

× a 从评定合格的位置改为向上立焊;

× b 道间温度比经评定记录值高 50°C 以上;

× c 改变电流的种类或极性;

× d 线能量

× e 由每面多道焊改为每面单道焊;

× f 机动焊、自动焊时, 单丝焊改为多丝焊, 或反之;

× 4) 钨极气体保护焊

× 重要因素:

- × a 增加或取消填充金属;
- × b 实芯焊丝、药芯焊丝、金属粉之间变更;
- × c 预热温度比已评定合格值降低50℃以上;
- × d 改变单一保护气体种类; 改变混合保护气体规定配比; 从单一保护气体改用混合保护气体或反之; 增加或取消保护气体;
- × e 当类别号为Fe-10I、Ti-1、Ti-2、Ni-1~Ni-5时, 取消焊缝背面保护气体, 或背面保护气体从惰性气体改变为混合气体;
- × f 当焊接Fe-10I、Ti-1、Ti-2类材料时, 取消尾部保护气体; 尾部保护气体从惰性气体改变为混合气体; 或尾部保护气体流量比评定值减少10%或更多;
- × g 对于纯钛、钛铝合金, 在密封室内焊接, 改变为密封室外焊接。

- × 补加因素:
- × a 从评定合格的位置改为向上立焊;
- × b 道间温度比经评定记录值高 50°C 以上;
- × c 改变电流的种类或极性;
- × d 线能量
- × e 由每面多道焊改为每面单道焊;
- × f 机动焊、自动焊时, 单丝焊改为多丝焊, 或反之;

- × 等离子焊:
- × 重要因素:
 - × a 增加或取消填充金属;
 - × b 实芯焊丝、药芯焊丝、金属粉之间变更;
 - × c 预热温度比已评定合格值降低50℃以上;
 - × d 当类别号为Fe-10I、Ti-1、Ti-2、Ni-1~Ni-5时, 取消焊缝背面保护气体, 或背面保护气体从惰性气体改变为混合气体;
 - × e 当焊接Fe-10I、Ti-1、Ti-2类材料时, 取消尾部保护气体; 尾部保护气体从惰性气体改变为混合气体; 或尾部保护气体流量比评定值减少10%或更多;
 - × f 改变喷嘴和保护气体的流量和组成;
 - × g 对于纯钛、钛铝合金, 在密封室内焊接, 改变为密封室外焊接。

× 补加因素：

- × a 改变坡口型式；
- × b 从评定合格的位置改为向上立焊；
- × c 道间温度比经评定记录值高 50°C 以上；
- × d 改变电流的种类或极性；
- × e 线能量；
- × f 由每面多道焊改为每面单道焊；
- × g 机动焊、自动焊时，单丝焊改为多丝焊，或反之；
- × h 填丝焊改为小孔焊，或反之，或改为两者兼有。