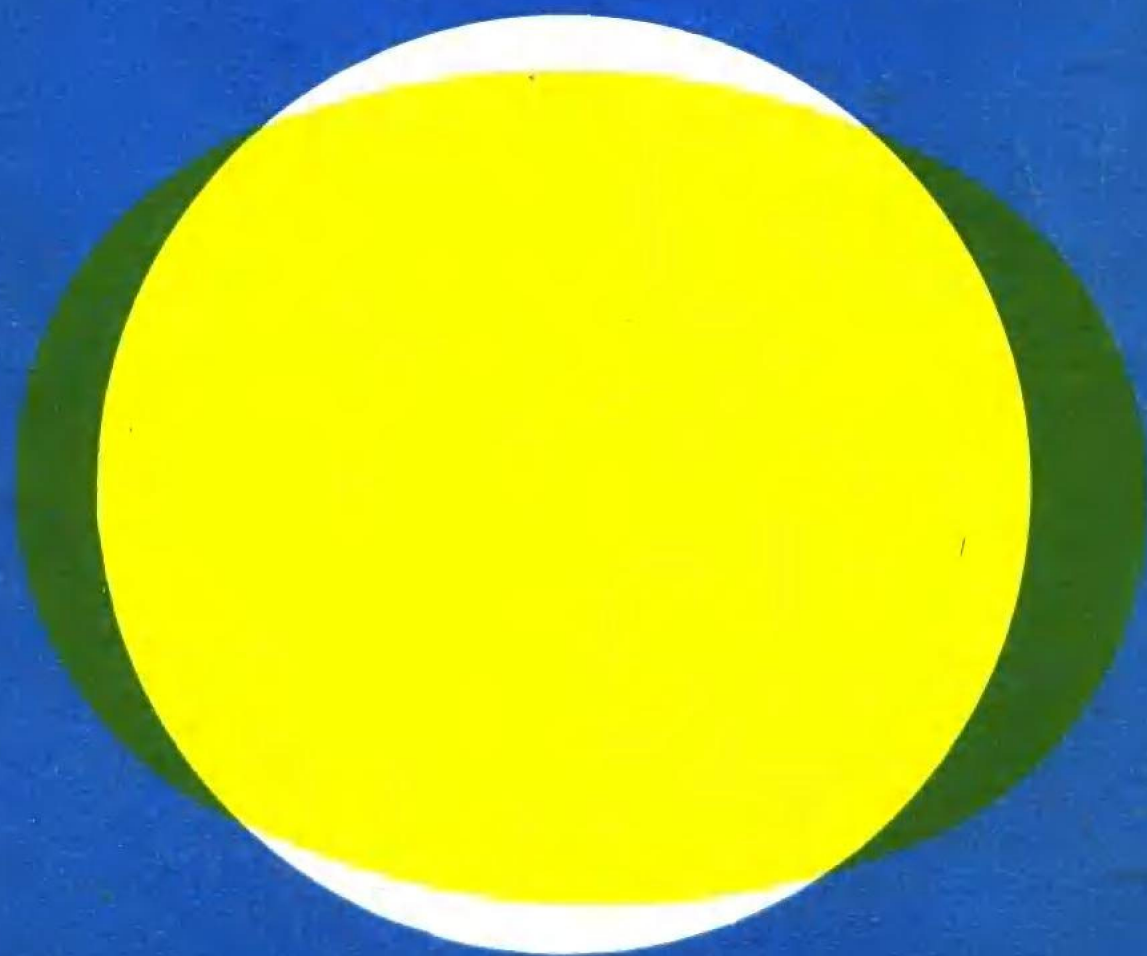


工程压力容器设计与计算

GONGCHENG YALI RONGQI SHEJI YU JISUAN

王 心 明 编



工程压力容器设计与计算

王 心 明 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书详细介绍工程压力容器的应力分析和设计计算。全书共分十二章，分别介绍钢制中高压容器、外压容器的应力分析和强度设计；压力容器法兰、高压密封机构、接管补强和断裂力学基本知识及其在工程压力容器设计上的应用。同时还叙述了压力容器的疲劳设计，以及压力容器材料和选择。

本书可供化工、机械、原子能、轻工、造船、冶金、海洋开发和其它工业部门的工程技术人员参考，也可以供大专院校有关专业师生阅读。

工程压力容器设计与计算

王 心 明 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 32 750千字

1986年8月第一版 1986年8月第一次印刷 印数：0,001—6,800册

统一书号：15034·2982 定价：6.50元

前 言

压力容器是化工、机械、原子能、轻工、造船、冶金和海洋开发等工业部门普遍采用的一种重要的机械设备。

容器，顾名思义是一种防漏的用于盛容物质的器皿式装置。压力容器系指能够承受力（内力、外力）作用的容器。这些力有：外部载荷（流体和气体压力，机械载荷等），由直接或间接加热作用引起的热负荷、或者外部载荷与直接或间接加热联合作用引起的载荷等等。压力容器广泛用于化工等工业部门的各种储罐、反应器、换热器，高压釜、蒸馏塔等，以及核反应堆中的压力容器，等等。

为了满足工业生产和科学研究，尤其是与能源有关的工业迅速发展的需要，压力容器的用途和范围愈来愈广，结构尺寸和重量愈来愈大，操作温度和工作压力愈来愈高，结构形式和工作条件愈来愈复杂，从而对容器的设计要求愈来愈高，并要求在保证运行安全可靠的情况下结构合理、节省材料、降低成本、便于制造，因此近十几年来压力容器的应力分析和设计方法有了很大变化。本书根据弹性理论，对钢制中压、高压容器壳体进行详细应力分析，介绍各种壳体的强度计算。同时也比较详细地叙述容器法兰、密封结构、接管补强等计算方法。本书还阐述了与压力容器应力分析和强度计算有关的弹性力学和塑性力学的基本知识，并另辟专章介绍了压力容器断裂力学设计和疲劳设计。其次，对压力容器使用材料及其选择也作了必要的介绍。书中内容反映出近十几年来压力容器研究、设计方面的新成果。

本书编写过程中，得到原化工部化工设计院、石油部机械所、一机部通用机械研究所及清华大学等单位的有关同志大力帮助。王绍廷副教授、贺匡国副教授、余梦生副教授等帮助审定初稿，并提出许多宝贵意见，在此一并深表谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不当之处，望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 压力容器材料和选择	1	第6节 高压容器设计公式选择	248
第1节 压力容器用材料的基本要求	1	第7节 安全系数选择	256
第2节 压力容器材料选择	22	第8节 自增强容器设计	259
第二章 压力容器的力学基础	29	第七章 多层厚壁高压容器	274
第1节 弹性理论基本方程	39	第1节 容器种类及设计要求	274
第2节 圆平板理论	37	第2节 热套组合圆筒	282
第3节 强度理论	46	第3节 层板包扎圆筒	300
第4节 热应力计算基础	49	第4节 扁平绕带圆筒	304
第5节 塑性力学基本知识	65	第5节 多层球形容器	308
第三章 压力容器应力分析	71	第6节 设计计算举例	309
第1节 薄膜应力	71	第八章 压力容器法兰设计	313
第2节 二次应力	89	第1节 法兰和垫片类型	313
第3节 边界效应理论应用—— 热应力分析	112	第2节 法兰应力分析	322
第4节 应力分类及应力限制	117	第3节 紧固螺栓计算	326
第5节 局部应力	127	第4节 法兰设计计算	332
第四章 薄壁压力容器设计	147	第5节 法兰极限载荷设计法简介	343
第1节 设计参数规定	147	第6节 极限应力法法兰设计举例	345
第2节 压力容器试验	164	第九章 高压容器零部件设计	349
第3节 内压圆筒设计计算	166	第1节 高压容器密封分类	349
第4节 球形壳体设计计算	168	第2节 双锥密封设计计算	352
第5节 内压容器封头设计计算	170	第3节 八角垫密封设计计算	356
第五章 外压容器设计	186	第4节 高压容器主要零件设计	360
第1节 外压容器稳定性	186	第十章 开孔和补强设计	371
第2节 临界长度的确定	195	第1节 开孔补强要素及设计要求	371
第3节 外压圆筒算图设计计算	196	第2节 开孔应力集中及应力集中系数	377
第4节 加强圈设计计算	206	第3节 厚壁容器开孔及应力集中系数	381
第5节 外压球壳设计计算	211	第4节 开孔补强原理	386
第6节 外压成形封头设计计算	213	第5节 等面积补强设计	390
第7节 夹套容器设计计算	217	第6节 安定性分析补强法原理及设计	394
第六章 单层厚壁高压容器设计	224	第十一章 压力容器疲劳设计	408
第1节 高压容器分类及设计要求	224	第1节 疲劳强度和持久限	408
第2节 圆筒应力分析	226	第2节 低循环疲劳	416
第3节 球壳应力分析	234	第3节 复杂应力状态	428
第4节 高压容器强度计算	237	第4节 压力容器疲劳设计	430
第5节 内压和温差同时作用的高压 容器强度计算	245	第十二章 压力容器脆性破坏和 断裂力学基础	436
		第1节 脆性破坏	436

第2节	线弹性断裂力学	444	附录 II	温度换算图	497
第3节	弹塑性断裂力学概述	463	附录 III	各种截面的力学特性表	498
第4节	断裂韧性测量	471	附录 IV	函数 $\Phi = \int_0^{\pi/2} \left(1 - \frac{c^2 - a_z}{c^2} \sin^2 \theta \right)^{1/2} d\theta$ 表	504
第5节	疲劳裂纹扩展特性	480	附录 V	单位换算表	504
第6节	断裂力学的设计应用	486	参考文献		505
附录 I	世界几个国家常用的圆筒壁厚计算公式、许用应力和焊缝系数表	496			

第一章 压力容器材料和选择

第1节 压力容器用材料的基本要求

压力容器用途很广，工作条件差异很大，因此在容器设计过程中正确地选择材料，是一件极为复杂而又特别重要的工作。压力容器受压元件所用材料选择的基本原则是使压力容器在实际操作条件（如压力、温度、外部负载、介质腐蚀性能、介质对材料的脆化作用和毒性等）下和指定的寿命内能够满足正常的安全的工作要求。作为容器设计者，不仅能够正确选择材料，而且应当了解影响材料性能（物理性能、机械性能等）的各种因素。下面，简单地介绍冶炼方法、合金元素、制造工艺、操作温度、介质腐蚀等对钢的各种性能的影响。

一、冶炼方法

炼钢过程是把生铁中含有的大量有害杂质元素，在氧化反应作用下转变成氧化物进入炉气和炉渣中排除以生产较纯金属的过程，所以炼钢过程也是氧化过程。根据冶炼方法和使用设备不同，可分平炉钢，转炉钢、电炉钢和坩埚钢。按炼钢炉炉衬不同，还可分为酸性钢和碱性钢。根据钢锭型式和脱氧情况，又可分镇静钢、半镇静钢和沸腾钢。

平炉钢，又称马丁炉钢，这种钢有酸性和碱性两种。平炉钢质量均匀，容易控制，产量大，是现代炼钢中的重要方法。平炉钢多用于制造受力构件。

转炉钢分酸性和碱性两种。转炉钢的成分不易控制，只能冶炼普通碳素钢。转炉钢用于一般对质量要求不高的构件。

电炉钢的主要特点是冶炼时钢液不和空气、煤气、焦炭等燃烧火焰接触，易于消除杂质，温度控制准确，质量较高，因此电炉钢一般都是优质钢。

坩埚钢质量更高，主要用于炼制高级合金钢。但成本高，产量低。自从高频电炉钢广泛采用以后，用这种方法炼钢就少了。

目前，压力容器主要用碱性平炉钢和碱性电炉钢。由于碱性炉熔炼去磷能力很好，因此厚截面钢板一般都采用这种方法冶炼，以使钢中的磷含量降至最低。另外，电炉操作时，可以倾斜放渣，不断地调整炉渣量，因而使易氧化的元素，例如铬和锰等具有较高的回收率，于是可以获得硫化物和氧化物夹杂很低的高纯净钢。其次，由于压力容器的操作压力和容器容积不断增加，特大型锻件的需要量也随之增多，这种锻件的压缩变形较小，热处理后不易获得此钢种应能达到的机械性能，因此提高钢的纯度是特别重要的。

为了提高低合金钢的可焊性，消除白点和开裂，必须降低钢锭（尤其是大型锻件的钢锭）中的氢含量。现在一般采用真空除气技术降低氢含量，改善锻件（尤其是特大型锻件）的纯度。除此而外，真空除气还能减少钢中的氧和氮含量。减少含氧量也就是减少了脱氧剂的用量，使钢更加纯净。经真空去气处理的钢，因非金属夹杂物减少，也改善了钢的疲劳特性。

二、合金元素对钢的影响

为了提高钢的机械性能，必须在钢中添加一些合金元素，其中最主要的有锰、硅、铬、镍、钼、钛、铌、钒、铝和铜等。这些元素添加在钢中后，对钢的物理性能和机械性能影响很大，根据元素加入量多少和搭配关系，可以产生下述三种情况：

- (1) 强度与碳钢相同时，韧性大大地提高；
- (2) 强度提高，韧性仍不低于碳钢；
- (3) 强度和韧性都提高。

1. 锰

锰是炼钢时用锰铁脱氧而残留在钢中的。一般碳钢含锰量在 0.3~0.5%。若含碳量在 0.3~0.5% 的碳钢中加入 0.7~1.8% 的锰时称为锰钢。锰具有很好的脱氧能力，能够清除钢中的 FeO，改善钢的性能，尤其是降低钢的脆性。锰可以和硫形成 MnS，消除硫的有害影响，改善钢的热加工性能。锰能降低钢的临界点，增加淬透性，对调质有良好的作用，使截面较大的工件获得较均匀的细化组织，从而减少截面不同部分力学性能的差异。锰在铁中有一定的固溶度，能溶于铁形成含锰铁素体，对钢有强化作用。因此作为合金元素加入钢中的锰，能够提高钢的强度性能和奥氏体钢的组织稳定性，截面较大的工件可以获得较均匀的细化组织。如锰含量增加到 10~15% 时，可获得韧性和强度都好的奥氏体钢，耐腐蚀性也很好，因此压力容器用碳素钢锰含量都很高。锰的不利影响是增加钢的过热敏感性和回火脆性。

锰是最便宜的合金元素，资源丰富，我国常用锰钢代替镍铬钢。

2. 硅

通常钢中硅含量在 0.2~0.3% 范围内。如钢中硅的含量超过 0.5% 时，则认为硅是作为特殊的合金元素加入的。硅和锰一样，也是一种脱氧剂，其脱氧作用比锰还要强些。此外，硅大部分溶于铁素体中，因此硅能提高钢的强度、耐蚀性和耐热性。硅含量高达 15~20% 时，即所谓高硅铸铁，具有特别好的耐酸腐蚀性能。含硅钢在氧化气氛中加热时，表面形成一层 SiO_2 ，从而提高钢在高温时的抗氧化能力，因此在铬、铬铝、铬镍钢中加入一定量的合金元素硅，将增加这些钢的高温抗氧化能力。锰钢加硅也能提高它的抗氧化性能，但含量过高时，钢表面脱碳倾向加剧。硅易在钢中产生带状组织，从而使钢材横向性能低于纵向性能，脆性转变温度升高，韧性和可焊性降低。

3. 铬

铬能提高钢的强度、硬度、耐磨性和耐腐蚀性。铬对淬透性的影响同锰一样的强烈，因此铬钢在调质处理时，易获得回火索氏体组织，具有良好的综合机械性能。铬又是较强的碳化物生成元素，它对调质钢在回火状态下碳化物的聚集起阻碍作用，使碳化物保持较大的分散度，从而提高了调质钢的强度，经淬火回火处理的铬钢，铬元素一般不降低其韧性。铬是决定不锈钢耐腐蚀性能的主要元素，钢中铬含量越高，其抗腐蚀性能越好。通常，不锈钢的铬含量高于 13% 以上。

由于铬能提高铬镍调质钢和高铬高碳钢的淬透性，因此冷却时要防止由组织应力而产生裂纹。高铬钢（含量超过 12~14% 时）的导热性能很差，在热加工加热时应注意缓慢地升温，并有足够的保温匀热时间。高铬钢在成型加工时，每次变形量要小些。

4. 镍

镍使钢具有很高的强度、塑性和韧性。当镍含量少于 20% 时, 其强度随镍含量增高而增加, 塑性随镍含量增高而降低。当镍含量高于 20% 时, 强度逐渐降低, 但塑性提高。镍能提高钢的抗疲劳性能, 减少钢对缺口的敏感性, 降低钢的低温脆性转变温度。镍能够提高钢对大气、海水、酸 (当镍含量超过 15~20% 时, 对硫酸、盐酸均有很高的耐腐蚀能力)、碱、盐等耐腐蚀性能。镍对钢的耐腐蚀性能的影响, 通常是使它与铬配合时才能充分地表现出来。因为镍是形成奥氏体的合金元素, 若在钢中只加入镍, 而不加入铬, 要使低碳镍钢获得纯的奥氏体组织, 只有镍含量超过 24% 时才能比较明显地提高钢的耐腐蚀性能。若镍和铬配合加入钢中, 如在铁素体铬不锈钢中加入少量的镍, 使金相组织由单相铁素体变为奥氏体和铁素体双相组织, 从而显著地提高钢的耐腐蚀性。若对此钢进行热处理, 则可提高强度。铬钢中加入的镍元素多一些, 奥氏体和铁素体双相组织就变为单相奥氏体钢 (Cr18Ni9)。这种钢具有特别好的耐腐蚀性能和良好的形变、焊接性能。

镍虽然属于稀贵金属, 但是它是炼制高级合金钢的主要元素之一。在具有腐蚀条件下工作的压力容器以及需要保持被处理物质不变质的储槽或装置 (例如食品工业用) 还应当用铬镍钢制造。

5. 钼

钼主要使钢具有耐热性和很高的高温机械性能。在结构钢中, 钼的作用是消除回火脆性、细化晶粒, 同时强烈提高钢的淬透性, 使截面厚度较大的部件可以淬透、淬深。在含有导致回火脆性的元素, 如锰、铬等钢中加入钼, 能防止和减少钢的回火脆性, 提高冲击韧性。在不锈钢中, 加入钼后能进一步提高钢对有机酸、过氧化氢、亚硫酸、硫酸、酸性染料、漂白粉等的耐腐蚀性能。

钼是较贵重的元素, 用途也很广, 因此钼钢 (一般和铬配合使用) 只能用于高温工作条件下的部件或重要的大截面构件, 例如: 高温高压容器的受力部件。

6. 钛

钛是最好的脱氧剂和除气剂。若在钢中加入 0.1~0.2% 的钛, 可加强熔炼时钢的精炼作用, 降低钢热处理的过热趋势。

钛能改善钢的热强性。在碳素钢和低合金钢中加入钛, 能提高持久极限和蠕变极限。含铬量在 4~6% 的铬钢中加入钛后, 能提高高温时的抗氧化性能。不锈钢中加入钛, 因其与碳的亲合力比铬大, 优先与碳结合生成碳化钛, 使铬差不多都能溶于固溶体中, 避免晶界贫铬, 减少晶间腐蚀倾向, 提高钢的耐腐蚀性能和韧性, 抑制钢在高温时晶粒长大倾向, 改善钢的焊接性能。在锰钢中, 加入少量的钛, 能提高它的机械性能, 特别是屈服极限; 在铸钢中加入约 0.2% 钛, 可以细化铸态组织, 提高铸钢的机械强度和韧性。

7. 钒

钒在钢中的主要作用是细化晶粒, 提高晶粒粗化温度, 降低钢的过热敏感性, 提高钢的强度和韧性。钒在高温溶入奥氏体时, 能提高钢的淬透性。相反, 若以碳化物形态存在时, 将降低钢的淬透性。其次钒能增加淬火钢的回火稳定性, 并产生二次硬化效应。

8. 钨

钨的硬度和熔点都高，一般用来制造合金工具钢和高速钢。钨能增加钢的回火稳定性、红硬性和热强性，如在结构钢中加入 0.2~0.4% 钨，便能防止热处理时晶粒长大和粗化，降低回火脆化倾向，显著地提高钢的强度和韧性。在不锈钢中，如 15A13 MoWTi（钨含量为 0.4~0.6%）是一种不含铬镍的耐腐蚀钢，用于常压加热炉、裂化加热炉、减压加热炉、催化加热炉辐射段炉管和裂化分馏塔、焦化分馏塔内构件等，耐腐蚀性能很好，优于 0Cr13 钢。

三、制造工艺对钢的影响

压力容器用的钢材，绝大部分都是经过压力加工（轧制、锻造、成形等）后才能使用，只有很少部分采用铸件。压力加工系指借外力作用，使金属材料产生塑性变形，产生一定的形状、尺寸和机械性能的零件或毛坯的加工方法。通过压力加工，能够改善金属组织，减少钢锭在浇铸过程中的缺陷，提高钢的机械性能。因此，了解轧制、锻造、成形、焊接和热处理等加工过程对钢的综合性能影响，对正确选择材料是必不可少的。详细内容见有关专门文献，这里只概略地介绍与压力容器有关的主要内容。

1. 形变硬化

在研究冷成形加工之前，需要介绍形变硬化的基本概念及其对钢的机械性能的影响。

在常温（低于再结晶温度）下，外力作用在零件上，若产生的应力超过材料的屈服极限时，将发生塑性变形，材料抵抗塑性变形的能力随着塑性变形的增加而提高。若施加的外力高达材料发生塑性变形之后卸载，应力将沿 CD 线变化趋于零，而材料则留下 OD 部分的残余应变，如图 1-1 所示。这时材料的比例极限和屈服极限都将提高，但强度极限没有变化。对于碳钢和某些少数金属，如果具有残余应变，并得到充分休息（例如几天），其比例极限和屈服强度升得更高，强度极限也有所增加。这种现象称为“形变硬化”或“形变强化”。

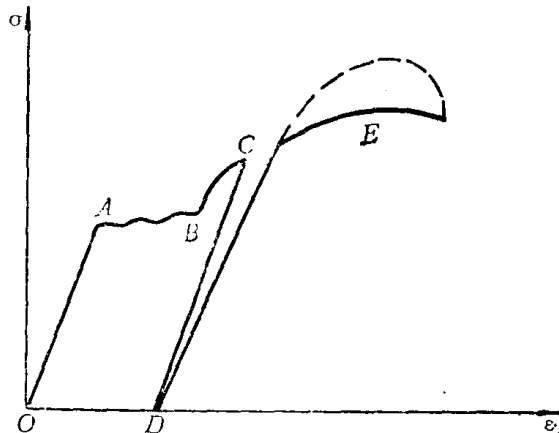


图 1-1

试验证明，金属在其再结晶温度以上时，不具有形变硬化现象，只是在再结晶温度以下即冷加工情况下，才会出现这种现象，因此又称“形变硬化”为“冷作硬化”。

形变硬化程度与应力和应变之间的关系用下式表示：

$$D = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1-1)$$

式中 D ——形变硬化度，公斤/厘米²；

$\Delta\sigma$ ——应力，公斤/厘米²；

$\Delta\varepsilon$ ——应变。

由式 (1-1) 可见, $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ 愈大, 材料抵抗塑性变形的能力愈大。

金属具有形变硬化这一重要特点, 从技术上来说, 其意义是很大的。可以这样说, 正是金属具有形变硬化这一特性, 才能使它得到如此广泛地应用。这是因为:

(1) 金属具有形变硬化特性, 使冷加工得以实现。如果金属只具有塑性变形而没有形变硬化能力, 要想得到均匀一致的冷变形是不可能的。由于具有塑性变形和形变硬化特性, 那一部分变形, 那一部分就硬化, 使塑性变形分布到其它未形变硬化的部分。于是, 可通过冷加工制造各种形状的零件。

(2) 形变硬化特性能防止零件突然断裂。零件在实际工作中, 由于种种原因总是有些部位的载荷偶尔超过材料的许用值 (屈服极限), 从而使该部分产生塑性变形。假如金属没有形变硬化特性, 变形开始后, 截面积减小, 过载应力增加, 变形更容易进行, 则此处的塑性变形使零件失效, 甚至于断裂。然而由于金属具有形变硬化特性, 在某种情况下, 万一某一部位过载, 它的变形会自行停止, 防止变形继续, 避免零件突然断裂。

(3) 利用形变硬化特性能够改变金属的机械性能。如前所述 金属材料形变硬化后, 强度极限和屈服极限都能提高。对于利用热处理无法增加强度的材料, 如 1Cr18Ni9Ti, 通过形变硬化处理后, 强度指标可明显提高。

2. 热加工

压力容器用钢材的热加工主要包括有热轧、锻造和热弯成形。

钢板轧制是在钢坯上进行的。就目前的技术水平来看, 能够轧制的钢板最大厚度可达 350 毫米。轧制钢材愈厚, 钢材 (钢坯或钢锭) 的压缩变形量愈小。目前允许的最小压缩比为 3。而实际需要的为 4, 基本上接近允许压缩比。

锻造也是在钢坯上进行的。目前压力容器用锻件主要用两种方法, 一种是芯棒锻造, 另一种是环形轧制。芯棒锻造是使锻件逐渐拔长和扩孔的加工过程; 环形轧制如普通轧制一样, 是连续加工的过程。一般地说来, 用环形轧制钢材比用芯棒锻造加工的钢材, 其组织更为均匀, 质量更好。这个影响, 对于大型锻件尤为突出。

3. 焊接

目前, 绝大部分压力容器都是由基本零件如圆筒、封头、接管、支座等焊接而成, 而基本零件也是由钢板、锻件等焊接制造的。选择焊接容器材料时, 可焊性是决定性的因素。所谓可焊性系指在焊接条件下获得满足设计要求的优质焊接接头的可能性。

对裂缝的敏感性和对金属缺陷的敏感性是焊接的两个最主要的材料质量指标, 同样也是衡量钢材是否可焊的性能指标。如前所述, 有些元素加入钢中, 能够降低材料对裂缝的敏感性和金属缺陷的敏感性。因此, 钢中含有合金元素不同, 其可焊性也不同。其次, 钢中含碳量多少对焊接性影响最大, 故通常以含碳量多少作为判断钢材可焊性的主要标志。除碳以外, 其它元素对可焊性的影响通过折算成相当的碳元素含量, 即所谓碳当量来表示。低合金钢的碳当量按下式计算^①:

$$C_D = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{3} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + \frac{Ni}{15} \quad (1-2)$$

① 有的文献介绍的碳当量计算式为:

$$C_D = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

一般情况下, 当 $C_D < 0.25$ 时, 可焊性良好; $C_D = 0.25 \sim 0.35$ 时, 可焊性合格; $C_D = 0.35 \sim 0.45$ 时, 可焊性不太好; $C_D > 0.45$ 时, 可焊性低劣。

必须指出, 用式 (1-2) 计算所得碳当量来判断钢材可焊性的优劣只能是近似的。下面我们主要讨论碳对可焊性的影响。

对于碳含量低于 0.28% 的碳素钢, 其焊接性能很好, 可以用各种焊接方法和工艺获得优质的焊缝接头, 能够做到焊缝接头的金属性能与母材完全一样。然而对于碳含量大于 0.28% 的碳素钢和合金钢, 其焊接性能就差得很远。通常会产生下述缺陷: 在焊缝中产生气孔; 在焊缝和热影响区产生裂纹。现在简单地分析产生这些缺陷的原因及其预防办法。

(1) 气孔: 中碳钢和高碳钢由于碳含量较高, 焊接时金属中的碳元素向熔池过渡。熔池脱氧不足时, 氧化铁 (FeO) 与碳作用, 生成一氧化碳 (CO)。在结晶后期生成的 CO 气体遗留在焊缝中形成气孔。基本解决办法是用含碳量较低的焊条作填充金属, 同时减少焊缝中母材金属的比例, 降低焊缝中的碳含量。

(2) 裂纹: 碳含量超过 0.28% 的碳钢, 在焊接过程中, 焊缝金属和热影响区在钢的熔点附近形成的微裂纹, 一般称为热裂纹。热裂纹主要是由杂质元素硫的偏析造成的, 其集中在热影响区的晶界和焊缝金属枝状晶之间的区域中。因为是微观裂纹, 往往难以发现, 故有很大的危险性。普通碳钢中, 硫是促使热裂纹产生的主要因素, 因此增加锰/硫比可以避免热裂的产生。当锰/硫比一定时, 碱性焊条抗热裂纹形成的能力比其它焊条好。对于制造宇航工业用压力壳体的中碳高强度合金钢, 一般是在母材上产生裂纹, 为了利用这种钢所具有的优异的机械性能, 往往把硫含量减到此钢能够达到可焊的程度。

冷裂, 又称氢裂或热影响区裂纹等, 是一种最危险的裂纹, 并能导致压力容器在水压试验时产生突然性破坏。裂纹一般产生于焊缝的硬脆区或热影响区, 因此是一个潜在的脆性破坏源。冷裂一般在温度低于 200°C 时下述三种因素即马氏体组织或部分马氏体组织、氢和焊接残余应力同时存在的情况下才能出现。如果钢不转变成马氏体, 氢是不起作用的。正是氢、马氏体和焊接内应力的联合作用, 才造成焊道下的破裂。冷裂一般出现在热影响区, 但是预热温度和时间不够时, 也能在焊缝金属中产生。由于形成冷裂必须是钢的金相组织能够转变成马氏体, 因此对于薄壁低碳钢没有多大影响, 然而对于厚壁 (如碳含量为 0.2~0.3%, 厚度超过 25 毫米) 或碳含量较高的碳钢 (如超过 0.3%), 冷裂常常发生。钢的导热率一定, 形成马氏体的可能性随厚度增加而增加; 钢材厚度一定, 冷却速率随焊缝熔池尺寸减小而增加, 小焊缝比大焊缝 (其它相同) 多半易于产生冷裂。对于铁素体合金钢, 除使碳含量降低到规定限度之内以外, 其它也应符合上述规律要求。对于铬和钼含量分别高于 0.5% 的合金钢, 在正常情况下规定的碳含量 (约 0.15% C) 对冷裂是敏感的。

压力容器设计者或制造者必须采取一切可能的措施防止冷裂的产生。就材料选择而言, 首先避免采用含碳量超过 0.3% 的碳钢或碳钼钢, 以及碳含量超过 0.2% 的合金钢。对于铁素体合金钢, 冷裂的危险性随合金元素含量和强度极限的提高而增加。具体的说, 钢的冷裂敏感性取决于正常冷却速率下是否在热影响区转变成马氏体, 换言之, 取决于钢的转化特性。为了避免在热影响区转变成马氏体, 通常对钢进行预热, 各种钢的预热温度见有关压力容器规范, 这里不再赘述。

其次, 由于应力松弛而产生的裂纹也是焊接过程中常见的缺陷, 产生这种缺陷的原因可能有几种。如果在焊缝接头处残余应力较高, 但在蠕变温度范围内可以消除残余应力。在正常情况下, 金属蠕变韧性完全可以适应较小的蠕变变形。但是在应力集中区(角焊缝焊边), 如果应力集中的影响使局部应变超过材料的塑性, 尤其是通过靠近焊缝区域的金相组织变化降低应力集中时, 裂纹就会产生。

因消除残余应力而产生的裂纹对高压厚壁容器焊接制造具有特殊的意义。例如由铁素体钢制造的厚壁压力容器, 尽管考虑了高温使用条件下可能出现裂纹并采取适当的预防措施, 但是在消除应力处理时, 还是可能出现裂纹的。对于某些合金钢的刚性焊接接头, 焊后热处理温度在 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ 范围内是不够的。对于奥氏体不锈钢制的厚壁容器, 由于热应力和残余应力的联合作用, 在对接焊缝处也易产生裂纹。

因应力松弛产生裂纹的主要原因是焊接接头设计的不合理, 具有应力集中源等。一般来说, 压力容器中应力松弛裂纹主要产生在接管与厚度超过 60 毫米圆筒壳连接的焊缝边(热影响区)。

焊接对钢的耐腐蚀性能起着不良的影响。一般有两个问题: 一个是不稳定奥氏体铬镍钢的“焊缝蜕变”, 另一个是奥氏体钢的应力腐蚀裂纹。焊缝蜕变主要是由于 18-8 不锈钢熔化焊缝热影响区中晶内碳化物析出而引起的, 此敏感区在酸性介质中易被腐蚀。焊缝蜕变可以采用下述两种办法解决: 第一把碳含量降到 0.03% 以下; 第二在钢中加入少量的钛和铌。前者称超低碳钢, 后者称稳定钢。防止奥氏体不锈钢焊缝应力腐蚀裂纹的唯一方法是使这种材料不直接同含有氯化物或氢氧化钠的水相接触, 或者在 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 消除应力。消除应力对于管子是可行的, 而对于容器来说困难很大, 有的根本办不到。因此以防止与这些介质接触最为适宜。

四、腐 蚀

有些压力容器常常要同强烈的腐蚀介质如酸、碱、盐、有机质溶液和腐蚀气体相接触, 这些介质强烈地腐蚀容器材料, 使容器寿命大大地缩短。同时, 不少操作过程是在高温、高压和高流速下进行, 这就加快了金属材料的腐蚀速率。因此, 设计容器时, 必须根据具体情况, 参考国内外同类型设备的使用经验和选材准则, 合理地选择材料。

金属材料的腐蚀形式分为均匀腐蚀和局部腐蚀两种。局部腐蚀又分为区域腐蚀、点腐蚀和晶间腐蚀等, 图 1-2。工程构件各种腐蚀破坏占总腐蚀破坏的比例列入表 1-1。

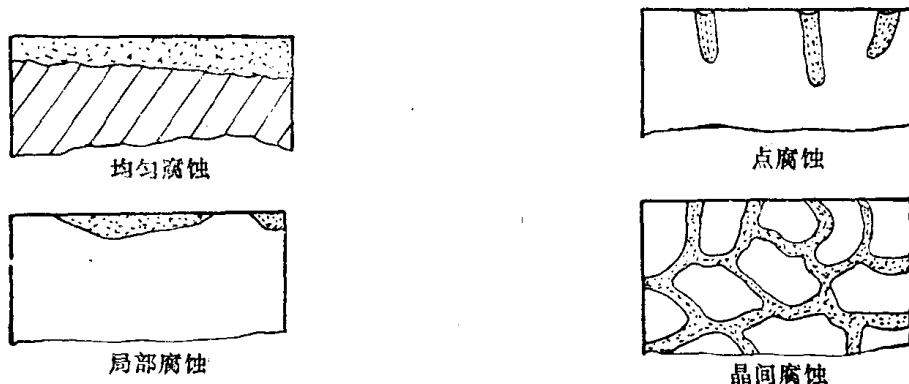


图 1-2

表1-1 工程构件各种腐蚀破坏占总腐蚀破坏的百分比

腐蚀破坏形式	%	腐蚀破坏形式	%
一般腐蚀	31.5	空穴腐蚀等	9.0
应力腐蚀裂纹	23.4	高温腐蚀	2.3
腐蚀疲劳		焊缝腐蚀	2.3
点腐蚀	15.7	氢脆	0.5
晶间腐蚀	10.2	其它腐蚀	5.2

均匀腐蚀的特征是在腐蚀介质作用下, 金属整个表面腐蚀均匀, 结果只是壁厚减薄, 对金属材料的机械性能影响不大, 在设计时如考虑腐蚀量并加到容器计算壁厚时, 就不会产生太大的危险。均匀腐蚀一般用腐蚀速率衡量材料的耐蚀性, 即每年腐蚀深度, 用毫米/年表示。均匀腐蚀速率取决于腐蚀介质的性质、浓度、介质流速和介质温度等因素。一般认为腐蚀速率 $k_r < 0.1$ 毫米/年者为耐腐蚀性良好的材料; $k_r = 0.1 \sim 1$ 毫米/年者为可以使用的材料; $k_r > 1$ 毫米/年者, 对于重要容器不宜采用。

防止均匀腐蚀方法是选择适当的耐腐蚀材料, 改变介质因素, 采用特殊的防腐涂层和电化学保护措施。

局部腐蚀是金属表面上个别地方出现腐蚀。腐蚀破坏的形式是出现麻点、局部穿孔、组织变脆等, 几种典型的局部腐蚀现象见图 1-3。腐蚀开裂的路径有晶间、穿晶和穿晶分支三种, 如图 1-4 所示。一般情况下, 受局部腐蚀的容器壁厚是根据最弱断面的强度计算的。但是, 局部腐蚀的部位和程度事先很难精确确定, 腐蚀的结果几乎都是在无明显重量损失(壁厚不减薄)的情况下突然破坏, 因此无法用均匀腐蚀速率判断材料的耐蚀性, 也就是说不能用增加腐蚀裕度的办法满足容器耐腐蚀的要求。防止局部腐蚀的途径是通过腐蚀试验弄清楚腐蚀的性质和条件, 采取相应的措施。目前有关这方面的文献较多, 我们只讨论压力容器经常碰到的、危害特别大的晶间腐蚀和应力腐蚀开裂的基本概念和防止方法。

晶间腐蚀主要出现在奥氏体不锈钢中, 这种腐蚀能使晶粒间的结合力差不多完全丧失, 材料强度几乎消失, 经过腐蚀的不锈钢表面有时还很光亮, 但是在受很小应力作用时就会断裂。不锈钢产生晶间腐蚀的主要原因是: 在 $400 \sim 850^\circ\text{C}$ 温度间再加热时在晶界上析出铬的碳化物 (Cr_{23}C_6), 这种碳化物的生成, 每 1% 的碳需要 10~12% 的铬。因铬在晶体内扩散速度低于碳, 碳化物需要的铬含量只能从晶界附近的固溶体中吸收, 因此使晶界部分严重贫铬, 以致腐蚀介质不能使其钝化, 从而失去耐蚀性。图 1-5 为发生晶间腐蚀的温度 (T) 和时间 (t) 关系。由图中可见, 18-8 钢在 $650 \sim 750^\circ\text{C}$ 时, 对晶间腐蚀最敏感, 因此称此温度范围为敏化温度。于是, 18-8 钢淬火后, 若在 $400 \sim 850^\circ\text{C}$ 之间, 尤其是在 $550 \sim 750^\circ\text{C}$ 之间保温一定时间以后, 就会发生晶间腐蚀。18-8 钢焊接时, 靠近焊缝的热影响区 ($400 \sim 850^\circ\text{C}$ 区域) 有可能产生晶间腐蚀。

根据产生晶间腐蚀的原因, 在生产上采取了许多措施防止晶间腐蚀的产生。其中主要有:

(1) 降低钢的含碳量。尽量把奥氏体不锈钢中的碳含量降到使碳在奥氏体中被溶

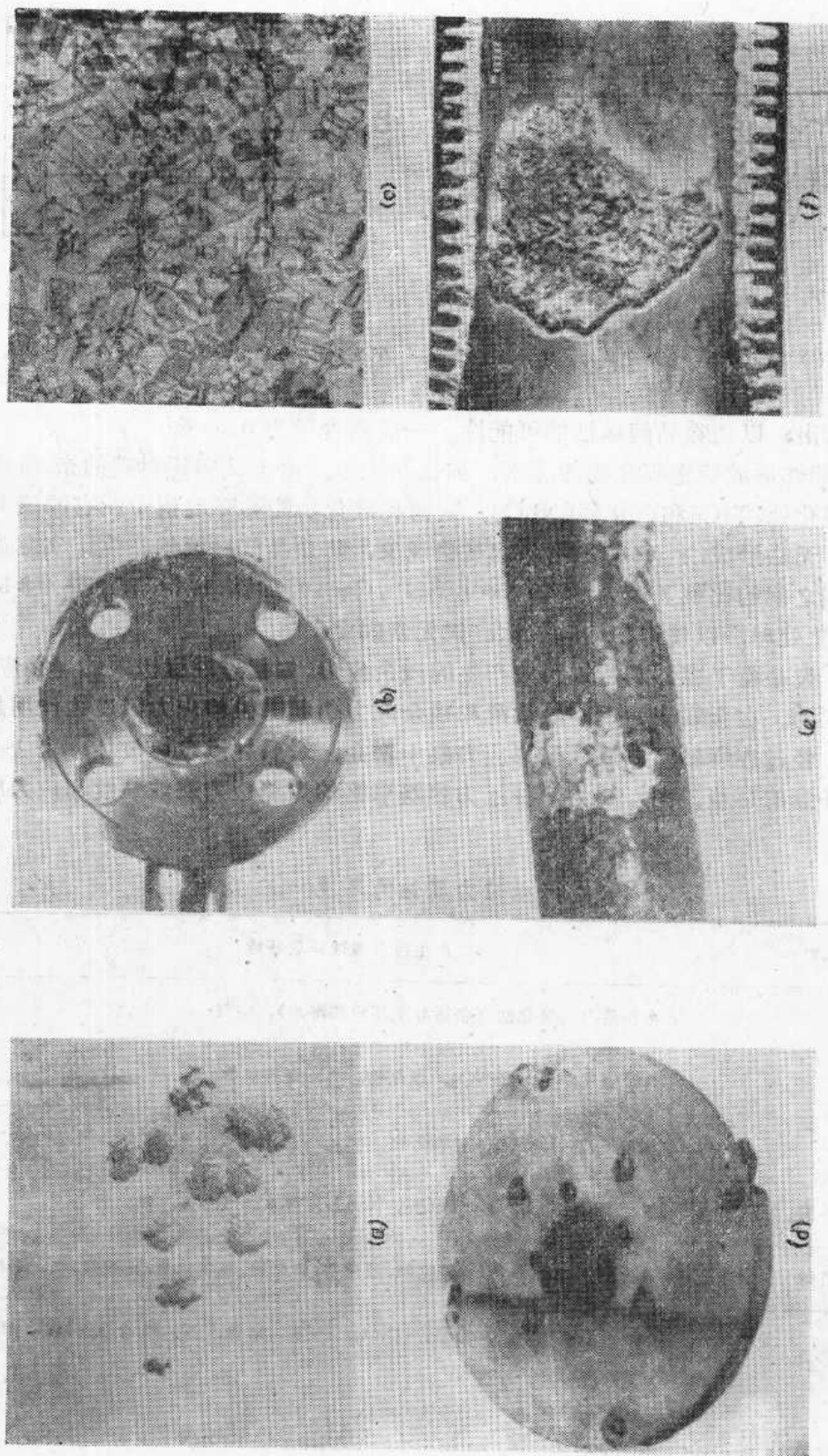


图 1-8

a) 奥氏体铬钢在含氯离子水中腐蚀麻点; b) 高合金钢管法兰在海水中的腐蚀; c) 黄铜管在含有少量氨的水中产生的穿晶应力开裂腐蚀; d) 普通铜的电池作用腐蚀; e) 生物腐蚀(穿孔); f) 铜管表面结块腐蚀。

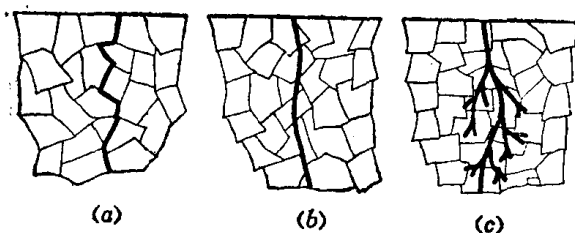


图 1-4

a) 晶间腐蚀; b) 穿晶腐蚀; c) 穿晶分支腐蚀。

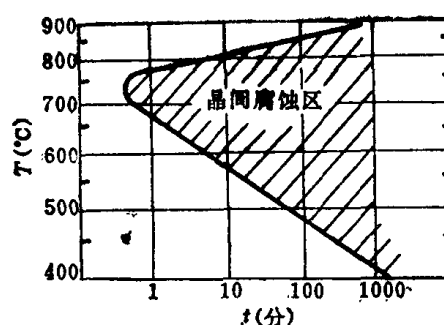


图 1-5

钢成分 C-0.19%; Cr-15.2%; Ni-10.9%。

解, 无碳化物析出, 以消除晶间腐蚀的可能性。一般碳含量为 0.05%。

(2) 添加能够形成稳定碳化物的元素, 如钛、铌等。由于钛和铌对碳的亲合力很强, 优先形成碳化钛(TiC)和碳化铌(NbC)。这两种碳化物能够夺取钢中所有的碳并不易溶于奥氏体, 无法形成 Cr_{23}C_6 , 消除晶间贫铬现象, 防止晶间腐蚀的产生。实际加入的钛、铌量与碳之间的比例关系为: $\text{Ti}/\text{C} = 6$, $\text{Nb}/\text{C} = 10$ 。加钛、铌钢, 应加热至 $850 \sim 900^\circ\text{C}$ 进行稳定化处理, 以使钢中的碳被钛、铌元素固定。

应力腐蚀开裂是由于容器制造过程中产生的残余应力(如超过屈服极限的焊接应力)和工作应力引起的。在金属表面上, 静载荷和残余应力引起的拉伸应力因腐蚀作用超过材料屈服极限。经过连续暴露以后, 局部应力集中增高, 最后导致金属破坏。表 1-2 为产生应力腐蚀开裂的环境。图 1-6 为两种压力容器用钢的焊缝应力腐蚀裂纹和应力腐蚀裂纹的情况。

表1-2 产生应力腐蚀的环境

材 料	产生应力腐蚀开裂环境
铝	水和蒸汽, 氯化钠 (包括海上环境和海水), 空气
铜	热带空气, 汞, HgNO_3 , 溴化物, 氨, 氨有机物
铝青铜	水和蒸汽, H_2SO_4 , 氢氧化物
奥氏体不锈钢	氯化物 (包括 FeCl_2 , FeCl_3 , NaCl), 海水, H_2SO_4 , 氟化物
铁素体不锈钢	氯化物 (包括 NaCl), 氟化物, 溴化物, 碘化物, 氢氧化物, 硝酸盐, 水, 蒸汽
碳钢或低合金钢	HCl , 氢氧化物, 硝酸盐, HNO_3 , HCN , 熔锌, Na-Pb 合金, H_2S , H_2SO_4 , HNO_3 , H_2SO_4 , 海水
高强度合金钢	海上环境
蒙乃尔高强度延性抗腐蚀合金	熔融的苛性苏打, 盐酸、氢氟酸

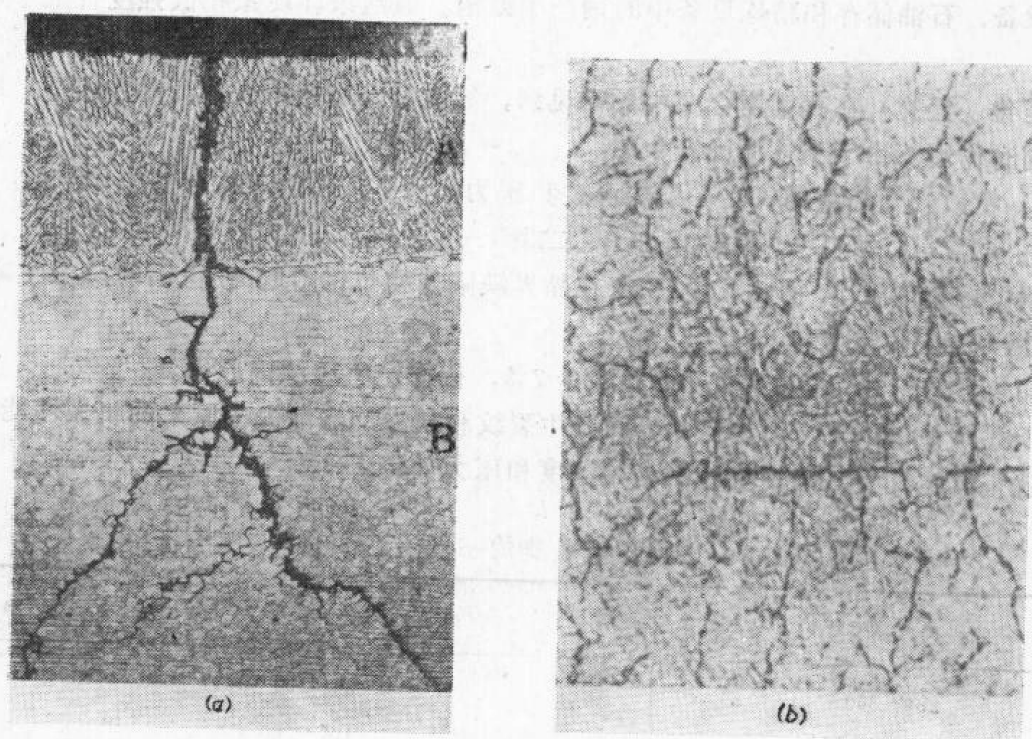


图 1-6

a) 12Ni5Cr3Mo钢焊缝应力腐蚀裂纹。A—焊缝金属；B—热影响区。b) Ti6Al4V压力容器合金内表面在 N_2O_4 作用下产生的应力腐蚀裂纹（图中为半球形封头区裂纹）。

解决应力腐蚀开裂的办法比较多，主要有：

(1) 减少作用载荷或残余应力，降低应力集中；保证构件具有足够的柔性，增加危险截面的尺寸，避免焊接和螺栓连接的截面错位，焊缝接头光滑。

(2) 改变介质条件，以减少或消除对材料应力腐蚀的敏感性，如通过水处理降低冷却水与蒸汽的氯根含量，减少对奥氏体不锈钢应力腐蚀开裂的影响。

(3) 选择合适的材料。一般情况下，一种介质只对相应的材料存在着应力腐蚀的敏感性，而对其它材料不敏感或敏感性较差。目前国内外已经研制出抗应力腐蚀开裂的不锈钢系列，如含硅钢、高镍奥氏体钢、氮磷铜含量特别低的高纯奥氏体钢、复相钢，超纯高铬铁素体钢等。

(4) 尽量避免或减少易引起残余拉伸应力的任何机械加工、装配或焊接工序，严格控制热处理条件、采取措施使表面产生压缩应力。

五、钢的氢破坏

氢破坏主要有局部裂纹（或氢鼓泡）和氢脆化两种形式。对金属起破坏作用的主要是原子氢。在金属材料中受原子氢侵入的条件很多，例如酸腐蚀、阳极保护、与石油接触、在潮湿天气中焊接和电镀等都能在金属中产生原子氢，或者常受氢气作用的设备在一定的条件（即一定的压力和温度）下，也会发生严重的氢破坏（腐蚀）。

氢鼓泡是因为氢原子扩散到钢中的内部空穴形成大分子氢，分子氢不能从空穴里逸出，从而产生很高的压力，使材料破裂，形成鼓泡或产生局部裂纹。在腐蚀介质中，硫化物、氰化物，以及砷、锑、硒和碲化合物等都能加快鼓泡的形成。腐蚀产生的氢能够