

第三章
压力容器用材以及环境和时间
对其材料性能的影响

**MATERIALS FOR PRESSURE VESSELS
AND INFLUENCES OF ENVIRONMENT AND
TIME ON PROPERTIES OF THESE MATERIALS**

第三节 环境对压力容器
用钢性能的影响

3.3 环境对压力容器用钢性能的影响

3.3.1 温度

3.3.2 介质

3.3.3 加载速率

3.3 环境对压力容器用钢性能的影响

教学重点：

温度对钢材性能的影响。

教学难点：

高温下钢材的性能和性能劣化。

3.3.1 温度

不同用途的压力容器的工作温度不同。

钢材在 { 低温
中温
高温 } 下，性能不同

高温下，钢材性能往往与作用时间有关

介绍几种情况的影响

- 一、短期静载下温度对钢材力学性能的影响
- 二、高温、长期静载下钢材力学性能
- 三、高温下材料性能的劣化

一、短期静载下温度对钢材力学性能的影响

1、高温下

温度较高时，仅仅根据常温下材料抗拉强度和屈服点来决定许用应力是不够的，一般还应考虑设计温度下材料的屈服点。

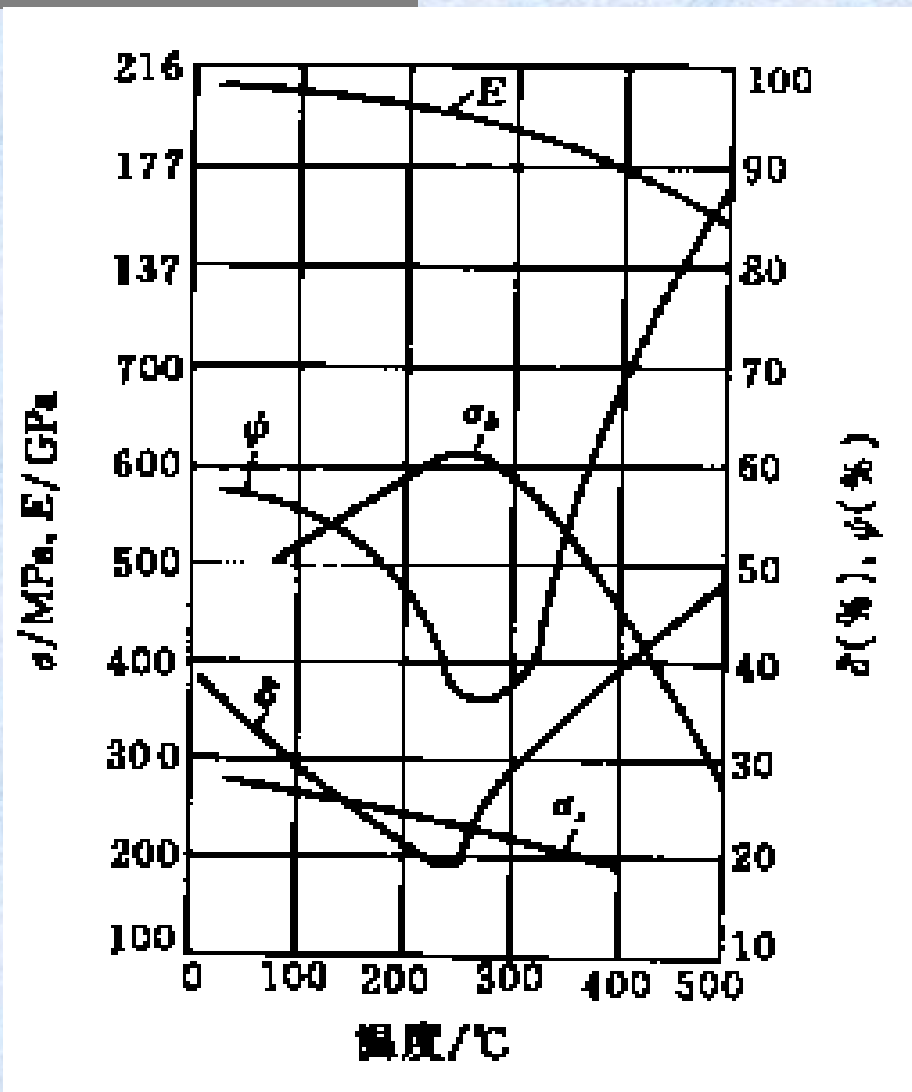


图3-3 温度对低碳钢力学性能的影响

3.3.1 温度

2、低温下

随着温度降低，碳素钢和低合金钢的**强度**提高，而**韧性**降低。当温度低于 20°C 时，钢材可采用 20°C 时的许用应力。

概念

韧脆性转变温度——（或脆性转变温度）

当温度低于某一界限时，钢的冲击吸收功大幅度地下降，从韧性状态变为脆性状态。这一温度常被称为韧脆性转变温度或脆性转变温度。

3.3.1 温度

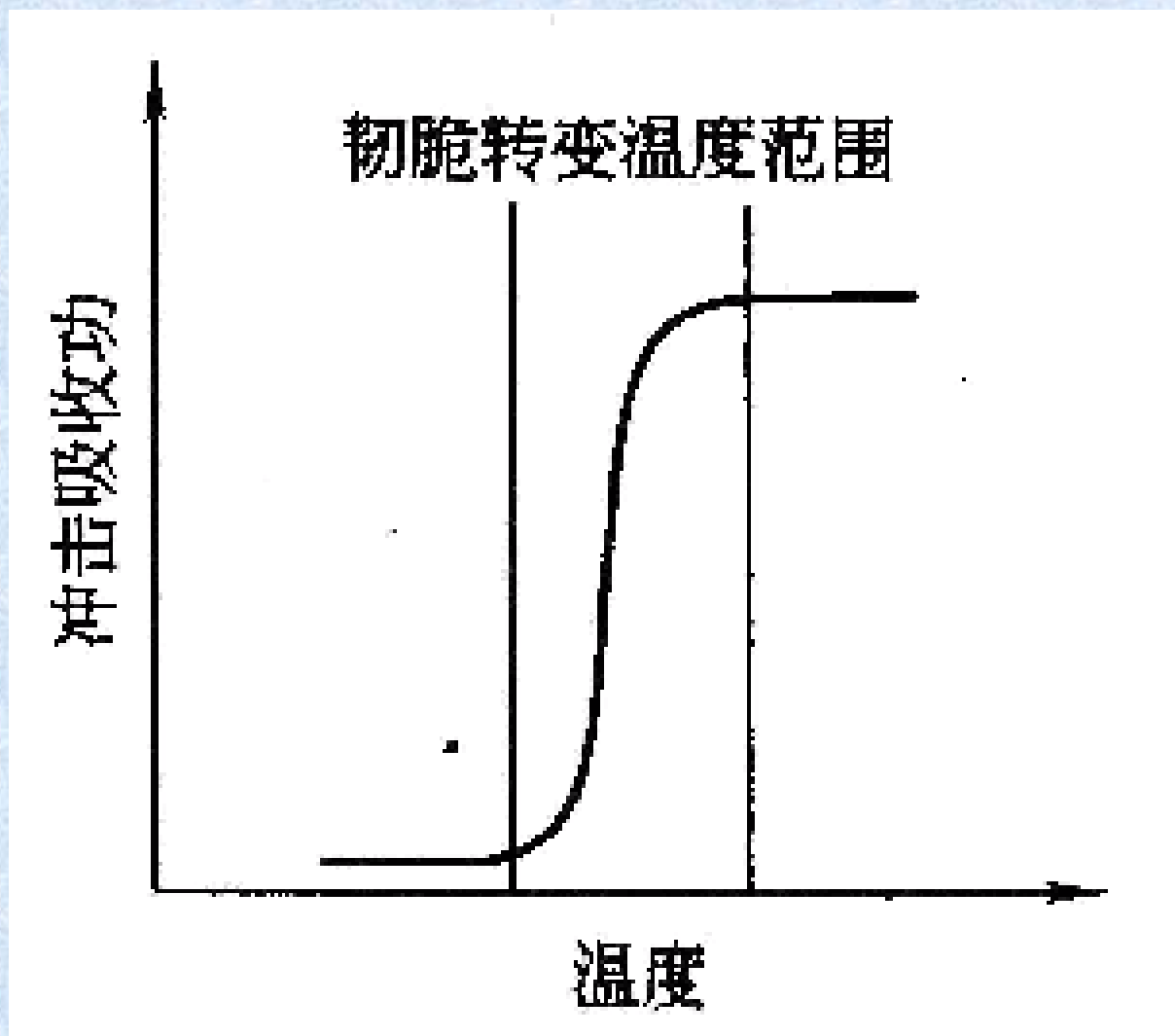


图3-4 低碳钢冲击吸收功和温度的关系曲线

3.3.1 温度

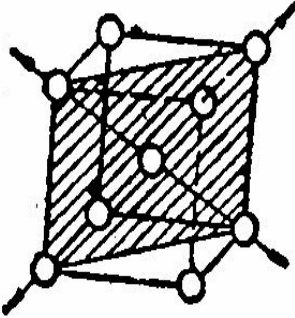
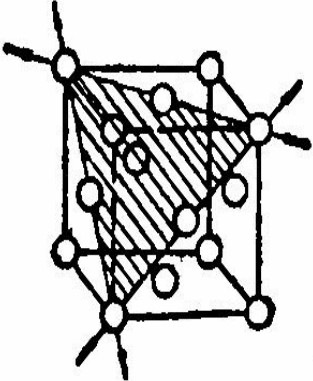
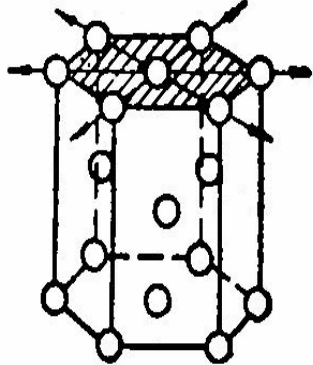
低温变脆的金属：

具有体心立方晶格的金属
如碳素钢和低合金钢

低温仍有很高韧性的金属：

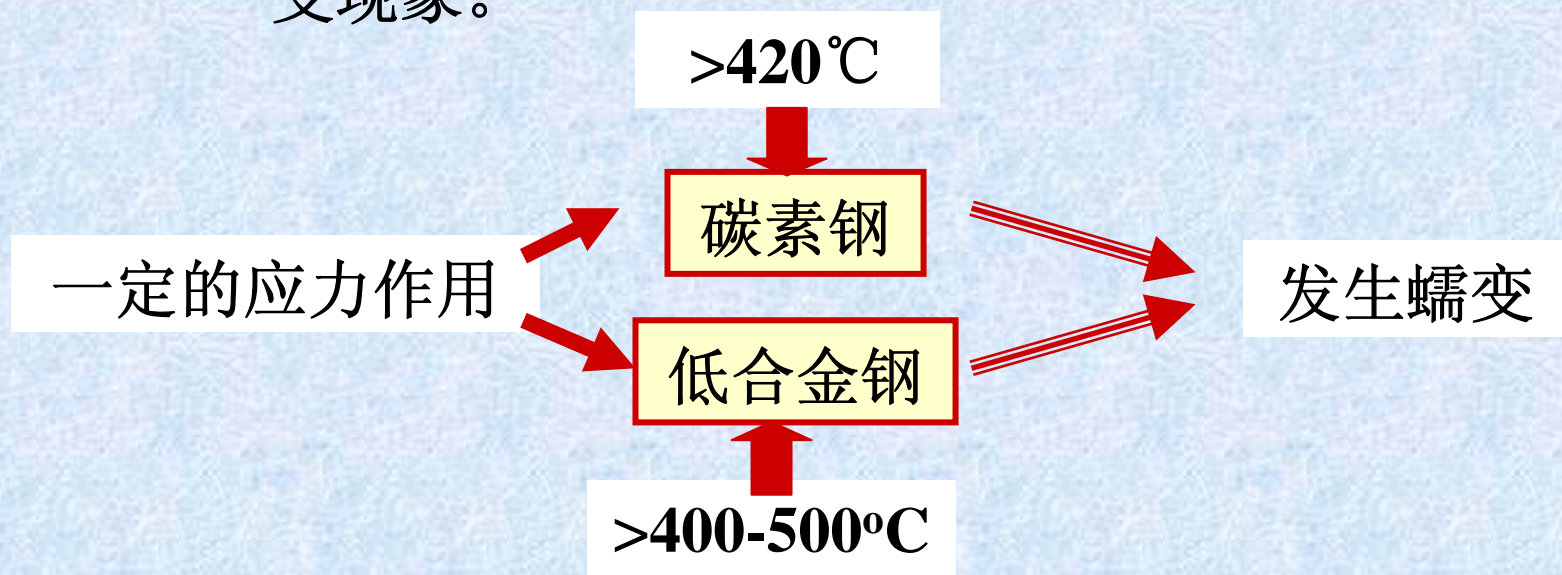
面心立方晶格材料如铜、铝和奥氏体不锈钢，冲击吸收功随温度的变化很小，在很低的温度下仍具有高的韧性。

3.3.1 温度

晶体结构	体心立方结构	面心立方结构	密排六方结构
滑移面及方向			
滑移系数目	$6 \times 2 = 12$	$4 \times 3 = 12$	$1 \times 3 = 3$

二、高温、长期静载下钢材性能

蠕变现象： 在高温和恒定载荷的作用下，金属材料会产生随时间而发展的塑性变形，这种现象被称为蠕变现象。



蠕变的危害

蠕变的结果是使压力容器材料产生蠕变脆化、应力松弛、蠕变变形和蠕变断裂。

因此,高温压力容器设计时应采取措施防止蠕变破坏发生。

3.3.1 温度

1、蠕变曲线

蠕变曲线三阶段

一. 减速蠕变

二. 恒速蠕变

三. 加速蠕变

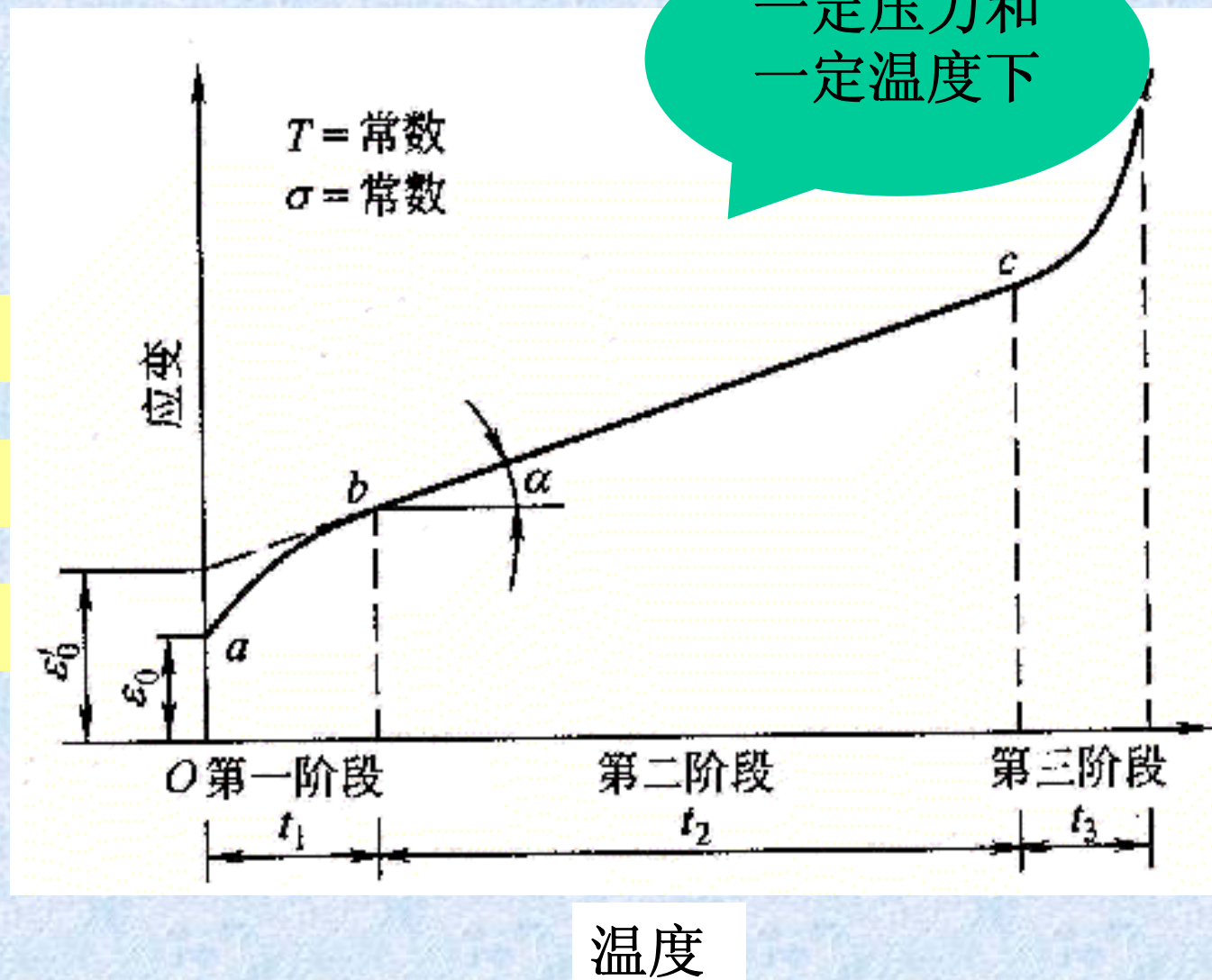


图3-5 蠕变应变与时间的关系

3.3.1 温度

oa线段——试样加载后的瞬时应变。

a点以后的线段——从**a**点开始随时间增长而产生的应变才属于蠕变。蠕变曲线上任一点的斜率表示该点的蠕变速率。

ab为蠕变的第一阶段

即蠕变的不稳定阶段，蠕变速率随时间的增长而逐渐降低，因此也称为蠕变的减速阶段。

bc为蠕变的第二阶段

在此阶段，材料以接近恒定蠕变速率进行变形，故也称为蠕变的恒速阶段。

cd为蠕变的第三阶段

在这阶段里蠕变速度不断增加，直至断裂。

3.3.1 温度

对于同一材料，给定温度改变应力或给定应力改变温度时，蠕变曲线形状不同。

▲当应力较小或温度很低时，第二阶段的持续时间长，甚至无第三阶段；相反，当应力较大或温度较高时，第二阶段持续时间短，甚至完全消失。

3.3.1 温度

2、蠕变极限与持久强度

a、蠕变极限——高温长期载荷作用下，材料对变形的抗力

蠕变极限表示法

- ★在给定温度下，使试样产生规定的第二阶段蠕变速率的应力值
- ★在给定温度和规定时间内，使试样产生一定量的蠕变总伸长率的应力值（常用）

b、持久强度——在给定的温度下，经过一定时间后发生断裂时构件所能承受的最大应力。

3.3.1 温度

◇考虑蠕变极限和持久强度的场合：

蠕变极限适用于在高温运行中要严格控制变形的零件的设计，如涡轮叶片

高温压力容器设计中，不仅要防止过大的变形，而且要确保在规定条件下不会蠕变断裂，往往同时用蠕变极限和持久强度来确定许用应力。（蠕变极限常用第二种表示法，且一般规定时间为 10^5h ，总伸长率为1%；确定持久强度的时间为 10^5h 。）

温度和应力对蠕变断裂形式有显著的影响

◎在高应力、较低的温度时，断裂前有大量的塑性变形，断

裂后伸长率较高，断口呈韧性形态；

◎而在应力低、温度高时，断裂前塑性变形小，断裂呈脆性，断裂后伸长率较低，缩颈很小，在晶体内部常发现大量的细小裂纹

3.3.1 温度

松弛

在常温下工作的零件，在发生弹性变形后，如果变形总量保持不变，则零件内的应力将保持不变。但在高温和应力作用下，随着时间的增长，如果变形总量保持不变，因蠕变而逐渐增加的塑性变形将逐步代替原来的弹性变形，从而使零件内的应力逐渐降低，这种现象称为松弛。

如高温压力容器中的连接螺栓，可能因松弛而引起容器泄漏。

3.3.1 温度

三、高温下材料性能的劣化

在高温下长期工作的钢材性能的劣化主要有：

蠕变脆化（前面已经讲了）

珠光体球化

石墨化

高温回火脆化

氢腐蚀和氢脆

3.3.1 温度

a、珠光体球化

危害：

使材料的屈服点、抗拉强度、冲击韧性、蠕变极限和持久极限下降

例如：16Mn钢的 $\phi 245 \times 26$ 蒸汽管道在9.8MPa、510°C条件下，运行约八万小时后，珠光体严重球化，碳化物积聚在晶界上，使其力学性能明显下降。

补救：已发生球化的钢材可采用热处理的方法使之恢复原来的组织。如将上述管道加热至920°C，停留1h，然后打开炉门冷却，力学性能则有所提高。

3.3.1 温度

b、石墨化

钢在高温长期作用下，珠光体内渗碳体自行分解出石墨的现象，称为石墨化

危害：

使金属发生脆化，强度和塑性降低，冲击值降低得更多。

产生环境：

石墨化现象只出现在高温下。对碳素钢和碳锰钢，当在温度 425°C 以上长期工作时都有可能发生石墨化。温度升高，使石墨化加剧，但温度过高，非但不出现石墨化现象，反而使已生成的石墨与铁化合成渗碳体

预防：

要阻止石墨化现象，可在钢中加入与碳结合能力强的合金元素，如铬、钛、钒等，但硅、铝、镍等却起促进石墨化的作用。

3.3.1 温度

c、回火脆化

2.25Cr-1Mo等铬钼钢，这些高温压力容器的常用材料，长期在**300-600°C**下使用，或者从此温度范围缓慢冷却，脆性转变温度会升高，冲击韧性降低，这种现象称为回火脆化。

研究表明：

影响**2.25Cr-1Mo**钢回火脆化的主要因素为化学成分和热处理条件。**P、Sb、Sn、As**等微量杂质元素的含量越多，奥氏体化温度越高，**2.25Cr-1Mo**钢对回火脆化月敏感。

3.3.1 温度

d、氢腐蚀和氢脆

氢能引起材料多种类型的性质劣化，但加氢反应器等压力容器中最常见的是氢腐蚀和氢脆。

3.3.1 温度

d-1. 氢腐蚀

高温、高压下氢与钢中的碳形成甲烷的化学反应，又称为氢蚀。

氢腐蚀有
两种形式



- ◆ 1. 和钢表面的碳化合生成甲烷，引起钢表面脱碳，使力学性能恶化；
- ◆ 2. 渗透到钢内部，与渗碳体反应生成甲烷。

影响氢腐蚀 的主要因素

温度
氢分压
时间
合金成分
应力等

●一般情况下，碳素钢在 200°C 以上的高压氢环境中才会发生氢腐蚀。钢中加入铬、钒、钛、钨等能形成稳定碳化物的元素含量，可提高钢抗氢腐蚀的能力。奥氏体不锈钢可以很好地抵抗氢腐蚀。

●目前，一般按照Nelson曲线选用抗氢用钢。根据该曲线，碳素钢在氢分压小于 3.45MPa 时，允许的使用温度约为 250°C ； $1.25\text{Cr}-0.5\text{Mo}$ 钢在氢分压小于 6.9MPa 时的允许使用温度大约为 520°C 。

3.3.1 温度

d-2. 氢脆

指钢因吸收氢而导致韧性下降的现象。

氢的来源

- 内部氢——钢在冶炼、焊接、酸洗等过程中吸收的氢
- 外部氢——指钢在氢环境中使用时所吸收的氢。

在高温、高氢分压环境下工作的压力容器，在停车时，应先降压，保温消氢（200℃以上）后，再降至常温。切不可先降温后降压。**为什么不能先降温再降压？**

3.3.1 温度

除以上4种劣化外，还要注意：

- ◆ 钢材长时间在高温下，还会发生合金元素在固溶体和碳化物相之间的重新分配，那些对固溶体起强化作用的合金元素，如铬、钼、锰等，都会不断脱溶，从而使材料高温强度下降。
- ◆ 除低温、高温外，中子辐照也会引起材料辐照脆化。
- ◆ 在设计阶段，预测材料性能是否会在使用中劣化，并采取有效的防范措施，对提高压力容器的安全性具有重要意义。

3.3.2 介质

一、腐蚀概述

金属腐蚀分类：

- 1、按腐蚀的机理来分
 - 电化学腐蚀
 - 化学腐蚀
 - 应力腐蚀
- 2、按金属腐蚀的形势来分
 - 全面腐蚀
 - 局部腐蚀
 - 晶间腐蚀
 - 小孔腐蚀
 - 缝隙腐蚀

3.3.2 介质

二、应力腐蚀

1、应力腐蚀的特征

三个阶段

孕育阶段——是逐步形成应力腐蚀裂纹时期；

裂纹稳定扩展阶段——在应力和腐蚀介质作用下，裂纹缓慢扩展；

裂纹失稳阶段——最终发生的突然断裂。

断裂前往往没有明显塑性变形，是突发性的，因而很难预防，是一种危险性很大的破坏形式。

◆ 值得注意的是第三阶段不一定总会发生，因为在第二阶段形成的裂纹有可能使压力容器泄漏，导致压力（应力）下降，而不出现第三阶段，即发生未爆先漏（**Leak Before Break**）。

3.3.2 介质

应力腐蚀开裂的特征：

- a. 拉伸应力
- b. 特定合金和介质的组合
- c. 一般为延迟脆性断裂

3.3.2 介质

2、常见的应力腐蚀

a. 碱溶液

b. 湿硫化氢

c. 液氨

d. 硝酸盐溶液

3.3.2 介质

3、应力腐蚀的预防措施

一般从选材、设计、改善介质条件和防护等几个方面采取措施，预防应力腐蚀引起的压力容器失效。

a. 合理选择材料

b. 减少或消除残余拉应力

c. 改善介质条件

d. 涂层保护

e. 合理设计

3.3.3 加载速率

加载速率的表示——应力速率（Pa/s）或应变速率（1/s）

- ◇通常，应变速率在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{s}^{-1}$ 范围内，金属材料的力学性能没有明显变化。
- ◇当应变速率在 10^{-1}s^{-1} 以上时，它对钢材力学性能有显著的影响。

3.3.3 加载速率

加载速率较高时，材料没有充分的时间产生正常的滑移变形，从而使材料继续处于一种弹性状态，使屈服点随应变速率的增大而增大，但一般塑性材料的塑性及韧性下降，即脆性断裂的倾向增加。如果材料中有缺口或裂纹等缺陷，还会加速这种脆性断裂的发生。

◇加载速率对钢的韧性影响还与钢的强度水平有关。

通常，在一定的加载速率范围内，随着钢材强度水平的提高，韧性的降低减弱。也就是说，在一定的加载速率范围内，加载速率的大小对某些高强度钢和超高强度钢的韧性影响是很小的，但对中、低强度钢的韧性影响则很明显。