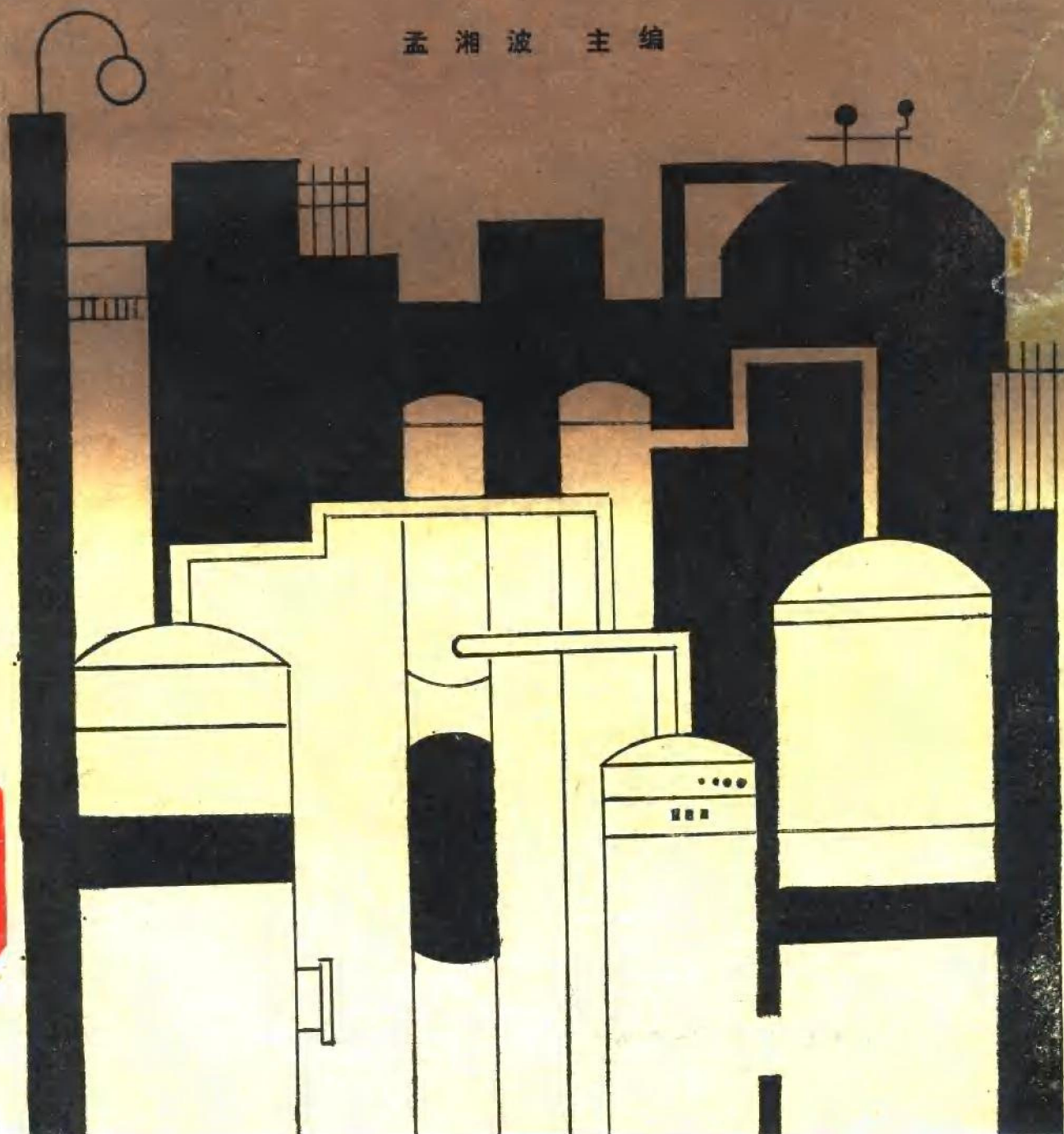


XIANDAI YALI RONGQI SHEJI

现代压力容器设计

孟湘波 主编



现代压力容器设计

孟湘波 主编

华东理工大学出版社

现代压力容器设计

孟湘波 主编

责任编辑 韩瑞根

华中理工大学出版社出版发行
(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.25 字数: 311 00

1987年11月第1版 1988年7月第2次印刷

印数: 1501—6500

ISBN 7-5609-0088-7/TK·5

定价: 2.40元

内 容 简 介

本书以薄壳、平板的基本理论为基础，以弹性分析作起点，介绍了石油化工薄壁及厚壁容器的设计，压力容器的材料选择，应力分类，疲劳设计，断裂力学分析，可靠性设计及电子计算机在压力容器设计中的应用等内容。

本书力求突出当前压力容器设计中的新内容，以及国内外压力容器设计研究中的动向。编写中既保持知识的系统性，各章又有其独立性，以方便不同读者的选用。

本书可供高等院校化工机械工程类专业作为教材或教学参考书，亦可供从事石油化工容器及设备的研究、设计、制造以及管理部门的工程技术人员参考。

前 言

为了适应飞速发展的石油化学工业的需要，我们认为应该尽量采用更为完善的解析方法和实验分析方法，并以先进的计算手段和优化设计法来评定和设计压力容器。为此，我们编写了这本《现代压力容器设计》。

本书可供高等院校化工机械工程类专业作为教材或参考书，亦可供从事石油化工容器及设备研究、设计、制造以及管理等方面的工程技术人员使用和参考，也可供核能、航天、造船、电力等工业部门的工程技术人员参考。

参加本书编写工作的有：武汉化工学院孟湘波(绪论、第四章)，冯兴奎(第一、三章)，杨继林、孟湘波(第五章)，胡家顺(第六章)，杨继林(第七章)；化工部第四设计院王荣贵(第二章)。本书由孟湘波主编。

本书由华中工学院马毓义教授审稿。

在本书出版过程中，得到了武汉化工学院、华中工学院、华中工学院出版社、化工部第四设计院的支持。华中工学院马毓义教授和谭丕林副教授热情指导了本书的编写工作。化工部第四设计院胡兰等同志为本书出版做了大量工作。在此，表示深切的谢意。

本书编者虽尽了很大的努力，但事实上不仅不可能对当今国内外有关现代压力容器设计的理论都作概略的介绍，即或已作了介绍的部分，也难免挂一漏万。论述部分的谬误和不妥之处也是在所难免，殷切期望读者予以教正。

编者 1986年5月

40818

目 录

绪 论	(1)
△ 第一章 压力容器用钢	(3)
1-1 压力容器用钢的一般要求及其选用	(3)
一、机械性能	(3)
二、制造工艺性能	(5)
三、特殊性能	(5)
四、选材和用材的几点原则	(6)
1-2 钢的性能及其影响因素	(6)
一、杂质的影响	(6)
二、合金元素的影响	(7)
三、冶炼方法的影响	(7)
四、脱氧状况的影响	(7)
五、加工方法及热处理状态的影响	(10)
1-3 压力容器用钢的可焊性及其评定	(10)
一、压力容器用钢的热处理状态	(10)
二、压力容器用钢的可焊性及其评定	(11)
1-4 石油化工压力容器用钢分析	(12)
一、中常温用钢	(12)
二、高温用钢	(15)
三、低温用钢	(15)
四、耐蚀钢	(17)
五、锻造容器用钢	(22)
参考文献	(25)
△ 第二章 受压薄壁容器的力学基础	(26)
2-1 无力矩理论	(26)
一、薄壁圆筒的应力分析	(26)
二、薄壁回转壳体的无力矩理论	(27)
三、无力矩理论的应用	(30)
四、无力矩理论的应用范围	(34)
五、由内压引起的壳体弯曲应力	(35)
2-2 有力矩理论与边缘问题	(36)
一、边缘问题的基本概念	(36)
二、有力矩理论在边缘问题上的应用	(37)
三、边缘应力的特性	(42)
2-3 平板理论	(45)
一、圆板受轴对称载荷的弯曲微分方程	(45)
二、圆形薄板受轴对称均布载荷的应力分析	(48)
2-4 中低压薄壁容器设计	(52)

一、内压容器的设计	(52)
二、容器封头的设计	(53)
三、设计参数的确定	(59)
2-5 外压容器的设计	(64)
一、外压薄壁圆筒稳定性的理论计算	(65)
二、图解法计算外压圆筒和球壳的壁厚	(70)
三、加强圈的设计	(74)
四、外压封头的设计	(77)
参考文献	(78)

第三章 厚壁容器设计 (79)

3-1 厚壁圆筒的结构型式	(79)
一、整体式厚壁圆筒	(79)
二、组合式厚壁圆筒	(79)
3-2 单层式厚壁圆筒的设计	(81)
一、应力分析	(81)
二、失效准则及其强度计算式	(85)
3-3 我国高压容器现行规定设计方法	(87)
一、单层式高压容器设计	(87)
二、组合式高压容器设计	(88)
3-4 自增强技术和超高压容器设计简介	(89)
一、自增强圆筒的设计参数和应力计算	(89)
二、自增强圆筒的设计步骤	(91)
三、超高压容器设计简介	(91)
3-5 高压容器密封设计	(92)
一、强制密封	(92)
二、自紧式密封的结构型式	(94)
3-6 高压容器零部件及开孔补强	(97)
一、端盖	(97)
二、筒体端部	(98)
三、开孔补强	(98)
参考文献	(99)

第四章 压力容器的应力分类 (100)

4-1 压力容器中的应力分类	(101)
一、一次应力(p)	(101)
二、二次应力(Q)	(102)
三、峰值应力(F)	(103)
四、关于热应力	(103)
4-2 压力容器设计时对各类应力的限制	(104)
一、应力强度的概念	(105)
二、对各类应力强度的限制	(105)
4-3 极限设计与安定性分析	(106)
一、压力容器的失效准则	(106)
二、极限设计	(108)

三、关于安定性的概念	(110)
4-4 以应力分析为基础的设计方法的应用	(112)
参考文献	(118)
第五章 压力容器的断裂力学分析	(119)
5-1 概述	(119)
一、断裂力学的产生与发展	(119)
二、断裂力学与材料力学的关系	(120)
5-2 线弹性断裂力学基本原理及其应用	(121)
一、应力强度因子和平面应变断裂韧性	(121)
二、对应力强度因子 K_I 的修正	(127)
三、应力腐蚀断裂	(133)
四、求 K_{Ic} 的经验公式	(136)
五、线弹性断裂力学在压力容器上的应用	(136)
5-3 弹塑性断裂力学基本原理及其应用	(138)
一、裂纹张开位移法——COD法则	(138)
二、COD方法在压力容器上的应用	(141)
三、断裂理论的能量法—— J 积分法	(144)
四、压力容器的“先漏后断”设计准则	(146)
5-4 断裂力学在疲劳设计中的应用	(147)
一、疲劳断裂与疲劳裂纹扩展	(147)
二、压力容器疲劳寿命预测	(153)
5-5 带缺陷压力容器修复的一般程序	(156)
一、缺陷修复的判别	(156)
二、缺陷修复工艺	(157)
参考文献	(159)
附录 一些钢材的断裂韧性数据	(159)
第六章 压力容器的可靠性设计	(161)
6-1 可靠性设计的基本理论	(161)
一、可靠性的定义和尺度	(161)
二、可靠性设计中的分布函数	(162)
三、分布函数的代数运算	(167)
6-2 压力容器的可靠性设计	(169)
一、应力—强度干涉模型	(169)
二、设计参数确定	(171)
三、可靠性设计中的安全指标	(172)
四、压力容器静强度可靠性设计步骤	(176)
五、可靠度与安全系数关系	(179)
参考文献	(180)
第七章 计算机在压力容器上的应用	(181)
7-1 前言	(181)
7-2 有限单元法在压力容器上的应用	(181)
一、有限元的分析过程	(181)
二、虚位移原理和虚功方程	(185)

三、平面问题的有限单元法	(186)
四、轴对称问题的有限元法	(193)
五、有限元法的计算程序和方法	(195)
六、有限元法在压力容器上的应用	(198)
7-3 计算机作标准化工容器设计	(203)
7-4 压力容器优化设计简介	(213)
一、优化问题的数学模型	(213)
二、优化方法的无约束问题和有约束问题	(214)
三、优化设计在压力容器上的应用	(216)
参考文献	(218)
工程单位与国际单位换算	(218)

绪 论

当今科学技术的发展,使压力容器技术已经成为了一门跨学科性质的独立技术。对于这一技术,世界各国都在进行研究,并都有程度不同的进展。本书试图介绍压力容器的现代设计法及其某些研究课题的梗概,并且希望能对从事这方面工作的人员有所裨益。

众所周知,压力容器广泛地应用于石油化工、外层空间、海洋科学、能源系统等诸方面,而且压力容器应用范围还在逐步扩大。

压力容器技术是介于基础科学与应用科学之间的一门新兴技术。随着弹塑性理论、现代实验技术和电子计算机技术的发展和运用,近年来在压力容器的应力分析、设计理论、材料性能、制造方法、检测手段、经济管理等方面都有所进展。为了设计制造出适应当代科学技术飞跃发展的高级技术产业群的压力容器,仍旧按弹性分析为基础的设计规定的方法,已远不能满足要求,实践证明,弹性分析方法是完善的,需要用弹塑性分析法和塑性分析法来补足其不足之处。在工程设计中,美、英等国家将以“分析设计法”取代“增大安全系数法”。当然,要采用这一设计方法其所面临的技术问题,显然要比通常采用的增大安全系数法的多得多。其一,计算工作量大,必须利用电子计算机技术;其二,必须同时对各种有关的失效模式进行系统的分析,以提高容器的安全性;其三,必须同时提高检验测试技术以保证压力容器的可靠性,例如采用电子计算机与超声波实行在役检验,可以随时确定压力容器的缺陷特性和缺陷尺寸及其扩展。由于各国的技术水准不平衡(如应力分析,疲劳分析,断裂力学应用,计算机应用,实验应力及材料性能的研究等诸方面的技术发展不一致,学术观点也不尽相同),所以目前许多国家尚不能实施以上述学科为基础的“分析设计法”。但从各国对大型化工容器及设备的设计、制造的技术发展趋势分析,到二十世纪末,在压力容器的设计、制造业中,CAD(计算机辅助设计),CAM(计算机辅助制造)及计算机辅助流水线质量控制,将三位一体地出现在压力容器的技术领域。

《现代压力容器设计》这本书,并不是设计手册一类的书。编写本书的目的,是想扼要介绍当今压力容器技术的一些新内容,但愿能起到抛砖引玉的作用。

第一章压力容器用钢是指处于不同压力、温度和介质的容器用钢。研究构成容器的材料的性能,以评定容器的安全运行寿命,这一工作与容器应力分析及计算具有同等重要的作用。本章除介绍石油化工容器常用材料的品种及性能之外,还从理论上说明了:对于材料的研究和对于新型材料的开发不仅对避免压力容器的失效是需要的,而且对材料的最经济的使用也是需要的。

第二章为受压薄壁容器的力学基础,第三章为厚壁容器设计。这两章主要介绍容器的设计计算方法,薄膜应力分析的基本理论和轴对称容器的受力分析,薄壁圆筒和厚壁圆筒的应力分析,球形、椭圆形、锥形、平板形端盖的分析等内容。同时,对外压容器失稳问题和平板的挠度微分方程也作了相应的介绍,并且,比较详尽的分析了边缘应力和壳体连接处的变形协调问题。

第四章叙述了压力容器的应力分类,即把容器所受的应力分为一次应力、二次应力和峰值应力,并对压力容器进行极限分析和安定分析。本章的内容有助于对压力容器的疲劳分析

和压力容器的断裂力学设计等内容的理解，为应用“以应力分析为基础的设计”(Design Based on Stress Analysis)的方法打下一定的基础。

第五章是压力容器的断裂力学设计。应用断裂力学理论防止压力容器的灾难性失效，在实践上获得了成功，因此断裂力学引起了各国的重视。本章介绍断裂力学的产生与发展及其COD方法在压力容器上的应用，断裂力学在容器疲劳设计中的应用。带缺陷压力容器修复的一般程序。

第六章为压力容器的可靠性设计。在压力容器设计阶段，要计算它们的可靠性。在使用期限内保证它们的可靠性，显然是很重要的事情。压力容器的可靠性工程是一门综合性的工程学科。要预测和分析容器的可靠性，涉及到容器的设计、选材、制造、检测以及操作维修等因素，因而，要针对影响可靠性的主要因素，来进行可靠性分析。本章介绍了可靠性设计的基本理论和压力容器可靠性的设计方法。

第七章为压力容器的计算机设计。目前有的国家已应用计算机进行压力容器的弹性、塑性、疲劳、断裂、蠕变和极限分析等等的计算，还应用它进行容器的设计、制造及检测等各项工作。本章介绍利用计算机进行压力容器分析研究的几种数值方法，以及进行标准化工容器的设计，并介绍压力容器的优化设计法。

随着石油化工、核反应堆、潜艇、空间运载火箭等对安全可靠性要求的提高，加速了对压力容器的材料性能和应力分析的研究，从而提高了压力容器的设计水平。

第一章 压力容器用钢

金属材料，尤其是碳钢和部分合金钢，是制造压力容器的基本材料。因此，系统和全面地掌握压力容器用钢的有关理论和技术资料是做好压力容器设计的重要基础。本章将介绍压力容器用钢的要求、种类、性能及其影响因素和变化规律。重点放在常用钢的分析上。

1-1 压力容器用钢的一般要求及其选用

压力容器用钢不同于一般机械零件用钢，其机械性能、制造工艺性和耐蚀性等，均应满足压力容器的严格要求。

一、机械性能

1. 尽可能高的强度

强度是确定压力容器壁厚的基本参数。强度高，则在相同压力和直径条件下容器壁厚就小，特别是，对于中高压容器，选用强度高的钢，可有效地减轻设备重量，降低造价。强度主要由屈服极限 σ_s 和抗拉强度极限 σ_b 表征，高温时还要考虑蠕变和持久极限。压力容器用钢希望有高的屈服极限，以便提高屈服承载能力。但对一定抗拉强度的钢来说，并不是屈服极限越高越好，还应限制屈强比 σ_s/σ_b 不能过大。因为 σ_s/σ_b 愈大，则钢的塑性和韧性就愈差，容器承压时的安全裕度也就愈小。低碳钢塑性好，其 $\sigma_s/\sigma_b \leq 0.6$ ，对这种材料，应尽可能地提高其屈服极限。高强度钢，塑性较差，一般其 $\sigma_s/\sigma_b > 0.8$ ，对这种材料，应注意使 σ_s/σ_b 不得过大，要求其 $\sigma_s/\sigma_b \leq 0.9$ 。

2. 良好的塑性韧性和较小的时效敏感性

韧性通常用冲击韧性 α_k 表征。它能最敏感地反映出材料的内部缺陷和晶粒度的影响，对压力容器的安全性有重要意义。有严重内部缺陷的钢，其冲击韧性必然显著下降，因此，通过 α_k 值可以检验或判断同种材料的完善程度。更重要的是，韧性好的钢，可以减小或避免容器发生低应力脆性破坏。对承受波动载荷的容器，韧性也与安全操作关系重大。在 -20°C 以上工作的容器用钢，一般要求其梅氏 U 型缺口试样在室温下的 α_k 值不小于 $60\text{N}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 。在 -20°C 以下工作的低温容器用钢，尚要求在相应低温条件下的韧性值不得小于有关规定。必须指出，U 型缺口试样的缺口敏感性差，特别是在低温条件下，对温度的变化不敏感。目前越来越多的国家都采用敏感性更高的夏比 V 型缺口试样来测定压力容器用钢的韧性值。我国也对在 -20°C 以下工作的低温容器用钢提出了用夏比 V 型缺口试样作冲击韧性的要求。

压力容器用钢，大都是低碳钢，制造时一般要进行冷弯卷加工。而低碳钢经冷加工变形后，在室温下经较长时间或在 $100\sim 300^\circ\text{C}$ 温度下经较短时间后，会发生强度硬度上升，塑性韧性下降而变脆的现象。尤其是韧性值，甚至下降到冷加工前的 40%。这种现象称为时效。对于危险性较大或较重要的压力容器，例如蒸汽锅炉等，还要求钢材的时效敏感性不得过大。低碳钢和普低钢在经 10% 左右冷塑性变形后，再在 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 温度下时效，其 α_k 值下降最甚。所以时效敏感性的测定方法是：预先将试件冷塑性变形 10%，然后加热至 250°C ，时效一小时，在室温下测定其冲击韧性值。压力容器用钢一般要求时效后的 α_k 值下降不超过 50%，且不小于 $35\text{N}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 。

塑性指标用延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 来表征。一般情况下, δ 和 ψ 值大,则钢的塑性好,屈强比亦小。故塑性既是压力加工性能指标,也是安全储备指标。压力容器用钢一般要求 $\delta_s \geq 12 \sim 14\%$ 。

3. 足够的断裂韧性

统计资料表明,压力容器的破坏,多为低应力脆性断裂,且这种断裂总是起源于裂纹或类似于裂纹的缺陷,随后由裂纹的扩展而造成。实际所制造的各种压力容器,存在这样或那样的缺陷是免不了的。而冲击韧性则不能反映裂纹的发展。近代断裂力学提出用断裂韧性 K_{Ic} 和临界裂纹尖端张开位移值 δ_c (COD)来衡量材料阻止裂纹扩展的能力,较为切实地解决了这个问题。 K_{Ic} 和 δ_c 都是反映材料韧性的固有力学性能指标,与材料本身的成分、组织、加工工艺和环境温度有关。 α_k 系由光滑带缺口试件测得,仅反映韧性;而 K_{Ic} 和 δ_c 则是在有裂纹的试样上测得,符合材料的实际情况。它是强度、韧性和塑性的综合指标。一般情况下,随着强度的提高,温度的降低,材料的 K_{Ic} 和 δ_c 值将下降。当容器中裂纹的形状和大小一定时,若钢材的 K_{Ic} 和 δ_c 值愈大,则使裂纹快速扩展而造成脆断所需的应力就愈高,容器愈不易发生断裂。由此可见,防止脆断主要应选用 K_{Ic} 或 δ_c 值高的钢。一般高强度钢的断裂韧性指标低于中低强度钢的。对于用 $\sigma_s \geq 1000\text{MPa}$ 的高强度钢,制造的厚壁容器和低温容器,采用 K_{Ic} 值来判断可以得到满意的结果;对于由强度不高,韧性较好的低碳钢、普低钢和低温用钢制造的中低压容器,以采用 δ_c 值更为可靠。

材料的 K_{Ic} 和 δ_c 值可由试验测得。压力容器常用钢的 K_{Ic} 和 δ_c 值详见第五章附录。

4. 低的脆性转变温度和无塑性转变温度

压力容器的断裂事故,大都为脆性断裂,而绝大多数脆性断裂都是在低温条件下发生的。所以通常把这种脆性断裂称为“冷脆”。脆性断裂属于低应力破坏,其断裂时的应力往往远低于材料的屈服极限,且断裂前毫无征兆,开裂速度极快,是突然性的,危害性甚大。

由于温度降低,钢材由韧性状态转变为脆性状态时的温度称为脆性转变温度 T_c 。高于 T_c 时的断裂为塑性断裂,断裂时有明显塑性变形;低于 T_c 时的断裂为脆性断裂,断裂时基本无塑性变形伴生。体心立方晶格的钢均有冷脆现象。压力容器制造中大量使用的低碳钢及低碳合金钢均具有体心立方晶格。如果能知道其脆性转变温度 T_c ,那末只要使操作温度高于 T_c ,便可防止脆性破坏的发生。

试验研究证明,对于低碳钢及低合金钢,其脆性转变温度一般是在夏比V形缺口冲击韧性值为 $35 \sim 50\text{N}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 之间时出现。故一般均要求压力容器用钢在操作温度下的冲击韧性值不低于 $35\text{N}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 。但影响钢材冷脆转变温度的因素很多,难以确切地定出其脆性转变温度,即是同种材料的钢板,也可得到不同的脆性转变温度。故以 T_c 作为合理选择钢材的依据并不很可靠。

目前一般是采用通过爆炸鼓胀试验或落锤试验测得的无塑性转变温度NDT作为压力容器设计的选材依据。在温度低于NDT时,材料无韧性,破裂呈完全的脆性断裂,钢会在远低于屈服限这个应力时开始断裂。在温度高于NDT时,随着温度的升高,开裂的应力会相应提高,且在不同应力水平下,均有一个裂纹不会失稳而发生扩展的最低温度。此温度称为在该应力水平条件下的止裂温度,即不发生脆断的温度。相应于屈服极限应力水平时的止裂温度,称为弹性断裂转变温度FTE。在FTE以下,裂纹可扩展至应力未达屈服极限的弹性变形部分;在FTE以上,裂纹不会扩展至应力未达屈服极限的弹性变形部分。在相应于强度极限应力水平时的止裂温度,称为塑性断裂转变温度FTP。在FTP以上时,破裂为完全

的塑性断裂。对于大多数低、中强度压力容器用钢，在板厚小于50mm时，其FTE和FTP与NDT的关系分别为

$$FTE = NDT + 35^{\circ}\text{C}$$

$$FTP = NDT + 70^{\circ}\text{C}$$

板厚增加，其FTE和FTP升高，对于厚度大于75mm的上述钢，三者间的关系为

$$FTE = NDT + 72^{\circ}\text{C}$$

$$FTP = NDT + 94^{\circ}\text{C}$$

钢材的止裂温度是压力容器设计选材的重要依据之一，它主要与钢种、板厚、应力水平及存在缺陷的数量和大小有关。应力水平高，相应的止裂温度亦高。若要求压力容器不论在如何低的温度条件下不发生脆断，则其应力水平一般只能在34~54MPa范围内，仅相当于压力容器常用钢的常温屈服极限的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{7}$ 。以此应力来阻止材料的使用温度，显然很不经济。

限制材料的使用温度，常用的有两种： $NDT + 17^{\circ}\text{C}$ 和 $NDT + 35^{\circ}\text{C}$ 。前者相当于在 $\sigma_s/2$ 的应力水平下，可保证按常规设计应力设计的容器不发生脆性断裂；后者相当于 σ_s 的应力水平，是美国ASME规范第Ⅲ篇的设计规定。当然，材料的NDT越低，其在较低温度条件下的应力范围就愈宽，发生脆断的可能也就愈小。研究还表明， σ_s 在500MPa以下的低碳钢和普低钢，用冲击韧性值和NDT来衡量其韧性，可得满意的结果。

常用压力容器用钢的NDT值见表5-7。

二、制造工艺性能

中低压容器一般由卷焊制造，超高压容器多系锻造制成，而高压容器的制造则卷焊和锻造均有采用。制造方法不同，要求材料的制造工艺性能亦不同。

为保证弯卷加工质量，必须使材料具有良好的塑性。为此，压力容器用钢一般要求延伸率 $\delta_s \geq 12 \sim 14\%$ ，同时还应进行弯曲试验，要求按规定进行 180° 冷弯后不裂。

压力容器的破坏，大都是由焊接缺陷引起的，因此，良好的可焊性是压力容器用钢的一项极重要指标。对碳钢和低合金钢而言，可焊性主要是指焊缝及热影响区产生裂纹的敏感程度。碳是影响可焊性的最重要元素。含碳量愈低，愈不易产生裂纹，可焊性愈好。因此，焊制压力容器必须是低碳钢。国家劳动总局“压力容器安全监察规程”中规定含碳量大于0.24%的钢不得用于焊制压力容器。各种合金元素，对可焊性均有不同程度的影响。这种影响通常是用碳当量来表示的。选材时应根据可焊性及强度等作综合考虑，确定最适宜的钢种。例如，若用抗拉强度800N级的高强度钢制造大型球罐，则该钢可焊性较差，易产生裂纹；若用低碳钢制造，则壁厚过大，焊后热处理也困难；若用中等强度的普低钢制造，则既减小了壁厚，也改善了可焊性。

锻制厚壁容器的钢，属大型锻件用钢。这类钢，除机械性能外，其制造工艺性必须给予足够的重视。如铸锭质量、锻造性能、白点敏感性、回火脆性、可焊性和热处理工艺性等均有较高的要求。

三、特殊性能

石油化工压力容器操作条件复杂，要求具有相应操作条件下的特殊性能，如耐高温、耐低温和耐各种腐蚀等。对大多数石油化工压力容器来说，往往是同时要求其有两种以上的特殊性能。究竟最后由哪种条件选定材料，则要视对容器寿命和安全操作的影响程度。例如，

在强腐蚀介质中工作的容器，耐腐蚀应是选材时考虑的主要问题，在高温和腐蚀条件下工作的容器，则应同时考虑耐高温和耐腐蚀问题。

四、选材和用材的几点原则

1. 经济合理

经济合理是一个综合指标，是指由此材料制成容器后的总成本。它包括：①所需材料总重量的费用。这不能仅看材料的单价，因为强度高的材料所需壁厚薄，耗材少，即是单价高，也不一定就不经济。②制造费用。壁薄可少用焊条，节省焊接工时；重量轻又可减小设备基础，缩短施工周期，降低运输费用。③容器的寿命和维修折旧费用。对于易损或经常更换件，即使是价贵，也要选用符合要求的耐用材料。例如在氯离子介质中工作的容器，用奥氏体不锈钢制造的成本要比用钛合金制造的低得多。但前者仅能使用二年左右，而后者则可用二十年。显然后者更经济。石油化工压力容器一般均为连续操作，要求在使用过程中确保安全，一旦发生破裂则损失严重，甚至是灾难性的。因此，选材应首先保证使用性能，只有在确保安全的前提下，才能考虑经济节约，否则是得不偿失。

2. 充分发挥材料的特长

由于压力容器操作条件复杂，一种材料难以满足多方面的性能要求，因此应当区别对待，合理使用。例如，对于承压高且腐蚀严重的容器，若完全用耐蚀合金钢来制造，势必造价昂贵。但若采用衬里或双层钢板制造就经济得多，且充分发挥了材料各自的特长。

3. 符合有关现行标准规范规定

压力容器的设计和制造均按有关标准或规范进行，其中对材料的要求均有具体规定或限制。但各种规范或标准都随着技术的进步而不断修改完善着，对材料的要求也随着提高。例如我国“钢制石油化工压力容器设计规定”，1979年版中规定用A3钢制造容器时设计压力不大于1.6MPa而1982年版和1985年版均修改为不大于1MPa。设计选材时应注意按现行有关规定进行，符合其使用限制条件。

1-2 钢的性能及其影响因素

一、杂质的影响

钢的杂质通常指磷、硫、氮、氢、氧等元素。作为杂质，这些元素对钢的性能均产生不利影响。

1. 磷和硫 两者均由原料带入钢中。磷可形成偏析，增加钢的回火脆性和冷脆性。硫可形成低熔点共晶混合物 FeS ，使偏析严重，导致热脆；焊接时有 SO_2 产生，在焊缝内形成气孔和疏松。

2. 氮 氮作合金元素时可提高钢的强度，是有益的。但在不作为合金元素时它总是作为杂质在钢中有少量存在，对钢的性能产生不利影响。对于低碳钢， Fe_4N 的析出，会导致时效和兰脆现象。含微量N的低碳钢，在冷加工变形后就会有明显的时效现象和缺口敏感性。当钢中含有磷时，其脆化倾向更大。N含量超过一定限度时，易在钢中形成气泡和疏松，使冷热加工变得困难。钢中的含氮量与冶炼方法有关。平炉冶炼的碳钢，含N为0.001~0.008%；电炉的为0.008~0.016%；酸性转炉的为0.014~0.018%；碱性转炉的为0.01~0.03%。

3. 氢 氢是在冶炼时由锈蚀或含水炉料中进入钢中的。它会使钢形成很多严重缺陷，

如白点、点状偏析、氢脆及焊缝热影响区的裂纹等。

4. 氧 它以各种夹杂物形式存在于钢中，对钢的塑性和韧性很不利，易导致时效，对无塑性转变温度极为不利。

二、合金元素的影响

压力容器用钢，是铁和碳的合金。除存在少量 P、S、N、H 和 O 等杂质元素外，还有目的地加入若干种合金元素，如 Si、Mn、Cr、Ni、Mo、W、V、Ti、Nb、Al、B 等。P、S、N 等在某些情况下，也起合金元素作用。通过合金化，可提高钢的综合机械性能，显著改善加工工艺性，例如淬透性和回火稳定性等。还可获得特殊的物理或化学性能，如热强性或耐蚀性等。合金元素在钢中的作用和影响是很复杂的。有关合金元素对钢性能的影响，将在本章有关各节中结合具体钢种予以讨论。

三、冶炼方法的影响

炼钢的主要任务是把钢中的碳及合金元素的含量调整至有关技术规定范围内，并使 P、S、N、H、O 等杂质的含量降至规定限量之下。冶炼方法不同，去除杂质的程度亦不同，所炼的钢的质量自然就有差别。与压力容器用钢有关的炼钢方法，主要有转炉炼钢法、平炉炼钢法、电炉炼钢法、电渣重熔炼钢法等。各种炼钢方法所产钢的质量情况及特点如表 1-1 所示。

根据炼钢时选用的原材料、炉渣性质和炉衬材料的不同，通常把炼钢方法和炼钢炉分为碱性和酸性两类。碱性炉渣主要为 CaO，去除 P、S 效果好，但钢中含 H 高。酸性炉渣主要为 SiO₂，脱氧效果较好，钢中气体含量较低，且氧化物夹杂少，所含硅酸盐夹杂物多呈球状，对锻件切向性能影响较小，但不能去除 P、S，对炉料要求严格。

钢中的气体，特别是 H，对钢的质量危害很大。对于质量要求高的钢，例如高压或超高压容器的大型锻件用钢，目前普遍重视采用真空冶炼、真空脱氧或电渣炉重熔等精炼方法。精炼后可使杂质得到净化。如电渣重熔法主要是降低钢中 P、S、N、O 等的含量。P、S 等的降低可使钢中的非金属夹杂物显著减少。测试证明，同一种钢，采用不同的冶炼方法，对强度影响较小，而对韧性则影响大。其影响程度是：在空气中冶炼的韧性最差；空气中冶炼后再进行电渣重熔次之；真空中熔炼后再进行电渣重熔或真空自耗电极重熔最好。大钢锭采用真空处理后解决了锻造时产生白点的严重缺陷，降低了氢脆与脆性转变温度，提高了锻件的塑性和韧性，大大减轻了机械性能的各向异性。同时，由于直接降低了钢中的含氢量，故可省略或缩短扩氢退火热处理工序。不同冶炼方法所炼钢中的气体含量之比较如表 1-2 所示。

四、脱氧状况的影响

炼钢脱氧工艺和钢水脱氧程度，对钢的性能和质量具有显著影响。通常，用 Al、Si 等强脱氧剂生产的钢为镇静钢，用 Mn 等弱脱氧剂生产的钢为沸腾钢。前者脱氧较好，钢锭化学成分较均匀，杂质少，无明显偏析，质量可靠；后者脱氧较差，偏析较多，脆化转变温度较高，时效现象严重。就韧性和冷脆倾向来说，镇静钢优于沸腾钢，平炉钢优于转炉钢；就成材率来说，沸腾钢则大于镇静钢，故价格便宜。介于镇静钢和沸腾钢之间的称为半镇静钢。图 1-1 所示为这三种钢的钢锭内部结构。表 1-3 是这三种钢的性能及特点之比较。

从化学成分来看，沸腾钢内含 Si 极微，一般不大于 0.07%。镇静钢则含 Si 较多，可达 0.17%。沸腾钢有优质钢，也有普通碳钢，但都是低碳钢。中、高碳钢及合金钢不生产沸腾钢。

表1-1 各种炼钢炉的特点与用途

炼钢炉	热 源	主要原料	主 要 特 点	用途举例
氧气转炉	炼钢生铁中所含碳、硅、锰、磷等元素所生成的氧化反应化学热	液态炼钢生铁、废钢	冶炼速度快，生产效率高，钢的品种质量与平炉钢大致相当	冶炼各种碳素钢和低合金钢，用于大量生产
平 炉	重油、人造燃气(发生炉气、焦炉气、高炉气)、天然气	炼钢生铁、废钢	容量大，炉料中废钢比例不限，冶炼时间较长，工艺过程容易控制。采用吹氧技术，可显著提高生产效率	冶炼各种碳素钢和低合金钢，用于大量生产
电 弧 炉	交流电弧	废钢	炉料通用性大，炉内气氛可以控制，钢水脱氧良好，能冶炼含易氧化元素和难熔金属的钢种，产品多样化	冶炼各种合金钢和优质碳素钢，用于大量生产
电 渣 炉	电渣电阻热	铸造或锻压的坯料	由于渣洗作用，脱氧、脱硫效果显著，钢的纯洁度较高，钢锭致密、偏析减少，自下而上顺序凝固，能改善加工性能	精炼合金钢和各种合金材料
感 应 炉 (真空感应炉)	感应电流	优质废钢中间合金(工业纯金属材料)	脱硫、脱磷效果不如电弧炉，要用优质炉料，但可避免电极增碳，钢中氮含量也较低，能冶炼含易氧化元素的钢种	冶炼优质高合金钢和其他特种合金
真空电弧炉 (自耗电极)	直流电弧	铸造、锻压或粉末烧结的坯料	高温高真空下，使夹杂和气体含量显著降低，钢的纯洁度高，成分和性能稳定性好	高合金钢和难熔合金的精炼
电子束炉	电子束	同 上	高真空电子束精炼，气体和夹杂含量大大降低，钢锭特别致密，纯洁	难熔金属和超合金的精炼
等离子炉	等离子体电弧	同感应炉	熔炼温度高，熔化速度快，比容量相同的感应炉耗电量少，对成分控制、脱氧、去气、去硫作用均较好	低熔点合金到高熔点合金均可熔炼

表1-2 不同冶炼方法钢中气体含量比较实例

冶 炼 方 法		低合金钢(0.25%C)			高合金钢(不锈钢, 耐热钢)		
		H ₂	O ₂	N ₂	H ₂	O ₂	N ₂
大气中冶炼	酸性平炉	1~6	50~150	50~150	—	—	—
	碱性平炉	2~10	75~250	40~125	—	—	—
	碱性电弧炉	1~20	50~125	30~500	5~15	10~200	50~600
	高频感应炉	—	—	—	1~10	20~250	100~700
真空熔炼 (处理)	真空感应炉	<1	5~15	5~50	<1~2	5~125	20~200
	真空自耗炉	<1~2	5~25	10~100	<1~2	10~100	20~200
	真空脱气	1~4	10~100	25~100	<1~5	10~100	50~300