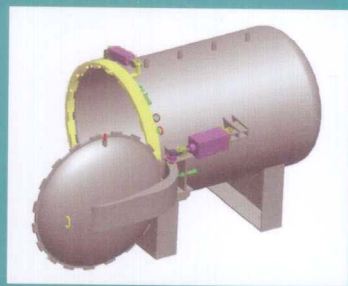


# 化工压力容器 设计选材



## Material Selection in Chemical Pressure Vessel Design

王非 编著

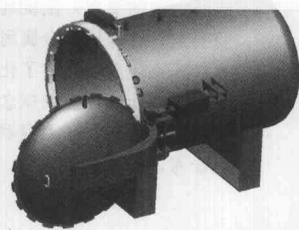


化学工业出版社

013067006

TQ051.3  
02

# 化工压力容器 设计选材



## Material Selection in Chemical Pressure Vessel Design

王非 编著



TQ051.3  
02



化学工业出版社

·北京·



北航

C1674803

013087008

本书基于设计工作中材料选用的实际需要,结合作者的实践经验,首先对材料性能做了基本介绍,按照板、管、锻、棒分别介绍选材的具体要求及介绍代材注意事项;重点围绕韧脆转变温度讨论了低温设备选材的要点,围绕蠕变讨论了高温设备选材的要点,围绕电化学腐蚀讨论了局部腐蚀控制经验和选材要点,并介绍了金属耐腐蚀性能的试验与检验。

本书还简要介绍了化工压力容器防腐措施,涉及各种非金属衬里和常用防腐涂料的选用,并简明阐述了全面腐蚀控制概念。附录中给出了不锈钢系列牌号及用途和不锈钢耐腐蚀数据表可供选材参考。

本书以化工压力容器设计人员为主要的读者对象,也可供工艺专业及化工压力容器制造单位相关人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工压力容器设计选材/王非编著. —北京:化学工业出版社, 2013. 7  
ISBN 978-7-122-17485-7

I. ①化… II. ①王… III. ①化工设备-压力容器-材料 IV. ①TQ051.304

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第113484号

责任编辑:段志兵  
责任校对:蒋宇

文字编辑:咎景岩  
装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张16 $\frac{1}{4}$  字数310千字 2013年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究





# 前 言

## (一)

选材是化工压力容器设计的重要组成部分，包括材料与材料加工两方面内容，需要设备专业与工艺专业配合才能完成。工艺专业以条件单形式提出推荐性的选材方案，设备专业在此基础上充实、完善、细化选材方案，即材料加工的要求。在此过程中必要的专业分工与有效的技术措施是必不可少的，但工作中往往暴露出相关人员材料知识的不足。设计人员对材料知之不多，材料专业人员在设计工作中可有可无，但设计又决定着选材、代材、材料特殊加工及专项检验等一切与材料有关的事项，这是一个矛盾。正是这一矛盾促使笔者萌生要写一本以设计人员为读者对象的书，向设计一线的工程师介绍金属材料的基本知识及其应用方式。笔者在研究、设计、教学过程中体会到，空洞地介绍材料知识事倍功半，设计人员对金属的什么“体”、什么“相”、几把“火”往往感到空洞、乏味，完成了考试任务之后常不知所云。需要结合实际工作介绍选材措施，根据选材需要补充相关基础知识，结合设计、建造中的具体限制性要求谈选材，并以此为切入点贯彻选材思路。

常规的机械设计也需要选材，但常规机械设计产品所面对的使用条件比较单一、稳定，且由指定专业厂家批量生产，选材方案可以由专家组通过产品鉴定等方式予以把关，通常不需要设计人员掌握更多的材料知识。化工压力容器属非标设备，具有设计参数多样、标准规范多变、特种行业专管的特点。机械产品注重成批，化工设备强调成套，侧重点的不同使得设计思想不同，导致选材思路有差别，即化工压力容器设计选材有其特点，不能照搬机械产品设计。

化工压力容器制造厂往往在设计完成后通过招标才能拿到制造合同，了解到材料与材料加工的具体要求，制造过程需要经常与设计单位进行材料与材料加工方面的沟通。目前设计公司出方案图，并在其指导下由制造单位承担施工图设计的情况越来越多，设计公司注重装置的系统可靠，制造单位强调自身的经济利益，在这种情况下普及选材知识就更为迫切。凡此种种都需要化工压力容器设计人员多了解一些选材及材料冷、热加工知识。

## (二)

脱离设计的选材是盲目的，脱离选材的设计是空洞的。

选材是利用材料固有性质满足设备对材料性能的需要。化工压力容器的选材依据从根本上讲是由操作条件下可能导致的失效模式决定的，但实施过程却受各种因素制约和影响。对于一个工程建设项目，投资（建设）方对选材的经济合理性最为关注，技术转让方要对选材的技术合理性负责，建造方则对选材的技术可行性承担责任。设计只是整个建造过程的部分工作，化工压力容器设计是由设计单位的一个部门完成的，是整体链条其中的一个环节。这就要求设计人员跳出本专业局限，以全局的眼光系统地看待技术思路、技术方案、技术问题，避免只见树木，不见森林。另外，选材方案在初步设计或基础设计阶段就应当被明确，但在设备专业的施工图设计阶段往往会因为一些具体的限制性要求或代材而被重新推敲或质疑，这也要求设计人员要有一定的材料知识和应用知识的能力。

化工生产的多样性和化工设备的功能性，给选材带来了一定的复杂性；材料科学所具有的半科学半经验（技艺）性质给选材增加了难度；压力容器承受的压力载荷与非压力载荷是影响强度计算的主要因素，不是影响选材的主要因素。压力容器对材料力学性能的要求是更重视其韧性，重视钢材的塑性储备量。设计中强度计算和结构设计的思路与选材思路有所不同，前者注重定量计算，后者注重定性分析，把二者联系在一起的是材料的性能。

化工压力容器设计选材特点是统一考虑材料标准与产品标准的内容，重点要保证最终产品材料性能符合最初的选材要求。基本思路是：成分决定组织，组织决定性能，性能决定选用。具体涉及下列环节：

种类——钢：碳钢、低合金钢、Cr-Mo 钢、不锈钢；

形式——钢材：板（材）、管（材）、锻（材）、棒（材）；

限制——范围：温度、压力、介质、结构；

条件——附加技术要求：冶炼，成分，冷、热加工，强度，冲击韧性，检验，性能复验等。

本书第 1~5 章围绕着材料基本性能介绍了碳钢、低合金钢、Cr-Mo 钢、

不锈钢的基本知识；按照板、管、锻、棒分别介绍选材的具体要求及代材注意事项；围绕韧脆转变温度  $K_{v2}$  讨论了低温选材要点，给出了不同低温条件下板、管、锻、棒选材一览；围绕蠕变讨论了高温选材要点，给出了高温环境、临氢环境选材的具体要求，明确高温环境下选用 Cr-Mo 钢、不锈钢的限制条件和附加要求；围绕电化学腐蚀的基本要点综合介绍了局部腐蚀控制经验和选材要点，并介绍了金属耐腐蚀性能的试验与检验。

第 6~8 章简要介绍化工压力容器防腐蚀措施，涉及橡胶衬里、砖板衬里、塑料衬里、玻璃鳞片树脂衬里、玻璃钢衬里、搪玻璃衬里；给出如何根据腐蚀环境选择涂料品种及压力容器常用防腐涂料的品种和性能；介绍了全面腐蚀控制概念。

附录中给出了不锈钢系列牌号及用途、不锈钢耐腐蚀数据、主题词索引。

本书体现了 TSG R0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》和 GB 150—2011《压力容器》及其“标准释义”对压力容器用材料的最新要求。需要说明的是，新标准对压力容器用不锈钢采用了新的表达方式，即基本上采用中国统一数字代号的表达方式。过渡期间同一不锈钢有不同的表达方式，如：

S30408——中国统一数字代号；

06Cr19Ni10——GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分》中的新牌号；

0Cr18Ni9——GB/T 3280—1992《不锈钢冷轧钢板》、GB/T 4237—1992《不锈钢热轧钢板》中的旧牌号；

304——AISI（美国钢铁学会）、ASME（美国机械工程师协会）、ASTM（美国材料与试验协会）等效采用的牌号。

为适应这一情况，书中一些地方采取了对照的方式，为适应工程设计的持续性需要及钢材配套方面问题，有些地方仍采用旧的不锈钢牌号。

本书以化工压力容器设计人员为读者对象，并可供工艺专业及化工压力容器制造单位相关人员参考。本书的读者应该具有 GB 150《压力容器》方面的基本知识，即了解常用技术标准和技术法规的基本要求，了解设计工作的基本程序。本书以普及实用知识为特点，没有对化工行业经常使用的金属材料作较为系统的叙述，需要的读者可查找相关资料。本人拙作《化工设备设计全书 化工设备用钢》亦可供参考。作为本书的姊妹篇，笔者的《化工压力容器设计——方法、问题和要点》中讨论了包括选材在内的设计常见问题，可作为本书的补充，供有兴趣的读者参考。

为了兼顾实际操作与学习的需要，既要知其然又要知其所以然，本书内容

分为“基本内容”与“参考内容”，并将参考内容用楷体字表达，以方便浏览和查找。所谓基本内容是指设计选材需掌握的基本概念、基本原理、基本方法、已列入相关标准规范的技术措施等；所谓参考内容是指基本内容的引申，涉及基本概念的讨论、推荐性的技术措施、复杂情况下的工程经验、选材方案的解释和注意事项等。这是一种尝试，这种人为的划分有时不一定恰当和准确，但对读者提高阅读效率会有所帮助。

### (三)

这里的化工是大化工的概念，是指石化、化工、医药而言。化工压力容器设计对冶金、能源、环保、轻纺、食品、城建等相关行业也有借鉴意义。这里的材料是指钢材。

笔者曾冒出过奇怪的想法：我们大学中传统的化工系（学院）有化工机械专业，现称过程装备与控制专业，有化工自动化及仪表专业，有防腐蚀（电化学）专业，怎么就没有化工材料专业呢？虽属笑谈，但也是力图强调化工装置选材的重要性。换个角度看问题，设计是为化工容器选择材料种类并确定材料结构的过程，制造是材料加工的过程，检验是验证材料质量的过程，使用是损耗材料的过程，修理、改造是弥补或完善材料不足的过程。事实上，化学工业的进步往往依赖并促进材料科学的发展，材料科学的许多成果也最先被化学工业采用，二者是密不可分的。

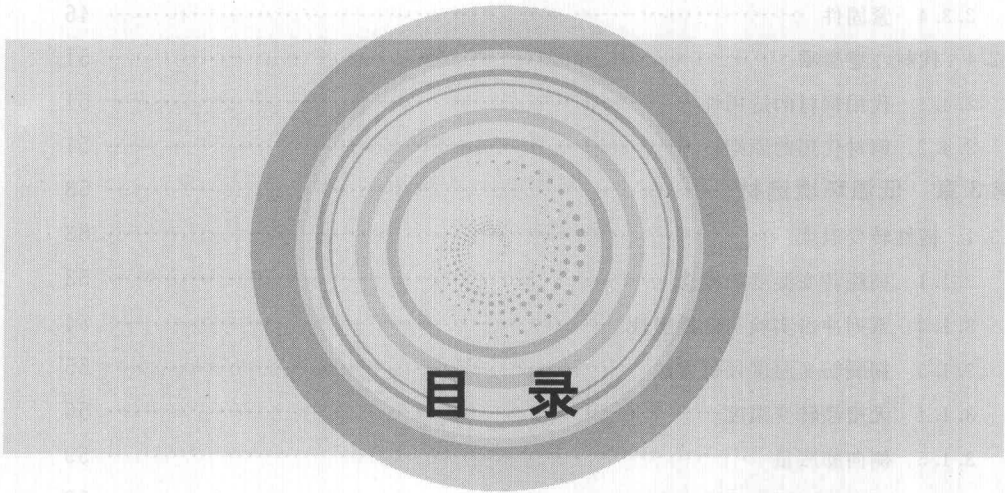
在编写本书的过程中，得到了有关方面的热情帮助。在与全国化工设备设计技术中心站的合作中形成了本书的雏形；在中国特种设备检测研究院、全国锅炉压力容器标准化技术委员会、中国石油和化工勘察设计协会、辽宁省锅炉压力容器特种设备安全技术协会等单位的合作中积累了本书的一些素材；笔者所在单位辽宁省石油化工规划设计院有限公司的各级领导和同事们给予了热情的支持。笔者对上述帮助表示由衷的感谢。

在本书的编写过程中，笔者不幸经历了人生的严峻考验，但也有幸体会到了人间最真挚的友情、亲情和爱情。谨以此书献给所有关心、鼓励、帮助我的人们，献给我的妻子——林英。

由于笔者水平所限，本书恐有不当之处，敬请读者提出宝贵意见。

王非

2013年2月于沈阳



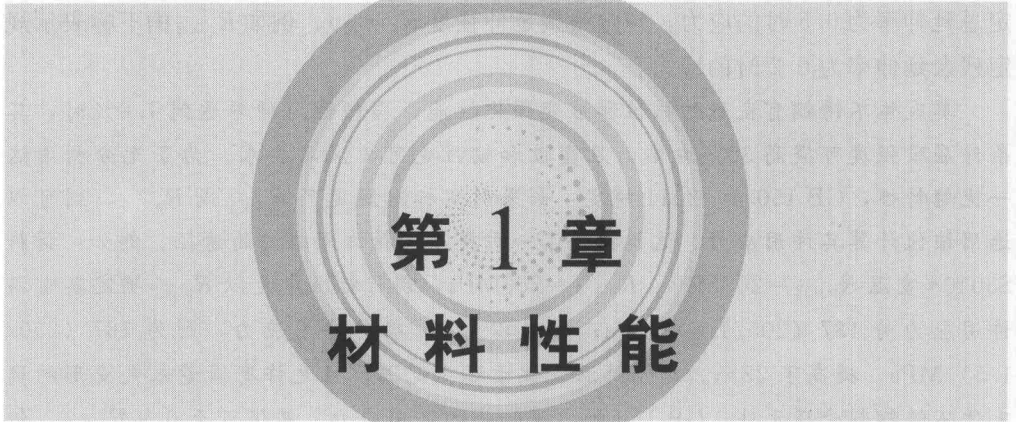
# 目 录

<b>第 1 章 材料性能</b> .....	1
1.1 力学性能 .....	1
1.2 合金元素和杂质对材料性能的影响 .....	6
1.2.1 合金元素的影响 .....	6
1.2.2 杂质的影响 .....	7
1.3 冷、热加工对材料性能的影响 .....	8
1.3.1 热加工的影响 .....	9
1.3.2 冷加工的影响 .....	10
1.4 各种钢材性能概述 .....	12
1.4.1 碳素钢 .....	12
1.4.2 低合金高强度结构钢 .....	14
1.4.3 合金结构钢与耐热钢 .....	19
1.4.4 抗氢钢 .....	20
1.4.5 不锈钢 .....	21
<b>第 2 章 选材基本要求</b> .....	31
2.1 概述 .....	31
2.2 一般规定 .....	31
2.3 具体要求 .....	34
2.3.1 钢板 .....	34
2.3.2 钢管 .....	37
2.3.3 锻件 .....	43



2.3.4	紧固件 .....	46
2.4	代材注意事项 .....	51
2.4.1	代用钢材的适用性 .....	51
2.4.2	钢材代用的原则 .....	51
<b>第3章</b>	<b>低温环境选材 .....</b>	<b>53</b>
3.1	韧性转变温度 .....	53
3.1.1	韧脆转变温度的概念 .....	53
3.1.2	系列冲击实验与低温脆性 .....	54
3.1.3	韧脆转变温度评价方法 .....	55
3.1.4	无塑性转变温度 .....	56
3.1.5	侧向膨胀量 .....	59
3.1.6	影响材料低温脆性的因素 .....	59
3.2	低温钢 .....	60
3.2.1	按温度等级分类 .....	61
3.2.2	按合金化原理分类 .....	64
3.3	低温环境选材 .....	67
3.3.1	低温用钢特点 .....	67
3.3.2	压力容器低温用钢的选用 .....	69
<b>第4章</b>	<b>高温环境选材 .....</b>	<b>72</b>
4.1	概述 .....	72
4.2	高温环境选材 .....	74
<b>第5章</b>	<b>腐蚀环境选材 .....</b>	<b>79</b>
5.1	腐蚀基础知识 .....	79
5.1.1	腐蚀机理 .....	79
5.1.2	腐蚀破坏形式 .....	81
5.1.3	腐蚀环境 .....	84
5.1.4	防腐蚀措施简介 .....	84
5.2	腐蚀环境选材注意事项 .....	85
5.3	选材依据和步骤 .....	91
5.3.1	选材依据 .....	91
5.3.2	选材步骤 .....	94
5.4	应力腐蚀环境选材 .....	95
5.5	晶间腐蚀环境选材 .....	99
5.6	金属耐腐蚀性能的试验与检验 .....	99

<b>第 6 章 非金属衬里</b> .....	104
6.1 橡胶衬里 .....	104
6.2 砖板衬里 .....	106
6.3 塑料衬里 .....	107
6.4 玻璃鳞片树脂衬里 .....	109
6.5 玻璃钢衬里 .....	110
6.6 搪玻璃衬里 .....	111
<b>第 7 章 涂装防腐</b> .....	113
7.1 涂层组成 .....	113
7.2 防腐涂料品种和性能 .....	113
7.3 涂装技术 .....	116
<b>第 8 章 全面腐蚀控制</b> .....	119
8.1 概述 .....	119
8.2 设计和加工制造中的腐蚀控制 .....	119
8.2.1 防腐蚀设计 .....	119
8.2.2 设备寿命的概率和可靠性分析 .....	121
8.2.3 局部腐蚀控制 .....	122
8.3 储运和安装中的腐蚀控制 .....	124
8.4 操作运行中的腐蚀控制 .....	125
8.5 检修中的腐蚀控制 .....	125
8.6 腐蚀控制管理 .....	126
<b>附录</b> .....	127
附录 1 美国不锈钢系列牌号含义及用途 .....	127
附录 2 不锈钢耐腐蚀数据表 .....	133
附表 2-1 山特维克公司不锈钢材质和牌号 .....	134
附表 2-2 不锈钢耐腐蚀性能数据表 .....	137
<b>参考文献</b> .....	242
<b>索引</b> .....	244



# 第 1 章 材料性能

化工压力容器设计选材是一项综合性和技术性都很强的工作。材料是构成设备的物质基础，制造是依照设计进行材料加工。在压力容器设计中能够与强度计算和结构设计并重的，唯有材料及其影响因素，差别在于强度和结构是设计中的重点，材料及其影响因素是设计中的难点；前者往往依赖于定量计算，后者有时更注重定性分析；把二者联系在一起的是材料的性能。

广义的金属学由四部分组成：物理冶金、金属力学性能、金属化学性能、金属物理性能。对材料性能的了解重点应放在基本概念、质量、适用范围、检验要求等方面。

## 1.1 力学性能

力学性能是指金属材料在力作用下显示的与弹性和非弹性变形相关或涉及应力-应变关系的性能。金属材料的力学性能主要取决于其化学成分和加工工艺。

(1) 屈服强度 (yield strength)  $R_e (\sigma_s)$

屈服强度也称物理屈服强度，是材料在拉伸试验过程中发生塑性变形的最小应力，反映材料抗微量塑性变形的能力，单位 MPa。应区分上屈服强度 (upper yield strength)  $R_{eH} (\sigma_{sU})$  和下屈服强度 (lower yield strength)  $R_{eL} (\sigma_{sL})$ 。

退火、正火、调质状态的碳素钢和低合金结构钢存在物理屈服现象，在应力-应变曲线上出现上、下屈服点和屈服平台，这类材料取其下屈服点的强度为该材料的屈服强度。其他类没有明显物理屈服现象的材料，如不锈钢、淬火状态的碳素钢及低合金钢等，则根据构件服役条件可以允许的残余变形量给出了条件屈服强度：规定塑性延伸强度  $R_p (\sigma_p)$ ，例如  $R_{p0.2}$ 、 $R_{p0.5}$ 、 $R_{p1.0}$  的下标表示塑性延伸率分

别为 0.2、0.5、1.0 时的应力；规定总延伸强度  $R_t$  ( $\sigma_t$ )，例如  $R_{t0.5}$  的下标表示规定总延伸率为 0.5 时的应力；规定残余延伸强度  $R_r$  ( $\sigma_r$ )，例如  $R_{r0.2}$  的下标表示规定残余延伸率为 0.2 时的应力。

奥氏体不锈钢有良好的韧性和应变强化性能，当塑性延伸率达到 1.0% 时，其条件屈服强度可提高 30% 左右，且塑性和韧性也可以满足要求。为了充分利用这一优越特性，GB 150.1—2011 规定：如果引用标准规定了  $R_{p1.0}$  或  $R_{p1.0}^t$ ，则可以选择该值计算其许用应力。这就提供了一种提高材料许用应力的途径。例如：材料 S30408 室温  $R_{p0.2}=205\text{MPa}$ 、 $R_{p1.0}=250\text{MPa}$ ，现行标准中是以  $R_{p0.2}$  确定其常温许用应力为  $137(205/1.5)\text{MPa}$ ；如果以  $R_{p1.0}$  确定许用应力，则为  $167(250/1.5)\text{MPa}$ ，提高了 22%。对设计温度低于蠕变范围，且允许有微量永久变形的奥氏体不锈钢制受压元件，GB 150 给出了较高的许用应力，其值可至  $0.9 R_{p0.2}^t$ ，但不能超过  $R_{p0.2}/1.5$ 。即标准中奥氏体不锈钢板材、管材、锻材的许用应力表中，在相同温度、厚度条件下分为较高的许用应力和较低的许用应力两栏数值，较高一栏数值可用于设计压力容器壳体等受压元件，但不适用于设计法兰或其他有微量永久变形就产生泄漏或故障的情况。

## (2) 抗拉强度 (tensile strength) $R_m$ ( $\sigma_b$ )

抗拉强度是材料在拉伸试验过程中拉断前所能承受的最大应力值。超越此应力值材料就进入低应力破坏阶段，所以抗拉强度也表示材料抵抗断裂的能力，单位 MPa。抗拉强度是静拉伸试验中最容易测定的力学性能指标，且重现性好，所以适合于作为材料规格说明或质量控制的标志。

## (3) 断后伸长率 (percentage elongation after fracture) $A$ ( $\delta$ )

材料在拉伸试验过程中试样拉断后的伸长量与原长之比的百分数，表征材料被拉伸的程度，单位 %。

$A(\delta_5)$  表示短比例试样值， $A_{11.3}(\delta_{10})$  表示长比例试样值， $A_{x\min}(\delta_{x\min})$  表示非比例试样值。比例试样相应表示为  $L_0=5.64\sqrt{S_0}$  和  $L_0=11.3\sqrt{S_0}$ ， $L_0$  和  $S_0$  分别表示试样的原始标距长度和试样标距处的原始截面积， $5.64=5\sqrt{4/\pi}$ ，对于非比例试样所使用的原始标距，以毫米 (mm) 表示，例如  $A_{80\min}$  表示原始标距为 80mm 的断后伸长率。采用不同尺寸试样测得的断后伸长率指标，可按 GB/T 17600.1—1998《钢的伸长率换算 第 1 部分：碳素钢和低合金钢》与 GB/T 17600.2—1998《钢的伸长率换算 第 2 部分：奥氏体钢》进行换算。

## (4) 断面收缩率 (percentage reduction of area) $Z$ ( $\psi$ )

断面收缩率是指材料在拉伸试验过程中拉断后的试样断面最大缩减量与原截面之比，表征材料被拉细的程度，用百分率表示。

上述四项力学性能指标通过材料的拉伸试验获取，详见 GB/T 228.1—2010



《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》(ISO 6892-1: 2009, MOD)、GB/T 228.2—2010《金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法》、GB/T 228.3—2010《金属材料 拉伸试验 第3部分：低温试验方法》、GB/T 228.4—2010《金属材料 拉伸试验 第4部分：液氮试验方法》。

材料在拉伸试验中弹性变形阶段的应力-应变关系遵循虎克定律，应力( $\sigma$ )与应变( $\epsilon$ )成正比，弹性模量 $E$  (MPa)是这段直线的斜率， $\sigma = E\epsilon$ 。弹性模量越大，材料发生一定量弹性变形的应力值越大，弹性模量在技术上又叫做材料的刚度，表示材料对弹性变形的抗力。金属弹性模量随着温度升高而减小，如：铁每升高 $100^{\circ}\text{C}$ ，弹性模量降低4%。金属的弹性模量是对成分、组织不敏感的性能。因此，在针对弹性失稳的承受外压的受压元件设计中不推荐使用高强度材料，效果事倍功半。

伸长率 $A$ 与断面收缩率 $Z$ 都是材料的塑性指标，相应的数值越大材料塑性越好。在压力容器设计中往往要求材料有较好的塑性，这不仅适应了加工制造的需要，更可以在压力容器使用中缓解不可避免的局部应力，防止容器因局部应力升高而破裂。

虽然伸长率 $A$ 与断面收缩率 $Z$ 都是塑性指标，但二者物理意义并非完全相同，伸长率与试样长度方向和横截面的组织及成分不均匀性有关。拉伸试样被拉断后有的出现缩颈，有的不出现缩颈，断面收缩率只表现断裂区的性能。拉伸试样终究要被拉断，但究竟在什么位置发生断裂并不是随机的，而是有选择的。断面位置必然是金属内部缺陷相对集中的地方，断面收缩率能更好地反映作为压力容器材料所关注的性能。

### (5) 硬度 (hardness)

硬度表示材料抵抗局部变形，特别是抵抗塑性变形、压痕或划痕的能力。

硬度值的物理意义随试验方法的不同而不同。例如：压入法的硬度值是材料表面抵抗另一物体局部压入时所引起的塑性变形能力；刻划法硬度值表示材料表面对局部切断破坏的抗力；而回跳法硬度值代表金属弹性变形功的大小。硬度值不是一个单纯的物理量，它表征着材料的弹性、塑性、形变强化、强度和韧性等一系列不同物理量组合的一种综合性能指标。

HB——布氏硬度，采用压球载入，测压痕直径，详见 GB/T 231—2009《金属材料 布氏硬度试验》；

HR——洛氏硬度，采用 $120^{\circ}$ 的锥体载入，测压痕的深度，详见 GB/T 230—2009《金属材料 洛氏硬度试验》；

HV——维氏硬度，采用两相对面间夹角为 $136^{\circ}$ 的正四棱锥体载入，测压痕的对角线，可用于测定显微硬度，详见 GB/T 4340—2009《金属材料 维氏硬度试验》。

在碳素钢中抗拉强度与硬度之间有一定的对应关系，经验公式为：

低碳钢  $R_m (\sigma_b) = 0.36HB, MPa$ ;

中碳钢  $R_m (\sigma_b) = 0.35HB, MPa$ 。

利用钢材抗拉强度与硬度之间的这一对应关系，可以在一定程度上实现对钢材强度的“无损”检测，即通过不破坏构件本体的表面测试达到检测材料硬度并推测其他性能的目的。详见 GB/T 1172—1999《黑色金属硬度及强度换算值》。

制造压力容器的金属材料并非硬度越高越好，并非强度越高越好。如：NB/T 47008 (JB/T 4726)《承压设备用碳素钢和低合金钢锻件》中的 I 级锻件虽然只有硬度值一项作为验收依据，但并非允许锻件的强度指标可以超标，事实上所列各钢种的布氏硬度值和强度的关系完全符合 GB 1172 的规定，所以标准根据各钢种所规定的抗拉强度上、下限范围分别给出了所对应的布氏硬度值。反之，尽管 II、III、IV 级锻件的检验项目中没有硬度值要求，但是，对于正常锻件，只要其强度指标不超标，其硬度指标也应在合理的范围内。当然对于不同的材料、不同的硬度范围，存在不同的对应关系。

### (6) 冲击韧性 (impact toughness) $K_{V2}$

韧性是金属材料在断裂前吸收变形能量的能力。冲击韧性是材料在受到外加冲击负荷的作用下，断裂时消耗的功除以试样缺口断面面积而得到的商值，即在规定温度下试样抵抗冲击载荷时单位面积所吸收的能量，单位 J。

特定钢材的冲击韧性 (冲击功) 与一定的温度相对应，当冲击韧性指标一定时，降低冲击试验温度是变相提高钢材冲击韧性指标。焊接是在钢材的小范围内进行的铸造过程，导致焊接接头 (焊缝) 冲击韧性明显降低，当要求钢材与其焊接接头冲击韧性指标一致时，是变相提高母材冲击韧性指标。

压力容器用钢材 (钢板、钢管、钢锻件及其焊接接头) 的冲击功最低值按表 1-1 的规定。

表 1-1 压力容器用钢材的冲击功最低值

	钢材标准抗拉强度下限值 $R_m^{\text{Q}}/MPa$	典型钢材		3 个标准试样冲击功平均值 $K_{V2}^{\text{Q}}/J$
		钢板	锻件	
碳素钢和低合金钢	$\leq 450$	Q245R, 15CrMoR	20	$\geq 20$
	$> 450 \sim 510$	Q345R, 16MnDR	16Mn, 16MnD	$\geq 24$
	$> 510 \sim 570$	Q370R, 18MnMoNbR	20MnMo, 20MnMoD	$\geq 31$
	$> 570 \sim 630$	12MnNiVR, 12Cr2Mo1VR	20MnMoNb, 12Cr2Mo1V	$\geq 34$
	$> 630 \sim 690$	06Ni9DR		$\geq 38$
	奥氏体不锈钢焊缝 <sup>②</sup>		S30408, S31608	$\geq 31$

① 对  $R_m$  随厚度增大而降低的钢材，按该钢材最小厚度范围的  $R_m$  确定冲击功指标。

② 奥氏体不锈钢钢材标准中无冲击韧性要求，奥氏体不锈钢制压力容器焊缝有要求。摘自文献 [50]。

③ 冲击试验温度不高于压力容器的最低设计金属温度。

试验方法参见 GB/T 229《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》。从 GB/T 229—2007 开始由“ $A_{KV}$ ”表示的冲击韧性改为“ $K_{V2}$ ”表示，物理意义不变，即 V 形缺口试样在 2mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量。

冲击韧性的高低，取决于材料有无迅速塑性变形的能力。冲击韧性高的材料，一般都有较高的塑性。但塑性指标高的材料不一定都有高的冲击韧性。因为在静负荷下能够缓慢塑性变形的材料在冲击负荷下不一定能迅速发生塑性变形。冲击韧性是强度与塑性的综合指标，是强度和塑性两者的函数，但塑性对韧性的影响更大些。韧性是材料断裂时单位体积的塑性变形功，等于真实应力-应变曲线所包围的面积。真实应力-应变曲线与应力-应变曲线的区别在于前者将拉伸试样的断面按变值来考虑，后者按定值考虑。

从 GB 150—89 开始对压力容器用钢冲击试样的制备明确要求“V 形缺口”和“横向取样”。

缺口形式对冲击韧性影响甚大，V 形缺口比 U 形缺口更为尖锐，更能反映材料的缺口和内部缺陷对动态载荷的敏感性。U 形缺口，冲击试验时其冲击功大部分消耗于裂纹的形成；V 形缺口大部分消耗于裂纹的扩展。U 形缺口测得的冲击韧性与 V 形缺口测得的冲击韧性之间不存在对应的换算关系。

横向取样：试样长轴垂直于轧制方向；纵向取样：试样长轴平行于轧制方向。纵向取样得到的冲击值大于横向取样的冲击值，德国人曾做过有关的对比工作得出经验公式： $K_{V2纵}/K_{V2横}=1/0.7$ 。原因是：钢锭浇铸时会形成偏析及含有杂质，在轧制钢板的过程中，这些不均匀部分和杂质会顺着金属延伸方向形成纤维状带状组织，从而使钢板平行于轧制方向的力学性能高于垂直方向的力学性能。

### (7) 断裂韧性 (fracture toughness) $K_{Ic}$

第一类裂纹尖端应力强度因子的临界值，又称为平面应变条件下的断裂韧性，单位  $MPa \cdot m^{1/2}$ 。裂纹可分为张开型、滑移型、剪切型三种裂纹，第一类裂纹属张开型裂纹。平面应变条件下断裂韧性的数值最低，超过这一数值就产生脆性断裂。

断裂韧性反映材料抵抗裂纹失稳扩展，即抵抗脆性断裂的能力。在断裂力学计算中经常使用，是一种新型的力学性能指标。还可由此引出“ $K_{Isc}$ ”——应力腐蚀条件下的应力强度因子临界值等，在压力容器应力腐蚀研究中采用。

冲击韧性  $K_{V2}$  和断裂韧性  $K_{Ic}$  都是评价钢材抵抗断裂的韧性指标。冲击韧性  $K_{V2}$  值作为钢材脆化程度的判据虽不确切；但积累了大量的工程经验，在检验钢材冶金质量、脆化趋势，尤其对低温使用的钢材等方面，已成为仲裁指标。一般而言，提高冲击韧性的有效措施，对提高断裂韧性具有相似的作用。但冲击韧性  $K_{V2}$  和断裂韧性  $K_{Ic}$  是有区别的。冲击韧性  $K_{V2}$  反映在冲击载荷下裂纹的形成、扩展直至断裂全过程所消耗的总能量，即钢材抵抗冲击断裂全过程的能力；而断裂韧性

$K_{Ic}$ 只反映已有裂纹扩展过程所消耗的能量,即钢材抵抗裂纹失稳扩展的能力。当钢材强度较高时,裂纹扩展的能量在钢材断裂总能量中所占的比例不断下降,就很难从冲击韧性 $K_{V2}$ 来衡量钢材的断裂韧性 $K_{Ic}$ 。

按机械设计观念,静载荷下工作的零件其主要失效形式是断裂或塑性变形。以抗拉强度 $R_m$ 为判据可防止容器的断裂失效;以屈服强度 $R_{eL}$ 为判据可防止塑性失效。对于塑性材料,许用应力由材料屈服点 $R_{eL}$ 和相应的安全系数确定;对于脆性材料,许用应力由材料抗拉强度 $R_m$ 和相应的安全系数确定。压力容器采用了与上述观点不同的设计理念。压力容器用钢具有良好的塑性,确定许用应力时综合考虑了抗拉强度 $R_m$ 和屈服强度 $R_{eL}$ ,许用应力取抗拉强度 $R_m$ 、屈服强度 $R_{eL}$ 除以各自的安全系数 $n_b$ 、 $n_s$ 后所得的较小值,体现了在满足韧性的前提下提高强度,提高塑性储备量的压力容器选材原则。机械产品通常希望提高材料的屈强比,压力容器对材料的要求则相反,一般情况下应避免采用调质热处理等方法不恰当地提高材料的强度,以留有一定的塑性储备量。钢制压力容器对材料力学性能的要求更重视钢材的韧性,重视钢材的塑性储备量。

## 1.2 合金元素和杂质对材料性能的影响

### 1.2.1 合金元素的影响

金属材料分为两大类,黑色金属与有色金属。在元素周期表中除铁、锰、铬三种元素为黑色金属元素外,其余的金属元素均为有色金属元素。通常将以铁、锰、铬为基的合金称为黑色金属,其中以铁为基的合金通常称之为钢;以其余金属元素为基的合金称为有色金属。

钢的牌号又叫钢号,是给每种具体的金属材料所取的名称。我国金属材料的牌号,一般都能反映出化学成分。有的牌号不仅表明金属材料的具体品类,而且可以大致判别其质量。钢在冶炼过程中或多或少地都含有合金元素,但这些合金元素,不是有意添加的,而且量都不高,称为残余元素。其来源有两方面:一是废钢中带来的;二是用共生矿冶炼的生铁或铁水带来的。

最早应用的是碳素钢,合金钢是在碳素钢的基础上发展起来的。合金钢按所含合金元素的总量可划分为三类:合金元素总量低于5%(一般在3%以下)的称为低合金钢;合金元素总量为5%(或3%)~10%的称为中合金钢;合金元素总量超过10%的称为高合金钢。以往压力容器行业采用的低合金钢大都为低合金高强度钢和珠光体耐热钢,所以一些压力容器资料中出现的低合金钢概念,如无特殊说明的话往往是指低合金高强度钢或珠光体耐热钢。同样,以往压力容器行业采用的高合金钢大都为奥氏体不锈钢,所以一些压力容器资料中出现的高合金钢概念,如



无特殊说明的话往往是指奥氏体不锈钢。

低合金钢是在碳素钢基础上加入少量合金元素的合金钢。合金元素的加入使其在热轧或热处理状态下除具有较高的强度外，还使韧性、焊接性能、成形性能、耐腐蚀性能等综合性能得到改善。国家标准 GB/T 13304—1991《钢分类》按照化学成分将钢分为三类：非合金钢、低合金钢和合金钢；而国际标准和欧洲标准按化学成分将钢分为两类：非合金钢和合金钢。如果按照后一标准对钢分类，我国的一些低合金钢基本上都应划归为非合金钢。美国 ASTM 标准中的低合金钢同样如此，其低合金钢除部分铬、镍含量高的钢号外，很多钢号也要划归为非合金钢。美国 ASTM 标准中的“碳锰钢”属碳素钢，其中大部分与我国锰系低合金钢近似。

合金元素添加后主要与铁和碳发生反应。其中：Si、Ni、Cu、Al、Co 等合金元素称为非碳化物元素，在钢中它们不能与碳形成化合物，主要固溶于铁素体之中；Ti、Zr、Nb、V、Mo、W、Cr、Mn、Fe 等称为碳化物元素。Mn、Ni、Co、C、N、Cu 为扩大  $\gamma$  相区的元素，Cr、Mo、V、W、Ti、Si、Al、B、Nb 为缩小  $\gamma$  相区的元素。

## 1.2.2 杂质的影响

**锰** 锰一般是随着炼钢脱氧剂带入，锰与硫的结合力较强，生成的 MnS 夹杂在钢中，影响钢的性能，所以碳钢规定含锰量小于 0.8%。

**硅** 硅一般是随着炼钢脱氧剂带入，硅与氧的结合力较强，生成的  $\text{SiO}_2$  夹杂在钢中，影响钢的性能，所以碳钢规定含硅量小于 0.5%。

**硫** 硫与铁常常是共生矿，钢铁中的硫是炼钢中没有除尽的杂质，硫难溶于铁，生成的 FeS 分布在奥氏体晶界，使钢材在 1000℃ 左右热轧时产生热脆，导致开裂。硫与其他杂质形成的夹杂物常导致钢材开裂。硫还容易使焊缝热脆，并使焊缝产生气孔和裂纹。因此，必须控制硫的含量，规定了钢材中含硫量的上限，普通碳钢 0.050%，优质钢 0.035%。

GB 713—2008《锅炉和压力容器用钢板》规定 Q245R、Q345R、Q370R 三种钢板硫含量的限制为  $\leq 0.015\%$ ，18MnMoNbR、13MnNiMoR、15CrMoR、14Cr1MoR、12Cr2Mo1R、12Cr1MoVR 钢板硫含量的限制为  $\leq 0.010\%$ 。

GB 3531—2008《低温压力容器用低合金钢钢板》规定，16MnDR、15MnNiDR、09MnNiDR 三种钢板硫含量的限制为  $\leq 0.012\%$ 。

**磷** 磷是炼钢难以除尽的杂质，它固溶在铁素体中，显著降低钢的塑性和韧性，尤其是低温韧性，使钢材脆性增加，称为冷脆。磷使钢产生偏析，影响焊接性能，因此必须加以控制。一般规定，含磷量普通碳钢小于 0.045%，优质钢小于 0.035%。