

中国石油化工总公司人事部 组织编写

主编:曹发美

编写:吴爱军 董守江

GAO JI WU SUN JIAN CE GONG

高级无损检测工

化学工业出版社

封面设计:闫学锋

封面电脑设计监制:苏远



ISBN 7-5025-1424-4/TH·26

定 价:14.80元

高级无损检测工

中国石油化工总公司人事部 组织编写

主 编 曹发美

编 写 吴爱军 董守江

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高级无损检测工/曹发美主编. —北京: 化学工业出版社, 1994. 8

ISBN 7-5025-1424-4

I. 高… II. 曹… III. 无损检验-技术教育 IV. T
B302.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 06829 号

责任编辑: 李建斌

封面设计: 闫学锋

化学工业出版社 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号)

北京市通县燕山印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 14 1/2 字数 393 千字

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月北京第 1 次印刷

印 数 1—5 500

定 价 14.80 元

编者及审稿单位

主 编：曹发美

编 写：吴爱军 董守江

参加审稿单位：

北京市劳动局锅炉压力容器检验所

中国石化总公司北京燕山石油化工公司

北京朝阳无损检测中心

北京燕山石油化工公司建筑安装工程公司

前 言

目前,全国石化企业正在开展技术培训,为了适应“无损检测工”专业培训和等级考核的需要,我公司受中国石化总公司人事部的委托,继1990年12月编写出版《无损探伤工》之后,由曹发美、吴爱军、董守江等同志按照中国石化总公司工人技术等级标准“无损检测高级工”的要求,编写了这本书。

《高级无损检测工》是工人技术考核自学用书,编者力求把“等级标准”中基本要求的内容用通俗易懂的文字、形象直观的插图和有代表性的示例系统地加以阐述。书中根据《等级标准》中应知应会的要求,相应分为基础理论和实际操作两部分,将《等级标准》高级工中的条文作了适当的归类和次序的调整,为便于学习还附有习题和答案。可帮助“无损检测工”提高技术理论水平和实际操作技能。这本书的出版对提高无损检测工和有关工程技术人员的技术素质将会起积极作用。

我高兴地向无损检测工、从事无损检测的工程技术人员、劳资和教育工作者推荐这本书,愿它对你从事的工作有所帮助。

北京燕山石油化工公司副经理

徐 莉

1994年5月

序

锅炉压力容器和工业管道广泛应用于生产和生活。由于它在一定的温度和压力下工作，其介质大多数为易燃、易爆、有毒、有腐蚀性的物质，一旦发生事故，将对国家财产和人民生命安全带来严重危害。因此，无论在制造过程中或运行一定期限后，需要进行检验和检测，发现和消除危险隐患，以保证安全运行。

无损检测结果是判断锅炉压力容器和工业管道可靠性的基本依据。但无损检测的准确程度，往往取决于检测工的技术水平和操作熟练程度。因此，无损检测成了一个需要进行特殊培训、严格考核并取得资格证的岗位。

《高级无损检测工》收集大量的实际操作实例和一些新技术、新方法、新工艺。尤其是计算机在无损检测中的应用及超声波探伤成像技术，能帮助无损检测人员把技术提高到一个新的水平。

《高级无损检测工》是编写者辛勤劳动的结晶，尤其是那些操作实例，是他们实践经验的总结，对广大工人学习技术无疑是有裨益的。

全国锅炉压力容器无损检测人员
资格鉴定考核委员会主任 陈亦惠

1994年5月

内 容 提 要

本书是根据中国石油化工总公司“无损检测工技术等级标准”编写的考评用书。

本书内容分为三部分：一、基础知识部分。介绍高级无损检测工应熟悉和了解的有关理论知识；二、操作实例部分。讲述高级无损检测工应熟练掌握并运用的实际操作技能；三、射线探伤习题。目的是通过习题的训练，使读者巩固并加深所学的知识，为顺利通过高级考试打下基础。为便于自学，所有习题均附有答案。

本书适于化工、石油化工和其它有关行业的无损检测工人学习，可作为劳动部门的职业技能考评的辅导教材，亦可供有关行业职工学校的师生参考。

目 录

1 基础知识

一、金属的机械性能	1
(一) 强度与塑性	1
(二) 硬度	5
(三) 韧性	7
(四) 疲劳	8
二、金属的结构及铁碳合金	8
(一) 铁碳合金的基本组织	8
(二) 铁碳合金状态图	11
三、钢的热处理	14
(一) 概述	14
(二) 钢在加热及冷却时的组织转变	16
(三) 钢的热处理工艺	20
四、碳钢与低合金高强度钢的特点和应用	24
(一) 碳钢	24
(二) 低合金高强度钢	26
(三) 不锈钢	28
(四) 锅炉压力容器用钢的特点和几种常用钢的简介	29
五、焊接裂纹及防止措施	30
(一) 热裂纹及其防止措施	31
(二) 冷裂纹及其防止措施	32
(三) 再热裂纹	33
六、金属材料部分习题及答案	34
七、涡流探伤	37
(一) 涡流探伤原理	37
(二) 影响涡流探伤的因素	38

(三) 涡流探伤特点	38
(四) 涡流探伤方法	39
(五) 涡流信号检测	40
(六) 对比试件	41
八、涡流探伤部分习题及答案	42
九、声发射检测	50
(一) 声发射现象的物理基础	50
(二) 声发射检测仪器	58
(三) 声发射检测的应用	63
十、X射线常见故障及排除方法	69
(一) 操纵台常见的故障	69
(二) 管头常见的故障	71
(三) 机器运行中各种不正常现象及产生的原因	73
(四) 检查故障和修理时应注意的事项	76
十一、压力容器制造和现场组焊无损探伤质量控制有关知识	78
(一) 探伤委托与技术交底及工程联系	78
(二) 检测人员及仪器	79
(三) 记录、报告、资料管理	79
(四) 射线探伤	80
(五) 超声波探伤	83
(六) 磁粉探伤	86
(七) 渗透探伤	87
(八) 压力容器焊缝无损检验	87
十二、压力容器的腐蚀和防护	88
(一) 金属腐蚀的分类	88
(二) 金属腐蚀的主要影响因素	94
(三) 腐蚀的十种形态	97
(四) 防止压力容器腐蚀的措施	113
十三、无损检测新技术、新设备、新材料的发展应用	118、
(一) 无损检测仪器的计算机化	118
(二) 计算机在射线检测中的应用	121
(三) 高灵敏度超声C扫描检测技术	132
(四) C扫描图象后处理的一些方法	136

(五) NY-101 型便携式全数字化超声波探伤成像仪	141
(六) 管内壁超声波测厚装置	152

2 操作实例

一、日本理学 RF-300EGB2F 仪器的使用	158
(一) 射线仪操作步骤	158
(二) X 射线仪使用中可能发生的故障及分析	160
二、射线安全防护	163
(一) 照射剂量的计算	163
(二) 射线防护基本方法	165
(三) 射线防护习题	168
三、射线探伤工艺操作	170
(一) 工艺准备	170
(二) 探伤条件的选择	200
(三) 焊缝透照方法	237
四、曝光曲线及其正确使用	256
(一) 曝光曲线的构成、含义及使用条件	257
(二) 曝光曲线的正确使用	260
(三) 曝光曲线的拟合公式	262
(四) 曝光曲线的其它用法	265
(五) 有关曝光曲线的讨论	266
五、典型的射线探伤操作法	268
(一) T 型角焊缝的射线透照方法	268
(二) 小口径对接焊缝 X 射线透照法	271
(三) 管子焊缝射线透照检验中缩孔和未焊透深度的测定方法	281
(四) 确定环焊缝射线照相透照次数的曲线图	289
(五) 余高焊缝射线照相黑度范围的控制方法	296
(六) 周向 X 射线机的现场使用	303
六、中厚板对接焊缝超声波探伤	308
(一) 探测条件的选择	308
(二) 扫描速度(扫描线)的调节	312
(三) 距离-波幅曲线的绘制与应用	316
(四) 表面声能损失差的测定	321

(五) 扫查方式	322
(六) 缺陷位置的测定	321
(七) 缺陷大小的测定	328
(八) 缺陷性质的估计	329
(九) 伪缺陷波	333
(十) 记录和报告	331
七、典型超声波探伤操作法	335
(一) 全焊透 T 型接头焊缝超声波检测	335
(二) T 型接头角焊缝未焊透深度超声斜束测量方法	343
(三) 角焊缝的超声波探伤及未焊透深度测定	354
(四) 插入式管座角焊缝的超声波探伤	358
八、9%Ni 钢乙烯球罐的无损探伤	364
(一) 9%Ni 钢乙烯球罐基本情况	364
(二) 正三背二焊层射线探伤	365
(三) 奥氏体焊缝超声波探伤	367
(四) 9%Ni 钢球罐奥氏体焊缝着色探伤	373

3 射线检测习题

一、是非题	376
二、选择题	381
三、填空题	392
四、问答题	397
五、计算题	399
六、是非题答案	404
七、选择题答案	404
八、填空题答案	405
九、问答题答案	407
十、计算题答案	423

1 基础知识

一、金属的机械性能

金属的机械性能，即金属材料在一定的温度条件和受外力（载荷）作用下，抵抗变形和断裂的能力，也称材料的金属性能。金属材料的常规机械性能指标主要包括强度、塑性、硬度、韧性等。通过金属材料在不同受力条件下所表现出来的不同特性指标，来衡量金属材料的机械性能。

金属材料的强度、塑性和韧性等性能，是通过试验来测定的。例如通过拉伸试验可得知材料的强度和塑性；通过冲击试验可得知材料的韧性。下面拟分别就材料的常规机械性能作一阐述。

（一）强度与塑性

1. 拉伸试验

为了说明材料的强度与塑性，首先从钢的拉伸试验说起。材料的拉伸试验，是将制成的标准试样置于拉力试验机夹头内，然后，对试样缓慢施加载荷，随着载荷的增加，试样逐渐伸长，直至试样拉断（如图 1-1 所示）。从试样受载直至拉断的全过程中，可以获得表达试样受载及伸长关系的拉伸曲线图（如图 1-2 所示），图中的纵座标为载荷（ P ），横座标为伸长量（ ΔL ）。对拉伸曲线（ $P-\Delta L$ 图）进行分析，可以看出：

（1）起初，当载荷（ P ）逐渐增加，但低于 P_e 时， OP 段呈直线，这表明试样的伸长与施加的载荷成正比关系，此时若将载荷卸除，试样就能恢复到原始长度（ L_0 ），因此可以认为在此阶段内，变形是完全属于弹性的，即弹性变形阶段。

（2）当载荷继续增加，超过 P_e 后，如将载荷卸除，则试件除部分弹性变形能恢复外，还将留有不可恢复的残余变形。当继续增加载荷到 P_b ，此时拉伸曲线图中出现有一水平段，这种现象说明材料

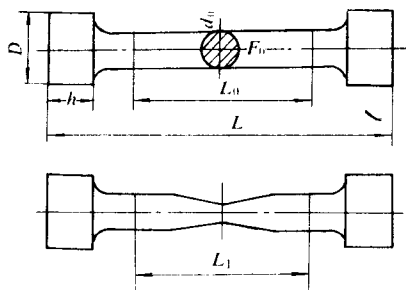


图 1-1 钢的标准拉伸试样

抗变形的能力暂时消失了，它不再象弹性变形阶段时那样，随着变形量的增加而不断增大抗力，于是人们就形象地比喻说材料这时对外力“屈服”了，并把出现这种现象的相应载荷作为“屈服载荷 P_s ”。此时，试样的伸长不再完全属于弹性变形，如果将载荷去掉，试样大部分伸长可以得到恢复，但还有少量的变形被保留下来，这部

分残余变形称为塑性变形。

(3) 若对试样继续施加载荷，则表现在拉伸曲线图上的曲线又趋向上升，可以认为材料此时又恢复了抵抗变形的能力，这种现象称材料的强化（即由于塑性变形后，内部结构变化，产生加硬化）。强化阶段一直持续到图示 b 点，显然这时外载荷 P 已达到最大值，因而相应于 b 点的载荷即称最大载荷或称极限载荷 P_b 。

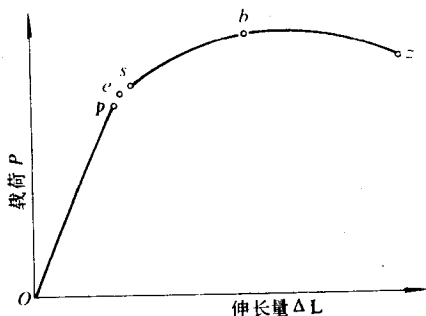


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线图

(4) 当施于试样的载荷达到上述最大值后，会出现试样的某个部位出现“颈缩”，局部变细，由于颈缩处的横截面积急剧缩小，最后，试样在低于 P_b 的载荷作用下被拉断，从图 1-2 中看出： $P_z < P_b$ ， b_z 段呈下弯曲线。

2. 强度

强度是指金属材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。材料受外力作用会发生变形,同时在材料内部也产生一种抵抗变形的力,单位面积上材料抵抗变形的力称为应力,强度的大小就用应力来度量。应力的计算公式为:

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (\text{牛顿/毫米}^2) \quad (1-1)$$

式中 σ ——应力 (牛顿/毫米²);

P ——外力 (牛顿);

F ——横截面面积 (毫米²)。

拉伸曲线上各特殊点的强度计算如下:

(1) 弹性极限 (σ_e) 拉伸曲线上的 e 点为材料产生最大弹性变形点,超过这点即产生塑性变形,我们把材料产生最大弹性变形时的应力称为弹性极限。

计算公式如下:

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (\text{牛顿/毫米}^2) \quad (1-2)$$

式中 P_e ——最大弹性变形时载荷;

F_0 ——试样原始截面积。

(2) 屈服极限 (σ_s) 在拉伸曲线上的 s 点,材料承受的载荷不再增加而仍继续发生塑性变形时的应力叫“屈服极限”或“屈服点”。

计算公式如下:

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad (\text{牛顿/毫米}^2) \quad (1-3)$$

式中 P_s ——材料屈服时的载荷 (牛顿);

F_0 ——试样原始截面积 (毫米²)。

有许多金属或合金材料,并没有明显的屈服现象发生,为表明

这些材料的屈服极限，规定以试样产生的伸长量为试样的长度的0.2%时的应力作为材料的“条件屈服极限”，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

屈服极限(σ_s 或 $\sigma_{0.2}$)是金属材料一个十分重要的强度指标，一般情况下材料都不应在超过其屈服点的载荷条件下工作，它是设计时选材的依据。

(3) 强度极限(σ_b) 拉伸曲线上的b点，它标志着当材料承受的应力值达到此值时，将引起破坏。材料抵抗拉力破坏作用的最大能力称为“强度极限”。

计算公式如下：

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (\text{牛顿/毫米}^2) \quad (1-4)$$

式中 P_b ——试样能承受的最大载荷(牛顿)；

F_0 ——试样的原始载面积(毫米²)。

材料的强度极限越高，能承受的应力越大，在选用金属材料时不允许超过它的强度极限。

在锅炉、压力容器的选材上，不仅希望材料具有高的 σ_s ，而且具有一定的屈强比(σ_s/σ_b)，屈强比越小，结构零件的可靠性越高，由于塑性变形不致立即破坏。

3. 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下，产生最大塑性变形(又称永久变形)而不破坏的能力。它以试样断裂后残余塑性变形的大小来表示，常用延伸率(δ)和断面收缩率(ψ)这两个指标来表达材料的塑性。

(1) 延伸率(δ) 延伸率(又称伸长率)是试样拉断后标距增长量 $L_1 - L_0$ 与原始标距长度 L_0 之比值的百分率来表示。

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 L_0 ——试样原始标距长度(毫米)；

L_1 ——试样拉断后的标距长度（毫米）。

(2) 断面收缩率 (ψ) 断面收缩率（又称截面收缩率）是用试件断口面积的缩减量与截面面积之比值的百分率来表示。

$$\text{即 } \psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 F_0 ——拉伸前试件原始截面积（毫米²）；

F_1 ——试件断后细颈处最小截面积（毫米²）。

延伸率和断面收缩率用于衡量材料的塑性，其数值越大，表示塑性越好。所以 δ 值和 ψ 值都是评价材料塑性好坏的一个指标。例如低碳钢的 δ 值可达 20~30%，被认为具有良好的塑性，而灰铸铁的 δ 值只有约 1%，故被认为是典型的脆性材料。

塑性指标在工程技术上有着重要的意义，一方面有良好塑性的材料可以顺利地进行某些成型工艺，如冷冲压、冷弯曲等。另一方面在使用时万一超载，也能由于塑性变形使材料强度提高而避免突然断裂。

压力容器的主要零部件都是承压的，无论从制造工艺的要求，还是从安全使用的要求，都应选用塑性好的材料，一方面易于加工制造；另一方面，一旦超压爆炸时，不致产生碎片飞出，这样可降低破坏力。

(二) 硬度

硬度是指金属材料抵抗硬物压入其表面的能力。它表示金属材料的坚硬程度。硬度是重要的机械性能指标之一。

硬度测定的方法很多，最常用的有布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和维氏硬度试验法三种。下面只介绍布氏和洛氏硬度试验法。

1. 布氏硬度

测定布氏硬度是在直径为 D 的淬火钢球上施加压力 P ，使钢球压入被测金属表面，并留下压痕（如图 1-3），载荷 P 与压痕表面积之比称为布氏硬度，用 HB 表示。