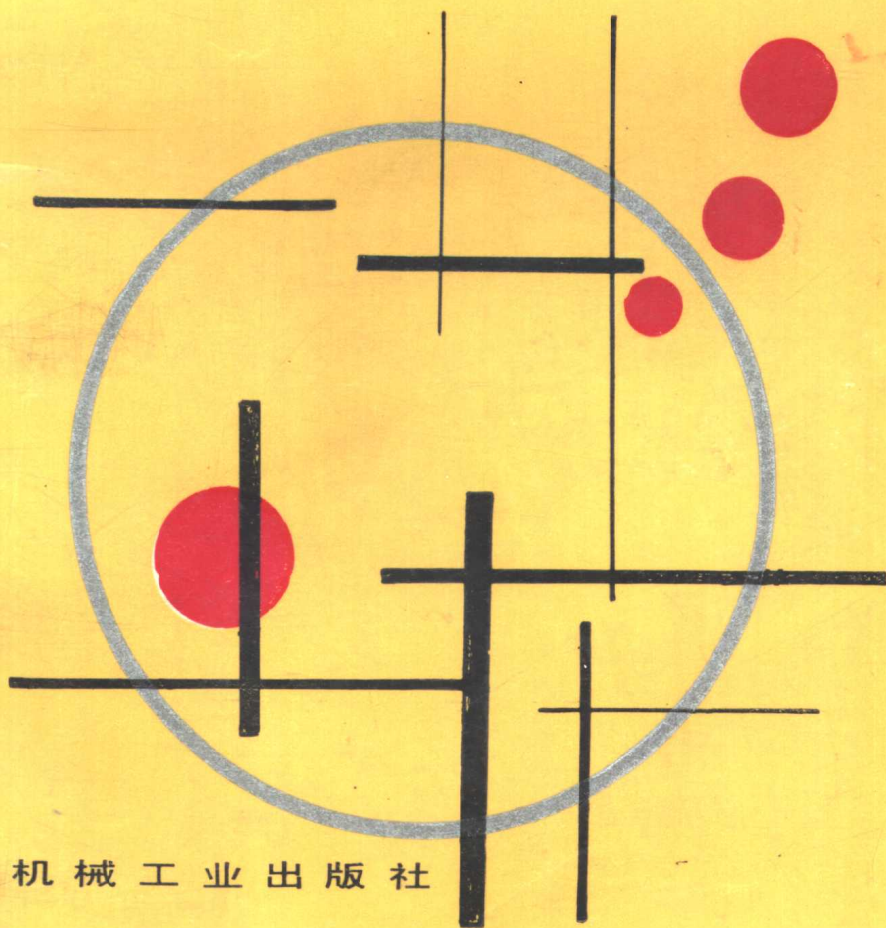


压力容器 分析设计基础

贺匡国 编著



机械工业出版社

压力容器分析设计基础

贺匡国 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

压力容器的分析设计基于塑性失效准则,按应力所在部位、应力性质和产生的原因进行分类评价。本书着重介绍分析设计的基础知识,并对ASME Ⅷ-2规范中涉及的圆柱壳、球壳和平板封头等计算做了推导和说明。主要内容有:应力分析设计方法概述;受均匀内压容器的应力分析;圆形平板封头的应力分析;压力容器的不连续应力、局部应力及热应力分析;并有具体实例详细介绍分析设计的计算步骤。

本书为从事压力容器设计、制造的工程师编写,适于自学,可作为继续教育用教材,亦可作为高等学校化工机械和有关专业选修课的教材,并可供压力容器检验部门的检验师,化工、石油化工和核工业等部门的设备技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

压力容器分析设计基础/贺匡国编著. -北京:机械工业出版社, 1995

ISBN 7-111-04773-7

I. 压… I. 贺… II. 压力容器-应力分析-技术-设计-基本知识 IV. TH490.2

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第08623号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:王正琼 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新
封面设计:肖 晴 责任印制:王国光
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1995年12月第1版第1次印刷
850mm×1168mm^{1/32}·7.75印张·201千字
0 001—3 700册
定价:14.00元

前 言

压力容器分析设计源于美国机械工程师协会的ASMEⅡ《核动力装置设备》，该协会并于1968年首次发布ASMEⅢ-2《压力容器另一规程》，在此前后英国、日本、法国等发达国家亦相继制定了类同或内容类似的规范。为与国外先进的设计技术衔接，1994年我国亦参照制订了行业标准JB4732《钢制压力容器分析设计标准》。这是第一部以应力分类为特征的国内分析设计规范，与各国规范有其共同特点，即运用塑性失效准则，按应力所在部位、应力性质和产生应力的原因不同进行分类评价，并规定了不同的限制条件。它有可靠的力学基础，以实际的使用经验为依托，在设计观点与方法上反映出面向近代设计的先进水平。显然，与应用传统的弹性准则，不问各种应力对安全的危害性是否相同而进行统一评定的常规设计^①相比较，有其明显的科学性。

鉴于国内压力容器分析设计标准即将正式发行，本书着重对分析设计提供了必要的基础知识和对ASMEⅢ-2规范中涉及的圆柱壳、球壳和平板封头等作了推导和说明，并增补了美国焊接研究委员会WRC-107通报关于压力容器的局部应力计算，以及板与厚壁容器的热应力计算，又新增了大型计算示例，以便读者借鉴。有关名词术语释义，材料、制造与检验要求的说明等，本稿还参考了我国的相关标准，做了一些摘录。因限于篇幅，对于应力计算主要采用解析方法，不介绍有限单元法。

本书的初稿是《压力容器分析设计》^②，曾作为化工机械工程

① 压力容器常规设计即按规则设计 (Design by Rule)。近年来新版本的常规设计标准，亦注意到应用分析设计的某些观点与结果。

② 化工工程师(设计)继续教育教材,压力容器分析设计(初稿),贺匡国、丁伟、刘东学编,1987,中国化工学会教育工作委员会。

ASCE 70/08

师继续教育用教材，由中国化工学会教育工作委员会组织，在全国化机专业教学指导委员会主任，南京化工学院戴树和教授主持下，于1987年在烟台继续教育学习班上讲授过，后来部分内容又作为本科生与研究生的选讲教材，均有较好的教学效果，学员反映良好，当时建议正式列为工程师继续教育和大学选修课的教材。现该书初稿经过全面改写，由中国机械工程学会压力容器分会设计委员会推荐出版。

本书由华东理工大学王允昌教授审阅全文。劳动部锅炉压力容器检测研究中心谢铁军工程师提供第8章的“应力计算”；大连理工大学胡大鹏高级工程师提供第3章的函数表和第8章拟合曲线的计算；关朝光同志为书稿描绘了插图。在本书的出版过程中，又得到了《压力容器》杂志编辑部的大力协助。特此一并致谢。

限于编者水平，不妥之处和错误诚恳希望读者批评指正。

编者

于大连理工大学，1994年12月

目 录

前言

第1章 压力容器规则设计与分析设计	1
一、规则设计	1
二、分析设计	2
第2章 应力分析设计方法概要	10
第1节 应力性质	10
一、薄壁容器	10
二、厚壁容器	12
三、平板端盖	14
四、壳体不连续区	15
五、容器支座区	17
六、容器接管区	18
七、容器热应力	19
第2节 应力分类	20
一、几个应力术语	21
二、一次应力	22
三、二次应力	23
四、峰值应力	24
第3节 应力强度	26
一、规范定义	26
二、计算方法	26
第4节 应力强度设计限制	30
一、材料的设计许用应力强度	30
二、各种应力强度限制条件	31
三、极限载荷设计概念	37
四、结构安定性概念	41
五、疲劳分析设计准则概要	43

第3章 受均匀内压容器的应力分析	47
第1节 薄壁容器的薄膜应力与变形	47
一、旋转薄壳的几何要素	47
二、旋转薄壳中的内力与应力	49
三、薄壳轴对称薄膜力求解	51
四、薄壳轴对称薄膜变形分析	54
五、薄膜理论的应用条件	57
第2节 薄壁容器的边缘弯曲解	59
一、边缘问题的基本概念	59
二、弹性基础梁类圆柱壳的边缘弯曲解	61
三、球壳的边缘弯曲解公式	71
附录: 函数表(一)	75
函数表(二)	77
函数表(三)	78
第3节 厚壁圆筒与球壳的三向应力	80
一、厚壁圆筒拉美公式推导	80
二、内压厚壁圆筒的弹性分析	83
三、外压厚壁圆筒的弹性应力与变形	87
四、内压厚壁球壳的弹性应力	89
第4章 圆形平板封头的应力分析	93
第1节 圆平板对称弯曲微分方程	93
一、平衡方程	94
二、几何方程	95
三、物理方程	96
四、挠度微分方程及其解的形式	97
第2节 几种圆平板的对称弯曲解	99
一、承受均布载荷的圆平板	99
二、承受同心圆载荷的圆平板	103
三、只承受弯矩的圆平板	107
第3节 压力容器的平板封头	109
一、ASME的计算模型	109
二、平板封头的变形和应力	112

第5章 压力容器的不连续应力	116
第1节 变形连续条件和边界载荷求解	117
一、 $\varphi_0 = \pi/2$ 的边界	117
二、 $\varphi_0 \neq \pi/2$ 的边界	123
第2节 不连续应力计算	127
一、需要已知的数据	127
二、计算步骤	127
三、数字计算例题	129
第6章 压力容器的局部应力	142
第1节 应力集中系数	142
一、外载荷产生的变截面应力集中系数	143
二、受内压壳体与接管连接的应力集中系数	144
第2节 球壳和圆柱壳由局部载荷引起的应力	149
一、球壳	149
二、圆柱壳	155
第3节 球壳和圆柱壳局部应力的计算方法	160
一、计算通式	161
二、计算方法	164
三、适用范围	172
第4节 局部应力计算举例	173
附录: WRC-107球壳—附件与圆柱壳—附件的内力(矩)	
无因次量曲线图	178
一、球壳—接管	178
二、圆柱壳—附件	191
第7章 热应力	200
第1节 温度分布计算	201
一、Fourier 定律	202
二、热传导的微分方程	204
第2节 轴对称温度场的圆平板热应力	207
一、 T 为常量的热应力	207
二、 $T(Z)$ 的热应力	208
三、 $T(r)$ 的热应力	212

四、 $T(r, Z)$ 的热应力	215
第3节 圆筒体与球壳的热应力	217
一、圆筒体的热应力	217
二、球壳的热应力	224
第8章 分析设计的计算举例	228
一、题意说明	228
二、应力计算	229
三、应力强度评定	231
四、结论	234
参考文献	238

第1章 压力容器规则 设计与分析设计

压力容器按规则设计与按分析设计一般分属两个自成体系的、独立的压力容器规范。由于技术上的综合经济性与使用经验等原因,通常,同一个国家内两种规范并存,但两者不得混用,可以任选其一。

一、规则设计

常规的压力容器设计即是按规则设计,世界各国均有按规则设计的压力容器规范,例如我国GB150《钢制压力容器》,美国ASME《锅炉及压力容器规范》Ⅷ-1,日本JIS B8243《压力容器构造》等。但是按规则进行设计并非只是运用文字条款不作计算分析。实际上是以工程强度的形式对容器进行应力计算,以弹性失效为设计准则。所谓弹性失效是认为容器只有完全处于弹性状态时才是安全的,一旦结构内某一点计算的最大应力进入塑性范围,即达到或超过材料的屈服极限,整个容器就认为是失效了。这种设计准则来源于施加静力载荷的构件,以其平均应力作为设计基础。由于未详细计算容器总体或局部结构的不连续应力和因多次受载时发生的交变应力,又不追究不同工况、不同性质、不同部位的应力值对失效所起的作用是否等同,因此计算与分析都是比较简单的,但是也就潜在着一定程度的盲目性。对此,为了保证安全,规则设计的压力容器规范以相应的条款做了必要的规定,诸如规定适用与不适用的容器种类;规定压力容器的选用材料;规定采用较大的安全系数;提出对不连续结构与焊接结构的规定要求;提出应遵守的制造与检验规程,等等。必要时,还应进行试制鉴定或实物模拟试验等。因此,自从第一个压力容器规

范[⊙]问世七十余年以来，按规则设计的绝大多数压力容器是安全可靠的。这就使得这种设计方法及其规范至今仍广为使用。

但是，随着生产发展和科学技术水平不断提高，容器建造趋向大型化，工况参数日益提高，应用现代计算技术进行容器的全面应力分析已经成为可能，因此按规则进行压力容器设计的缺点和局限性亦就明显地暴露出来：

(1) 由于不考虑可变载荷对容器各部位引起不同的应力与变形，故无法进行疲劳分析和预计寿命，亦不能推测失效起源于何处。

(2) 弹性失效并不表明容器的承载能力已经耗尽。不同性质的应力取同一应力评定判据是不合理的，这对设计复杂结构的大型容器很不经济。而有效利用结构的塑性行为已被证明是可行的。

(3) 取较高的安全系数无疑掩盖了失效的实质。其结果增加了材料消耗和制造成本，而对容器安全有时适得其反。例如增大构件尺寸，所需钢材的力学性能降低，原材料与制造缺陷随之增多；对于受热构件，热应力还将增大，等等。

基于以上原因，开始研究并出现了另一种压力容器的设计方法，即按压力容器全面的应力分析进行设计，简称“分析设计”。

二、分析设计

压力容器分析设计是设计方法上的一个进步。它要求根据具体工况，进行详细的应力计算与分析，考虑不同的失效形式，以新的观点和相应的规范进行设计的一种新方法。它的理论基础是

⊙ 美国ASME《锅炉及压力容器规范》是世界上历史最久的规范。它的第一版只是锅炉规范，^W于1915年正式出版。1925年增添了非直接火压力容器规范，即现行ASME《锅炉及压力容器规范》第Ⅲ卷第一分册的前身，是按规则设计的规范分册。我国第一本按规则设计的正式部颁规程1977年出版，名为《钢制石油化工压力容器设计规定》，内容以设计计算为主，修订过二次，即1982年版和1985年版。1989年我国公布实施的国家标准《钢制压力容器》是我国第一本压力容器规范，包括设计规定、材料、制造、检验与验收，其中设计方法基本上为按规则设计。

板壳力学、弹性与塑性理论以及结构的有限单元法。其先进性表现在：

(1) 考虑了超出弹性范围以后结构的塑性行为，放弃传统的弹性失效准则。引入极限分析与安定分析概念，采用塑性失效设计准则。

(2) 应用电子计算机技术和(或)近代实验测试技术，对复杂结构的容器整体，包括任何不连续区域都可以做详细的弹性应力分析与计算。

(3) 按不同性质的应力分类和失效形式给予不同的限制条件。机械应力以极限载荷为界限；不连续应力或热应力以安定载荷为界限。当反复受载需做疲劳分析时以疲劳试验应力幅为界限。

(4) 引用虚拟应力概念可以方便地对高应变区作弹性分析。以屈服后的虚拟应力与屈服应力之比表示塑性承载能力相对于弹性荷载提高的倍数。

压力容器分析设计通常用试算法，需要有初设结构，然后进行应力计算与分析，有时还需更改最初的设计结构再做计算分析。需要做的主要设计工作包括：对容器各部位的各种应力进行详细计算，或对模拟容器进行实验测试；根据不同应力引起失效的危害程度不同，进行应力分类；对各类应力进行分解、组合，形成当量应力给予不同的应力限制；最终判别其设计的可行性。如果需要，对于反复受载的容器再做疲劳分析设计。应力分类及其限制条件按相应的规范规定。对于复杂结构容器的应力计算通常采用有限单元法，对于结构简单的容器亦可采用解析法公式计算。

如上所述，只就设计方法而言，压力容器按应力分析设计是科学的，计算结果亦是经济的。但是要实现设计上的安全可靠必须以遵循相应的规范为前提，而且设计的可行性最终总是以综合经济性作为评价。目前，按分析设计的容器规范有：美国ASME《锅炉及压力容器规范》Ⅷ-2，日本JIS B8250《压力容器构造—另

一标准》，我国JB4732—94《钢制压力容器—分析设计标准》等，与按规则设计的容器规范相比较，见简表1-1至表1-4。可以看出其设计方法上的先进性是以规范的严格要求为条件的。按照分析设计，由于计算复杂，选材、制造与检验等要求从严，有时综合经济性并不合理，因此一般只推荐重量大、结构复杂、操作参数较高等大型压力容器采用分析设计是适宜的。当然，如果容器要求进行疲劳分析，则必须采用分析设计。

表1-1 两类规范的部分内容比较

	比较项目	按规则设计	按分析设计
1	规范名称	GB150《钢制压力容器》 ASMEⅧ-1《压力容器》 JIS B8243《压力容器构造》	JB4732—94《钢制压力容器—分析设计标准》 ASMEⅧ-2《压力容器—另一规程》 JIS E8250《压力容器构造—另一规程》
2	规范历史 (第一版或前身出版年代)	中国: 1989 ASME: 1925 JIS: 1963	中国: 1994 ASME: 1963 JIS: 1983
3	设计压力 (最高)	中国: 35MPa ASME: 20MPa JIS: 30MPa	中国: 100MPa ASME: 不限定 JIS: 100MPa
4	设计温度	材料的允许使用温度 (可高于材料蠕变温度)	材料的蠕变温度以下
5	不适用工况	反复受载疲劳分析	高温蠕变
6	设计准则	弹性失效准则	塑性失效准则; 疲劳失效准则
7	采用强度理论	最大主应力理论 ^①	最大切应力理论
8	应力分类	不分类	按应力性质不同分类
9	应力分析方法	材料力学, 板壳力学	弹性有限元法, 弹性理论和板壳理论解析法, 实验应力测试法

(续)

	比较项目	按规则设计	按分析设计
10	计算复杂性	以膜应力为基础作计算, 简单	各种应力均需全面计算 复杂
11	对热应力的考虑	通常与机械应力迭加	作为二次应力
12	应力评定判据	取相同判据	按应力分类取不同判据
13	基本安全系数 (最小)	中国: $n_b=3, n_s=1.6$ ASME: $n_b=4, n_s=1.6$ JIS: $n_b=4, n_s=1.6$	中国: $n_b=2.6, n_s=1.5$ ASME: $n_b=3, n_s=1.5$ JIS: $n_b=3, n_s=1.5$
14	材料控制 (以钢板为例)	符合压力容器常规要求	相应要求比常规的更严格
	许用材料种类	ASME VIII-1, 约139种 GB150-89, 约27种	ASME VIII-2约72种 JB4732-94约24种
15	制造与检验	按压力容器常规要求	比前者要求严格
	制造资格	中国: 要有压力容器制造许可证 ASME: 获准“U”钢印	中国: 必须有相应的许可证, 例如第三类压力容器制造许可证 ASME: 获准“U2”钢印
16	综合经济性	一般结构的容器综合经济性好	大型、复杂结构的容器综合经济性好(用户需提出详细的设计任务书)

① 某些局部区域采用最大切应力理论。

表1-2 我国GB150与JB4732比较 (材料, 制造与检验)

(一)标准内容

GB150-89	JB4732-94(报批稿)
1. 总论	1. 主题内容与适用范围
2. 材料	2. 引用标准
3. 内压圆筒和内压球壳	3. 总论
4. 外压圆筒和外压球壳	4. 名词术语
5. 封头	5. 分析设计的一般准则
6. 开孔和开孔补强	6. 材料
7. 法兰	7. 承受内压的回转壳

(续)

GB150—89	JB4732—94(报批稿)
8. 卧式容器 9. 直立容器 10. 制造、检验与验收 附录： A 材料的补充规定(补充件) B 超压泄放装置(补充件) C 低温压力容器(补充件) D 非圆形截面容器(补充件) E U形膨胀节(补充件) F 直立容器高振型计算(补充件) G 产品焊接试板焊接接头的力学性能检验(补充件) H 钢制压力容器渗透探伤(补充件) I 钢材高温性能(参考件) J 密封结构(参考件) K 焊接接头设计(参考件) L 例题	8. 承受外压的回转壳 9. 平盖 10. 开孔和开孔补强 11. 制造、检验与验收 附录： A 基本部件、组合部件的应力分析(补充件) B 实验应力分析(补充件) C 以疲劳分析为基础的设计(补充件) D 法兰(补充件) E 超压泄放装置(补充件) F 材料的补充规定(补充件) G 材料高温性能(参考件) H 焊接接头(参考件) I 管壳式换热器管板的应力分析(参考件) J 圆柱壳开孔接管应力分析法(参考件) K 对有限元计算程序与分析人员的基本要求(参考件)

表1-3 我国GB150与JB4732比较 (材料, 制造与检验)

(二)关于材料的要求 (钢板)

比较项目	GB150—89	JB4732—94(报批稿)
1 采用的钢板标准	GB	YB(T), 冶金部推荐, 技术要求较高; GB
钢板常温强度指标	高合金钢板 无	有
2 钢板超声波检测条件与合格级别(逐张)	包扎容器内筒钢板 I级 低合金钢板, >25mm II级 16MnR, >30mm III级 20R, >38mm IV级	包扎容器内筒钢板 I级 调质钢板 I级 不分材料, >20mm I级

(续)

比较项目	GB150—89		JB4732—94(报批稿)	
3 拉伸和冲击试验(逐张)	调质钢板 包扎容器内筒钢板		调质钢板 包扎容器内筒钢板 厚度>50mm钢板	
4 最高使用温度(举例)	20R, 16MnR 15CrMoR 0Cr19Ni9	475℃ 550℃ 700℃	20R, 16MnR 15CrMoR 0Cr18Ni9	375℃ 475℃ 425℃
使用温度下限	-20℃		0℃	
低温用钢板最低使用温度(最低冲击试验温度)	16MnR热轧, 6~25mm, -20℃ 16MnDR正火, 6~32mm, -40℃ 09Mn2VDR正火, 6~32mm, -70℃ 06MnNbDR正火, 6~16mm, -90℃		16MnR正火, 6~100mm, -20℃ 16MnDR正火, 6~32mm, -40℃ 09Mn2VDR正火, 6~20mm, -50℃ 09MnNiDR正火, 6~60mm, -70℃	
5 钢板的韧性要求(以冲击功 A_{kv} 表示)	20R $\geq 18J$ 16MnR, 15MnVR $\geq 20J$ 15MnVNR, 18MnMoNbR, 18MnNiMoNbR $\geq 27J$		$\sigma_s \leq 450MPa$ $\geq 20J$ $> 450 \sim 515MPa$ $\geq 24J$ $> 515 \sim 590MPa$ $\geq 27J$ $> 590 \sim 650MPa$ $\geq 31J$	
6 可否使用非压力容器用钢板	$p \leq 1.0MPa$, $t = 0 \sim 350^\circ C$, $\delta \leq 16mm$, 可用A3或AY3		不可	
7 可否使用沸腾钢板	$p \leq 0.6MPa$, $t = 0 \sim 250^\circ C$, $\delta \leq 12mm$, 可用A3F或AY3F		不可	

表1-4 我国GB150与JB4732比较(材料, 制造与检验)

(三)关于制造与检验的要求

比较项目	GB150—89	JB4732—94(报批稿)
1 适用范围	单层压力容器 多层包扎压力容器 热套压力容器	单层压力容器 多层包扎压力容器 热套压力容器 锻焊压力容器
2 制造用材料应有确认标记	不明确	明确 并对使用硬印标记有限制

(续)

比较项目	GB150—89	JB4732—94(报批稿)
3 封头的形状偏差(封头内径为 D_i)	检查用样板弦长不小于 $3/4D_i$	封头深度不大于 $45\%D_i$, 检查样板弦长等于 D_i 封头深度大于 $45\%D_i$, 一律按外压封头从严要求 封头直边纵向皱折深度不大于1.5mm
4 焊缝对口错边量	不考虑材料因素, 按焊缝类别和厚度规定允许错边量, 例如纵向焊缝, 厚度 $\leq 50\text{mm}$, 错边量允许 $\leq 3\text{mm}$	增加考虑材料因素, 且允许错边量从严, 例如 $\sigma_b > 540\text{MPa}$, 条件与GB150相同, 允许错边量 $\leq 2.4\text{mm}$
5 两板厚度不等, 需要削薄的条件(薄板厚度为 δ_2)	$\delta_2 \leq 10\text{mm}$, 厚度差 $\geq 3\text{mm}$; $\delta_2 > 10\text{mm}$, 厚度差 $> 30\%\delta_2$, 或 $\geq 5\text{mm}$	不分板厚, 厚度差 $> 25\%\delta_2$, 或 $\geq 3\text{mm}$
6 壳体直线度允差	长度 $L \leq 20\text{m}$, 允差 $2/1000$; $20\text{m} < L \leq 30\text{m}$, 允差 $1/1000$	不分长短档次, 允差 $1/1000$
7 接管底部要求	没有规定	内表面转角半径 $r \geq 1/4$ 壳厚, 且不大于 20mm 对插入接管, $r \geq 1/4$ 管厚, 且 不大于 10mm
8 对接焊缝的接头余高	按施焊方法与焊缝深度(δ)规定余高, 例如手工焊, $25\text{mm} < \delta \leq 50\text{mm}$ 余高 $0 \sim 3\text{mm}$ $\delta > 50\text{mm}$, 余高 $0 \sim 4\text{mm}$	考虑材料因素与焊缝深度(δ)规定余高, 例如 $\sigma_b > 540\text{MPa}$, $25\text{mm} < \delta \leq 50\text{mm}$, 余高 $0 \sim 10\%\delta$, 且 $\leq 3\text{mm}$; $\delta > 50\text{mm}$, 余高 $\leq 3\text{mm}$
9 焊接接头表面不应有的缺陷	裂纹、气孔、弧坑、夹渣; 除规定材料不得咬边外, 其它咬边深 $\leq 0.5\text{mm}$, 长 $\leq 100\text{mm}$, 两侧咬边总长不得超过焊缝长度的10%	裂纹、气孔、咬边、弧坑、夹渣
10 焊接引弧要求	不作具体规定	禁止在非焊接部位引弧