

GAODENGXUEXIAOJIAOCAI

高等学校教材



超高压容器设计

陈国理 陈柏暖 王作池 编著



51.3

化学工业出版社

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

超高压容器设计/陈国理等编著. —北京: 化学工业出版社, 1997

高等学校教材

ISBN 7-5025-1857-6

I. 超… II. 陈… III. 高压容器-设计-高等学校-教材
IV. TQ051.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 05852 号

高等学校教材
超 高 压 容 器 设 计
陈国理 陈柏暖 王作池 编著
责任编辑: 孙世斌
责任校对: 蒋 宇
封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
新华书店北京发行所经销
北京市燕山联营印刷厂印刷
北京市燕山联营装订厂装订

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 6 $\frac{1}{8}$ 字数 170 千字
1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月北京第 1 次印刷
印 数: 1—3000
ISBN 7-5025-1857-6/G · 483
定 价: 9.80 元

版板所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换。

前 言

本教材是根据全国化工设备及机械专业第二届教学指导委员会推荐、化工部人事教育司下达任务编写的。

考虑到目前化学及石油化工乙烯工程，乙烯超高压聚合使用超高压反应器，人造水晶工业使用超高压水晶釜以及其它工程使用超高压等静压挤压容器……等使用超高压容器愈来愈多，化工机械专业本科生开出“超高压容器”选修课程是有需要的。通过“超高压容器”课的修读，不但对超高压容器的结构型式，选材原则及设计计算等有所了解，而且对一般高压容器的设计准则与设计方法，特别是安全的考虑更能加深理解。同时考虑到，对大多数化工机械专业本科生，有机会接触超高压容器的不仅仅局限于设计方面的内容，而且更多的在于如何确保超高压容器安全运行方面的知识。因此，本书包括了容器的结构类型、结构分析、强度计算、残余应力分析、疲劳设计与安全性分析和使用管理等方面的内容。用较少的篇幅全面的介绍了超高压容器的知识。本书既可作为高等院校或中等专科学校的教材，也可作为超高压容器的设计、生产使用部门的工程技术人员和管理人员的参考书。

本书由陈国理（教授）主编，陈柏暖（教授）、王作池（讲师）参编，陈国理负责绪论、第七章的编写；陈柏暖负责第二、三（第二节除外）、四、六章的编写；王作池负责一、三（第二节）、五章的编写。陈柏暖负责全书的统稿，陈国理负责复查定稿。并由浙江大学黄载生教授审阅全稿，提出许多宝贵的意见，对保证本书的质量起很好的作用。此外，广州石化总厂张造雄工程师，广州煤气公司程志庆工程师协助整理及部分抄稿工作，他们对本书的出版均付出了不少的劳动，在此，谨对他们表示感谢。

本书内容，特别是安全法规力求与国内劳动部门所订的规程一致，

但由于水平与时间所限，谬误与不到在所难免，热忱期望有关部门及读者批评指正。

编 者

1996. 8. 于广州

内 容 提 要

本书是根据全国化工设备及机械专业第二届教学指导委员会的推荐,经化学工业部高等学校教材编审出版任务书(94)化教材任字第08号文批准编写的。

全书共分七章,内容包括:超高压技术的发展及其应用;超高压容器设计准则、选材原则及典型结构;整体锻造单层厚壁容器、自增强容器、绕丝式容器、剖分式容器的设计计算;超高压容器疲劳设计准则和方法;超高压容器安全性问题(爆炸量能的估算、爆炸破坏程度及影响范围、可能发生事故的要素、运行管理、缺陷处理、安全评定及延寿技术)等。

本书除作为化工设备及机械专业本科选修课教材和教学参考书外,也可供从事超高压技术的科研、工程技术人员及管理人员参考。

目 录

绪论	1
第一节 超高压技术的发展及其应用	1
一、在化工生产方面的应用	1
二、在‘等静压制’的应用	3
三、在液体射流切割的应用	4
第二节 超高压容器的设计准则	4
一、超高压容器筒壁的应力特征	5
二、提高超高压圆筒强度的方法	6
三、超高压容器材料选用准则	8
四、失效准则及设计规范	8
第一章 超高压容器用钢及典型结构	10
第一节 超高压容器用钢	10
一、选材原则与主要性能指标	10
二、材料的冶炼及热处理	12
三、推荐材料	15
第二节 超高压容器典型结构	16
一、单层厚壁容器	16
二、多层缩套容器	19
三、绕丝式容器	22
四、剖分式筒体	24
五、压力夹套式容器	26
六、综合式容器	27
第二章 整体锻造单层厚壁容器	28
第一节 按塑性失效准则的设计方法	28
一、塑性条件	28
二、初始屈服压力 (p_s)	30
三、全屈服压力 (p_F)	31

四、筒体壁厚的计算	32
第二节 按爆破失效准则的设计方法	33
一、爆破压力 (p_b)	33
二、筒体壁厚的计算	38
第三章 自增强容器	41
第一节 理想材料的自增强设计计算	43
一、自增强压力与超应变度	43
二、自增强加压时筒壁应力、应变与径向位移	45
三、自增强压力卸除后的筒壁残余应力	47
四、最佳弹-塑性界面半径 (r_c^{opt}) 及最佳自增强压力 (p_k^{opt})	51
五、自增强容器的弹性强度——再屈服压力 (p_n)	55
六、自增强反向屈服	56
第二节 考虑材料应变硬化与鲍辛格效应的自增强设计计算	65
一、材料的应变硬化与鲍辛格效应行为	66
二、鲍辛格效应对反向屈服的影响	69
三、考虑材料应变硬化与鲍辛格效应的残余应力计算	72
第三节 自增强处理方法	86
一、直接液压法	87
二、机械式挤压法	87
三、爆炸法	88
四、固体自增强法	89
第四章 绕丝式超高压容器	90
第一节 绕丝筒体设计	92
一、绕丝层外径 (r_o)	92
二、内筒外径 (r_i) 及钢丝缠绕层数 (n)	93
三、钢丝的拉紧应力 (σ_w) 和拉紧张力 (T_i)	95
四、内筒预(紧)应力的核算	96
五、内筒压缩稳定性校核	98
六、内筒径向位移	98
七、绕丝式容器的应力分布	100
八、缠绕钢丝疲劳强度校核	101
第二节 绕丝筒体的应力松弛	103
一、蠕变与应力松弛现象	103

二、应力松弛设计计算	103
第五章 剖分式超高压容器设计	113
第一节 剖分式容器的结构型式	113
一、基本结构型式	113
二、剖分块与压力夹套相结合	115
三、综合型式	116
第二节 剖分式容器的计算	117
一、剖分层的最佳径比	117
二、承载能力的计算	118
第六章 超高压容器疲劳设计	123
第一节 概述	123
一、疲劳现象的普遍性	123
二、超高压容器疲劳裂纹的特征	124
三、交变应力的循环特征	124
四、低循环疲劳、高循环疲劳与疲劳曲线方程	125
第二节 疲劳设计准则和方法	128
一、无限寿命设计准则	128
二、安全寿命设计准则	129
三、损伤容限设计准则	144
第七章 超高压容器的安全性问题	165
第一节 超高压操作的能量和可能发生事故的因素	165
一、超高压系统的能量	165
二、爆炸能量的计算	165
三、可能发生事故的因素	173
第二节 设计与制造的可靠性	173
一、筒体的可靠性	173
二、零部件的合理设计	174
三、加工制造应注意的问题	176
第三节 运行与管理	177
一、耐压试验	177
二、安全规程	178
第四节 缺陷处理、安全评定及延寿	180
一、缺陷处理	180

二、安全评定	181
三、容器的剩余寿命评估	181
四、超高压容器的延寿	182
参考文献	184

绪 论

第一节 超高压技术的发展及其应用

压力 (Pressure) 广泛地存在于自然界中,但在人类历史的长河中,在很长的一段时期未被人们认识与利用,至 1769 年蒸汽机的发明,1913 年氢、氮在 20MPa 的高压下直接合成为氨的成功,揭开了利用高压进行工业生产的序幕。此后发现,压力不但可以促进化学反应,还可以改进物质的物理性能,而且压力愈高,作用愈大,例如利用超高压可以进行机械制造的切割、焊接、成型……。目前高压技术已渗透到各个工业领域,并取得了丰硕的成果,下面分述使用压力 $p \geq 100\text{MPa}$ 的一些工业领域及成果。

一、在化工生产方面的应用

1. 合成氨 19 世纪末,化学家们便认识氨是化肥、炸药以及其它工业的重要原料,空气与水中存在着大量的制氨原料—氮和氢,想从空气中取氮、从水中取氢直接进行工业生产氨,但是氢、氮在一般压力下是不起反应的。1829 年,洛恩特根 (Roentgen) 发表了一篇压力效应对化学反应的影响的研究论文,1888 年,法国化学家勒·查泰里耳 (Le. chateller) 提出利用压力这个因素来促进氢、氮合成反应的著名原理与设想,1913 年,德国工程师赫伯 (Haber) 根据这个设想研制成功了能耐 20MPa 的高压容器,终于使氢、氮在容器中以 20MPa 压力及有催化剂存在下直接合成为氨,首先成功地进行了合成氨的工业生产,这是高压技术在化工生产中应用的先声。

在 20MPa 压力下,虽能促进氢、氮的合成反应,但转化率是很低的,只 10%~12% 左右,为了提高合成转化率,法国化学家乔治·克劳德 (Georges Claude) 在法国建立了一间工作压力 $p \geq 100\text{MPa}$ 的合成氨厂,将转化率提高到 30% 左右。在当时金属冶炼及机械制造条件下,

很难维持这么高压力的容器及管道的安全正常操作，所以这个高压合成氨厂生产没有维持很久，但通过这个厂的生产实践证明：对合成氨来说，较高的操作压力，合成转化率较高。故提出了 300~450MPa 操作压力的设想，认为如果有这样高的操作压力，合成转化率可达到 50% 以上，并且可以不用催化剂，氢、氮便能直接反应。如果能把操作压力与转化率进一步提高，合成氨生产便不用循环操作，流程与设备都大为简化。在炼钢工业，机械制造工业的技术水平不断提高后，这个目标是可以达到的。

2. 乙烯的聚合 乙烯的聚合，1933 年以前是在 10MPa 操作压力下进行中、低压聚合，由于聚合的压力低，用途受限制。‘二战’时期，德国人为满足制造雷达的需要，研制了在 150MPa 压力下乙烯的聚合，这种乙烯产品具有优良的柔软性和高频绝缘的性能，适用拉吹塑成膜、挤压、注压；并且超高压聚合，还具有工艺流程短、设备容积小、产量大和成本低的优点。从此，德国建立了第一间操作压力为 150MPa 的乙烯超高压聚合工厂，这是人类历史上首次使用超高压技术进行大批量的化工生产。‘二战’以后，随着冶金技术的进步，采用真空电炉冶炼出完全无非金属夹杂物、具有韧性好、强度高的高合金钢（例如 En26、AISI4340 钢），得以制造高压设备，因此德国、英国、美国、日本相继又把乙烯聚合的压力提高到 240MPa、320MPa，个别有达 400MPa。我国 60 年代上海化工研究院自建的高压聚乙烯工厂操作压力为 150MPa，70 年代北京与上海引进的分别为 240MPa 与 280MPa，80 年代大庆与 90 年代广东茂名引进的高压聚乙烯设备，其操作压力均为 320MPa。目前的设计均在此压力以上。

3. 单晶体材料的高压合成——人造水晶 用作光学玻璃及电子工业元件的水晶是用单晶体材料在高压下合成的，即用石英砂 (SiO_2) 矿石，装于超高压容器中，加入 0.3mol (NaOH) 溶液，容器在密封下加热，使之溶解，在 150~200MPa 的压力和 360~400℃ 温度下再结晶而得到人造水晶。由于电子工业的大量发展，人造水晶用得很多，70 年代以来，我国建立了许多人造水晶厂，使用的超高压容器——人造水晶釜有数千台以上，这是我国当前超高压技术中，使用超高压容器最

多的一个领域。

4. 金刚石和超硬材料的合成—人造金刚石 金刚石的合成是将低级碳的石墨，通过高温高压，挤压成高级碳（金刚石）的过程。

把石墨切成小方块，外面用叶蜡石与镍包裹，然后放到砧座式压机的六面体钻座挤压，挤压压力达 5500~6000MPa，并用电加热至 1000℃，金刚石晶核就在石墨与镍的界面上形成，通过石墨的消耗，金刚石晶核就逐渐长大，所产生金刚石晶核的数目以及长大的速率，取决于相对于平衡线压力的“超压”量。在相当高超压量（6000MPa）的条件下，反应进行得很快，几分钟便完成了（从装料到取出约 20min）。便得到一小颗一小颗闪闪发光的金刚石。

人造金刚石是目前高压技术生产产品中使用最高压力者，但石墨是固相反应，无需使用压力容器，受高液压的部位主要是六面体砧座压机的活塞筒。

二、在‘等静压制’的应用

压力不仅能促进化学反应，还能改变一些物质的物理性能，一些物质在很高（1000MPa 以上）的压力（液压或气压）挤压下，分子间的距离缩小，密度增大，甚至产生分子与原子的变位与变形，以至原子结构发生变化，而使物质的物理性质产生根本的变化。例如白磷在 1200MPa 的液压挤压下，由不导电、无金属光泽的白磷，变为能导电有金属光泽的黑磷。一些金属或非金属，在超高液压挤压下，其机械性能与物理性能也会产生某种变化。这种利用液体或气体对物质进行等静压挤压，以改变物质物理或机械性能的处理，称等静压挤压，或等静压制。其是 70 年代中期兴起，80 年代得到迅猛发展的一项新技术，也是超高压技术的新发展。

等静压挤压处理在室温下进行的，称冷等静压（CIP）；挤压温度在 250~450℃ 间者，称温等静压（WIP）；挤压温度在 450~2000℃ 间者，称热等静压（HIP）。冷等静压大多数只用作等静压制压实压紧的一个工序，一般还要跟着烧结或热等静压，目前在粉末冶金、陶瓷、塑料工业常用作成型的手段。温等静压提高一些温度，有时是用来对材料内部某些添加剂施加影响的。热等静压由于在高温下进行挤压，压

力介质只能用惰性气体（多为氩气），在高温下挤压，不但可以压紧、压密，还可以改变物质的微观组织，改进物质的性能，如白磷变为黑磷；因此热等静压作用较大，例如用来消除铸钢件的铸造缺陷及燃气轮机翼轮的疲劳再生等等。等静压制现较多应用于陶瓷与粘土工业，粉末冶金工业及塑料工业。

三、在液体射流切割的应用

80年代以来，国外利用高压液体，开创了一项液体射流切割，并已在工业上广泛应用。有连续射流切割（压力1400MPa）和脉冲射流切割（7000MPa）两种，主要应用于以下三个方面。

1. 切割各种物料（木材、皮革、塑料、钢板等） 使用脉冲水射流，通过装有活塞作往复运动的喷嘴，在2000MPa的压力下，一次脉冲可穿透12cm厚的钢板，用射流切割的钢板，切口平直，无热变形。

2. 采煤采矿 利用高压液体射流，进行采煤、采矿及开凿隧道、疏浚和钻探，无粉尘，无污染，并可避免火花引燃的危险，用于射流采煤时，有下列三种方式：

（1）用大直径（10~35mm）水力喷枪，在5~15MPa压力下破碎煤层，范围可达26m；

（2）用小直径（ $d < 10\text{mm}$ ）喷枪，在20~1000MPa压力下切割小范围煤层；

（3）用脉冲水枪，在200~700MPa压力下，破碎煤层。

3. 物料的分选 利用水力喷枪进行物料分选包括射流清洗、树皮的剥离和钢板、压力容器及船舶等的除锈等。

液体射流可以用纯水或纯水加磨料，用于型材的切割和岩石开掘。

第二节 超高压容器的设计准则

上节所述高压技术在工业上的应用，都需使用能承受很高工作压力的容器，根据国内外压力容器设计规范的规定，其操作压力 $p \geq 100\text{MPa}$ 者，属于超高压容器。超高压容器由于其应力水平很高，故其结构型式的选择，结构材料的选用，设计使用的规范及安全可靠性的设计均与一般高压容器有所不同，而且比较复杂。

一、超高压容器筒壁的应力特征

1. 筒壁应力不均匀性严重 根据拉美公式, 厚壁圆筒在内压作用下, 其内、外壁周向应力之比为:

$$\frac{\sigma_{ti}}{\sigma_{to}} = \frac{K^2 + 1}{2}$$

从上式可以看到, 当容器的径比 $K=3$ 时, $\sigma_{ti}=5\sigma_{to}$; 当 $K=4$ 时, $\sigma_{ti}=8.5\sigma_{to}$, 而超高压容器的径比 K 一般都在 3 以上, 或者更大, 因此, 其应力分布的不均匀性更为严重。

图 0-1 表示厚壁容器各种不同径比, 筒壁上周向应力的分布情况。从图可以看到, 当 $K>4.0$ 时, 内、外壁周向应力相差接近一个 p 值; 并且, 0.6 壁厚以外的部分 (即将近一半的外层材料), 其周向应力是很小的; 当 $K\geq 10$ 时, 0.4 壁厚以外的材料, 几乎完全没有应力。

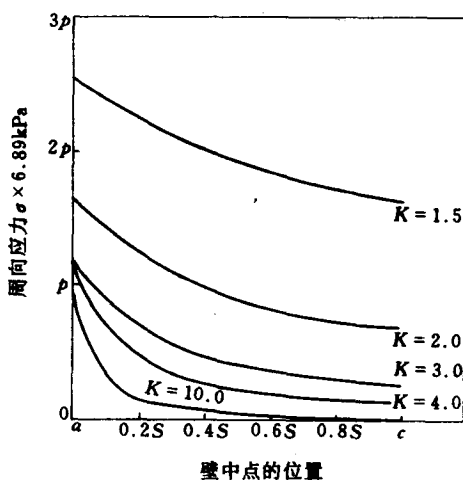


图 0-1 不同径比的筒壁周向应力分布

图 0-2 表示厚壁圆筒的径比与周向应变的关系。从图可看到, 当 K 值增加, 应变值减少得很快, 当 K 值大到 5~6, 外壁上应变已很微小, 当 $K=9\sim 10$ 时, 外壁已无应变。

2. 屈服压力有一定极限 一般的厚壁圆筒增加壁厚, 径比增加,

屈服压力可以提高。因此，高压容器通常都是通过增加壁厚来提高其强度。但是超高压厚壁圆筒则不然，其屈服压力是有一定极限的，如图 0-3 所示，当 $K \geq 6$ 时，圆筒的屈服压力曲线已呈水平状。即 K 值增加，屈服压力已不再增加，并以一定值为极限的。

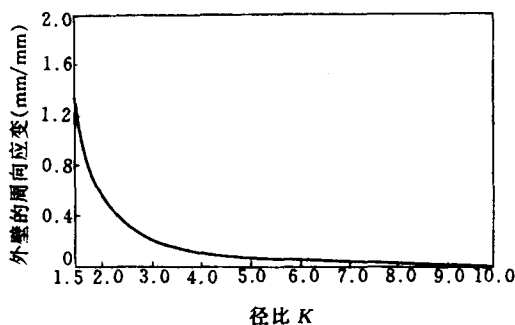


图 0-2 不同径比的筒壁周向应变

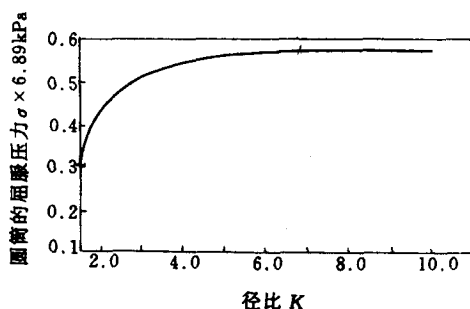


图 0-3 圆筒的屈服压力与径比的关系

二、提高超高压圆筒强度的方法

从前面的分析可知，超高压厚壁圆筒具有筒壁应力分布严重不均匀，屈服压力有一定极限的特性，也就是说，超高压容器承受很高的工作内压（按第四强度理论 $p \geq \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ ）时，此时内壁应力已达到屈服，增加壁厚对应力水平和强度没有改善，只是浪费材料。那么怎么样才

能提高超高压圆筒的强度呢？

提高压力容器的承压强度，以使操作安全可靠，一般有两种方法，一种是惯用的增加壁厚法，只能用于中、低压容器及一般高压容器，这是一种消极方法；另一种是从根本上降低工作时筒壁应力水平的办法，这是积极的方法，超高压容器得使用这种方法，其法有三：

1. 预应力法 在容器制造过程中或容器制成后，使器壁产生预应力或残余应力（前者如缩套容器、绕丝容器，后者如自增强容器），内层为压缩预应力，外层为拉伸预应力。容器操作时，工作应力与之迭加，内层的压缩预应力与操作拉应力迭加，使内壁表面的应力降低，理想的情况是降至为零或负值，外层材料两者均为拉应力，迭加后应力有所增加，但不达到屈服，使外层材料也能承受载荷，克服外层材料应力偏低的缺点，使内、外层材料均匀承担载荷，容器的承载能力便可大大提高，而筒壁应力却很低。

2. 施加外压 在容器的外面加设一个直径稍大于内筒的外罩容器，构成一个截面很小的夹套。在工作时，随着内筒的升压，夹套也注入低于内容器压力某一定值的压力介质，使内筒在受很高内压的同时，也承受一定的外压，这样，筒壁由外压产生的压应力便可抵消一部分工作内压产生的很高的拉应力，筒壁的应力水平便可降低，液压支承容器便是根据这个原理设计的。

3. 分离主应力 厚壁圆筒在受内压时、筒壁上存在周向、轴向与径向三向应力状态，绝对值以周向应力为最大，其中又以内壁处的周向应力为最大，但随着半径位置的增大而减小。径向应力也是内壁表面处最大，随着半径位置增大而减小，在外壁表面处为零。能量强度理论认为，筒壁上的当量应力为此三个主应力的综合，而在内壁表面有最大值。为了使超高压圆筒在工作时应力水平降低，则首先要降低内壁表面的应力水平，可以利用筒壁上受内压产生应力的特点，进行应力分离与调整。例如将筒体做成扇形剖分式、将筒体内壁表面的最大周向应力移到外壁表面，其绝对值大为减少；利用框架支承端盖，全部轴向拉力由框架承受，筒体上不存在轴向应力；再在圆筒外面设压力夹套，引入高压液体（液体支承），利用压应力消除部分拉应力。

径向应力也大大降低。这样筒壁上的三个主应力便被分离、分开承受，内壁表面也不存在最大应力，筒壁上的应力水平大大降低，具体结构型式将在第一章论述。

三、超高压容器材料选用准则

超高压容器由于操作压力很高、筒体应力水平极高，其结构材料必须具有超高强度，这种考虑是无可厚非的。但是如果单从强度考虑，认为压力愈高，选用愈高强度的材料，甚至认为强度愈高愈好，因此选用抗拉强度 1GPa 以上的材料，或者通过热处理调质，把屈服极限、抗拉强度提得很高，那便错了，而且是很危险的。由于超高强度的材料，其塑性、韧性都较差，而且随着强度的提高，塑性和韧性还会降低，便会导致脆断的危险。国内外都有这样的教训，单从强度考虑，选用抗拉强度 1GPa 以上的材料，由于忽视塑性与韧性，超高压容器在进行水压试验时，由于水温不够高，或存在探伤发现不了的微缺陷，产生应力集中而断裂失效。因此，选用超高压容器材料时，不能片面要求高强度，要同时重视塑性、韧性。提高强度也要有个极限，使屈服比在 0.8~0.9 的范围内，有时甚至要降低强度的要求，来满足塑性、韧性的要求，或者选用屈服强度较低一些的材料，通过自增强处理来提高其屈服极限，使有足够的韧性储备，以便于吸收局部的峰值应力和抵抗冲击载荷。

四、失效准则及设计规范

进行超高压容器的设计计算以决定筒壁厚度时，需要根据容器的失效准则来作决定，超高压容器应该根据哪一个失效准则来计算呢？试用高压容器的三个失效准则，结合超高压容器筒壁应力的特性进行分析比较。

若以弹性失效准则来设计超高压容器，即根据内壁应力不使器壁屈服来决定壁厚，则由于超高压容器筒壁应力严重不均匀，倘以内壁应力控制，就不能发挥外层材料应起的作用。而且随着工作压力的提高，当 $p = \frac{[\sigma]}{\sqrt{3}}$ 时，根据第四强度理论，则径比 K 变为无限大，这是不合理的；若 $p \geq \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ ，则内壁不可避免出现屈服，这是弹性失效准则