

049009

TK 225
4039

锅炉受压元件强度分析与设计

李之光 王铎庆 编著

机械工业出版社

锅炉受压元件强度分析与设计

李之光 王铎庆 编著

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ • 印张 11 • 字数 265 千字

1985 年 12 月北京第一版 • 1985 年 12 月北京第一次印刷

印数 00,001—13,760 • 定价 2.35 元

*

统一书号: 15033 • 6295

前 言

《锅炉受压元件强度分析与设计》是锅炉专业的一门主要专业课。本课程应在掌握了材料力学并具备一定的锅炉本体结构及热工学知识之后学习。

本书共十章，包括三方面内容：（1）锅炉受压元件受力及强度计算特点；（2）锅炉受压元件应力分析及强度计算；（3）与锅炉受压元件强度分析密切有关的问题，如受压元件试验、断裂力学、有限单元法基本原理等。

本书作为高等工科院校锅炉专业的教材，也可作为锅炉安全监察技术人员的理论培训教材，亦可供从事锅炉设计、制造、安装、运行、科研工作的技术人员提高专业理论水平之用。

本书由哈尔滨工业大学李之光教授及王铎庆同志编著。

本书由机械工业部教材编审委员会委员、上海机械学院副教授卓宁同志审阅。

在编写过程中，得到了哈尔滨工业大学高广安副教授、刘曼青副教授以及刘建平同志的协助。对诸同志的辛勤劳动与热情帮助深表谢意。

由于写作者水平有限，书中会存在不少缺点与错误，恳请读者批评指正。

符 号 说 明

A	拉撑件所支撑的面积, cm^2	$[P]$	最高允许工作压力 (表压), MPa
a	椭圆孔的长轴, mm	p_{sw}	水压试验最高允许压力 (表压), MPa
B	有效加强宽度, mm	Q	剪力, N
b	椭圆孔的短轴、加强板的宽度, mm	q	热负荷, W/m^2 ; 单位长度载荷, N/cm
C	附加壁厚, mm	$q_{\max}$	最大热负荷, W/m^2
c	裂纹长度的一半, mm	R_n	内半径、内曲率半径, mm
D	抗弯刚度, $\text{N}\cdot\text{mm}$	R_r	中半径 (沿壁厚平均半径), mm
D_n	内直径, mm	r	半径、板边内半径, mm
D_w	外直径, mm	r_n	内半径, mm
D_p	中径 (沿壁厚平均直径), mm	r_w	外半径, mm
d	孔的直径、起加强作用管接头的内直径、板边孔或加强圈的内直径、拉杆直径, mm	S	应力强度 (当量应力), MPa
d_d	孔的当量直径, mm	S	壁厚、取用壁厚 (图纸上的壁厚)、实际测量壁厚, mm; 静矩, cm^3
d_r	中径 (沿壁厚平均直径)、相邻两孔的平均直径, mm	$S_{\min}$	最小需要壁厚, mm
$[d]$	未加强孔的最大允许直径, mm	S_l	理论计算壁厚, mm
E	弹性模量, MPa	$S_y = S - C$	有效壁厚, mm
e	焊脚尺寸, mm	t_0	不考虑孔间影响的最小节距, mm
F	截面积、加强面积, mm^2	t	纵向相邻两孔的节距、节距, mm
f	拉撑件截面积, cm^2	t'	横向相邻两孔的节距, mm
$f_{\min}$	拉撑件最小需要截面积, cm^2	t''	斜向相邻两孔的节距, mm
G	重力, N	t_j	介质额定温度, $^{\circ}\text{C}$
h_n	内高度, mm	t_b	介质饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
h_p	沿壁厚平均高度, mm	t_{bi}	计算壁温, $^{\circ}\text{C}$
I	惯性矩, cm^4	t_n	内壁温度, $^{\circ}\text{C}$
J	介质均流系数	t_w	外壁温度, $^{\circ}\text{C}$
K	系数	Δt	温差、温度偏差, $^{\circ}\text{C}$
k	应力集中系数、系数	W	抗弯断面系数, cm^3
L	呼吸空位、长度, mm	X	介质混合程度系数
l	长度, mm	Y	封头形状系数
L_b	焊缝长度, mm	α	线膨胀系数, $\text{mm}/\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C}$
M	弯矩, $\text{N}\cdot\text{cm}$	α_2	壁面对介质的放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$
M_s	扭矩, $\text{N}\cdot\text{cm}$	β	外径与内径的比值
n_b	对应于抗拉强度的安全系数	Δ	焊缝高度, mm
n_s	对应于屈服限的安全系数	ε	应变, %
n_D	对应于持久强度的安全系数	ε_s	理想弹性材料对应于屈服限的弹性应变, %
P	力, N	η	基本许用应力的修正系数、相对椭圆度
p	压力、计算压力 (表压), MPa	λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
		μ	波松比

- ρ_1 回转壳第一曲率半径, mm
 ρ_2 回转壳第二曲率半径, mm
 σ 应力, MPa
 σ_b 材料在 20°C 的抗拉强度, MPa
 σ_s 材料在 20°C 的屈服限或条件屈服限(残余应变为 0.2%), MPa
 σ'_b 材料在计算壁温时的抗拉强度, MPa
 σ'_s 材料在计算壁温时的屈服限或条件屈服限, MPa
 σ'_D 材料在计算壁温时的持久强度, MPa
 σ'_c 材料在计算壁温时的蠕变限, MPa
 σ'_{sc} 材料在某温度时的松弛特性, MPa
 σ_θ 环向应力(切向应力)、纬向应力, MPa
 σ_z 纵向应力(轴向应力), MPa
 σ_r 径向应力, MPa
 σ_m 经向应力, MPa
 σ_d 当量应力, MPa
 $[\sigma]$ 许用应力, MPa
 $[\sigma]_b$ 基本许用应力, MPa
 $[\sigma_a]$ 允许应力幅度, MPa
 σ_t 热应力, MPa
 τ 切应力, MPa; 时间, s、h
 φ_h 焊缝减弱系数
 φ 纵向孔桥减弱系数、封头减弱系数、孔桥减弱系数
 φ' 横向孔桥减弱系数
 φ'' 斜向孔桥减弱系数
 φ_d 斜向孔桥当量减弱系数
 $\varphi_{\min}$ 最小减弱系数
 $[\varphi]$ 允许最小减弱系数
 φ_{sw} 水压试验时最小减弱系数
 φ_s 实际减弱系数

目 录

前言	
符号说明	
第一章 锅炉元件受力形式与应力	
控制原则	1
§ 1-1 锅炉强度的重要性及与锅炉强度有关的最优化问题	1
§ 1-2 锅炉钢材的强度特性	4
§ 1-3 锅炉元件的低周疲劳	7
§ 1-4 锅炉元件的应力松弛	11
§ 1-5 锅炉元件的热应力	12
§ 1-6 锅炉元件的残余应力	16
§ 1-7 锅炉元件中应力的分类与控制原则	19
第二章 锅炉受压元件强度计算规定	24
§ 2-1 强度计算标准	24
§ 2-2 安全系数与许用应力	25
§ 2-3 计算壁温	29
§ 2-4 计算压力(设计压力)与最高允许工作压力	34
第三章 承受内压圆筒的强度	36
§ 3-1 厚壁圆筒的应力分析	36
§ 3-2 未减弱圆筒形元件的强度计算公式	40
§ 3-3 圆筒形元件上孔排及焊缝的减弱	43
§ 3-4 圆筒形元件的强度计算方法	49
§ 3-5 大孔与孔排的加强	51
§ 3-6 管子(管道)弯头和环形集箱的强度	59
§ 3-7 附加外载的校核计算	63
§ 3-8 最大水压试验压力	67
§ 3-9 对圆筒形元件的结构要求	67
第四章 承受外压圆筒的强度与稳定性	72
§ 4-1 承受外压圆筒形元件的强度与稳定性计算公式	72
§ 4-2 承受外压圆筒形元件的强度与稳定性计算方法	74
§ 4-3 加强圈	77
§ 4-4 对炉胆的结构要求	78
第五章 回转壳的强度	79
§ 5-1 回转壳的应力分析与强度计算公式	79
§ 5-2 回转壳上孔与焊缝的减弱	85
§ 5-3 回转壳的强度计算方法	86
§ 5-4 回转壳上孔的加强	87
§ 5-5 对回转壳的结构要求	89
第六章 平板的强度	91
§ 6-1 平板的应力分析	91
§ 6-2 平端盖、平堵板及人孔盖的强度计算方法及结构要求	99
§ 6-3 有拉撑件的平板的强度计算方法及结构要求	101
§ 6-4 矩形集箱的强度计算	112
§ 6-5 平板上孔的加强	115
第七章 薄壁圆筒的边界效应	117
§ 7-1 薄壁圆筒端部作用弯矩及剪力时的边界效应	117
§ 7-2 圆筒体与凸形封头连接处的应力分析	122
§ 7-3 圆筒体与平端盖连接处的应力分析	126
第八章 锅炉受压元件试验	128
§ 8-1 静载强度的验证性水压试验	128
§ 8-2 低周疲劳强度的验证性液压试验	131
§ 8-3 工艺性水压试验	133
第九章 断裂力学基础	136
§ 9-1 用线弹性断裂力学校验元件强度的方法	136
§ 9-2 用弹塑性断裂力学校验元件强度的方法	140
§ 9-3 有裂纹容器寿命的估计	141
第十章 有限单元法基本原理	144
§ 10-1 有限单元法基本概念	144
§ 10-2 单元分析	148
§ 10-3 整体分析	155
附录一 法定计量单位与工程单位的换算	164
附录二 钢材物理性能	165
附录三 矩阵知识	166
主要参考文献	170

第一章 锅炉元件受力形式与 应力控制原则

§ 1-1 锅炉强度的重要性及与锅炉强度 有关的最优化问题

一、锅炉强度的重要性

锅炉受压元件 $\ominus$ 的强度，是指该元件在载荷作用下，于设计期限内不失效的能力。

锅炉受压元件承受的载荷有以下几种：

1. 介质压力，包括正常运行条件下的稳定压力、起停过程中的压力升降以及水压试验过程中的压力。

2. 附加载荷，包括由元件自身、内部介质等的重力构成的均匀外载以及因支承、悬吊引起的局部集中外载。

3. 温度应力，包括在正常运行条件下由元件壁温差产生的稳定热应力、在变工况条件下由元件壁的变动温差引起的定期变化的热应力以及在元件的个别部位由壁温波动产生的频率较大的交变热应力。

4. 工艺应力，包括焊接残余应力、胀接残余应力等。

一般情况下，以上各种载荷与高温及腐蚀性介质同时作用于元件壁上。因此，锅炉受压元件的受载情况比一般机械零件要复杂得多。

锅炉受压元件的设计期限，对于以蠕变破坏为失效标志的元件，已由过去的 10 万小时向 20 万小时过渡；对于以低周疲劳破坏为失效标志的元件，一般按 30 年考虑。

锅炉受压元件可能的失效形式主要有以下几种：

1. 因机械应力或热应力大幅度变动引起的低周（塑性）疲劳破坏。发生在几何形状突变、填角焊缝、缺陷等应力集中部位或热负荷过高并积存水垢导致壁温差过大部位。

2. 因交变热应力引起的高周（弹性）疲劳破坏。发生在受热面的汽水分界面、减温器喷水雾化区段等热应力变化频率较大的部位。

3. 因超压引起的塑性破坏。发生在安全阀及燃烧自动控制设备同时失灵等情况下。

4. 因超温引起的塑性破坏（时间较短）或蠕变破坏（时间较长）。发生在受热面冷却条件遭受破坏情况下。

5. 因苛性脆化等原因引起的脆性破坏。

6. 因外压力过大导致结构失稳。如炉胆塌陷等。

7. 因弹性变形过大或应力松弛导致介质向外泄漏。发生在法兰联接、胀接等部位。

8. 因腐蚀过大导致介质向外泄漏。

上述任何一种形式失效都将造成经济损失并危害人身安全。如果导致爆管或爆炸，除设备毁坏、人身伤亡以外，还将因停电、停止供热、停产而造成重大经济损失。特别是，高参

$\ominus$ 指承受介质压力作用的元件。

数大容量锅炉受压元件失效所造成的损失更大。

锅筒内储存大量具有一定压力的饱和水及饱和汽，因其破裂而引起爆炸将是一种灾难性事故。历史上锅筒爆炸事故屡见不鲜，现在虽已明显减少，但尚不能杜绝。据记载，从一八七〇年至一九一〇年的四十年间，美国、加拿大、墨西哥区域，有记录的锅炉爆炸约一万起。一九〇五年，美国某鞋厂一台火管锅炉爆炸造成 58 人死亡和 117 人受伤的重大事故。历史上还发生过船舶锅炉爆炸使船上千余人丧生的惨重事件。一九六三年，苏联一台压力为 0.8MPa 的立式舒霍夫式火管锅炉，受热面积仅 35m²，因下脚圈开裂而爆炸，锅炉腾空而起，飞出三百余米。一九五五年，我国某纺织厂 2.2MPa、10 t/h 的蒸汽锅炉下锅筒爆炸，使锅炉飞至七十五米以外的另一厂房内，这是近三十年来我国最大的一次锅炉爆炸事故。

对不同压力下的饱和水及饱和汽，按工程热力学绝热膨胀过程算得的最大可能爆炸能量，如图 1-1 所示。可见，爆炸能量随压力升高而增大。单位容积饱和水的爆炸能量比饱和汽为大，随压力升高，两者差别先增加而后减小。对于水容积和汽容积各为 10m³ 的锅筒，当压力为 0.9MPa 时，爆炸能量达三亿焦耳；而当压力为 11 MPa 时，达二十亿焦耳，可见，爆炸能量是相当大的。

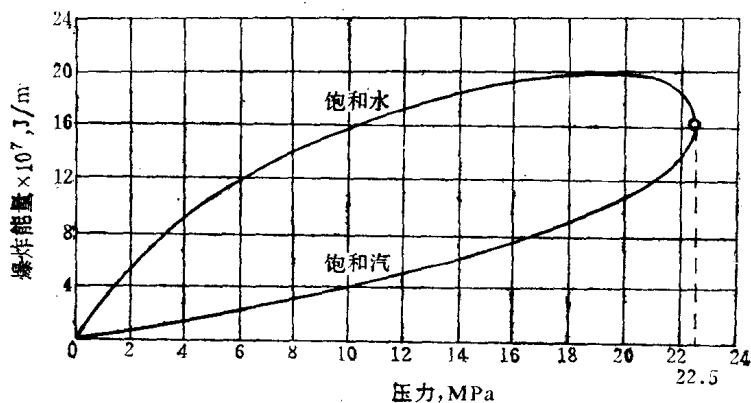


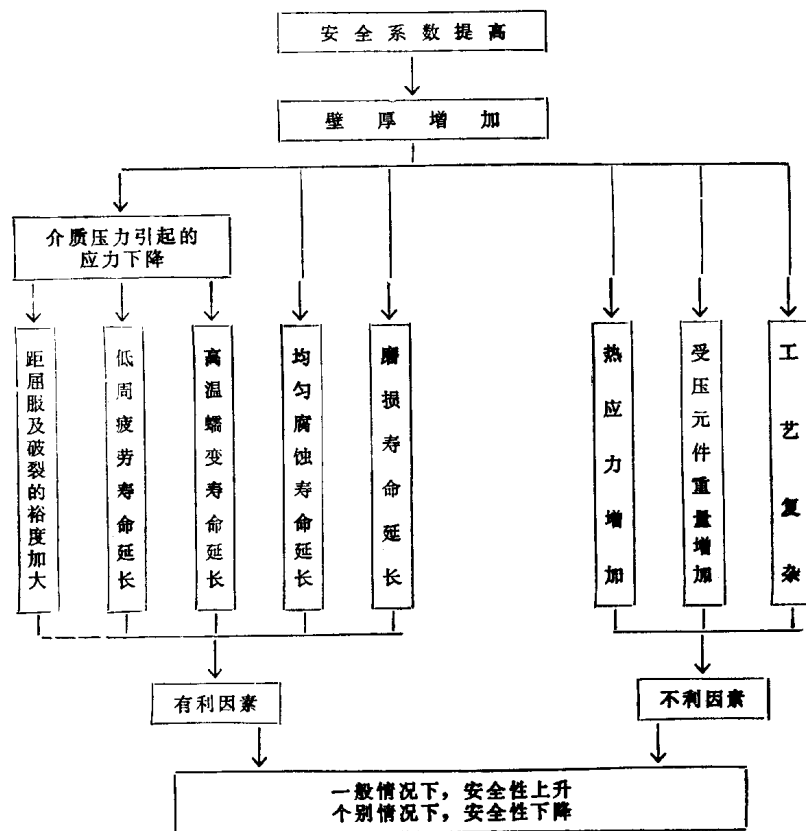
图1-1 不同压力下，1 m³ 饱和水或饱和汽的爆炸能量

为防止锅炉受压元件因失效所引起的严重后果，必须合理地选取材料，准确、合理地进行强度分析和元件结构设计，确保制造安装检修工艺质量合格以及运行方式合理。以上任何一种要求未予很好保证，都有可能引起元件失效。但也应指出，在确实保证了上述各项要求后，就可以有把握地达到安全可靠。各国大量高参数电站锅炉没有一个锅筒在运行中爆炸过，而参数较低的小型锅炉却屡次发生爆炸，这充分说明：严格执行各项规程（设计、材料、制造、安装、检查、运行等规程），就可能作到确保安全可靠，反之，如不执行或不严格执行各项规程，就可能出现因受压元件失效所引起的严重事故。

二、与强度有关的最优化问题

大多数情况下，对于由相同材料制造，且在同样条件下工作的受压元件，随着壁厚的增大（增加安全系数），失效的可能性就下降。即一般来讲，壁愈厚，愈趋于安全。但锅炉是耗钢量相当大的设备，壁厚即使增加有限，则多消耗的钢材数量也十分可观。一台配五万千瓦机组的电站锅炉，它的受压元件钢材重量达三百余吨，锅炉本体总重量达八百余吨。电站锅炉向高参数发展，对受压元件钢材质量提出更高要求，而且还要应用低合金钢和高合金钢。在我国，电站锅炉受压元件所用低合金钢的价格约为碳钢的二倍，而高合金钢约为碳钢的二十倍。小容量工业锅炉每台耗钢量有限，但随着工业的发展，工业锅炉用量越来越大。其年总蒸发量不小于电站锅炉，而工业锅炉单位蒸发量的钢耗与电站锅炉比较大致相同，故工业锅炉每年总钢耗也十分可观。因此，锅炉受压元件壁厚的选取，既应考虑安全性，也要照顾经济性（钢耗）。这里就存在个最优化问题。

实际上，与锅炉受压元件壁厚（安全系数）的选取相关联的问题是很复杂的，它涉及多方面因素。在材料及工作条件相同情况下，取用壁厚的大小将带来各种不同的后果。例如，取用壁厚偏大时，元件壁由于介质压力产生的应力下降，将使距屈服及破裂的裕度加大，使低周疲劳寿命、高温蠕变寿命延长；另外，壁厚偏大，抵抗均匀腐蚀及抵抗磨损的寿命也延长，这些都是有利于安全性的因素。但另一方面，壁厚加大将使热应力增加，使受压元件重量增加，使工艺复杂，这些都可能成为不利于安全性的因素。此外，壁厚增加还使工艺量增加，使运输、安装增加困难；受压元件重量增加，可能导致构架钢耗加大。壁厚增大对安全性的影响，示意如下：



由以上分析可见，元件并非在所有情况下都是壁愈厚愈安全。对于壁厚较大且热负荷很高的部位，尽管壁厚增加使介质压力产生的膜应力下降，但壁温差引起的热应力会明显上升，此时，就需要进行最优壁厚值核算。

锅炉容量增大，受热面管径及介质流速不会有较大变化。因此，在锅炉其它参数相同的情况下，受热面管子总长度、集箱数目、集箱上开孔数目、焊接接头总数目等都基本上与锅炉容量成正比例关系。如果制造、安装工艺水平及检验手段不变，则由于缺陷造成破坏事故的次数也大致与锅炉容量成正比例关系。由此，一定时期内，锅炉事故的损失就与锅炉容量增长倍数的平方约成正比例关系。例如，假设一台五万千瓦锅炉机组一年坏一个焊接接头，停炉检修一小时，则每年损失五万度电；而一台五十万千瓦锅炉机组一年就约损坏十个焊接接头，若每坏一个焊接接头停炉检修一次也需一小时，则每年就要损失五百万度电。由此，可看出大容量机组安全可靠性的重。大容量机组安全性应从多方面解决，安全系数适

当加大是其中措施之一。有的国家锅炉受压元件强度标准规定三十万千瓦及更大容量锅炉受热面管及锅炉范围内的汽、水连接管的许用应力降低 10%；我国水管锅炉受压元件强度标准规定对于压力大于或等于 14MPa 的锅筒，许用应力降低 10%。对于大容量、高参数锅炉机组，尽管壁厚加大会使钢耗明显增多，但由于上述事故停炉损失巨大，经最优化分析后，则壁厚加大，一般来说还是合适的。

利用管接头加厚的办法可提高锅筒的孔桥减弱系数，从而降低锅筒壁厚。这对于管孔数目不多的锅筒（如近代大容量锅炉的锅筒），无疑是有利的。但当锅筒上管孔数目很多时，就不宜于采用这种办法。对于不同材料、不同结构、不同压力的锅筒，管孔数目为多少时，采用管接头加强办法才最有利？这只有进行最优化评价之后才能确定。

对于蠕变破坏失效的高温元件，设计寿命将随壁厚增加而延长。目前，总的趋势是用加大壁厚办法使寿命由十万小时延长至二十万小时或更长。高温元件一般皆用合金钢材制造，更换这些元件的经济投资十分可观。至于壁厚加大到什么程度或设计寿命延长到多大最为有利，亦需进行必要的最优化评价。

和其他工程设计一样，锅炉强度设计中的最优化评价问题很多，目前，这方面工作还很粗略，有待今后做更深入的研究与分析。

§ 1-2 锅炉钢材的强度特性

一、短时强度特性

图 1-2 为一般塑性材料拉伸试件的应力-应变曲线。在初始阶段都有直线段——弹性阶段，试件只产生弹性变形，如卸载，试件将恢复到原始形状。超过此阶段后，曲线发生转折，此时如卸载，将发现试件已产生残余塑性变形。

图 1-2 a 中，相应于屈服台阶的应力称为“屈服限”，用 σ_s 表示，图 1-2 b 中的曲线没有屈服台阶，相应于产生 0.2% 塑性应变的应力称为“条件屈服限”，一般用 $\sigma_{0.2}$ 表示，有时也用 σ_s 表示。对应于应力-应变曲线最高点的应力称为“抗拉强度”，用 σ_b 表示。

随着温度升高，上述应力-应变曲线的形状有较大变化，如图 1-3 所示。在较高温度下，屈服台阶消失，只能求条件屈服限了。

温度对锅炉常用的 20 号碳钢及 12Cr1MoV 低合金钢条件屈服限及抗拉强度的影响如图

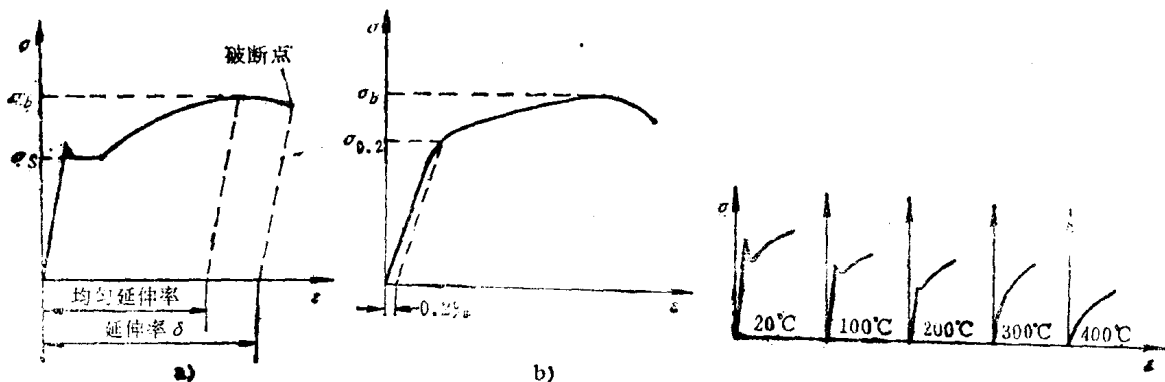


图 1-2 塑性材料拉伸试件的应力-应变曲线

a) 有明显屈服台阶 b) 无屈服台阶

图 1-3 温度对低碳钢应力-应变曲线的影响

1-4 所示。

高温下拉伸试验的结果取决于加载速度的大小。加载速度对屈服限的影响尤为显著。在 400~500℃ 温度条件下, 碳钢试件 (10mm 直径的 5 倍长度试件) 的加载速度由每分钟 2mm 降至每分钟 0.2mm, 屈服限约下降 15~20MPa, 即加载时间延长, 屈服限降低。可见, “时间” 因素对高温强度的作用是显著的。当温度超过一定值时, 高温短时拉伸试验所得的强度特性已不能完全表征高温长期工作元件的强度特点。高温强度除靠短时拉伸试验外, 还必须靠长期拉伸试验——蠕变试验及持久强度试验来确定。

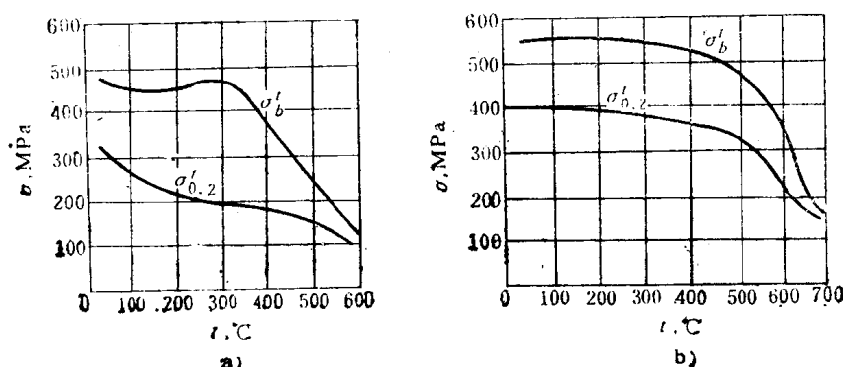


图1-4 温度对屈服限及抗拉强度的影响

a) 20号碳钢 b) 12Cr1MoV低合金钢

二、长期强度特性

1. 蠕变限

材料在高温及恒定的应力作用下, 随着时间的延长, 塑性变形不断增加的现象称为“蠕变”。

图 1-5 给出试件在某温度下对应三个不同应力的应变-时间曲线, 这些曲线称为“蠕变曲线”。

应力 σ_3 较大, 致使试件在试验期限 (数千至万余小时) 以内破断; 应力 σ_2 小于 σ_3 , 在试验期限以内, 试件未破断, 但产生一定蠕变变形, 恒定蠕变速度区 (直线区段) 的蠕变速度为 v_c (直线的斜率); 应力 σ_1 又小于 σ_2 , 在试验期限以内, 试件非旦未破断, 而且 $v_c = 0$ 。

若取高温元件中的应力为 σ_1 , 则工作中蠕变现象经短时即行消失。但在高温下不引起蠕变现象的应力很小, 如采用这样的应力进行设计, 非旦浪费钢材, 而且由于壁厚大将产生较大热应力, 有时并不安全。

高温元件在整个工作期限内, 积累一定的蠕变变形是可以的。确定锅炉元件高温强度特性时, 许多国家都规定允许总应变 $[\varepsilon] = 1\%$ 。

基于以上情况, 将某温度下在指定工作期限内引起允许总应变的应力称为“蠕变限”, 用 σ'_t 表示, 并以它为基础对高温元件进行强度计算。

锅炉高温元件的工作期限, 目前不少国家都取为 10 万小时。试验时间一般取为工作期

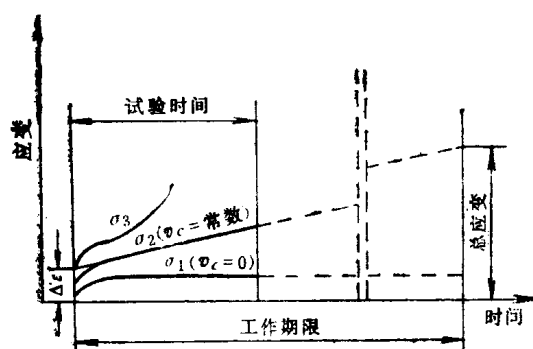


图1-5 蠕变曲线

$\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$

限的十分之一，将直线段延伸至 10 万小时所得总应变一般认为是可行的。

当忽略初始应变 $\Delta\varepsilon$ 时（见图 1-5），对应于蠕变限的蠕变速度为

$$v_c = \frac{[\varepsilon]}{\tau}$$

式中 $[\varepsilon]$ ——允许总应变；

τ ——指定工作期限。

对于锅炉元件，此蠕变速度值为

$$v_c = \frac{1\%}{10^5 \text{ h}} = 10^{-5}\%/\text{h}$$

因此，也将某温度下引起蠕变速度为 $10^{-5}\%/\text{h}$ 的应力称为“蠕变限”，有时也用 $\sigma'_{10^{-5}}$ 来表示。

根据大量试验结果，可认为在一定温度下应力与恒定蠕变速度之间存在如下关系：

$$v_c = a\sigma^b$$

式中 a 、 b ——与钢种及温度有关的常数。

如以 $\lg \sigma - \lg v_c$ 为坐标，则得直线关系，如图 1-6 所示。这样，根据一些应力较大的试验数据，靠延伸法即可求出较小蠕变速度 $v_c = 10^{-5}\%/\text{h}$ 所对应的蠕变限。应注意，有时在此关系线上会出现拐点，使折线向下方转折，因此，若试验时间太短，或过于延长直线，可能得到偏于不安全的推测结果。

不同钢材在不同温度条件下，至蠕变破坏所累积的塑性应变值相差很大，笼统地规定一个允许总应变 $[\varepsilon]$ 值为 1%，具有很大的近似性。

近年来，蠕变限在一些国家的锅炉受压元件强度计算标准中已不再应用，而被另一个能较好地反映锅炉受压元件失效特点的强度特性——“持久强度”所代替。苏联一九五六年及以后的锅炉强度标准不再应用蠕变限；西德标准仅在保证更高可靠性的条件下，才用蠕变限与持久强度两者一起考虑高温强度；但美国标准至今仍沿用蠕变限来考虑高温强度。我国锅炉强度标准不用蠕变限。

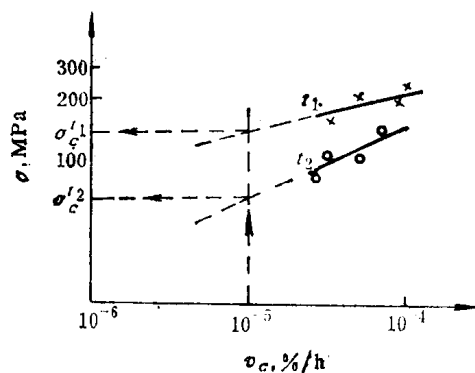


图1-6 $\lg \sigma - \lg v_c$ 关系

2. 持久强度

钢材的持久强度是在一定温度下经历指定工作期限后，不引起蠕变破坏的最大应力，用 σ'_t 表示。它所反映的是破坏，而蠕变限所反映的是变形。对于锅炉元件，并不需要精密的几何配合，元件失效的形式主要是破坏而不是变形，所以用持久强度作为锅炉高温元件的强度特性较为合理。

在高温蠕变条件下，应力愈大，蠕变进行得愈快，破坏得愈早。试验表明，在一定温度条件下，应力与蠕变破坏时间存在如下关系：

$$\tau = B\sigma^{-m}$$

式中 B 、 m ——与钢种及温度有关的常数。

如以 $\lg \sigma - \lg \tau$ 为坐标，则得直线关系，如图 1-7 所示。试验时，各试件应力取得较大，可在较短时间破断，再将直线延伸，即可求得指定工作期限的蠕变破坏应力——持久强度。

一般锅炉受压元件的设计寿命为十万小时，故有时也用 $\sigma_{t,10^5}$ 表示持久强度。

一九五二年，拉森 (F. R. Larson) 及米勒 (J. Miller) 提出一种确定高温强度特性的参数法，受到各国广泛重视，一直应用至今。根据大量试验数据及分析，可知对某应力而言，绝对温度 T 与蠕变破坏时间 τ 存在如下关系：

$$T(C + \lg \tau) = \text{常数}$$

式中 C ——与钢种有关的常数。不同珠光体钢的 C 值在 18~22 之间，一般取 $C = 20$ 。

$T(C + \lg \tau)$ 称为“拉森-米勒参数”，可按下述方法得出便于应用的高温强度特性参数图：

在较高试验温度（比工作温度高 50~100℃）条件下，选取一系列应力值进行持久强度试验。应力的选取，应使试件在较短时间内就能破断。由试验温度 T 及破坏时间 τ 得一系列 $T(C + \lg \tau)$ 参数值。 $\sigma - T(C + \lg \tau)$ 坐标内的试验曲线如图 1-8 下部所示。按不同参数值推算出相应于 $\tau = 10^5$ 、 10^4 等小时所对应的温度 t ，并绘在图 1-8 上部。这样，就得到高温强度特性参数图。按图中虚线所示方法，可得到不同温度下的持久强度特性。

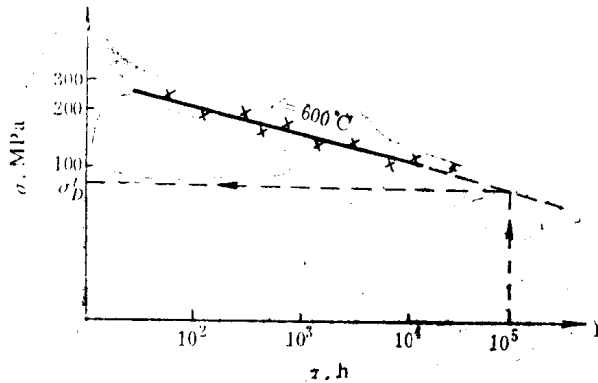


图1-7 $\lg \sigma - \lg \tau$ 关系

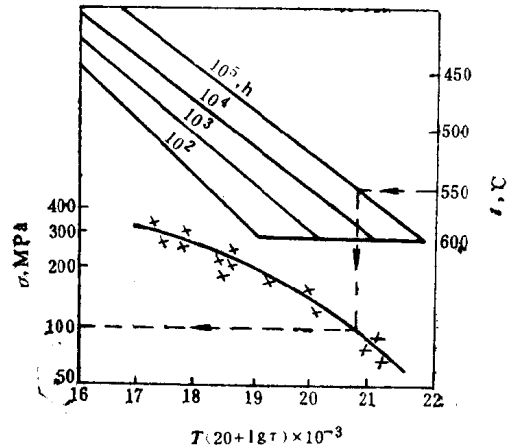


图1-8 高温强度特性参数图

利用拉森-米勒参数可很容易地推算出超温后高温元件寿命的降低程度。如取 $C = 20$ ，温度由 510℃ 升至 520℃，则

$$\begin{aligned} T_1(C + \lg \tau_1) &= T_2(C + \lg \tau_2) \\ 783(20 + \lg \tau_1) &= 793(20 + \lg \tau_2) \end{aligned}$$

得

$$\tau_2 = \frac{\tau_1}{1.8}$$

即温度升高 10℃，工作寿命几乎下降一半。表明高温元件对超温应予以严格控制。

§ 1-3 锅炉元件的低周疲劳

锅炉受压元件在其寿命期限内，必定要有多次启动、停炉和水压试验的升压、卸压过程。此时，受压元件的工作应力将随之重复起伏。因此，锅炉受压元件不但应能承受稳定压力的作用，而且还要能抵抗多次压力循环的作用。锅炉受压元件应力集中最剧烈处已处于塑性状

态, 应力明显超过屈服限。可以认为在稳定压力作用下, 元件上存在一定的应力集中并使局部处于塑性状态, 对强度是无害的。但是, 在交变压力作用下, 即使对于用塑性很好的材料制造的元件, 应力集中最剧烈处也有可能产生疲劳裂纹, 及随之而来的裂纹扩展, 终致酿成元件的泄漏或破裂。虽然应力集中之处只占元件上极小部位, 但它却影响着整个元件的强度。

锅炉受压元件在整个寿命期限内, 应力循环次数不很多, 少则数百次, 最多也不过一万余次左右, 故上述疲劳破坏属于“低周疲劳”范畴。防范低周疲劳的强度计算方法尚在发展之中。目前, 实用计算方法有两种: 粗估法 (低周疲劳设计曲线法) 及分析法 (裂纹生长过程分析法)。对于极重要元件的低周疲劳强度问题, 应采用分析法以求得精确结果。但分析法所需原始资料较多, 如这些资料不够确切, 则所得结果亦不可靠。对于一般受压元件, 目前都采用粗估法。

粗估法的基本依据是由试验确定的钢材低周疲劳曲线。美国机械工程师学会 (ASME) 于一九六三年首次提供这种曲线^[15], 如图 1-9 所示, 至今已为许多国家采用。

图 1-9 中纵坐标表示按最大剪应力强度理论所得当量应力的允许应力幅度, 横坐标为应力循环周数。

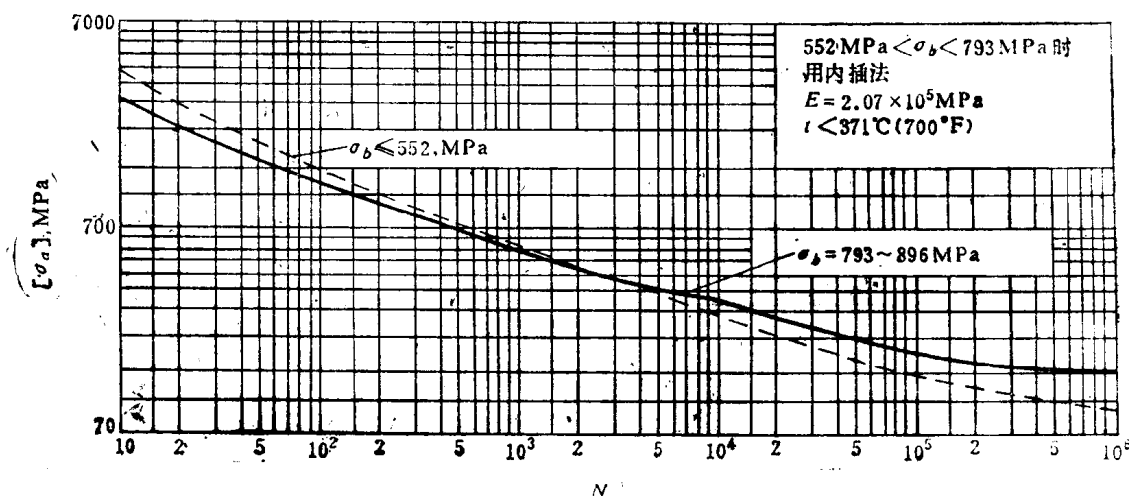


图1-9 低周疲劳设计曲线

承受内压作用的圆筒形元件应力集中最剧烈处如图 1-10 中 A 点所示。该点的应力幅度为 $k\sigma_d/2$, 它不应大于按图 1-9 根据应力循环周数 N 所得出的允许应力幅度。考虑弹性模量修正后, 应满足如下强度条件:

$$\frac{k\sigma_d}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{E'} \leq [\sigma_a] \quad (1-1)$$

式中 k ——应力集中系数, 图 1-10 中 A 点处一般为 3.0, 精心设计后, 可降至 2.5;

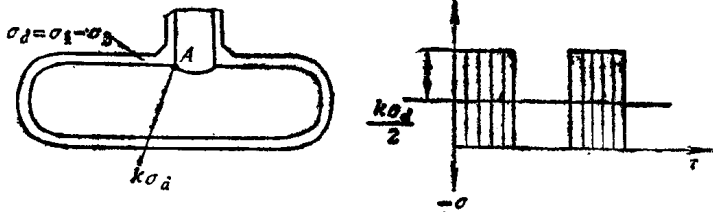


图1-10 筒形容器最大应力点的应力变化

σ_d ——应力集中区域以外按最大剪应力理论所得当量应力, MPa;

E' ——壁温为 t °C 时的弹性模量, MPa (见附录二);

$[\sigma_a]$ ——允许应力幅度, MPa (见图 1-9)。

应力超过屈服限的低周疲劳试验, 如用应力整理数据, 分散度很大, 无法得出明显关系曲线。图 1-9 所示曲线是根据试件应变值, 其中也包括塑性应变, 人为地仍按虎克定律关系换算出的应力得出的, 此应力称为“虚拟应力”, 如图 1-11 所示, 即

$$\sigma_{xu} = E\varepsilon$$

式中 σ_{xu} ——虚拟应力;

E ——弹性模量;

ε ——应变, 其中也包括塑性应变。

图 1-9 所示的低周疲劳曲线已经考虑了足够的安全裕度: 如以应力幅度 σ_a 为准, $n_{sa} = 2$; 如以周数为准, $n_N = 20$ 。 $n_N = 20$ 是这样考虑的: 数据分散取 2.0, 尺寸效应取 2.5, 表面粗糙度、环境影响等取 4.0。

对于 $552\text{MPa} < \sigma_b < 793\text{MPa}$ 情况, 可用内插法确定 $[\sigma_a]$ 。

图 1-9 所示低周疲劳曲线表明, 低周疲劳强度与钢种关系不大。抗拉强度较高时, 工作应力一般也取得较高, 则低周疲劳寿命反而较短。

有时会遇到在整个工作期限内, 应力幅度有较大变化的情况, 此时, 可按累积损伤原则考虑低周疲劳强度, 即应满足

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots \leq 1$$

式中 n_1 、 N_1 ——在应力幅度 σ_{a1} 下的实际工作周数及允许工作周数, 见图 1-12;

n_2 、 N_2 ——在应力幅度 σ_{a2} 下的实际工作周数及允许工作周数。

n_1/N_1 表示在 σ_{a1} 作用下的损伤百分数, 余此类推, 总的损伤百分数不能超过 100%。

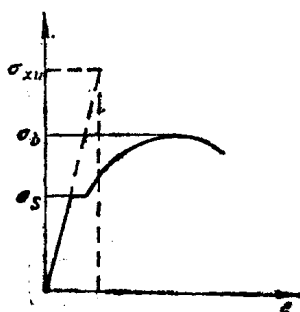


图1-11 虚拟应力

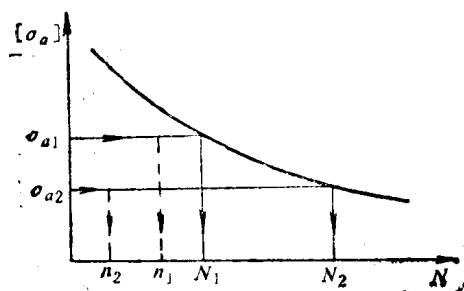


图1-12 累积损伤

〔例题 1-1〕 用低碳钢板 20_g 及低碳低锰钢板 16Mn_g 制造工业锅炉锅筒 (介质表压为 0.8MPa), 合金钢板 14MnMoV_g 制造电站锅炉锅筒 (介质表压为 10.9MPa)。试对比它们的低周疲劳强度。

解:

由水蒸汽表知, 介质饱和温度 t_b 为:

介质绝对压力 0.9MPa 时 $t_b = 175^\circ\text{C}$

介质绝对压力 11MPa 时 $t_b = 317^\circ\text{C}$

由表 2-5 知, 不受热 (在烟道外) 锅筒的计算壁温 $t_{bi} = t_b$ 。

由表 2-1 知, 不受热焊接管孔锅筒的基本许用应力系数 $\eta = 1.0$ 。

由表 2-2, 根据计算壁温 t_{bi} 得基本许用应力:

$$20_g \quad t_{bi} = t_b = 175^\circ\text{C} \quad [\sigma]_r = 136 \text{ MPa}$$

$$16\text{Mn}_g \quad t_{bi} = t_b = 175^\circ\text{C} \quad [\sigma]_r = 172 \text{ MPa}$$

$$14\text{MnMoV}_g \quad t_{bi} = t_b = 317^\circ\text{C} \quad [\sigma]_r = 215 \text{ MPa}$$

按式 (2-1), 得许用应力:

$$20_g \quad [\sigma] = \eta [\sigma]_r = 1.0 \times 136 = 136 \text{ MPa}$$

$$16\text{Mn}_g \quad [\sigma] = \eta [\sigma]_r = 1.0 \times 172 = 172 \text{ MPa}$$

$$14\text{MnMoV}_g \quad [\sigma] = \eta [\sigma]_r = 1.0 \times 215 = 215 \text{ MPa}$$

由附录二, 得计算壁温条件下的弹性模量:

$$20_g \quad t_{bi} = 175^\circ\text{C} \quad E' = 1.78 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$16\text{Mn}_g \quad t_{bi} = 175^\circ\text{C} \quad E' = 1.92 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$14\text{MnMoV}_g \quad t_{bi} = 317^\circ\text{C} \quad E' = 1.89 \times 10^5 \text{ MPa}$$

设锅筒上大孔边缘的最大应力集中系数 $k = 3.0$, 并设锅筒壁的当量应力 $\sigma_d = [\sigma]$, 由式 (1-1) 得经过温度修正后的最大应力幅度:

$$20_g \quad \frac{k\sigma_d}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{E'} = \frac{3.0 \times 136}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{1.78 \times 10^5} = 237 \text{ MPa}$$

$$16\text{Mn}_g \quad \frac{k\sigma_d}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{E'} = \frac{3.0 \times 172}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{1.92 \times 10^5} = 278 \text{ MPa}$$

$$14\text{MnMoV}_g \quad \frac{k\sigma_d}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{E'} = \frac{3.0 \times 215}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{1.89 \times 10^5} = 353 \text{ MPa}$$

按图 1-9 的低周疲劳设计曲线, 以上述最大应力幅度值为纵坐标, 得允许的应力循环周数 $[N]$:

$$20_g \quad \sigma_b = 402 \text{ MPa} \quad [N] = 1.2 \times 10^4 \text{ (按图 1-9 中虚线)}$$

$$16\text{Mn}_g \quad \sigma_b = 470 \text{ MPa} \quad [N] = 0.8 \times 10^4 \text{ (按图 1-9 中虚线)}$$

$$14\text{MnMoV}_g \quad \sigma_b = 637 \text{ MPa} \quad [N] = 0.5 \times 10^4 \text{ (按图 1-9 中虚线与实线 并内插)}$$

从上可见, 16Mn_g 材料的允许循环周数 $[N] = 0.8 \times 10^4$ 已小于工业锅炉的设计循环周数 $N = 10^4$; 14MnMoV_g 材料的允许循环周数 $[N] = 0.5 \times 10^4$ 尽管比 20_g 及 16Mn_g 的为小, 但此材料用于电站锅炉, 已大于电站锅炉的设计循环周数 $N = 0.2 \times 10^4$ (见 § 1-7)。

锅筒上一般都开设孔排, 孔桥 (孔间金属断面) 上的当量应力等于或略小于许用应力, 而孔桥以外的锅筒壁上的当量应力必小于许用应力, 假设为 0.7 倍许用应力, 则

$$16\text{Mn}_g \quad \frac{k \cdot 0.7\sigma_d}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{E'} = \frac{3.0 \times 0.7 \times 172}{2} \frac{2.07 \times 10^5}{1.92 \times 10^5} = 195 \text{ MPa}$$

于是, 由图 1-9, 得允许的应力循环周数 $[N] = 2.5 \times 10^4$, 它已远大于工业锅炉的设计循环周数 (10^4)。

由以上计算可见, 如 16Mn_g 用于制造无孔排的容器, 则大孔边缘的低周疲劳强度偏于不安全。

§ 1-4 锅炉元件的应力松弛

为了用螺栓压紧两个工件，例如压紧管道上的两个法兰盘，需转动螺母使螺杆弹性拉长——出现拉应力，从而产生压紧力。在高温下会发现螺杆产生的拉应力随着时间的延长而自行减小，从而使压紧力减弱，如不及时重新旋紧螺帽，会使管道内部工质外泄。拉应力的自行减小是螺杆中弹性变形不断转变为塑性变形的结果，如图1-13所示。在最初，即 $\tau = 0$ 时，螺杆中的变形 Δl_0 全为弹性变形，此时，螺杆中的应力为

$$\sigma_0 = E \frac{\Delta l_0}{l_0}$$

式中 E ——弹性模量；

Δl_0 ——初变形；

l_0 ——原长度。

随着时间的增长，弹性变形逐渐转变为塑性变形，弹性变形不断减小，螺杆中的应力也就相应地不断下降：

$$\sigma = E \frac{\Delta l_t}{l_0}$$

式中 Δl_t ——螺杆中剩余的弹性变形， $\Delta l_t < \Delta l_0$ 。

在上述的弹性变形不断转变为塑性变形的过程中， $\Delta l_0 = \Delta l_t + \Delta l_s$ 是固定不变的（ Δl_s 为塑性变形值）。这种在具有固定初变形的工件中，应力的自行减小现象称为“应力松弛”。

应力松弛现象，对于钢材来说，即使在室温条件下也能产生，当然，进行得极慢。随着温度升高，应力松弛现象愈明显。碳钢在200℃条件下，应力松弛已较显著，参见表1-1。温度波动会使应力松弛加快〔6〕。

在松弛过程中，应力随时间的变化可用松弛曲线表示，见图1-14。某钢材在某温度下的松弛特性 σ'_{s0} 是在初应力为某 σ_0 时，经指定工作期限后，所残留下来的应力值。

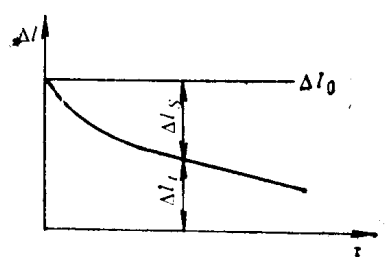


图1-13 应力松弛过程中弹性变形转变为塑性变形的示意图

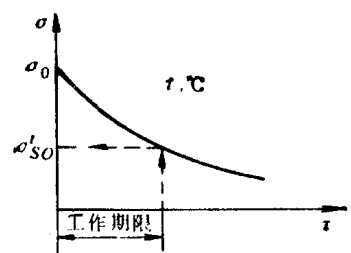


图1-14 松弛曲线

表1-1 20号碳钢的松弛特性

热处理状态	试验温度 (°C)	初应力 σ_0 (MPa)	对应下列时间(h)的 σ'_{s0} (MPa)				
			100	500	1000	3000	10000
950℃退火	200	147	108	107	107	103	(95)
	300	147	104	101	101	99	(94)
	400	118	83	79	78	75	(67)