

成岩 与成矿实验

地质出版社

成岩与成矿实验

曹荣龙 赵斌 曾易善 艾瑞英 编著
王声远 刘玉山 王联魁 王恒升

地质出版社

成岩与成矿实验

曹荣龙 赵斌 曾易善 艾瑞英 编著
王声远 刘玉山 王联魁 王恒升

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本:850×1168 1/32 印张:9.75 字数:262,000

1980年3月北京第一版·1980年3月北京第一次印刷

印数1—4,490册·定价0.00元

统一书号:15038·新439

编写说明

目前，国内有关成岩成矿实验的参考书较少。为了促进我国成岩成矿实验工作的开展，满足广大从事地质生产、科学研究和教学工作的同志的要求，我们编写了“成岩与成矿实验”这本小册子。

近代地质学的发展在越来越大的程度上依靠先进技术装备起来的实验研究手段和充分地正确地应用实验成果。我国在解放后开始了成岩成矿实验研究。在短短的十几年里，许多科研部门和大专院校都相继建立起实验室，开展了成岩成矿的实验工作。77年11月，在广西召开了第一次全国成岩成矿实验学术交流会，检阅了科学成果，明确了今后目标。会议提出有必要广泛宣传成岩成矿实验工作的重要作用，普及有关的基础知识，介绍反映国际国内主要实验成果及其在地质上的应用。

参加本书编写工作的有地质科学院地质矿产研究所，北京大学地质地理系和中国科学院贵阳地球化学研究所三个单位有关的实验室和教研室。引言由地化所曹荣龙执笔；第一章由北京大学曾易善、艾瑞英执笔；第二章由地化所王声远执笔；第三章由曹荣龙执笔；第四章由地矿所刘玉山执笔；第五章由地化所王联魁执笔；第六章由曹荣龙执笔；第七章由地矿所王恒升执笔；第八章由地化所赵斌执笔。最后全书由中国科学院贵阳地球化学研究所汇总，六室成岩成矿实验组赵斌、曹荣龙和王声远等同志进行整理并完成书稿。

这本小册子的编写工作受到了多方的支持。地科院王恒升教授亲自撰写了第七章。地化所涂光炽教授对全书的编写进行了指导，对不少章节进行了审阅和修改，文中图件由各单位绘图组清绘，特此表示感谢。

1976.10.8

引 言

早在十九世纪初,人们已开始应用物理化学的理论和方法,在简易的实验条件下合成矿物,模拟地质过程。随着地质事业的发展以及科学技术的进步,近二十年来成岩成矿实验研究飞速发展,并逐步成为一门独立的新学科。

成岩成矿实验是地质学的分支,国外又称实验岩石学。它的主要任务是在野外地质工作的基础上,对成岩成矿作用进行更深入的实验研究。成岩成矿实验的重要意义在于,实验研究对于野外观察起着补充完善的作用,从而帮助人们深入地 and 正确地掌握成岩成矿规律,有效地推动找矿勘探理论的发展。

成岩成矿实验的基本原则是借助于各种高温高压技术和设备,在实验室创造天然岩石和矿物在地球深部环境下形成时的物理化学条件,诸如温度、压力、介质酸硷度、氧化还原电位等等,以实现实验室的人工合成和人工模拟。因此,成岩成矿实验的现状和水平依赖于社会经济工业技术的提高,取决于实验室装备的现代化程度。同时,这门分支学科的发展史反映出了人们不断努力提高实验技术,不断创造相应于地球更深部环境的条件的历史。现在国际上已见300万巴静压力和3000℃的高温超高压实验设备,因而有了可能通过实验手段从事对下地幔物质成分结构的研究和探讨。这方面,我们在第一章介绍了产生高温高压的有关设备和技术。根据目前的需要,主要介绍了材料、高压容器的强度计算、密封设计等基本技术资料,并对目前国内外常用的水热实验设备作了说明。

内生岩石和矿石都是一定的物质体系在深部温压条件下进行化学反应或发生相转变的产物。因此,成岩成矿作用作为天然的化学和物理化学过程,必将遵守基本的化学理论和物理化学定

理。同样，作为模拟自然的成岩成矿实验更是必须以热化学理论和相律为基础才能严格地进行。因此，在这个领域内，热化学原理以及相律和相图的应用被视为重要的基础，无论对于实验的设计、实验数据的检查、实验资料的整理和表述，以及实验成果的正确应用都是不可缺少的。因此，本书在第二章和第三章分别予以介绍。由于目前国内这方面合适的参考材料不多，考虑到普及通俗的需要，编写的要求着意在基本概念的确切和内容的系统性上，希望这部分材料对过去这方面接触不多的同志可资参考。在第二章成岩成矿实验的理论基础中，介绍了地球化学问题中常用的热化学概念。并结合成矿实验举例说明各种热力学基本参数对化学平衡的影响，以及有关平衡常数与基本热力学参数之间函数关系的主要公式及其应用。第三章相律和相图内容介绍了相律公式的基本内容及其具体的物理化学含义，并系统地举例阐述了一元系、二元系、三元系以及含水体系各类相图的结构特征和识图方法。

书的第四、五、六、七各章分专题介绍了铁矿床、花岗岩、基性超基性岩以及铬铁矿等方面的实验资料。编写这几部分的目的主要是概略地反映国内外现阶段成岩成矿实验研究的基本成果以及在解决各种地质成因理论方面的应用意义。这对从事有关专门问题研究的同志提供了一些参考材料。但是，限于篇幅，许多实验资料都并不能细致深入地介绍。为了弥补不足，这几章都列了必要的参考文献。第四章有关铁矿成因方面的实验分为铁的溶解、迁移形式和沉淀条件；前寒武纪沉积变质铁矿形成的物理化学条件；接触交代型铁矿的实验；以及与火山成因铁矿有关的实验等四方面介绍了国内外主要的实验成果。第五章关于花岗岩实验比较系统地介绍了花岗岩的熔化实验以及饱和水含量方面的实验。主要内容包括水压等于总压方面的实验；与花岗岩有关的相图以及干体系和高压下的花岗岩实验等几个部分。第六章基性超基性岩成因理论与实验研究，分几方面介绍了拉斑玄武岩的熔化实验，基性岩浆的矿物反应系列实验；基性岩浆分离结晶作用的

有关实验；与金伯利岩成因有关的实验；关于阿尔卑斯型超基性岩的成因理论及其实验依据；以及超高压下矿物的相转变与地慢物质结构的一般概念。

成岩成矿实验是重要的工具和手段，但任何一项实验的目的不是直接去解决成因问题，而应当是提供一个必要的侧面，使人们对野外或其他观察所产生的不同成因假设进行更恰当的估价。这是因为成岩成矿实验存在有许多固有的局限。诸如体系的高度简化、封闭环境又严格平衡的实验条件，样品的微量以及实验时间的短暂等。这些局限明显地偏离了天然过程的真实环境。这就要求人们紧密地结合野外的地质研究来应用实验的成果；善于从概括的实验资料出发去掌握“地质事实”的现象和本质，去估量各种不同的观点和见解。在本书第七章有关铬铁矿矿床形成方面的几个实验和一些意见中，王恒升教授结合地质资料和有关实验探讨了铬铁矿矿床的成因问题。这种研究问题的方法是值得倡导的。

书末“成岩成矿实验的进展和前景”一章，介绍了世界上一些科学先进国家在实验室建设、实验技术水平等方面的概况，展望了成岩成矿实验研究的前景。这对于掌握国际动态、发展趋势以及拟定我们长远的赶超目标都会有裨益。

目 录

编写说明

引言

第一章 高温高压技术简介	1
一、高温设备	1
二、高压设备	3
第二章 成岩成矿实验的热力学基础	15
一、地质科学中应用的热力学原理	16
二、热力学原理在成矿实验中应用实例	29
第三章 相律和相图	50
一、相律及其有关的热力学基本概念	52
二、相图的解释和应用	57
第四章 有关铁矿床的成矿实验	135
一、铁的溶解、运移形式和沉淀条件	135
二、前寒武纪沉积变质铁矿形成的物理化学条件	144
三、接触交代型铁矿的实验研究	154
四、与火山成因铁矿有关的一些实验	160
第五章 关于花岗岩实验	171
一、水压等于总压方面的实验	172
二、总压大于水压方面的实验	200
三、有关干体系和高压下花岗岩实验	204
第六章 基性超基性岩成因理论与实验研究	207
一、玄武岩浆的温度及其在水压下的结晶作用实验	208
二、与层状基性超基性岩有关的熔化关系实验和矿物相 平衡实验	211
三、与金伯利岩有关的几个实验	227

四、深成阿尔卑斯型超基性岩体的成因及其有关的实验	232
五、超高压下的矿物相转变实验——地幔物质结构的一般概念	252
第七章 有关铬铁矿矿床形成方面的几个实验和一些意见	262
一、铬铁矿矿床的地质特征	262
二、几个重要的人造铬铁矿的实验	264
三、铬铁矿矿浆是在岩浆晚期经过挥发分的作用由残余的岩浆中熔离出来的	268
四、基性、超基性岩岩浆的液态分异	270
第八章 成岩成矿实验的进展	279
一、进展情况	279
二、某些重要实验研究结果	284
三、发展趋势	298
四、结束语	299

第一章 高温高压技术简介

要进行成岩成矿实验，必须掌握有关高温高压的技术和方法，创造条件搞好设备。

一、高温设备

(一) 高温的产生

电阻炉一般由三部分构成

1. 电热元件 要求其温度应比电炉工作温度高100—200℃的材料制成。

铁铬铝合金——炉温可达1250℃，性硬脆，线膨胀系数较大。炉膛应用较好的氧化铝耐火材料。

镍铬合金——炉温在1100℃以下，高温时不易氧化，升温时电功率稳定。

碳化硅——炉温可达1350—1400℃、性脆、易断。长时间使用（数十小时）时其则电阻升高，为保持预定温度需升高电压（因此电炉必须与调压器配用）。

2. 炉衬 即炉膛和隔热层，作用是固定炉丝和减少热的散失。炉膛要求在高温下有一定的强度，多用耐火材料制成。有时为了使炉温均匀，炉膛内衬由导热性能好的材料（铜、铝、石墨等）制成的套筒。隔热层主要由石棉灰，硅藻土和矿渣棉等保温材料组成。

3. 炉壳 一般用薄钢板制成，以保护炉衬，炉壳要接地。市场上卖的多为坩埚电炉，有时还要自己加工一些特殊口径的电炉。使用电炉时应先测定炉膛的温度场，确定等温区。关于设计电炉的一些主要参考数据列于表1。

表1 设计电炉的一些主要参考数据

电炉功率, kw	1	1	2	2	3	3	4	4
输入电压, V	220	220	220	220	220	220	220	220
输入电流, A	4.55	4.55	9.1	9.1	13.7	13.7	18.2	18.2
炉丝电阻, Ω	48.4	48.4	24.2	24.2	16.1	16.1	12.1	12.1
相数	1	1	1	1	1	1	1	1
炉丝最高温度 $^{\circ}\text{C}$	850	1000	850	1000	850	1000	850	1000
炉膛最高温度 $^{\circ}\text{C}$	700—750	850—900	750	900	750	900	750	900
炉丝牌号**	Cr13 Al5***	Cr15 Ni60	Cr13 Al5	Cr15 Ni60	Cr13 Al5	Cr15 Ni60	Cr13 Al5	Cr15 Ni60
炉丝直径mm	1.0	1.0	1.6	1.6	2.0	2.0	2.3	2.3
炉丝比电阻**** Ω/m	1.41	1.17	1.41	1.17	1.41	1.17	1.41	1.17
炉丝长度m	27	32	34	42	36	44	35	43
炉丝重量kg	0.16	0.21	0.51	0.68	0.86	1.11	1.12	1.42

* 短时间使用炉膛温度还可高些。

** 国内常用牌号请查有关手册。

*** Cr13Al5— $\text{C} < 0.2\%$, $\text{Mn} \leq 1\%$, $\text{Si} \leq 1\%$, $\text{Ni} \leq 0.6\%$; Cr12—15%, Al3.5—5.5%;

Cr15Ni60— $\text{C} \leq 0.15\%$, $\text{Mn} \leq 1.5\%$, $\text{Si} \leq 1.2\%$, Cr15—18%, Ni55—60%, 余为Fe。

**** Cr13Al5, y (电阻温度系数) $= 0.1 \times 10^{-3}$; Cr15Ni60, $y = 0.1 \times 10^{-3}$ 。

(二) 高温测量

温度是成岩成矿实验的重要参数, 实验中一般用热电偶与毫伏计或电位差计配用来测量温度。

1. 热电偶 由两根化学成分不同的金属或合金丝彼此连结构成。它的大小决定于两接点的温度差和金属丝的性质。测量热电偶的温差电势就能确定待测温度。热电偶有:

(1) 镍铬-镍铝(代号EU)热电偶: 其温差电势与温度近似成线性关系, 故配用仪器刻度均匀。线质硬、易断, 但价格低廉。测温精度 $\pm 4 - \pm 8^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 铂-铂铑 (代号LB) 热电偶: 性能稳定, 准确度高, 线质细且均匀, 热感度高, 可测微小区域的温度, 精度 $\pm 3 - \pm 5^{\circ}\text{C}$, 温差电势小, 须与精密的仪表配用, 可作标准热电偶。

2. 测温方法 测温时将热电偶一接点置于待测温度处 (热端), 另一接点置于恒定的低温处 (冷端), 亦可用补偿导线和冷端补偿器来消除冷端温度变化引起的测温误差。热电偶的两根金属丝用磁管隔开。用毫伏计或电位差计测量其电势差, 即可求出待测温度。应定期校正热电偶。

(三) 温度的控制

实验中, 常要求在一定时间内保持温度不变 (或在很小的范围内变化), 使反应达到平衡, 用仪器控制炉温。其控温工作原理有两种:

1. 开关式控温 炉温偏离指定值时, 测温元件 (如热电偶) 发出信号, 通过自动控制装置断开或接通电源, 使炉温恢复到指定值。

工作中使用开关式温度控制器时, 常在控制器与电炉之间串接调压器。升温时用高电压, 达到恒温后适当降低电压。这样可以做到升温迅速, 保持温度精度好。

2. 连续式控制 炉温偏离指定值时, 连续自动补偿装置增加或减少供给电炉的电能以抵消外界条件变化引起的炉温变化。

二、高压设备

成岩成矿作用实验研究用的高压设备大致可分为两类: 一是内加热设备, 因结构复杂, 这里不予介绍; 一是外加热的高压釜, 这类设备比较简单, 使用较普遍。

(一) 高压容器的设计和计算

1. 高压容器的设计 设计高压设备选用材料必须立足于国内钢材、高温合金的生产和供应情况。在考虑设备工作需要, 加工要求的同时还要注意节约, 因为高压设备所用材料多为国防、经

济建设急需的优质钢材。

高压釜是在高温、高压下用腐蚀性介质工作，所以釜体材料要求强度大，抗蠕变性，耐蚀性，热稳定性好，一般用优质耐热不起皮钢，不锈钢耐酸钢或高温合金制造。材料的型号及性能可在专门的手册中查到。

为了防止工作介质腐蚀釜体和污染实验材料，常在釜中放置特种材料*（耐蚀性强但强度低或价值昂贵）的封闭或半封闭容器（如衬筒管、伸缩囊、安瓿等），使反应在这种容器中进行。这样可适当的降低对釜体材料耐腐蚀性的要求。

2. 高压容器的强度计算 厚壁高压容器（釜体）强度计算由于依据的强度理论不同，所以导出的计算公式也不相同。国内目前采用弹性失效理论计算，经验表明，计算值与实验结果比较吻合，一般偏“保守”约10—15%。

当工作温度 $t > 200^{\circ}\text{C}$ ，工作压力 $P < 1000$ 公斤/厘米²，釜体外、内直径比 $\frac{d_{\text{外}}}{d_{\text{内}}} = k > 1.50$ 时，用下式计算许用应力 $[\sigma]$ ：

$$[\sigma] = \frac{\sqrt{3} P k^2}{k^2 - 1} \quad (1)$$

$[\sigma]$ 取下列四个值中的最小值：

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s^t}{n_s}$$

式中 σ_s^t ——短时高温拉伸屈服极限； n_s ——相对短时高温拉伸屈服极限的安全系数，奥氏体不锈钢 n_s 值取1.3。

$$[\sigma] = \frac{\sigma_b^t}{n_b}$$

式中 σ_b^t ——短时高温拉伸强度极限； n_b ——相对短时高温拉伸强度极限的安全系数，奥氏体不锈钢 n_b 值取2.6。

$$[\sigma] = \frac{\sigma_c^t}{n_c}$$

* 如耐酸腐蚀的材料：石英、石墨、铂、金、钽、钛、铅、聚四氟乙烯等。耐碱腐蚀的材料有石墨、纯铁、镍、金、银等。

式中 σ_c^t ——温度 t 时, 100000小时产生1%蠕变变形的应力(蠕变极限); n_c ——相对蠕变极限的安全系数, n_c 值取1.0。

$$[\sigma] = \frac{\sigma_d^t}{n_d}$$

式中 σ_d^t ——温度 t 时, 持续100000小时导致断裂的应力(持久强度极限); n_d ——相对持久强度极限的安全系数, 奥氏体不锈钢 n_d 值取1.5 (σ_d^t 取平均值) 或1.25 (σ_d^t 取最小值)。

据式(1)求出 k 值后, 若釜内外壁温度不同尚须对温差应力进行校核。

外加热(内压)容器的温差应力计算公式为:

$$\sigma_{\text{切, 内}}^t = \frac{\alpha E (t_{\text{内}} - t_{\text{外}})}{2(1 - \mu)} \left(\frac{1}{\ln k} - \frac{2k^2}{k^2 - 1} \right) \quad (2)$$

式中 $\sigma_{\text{切, 内}}^t$ ——容器内壁切向温差应力; $t_{\text{内}}, t_{\text{外}}$ ——容器内壁和外壁的温度; α, E, μ ——分别为平均工作温度下材料的线膨胀系数、弹性模数、泊松比, 一般可用室温值, μ 值取0.32。

校核的要求是要满足式(3)和(4):

$$\sigma_n^t \leq [\sigma], \quad \sigma_n^t = \frac{\sqrt{3} P k^2}{k^2 - 1} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{合, 内}} = \sigma_{n, \text{内}}^t + \sigma_{\text{切, 内}}^t \leq 3[\sigma] \quad (4)$$

式中 $\sigma_{\text{合, 内}}$ ——釜内壁的合成应力; $\sigma_{n, \text{内}}^t$ ——工作压力引起的釜内壁切向应力。

容器在蠕变条件下工作时可不考虑温差应力, 奥氏体不锈钢釜壁工作温度高于550℃时, 应用蠕变极限和持久强度极限进行强度计算, 实验室用容器寿命可按10000小时考虑。

超高压($P > 1000$ 公斤/厘米²)厚壁($k > 1.50$)容器的强度计算以塑性失效理论为基础。常用福皮尔(Faupel)公式计算破裂压力:

$$P_{\text{破}} = \frac{2\sigma_s^t}{\sqrt{3}} \left(2 - \frac{\sigma_s^t}{\sigma_b^t} \right) \ln k \quad (5)$$

这计算值与实验值误差在±15%以内, 一般偏“冒进”。

按前述对 n_b 的规定取安全系数值, 求出许用应力 $[\sigma] = \frac{P_{\text{破}}}{2.6}$ 。

校核温差应力的计算公式同前。

蠕变条件下可考虑将式(5)改为

$$P'_{\text{破}} = \frac{2\sigma_c^t}{\sqrt{3}} \left(2 - \frac{\sigma_c^t}{\sigma_d^t} \right) \ln k \quad (6)$$

用蠕变极限和持久强度极限来计算, 即考虑容器一定时间内的一定形变。按前述对 n_d 的规定取安全系数值计算许用应力

$$[\sigma]' = \frac{P'_{\text{破}}}{1.25}$$

按式(3)计算 σ_n^t 值(σ_n^t 值应小于 $[\sigma]'$), 并代入蠕变极限进行校核。若 $\sigma_n^t \leq \sigma_c^t$, 则说明容器在弹性形变范围内工作, 因而可认为容器在这种条件下工作是安全的; 反之, 容器将有部分在弹性形变范围内工作, 部分在塑性形变范围内工作, 即不够安全。

现以北京大学地质系设计加工的高压釜体强度计算为例说明校核方法。

釜体由4Cr14Ni14W2Mo钢制造。这种钢在温度650℃以下有良好的机械性能, 800℃以下耐热不起皮, 900℃以下耐气体腐蚀能力强。由手册查得有关常数(1175℃水淬, 750℃时效5小时), 如表2, 3。

设高压釜工作条件为600℃, 1000公斤/厘米², $k=4$ 。使用寿命10000小时:

表2 不同温度的持久强度极限

持久强度极限	600℃	650℃
$\sigma_d/10000^*$, kg/mm ²	18.0	13.0
$\sigma_d/100000$, kg/mm ²	15.0	10.0

* $\sigma_d/10000$ 为某温度时, 持续10000小时导致断裂的应力。

表 3 不同温度的蠕变极限

蠕 变 极 限	600℃	650℃	700℃
$\delta_c/10000^*$, kg/mm ²	18.0	8.0	3.7
$\delta_c/100000$, kg/mm ²	8.0	4.0	1.6

* $\delta_c/10000$ 为某温度时, 10000小时产生1%蠕变变形的应力。

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{破}} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \delta_{c/10000}^{600} \left(2 - \frac{\delta_{c/10000}^{600}}{\delta_{d/10000}^{600}} \right) \ln k \\
 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \times 18 \left(2 - \frac{18}{18} \right) 2.3 \times 0.6 \\
 &= 28.7 \text{ 公斤/厘米}^2
 \end{aligned}$$

$$[\delta]_{10000}' = \frac{P'_{\text{破}}}{1.25} = \frac{28.7}{1.25} = 23.0 \text{ 公斤/厘米}^2$$

若使用寿命为100000小时:

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{破}} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \times 8 \left(2 - \frac{8}{15} \right) \times 2.3 \times 0.6 \\
 &= 18.8 \text{ 公斤/厘米}^2
 \end{aligned}$$

$$[\delta]_{100000}' = \frac{18.8}{1.25} = 15.0 \text{ 公斤/厘米}^2$$

按公式 (3) 求得:

$$\delta_n^P = \frac{\sqrt{3} P k^2}{k^2 - 1} = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 16}{15} = 18.5 \text{ 公斤/厘米}^2$$

结果是 $\delta_n^P \approx \delta_{c/10000}^{600}$, 而 $\delta_n^P > \delta_{c/100000}^{600}$

由此可知, 在600℃, 1000公斤/厘米²条件下进行实验, 10000小时以内釜体基本上弹性形变范围内工作, 所以是安全的而工作100000小时则“不保险”。当然, 这样估算是否正确, 最终还要由爆破实验来验证, 因为目前没有定型的超高压容器强度计算的规范, 但这结果可供设计参考。

3. 高压容器的封口和密封 在高压釜中保持高压要满足两个条件: 一是容器强度足够大; 一是容器绝对密闭。容器封口的要

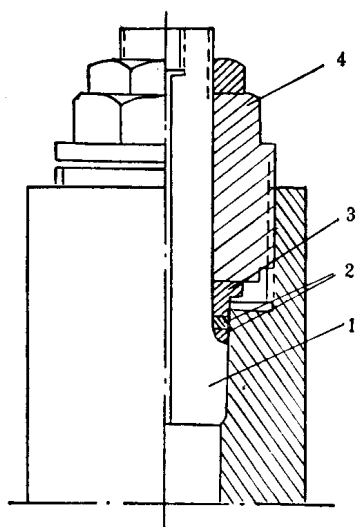


图 1·1 自紧式封口

- 1—塞头； 2—垫圈；
3—压块； 4—压紧螺母

求是保证密闭，温度变动不影响密封性能，结构简单，加工方便，便于装卸，不被工作介质腐蚀。

高压釜封口分为自紧式和非自紧式两种。

(1) 自紧式封口：其工作原理是塞头底面积 S_2 承受的力分布在比 S_2 小的垫圈的环形面积 S_1 上，所以垫圈中产生的应力大于工作压力，而且只要釜内压力不低于设计的密封压力极限，这个压力差就总存在，以此保证密封。而且工作压力升高会使密封表面的严密性增强，故这种封口多用于超高压设备（见图1·1）

这种封口的设计关键是确定垫圈的表面积。根据国内超高压容器的密封试验，垫圈中的应力高于工作压力20—40%，即

$$\frac{\delta}{P} = \frac{S_2}{S_1} \approx 1.20—1.40$$

式中 δ ——垫圈表面的应力； P ——工作压力。

δ 的下限是垫圈材料的屈服极限 δ_s ，低于 δ_s 则无法造成预密封。 δ 的上限是塞头材料的屈服极限 δ_s' ，高于 δ_s' 则会把塞头“勒断”、飞出，造成事故。

(2) 非自紧式封口：这种封口又分为两种。

A. 以塑性形变(局部弹性形变)为基础的封口（见图1·2）。垫圈装在釜体与塞盖接触处，由紫铜或铅、铝等软材料制成。在螺栓预紧力的作用下，垫圈材料发生塑性变形，填满密封接触面不平整处（即可能漏泄处），造成密闭。垫圈断面可为圆形，也