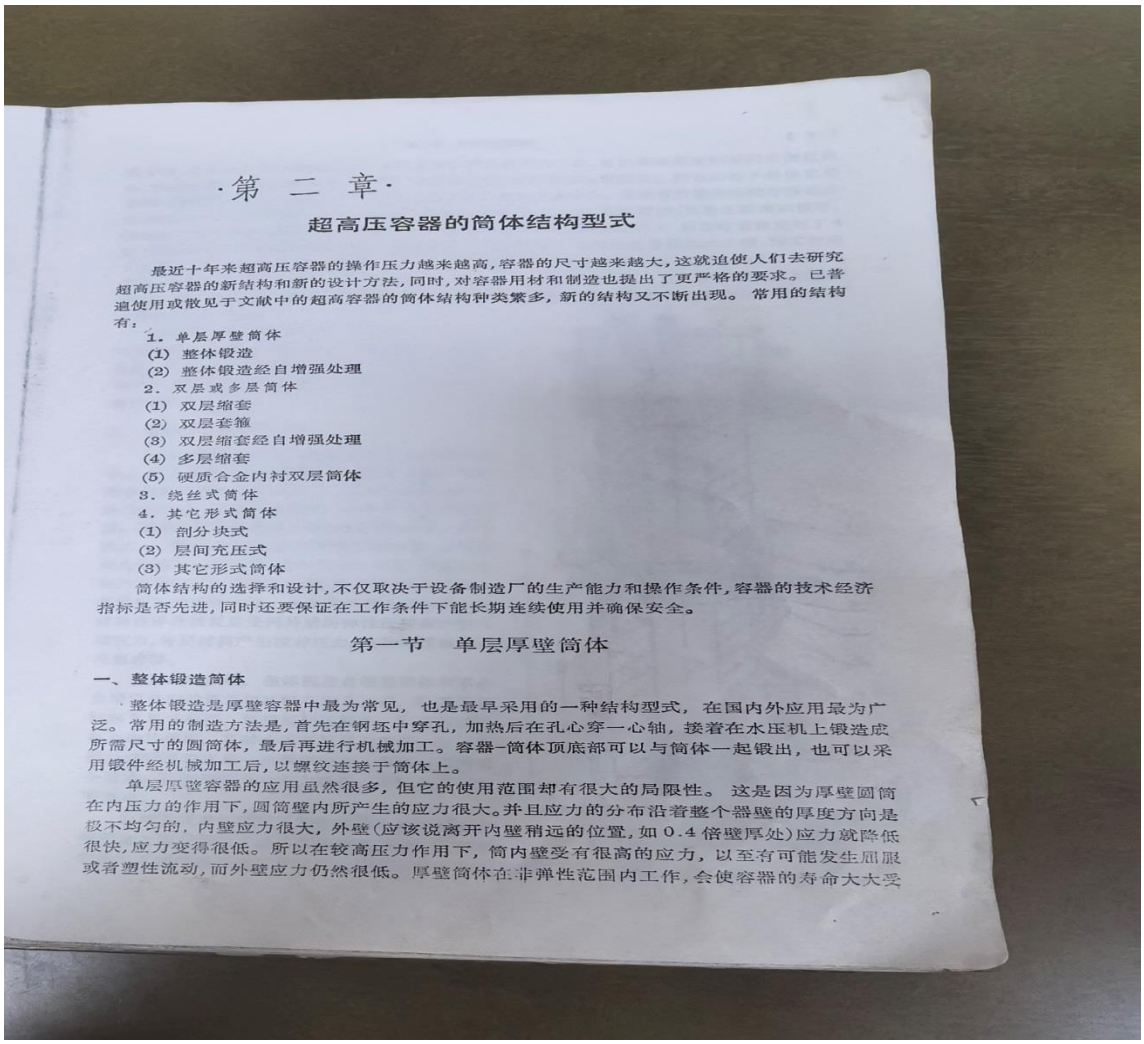
等静压机容器缠绕结构和多层套合结构的比较

等静压机处理舱属于超高压容器，超高压容器的设计需要遵循美国机械工程师学会颁布制定的全球通用的 ASME-U3 最高压力等级设计规范，至于选择什么样的容器结构取决于使用工况，诸如工作压力，工作温度，保压时间等工作条件。无论使用什么样的结构，其目的是使容器结构产生均匀的预应力满足高强度高可靠性的使用要求。

过去以往等静压设备压制粉末冶金、陶瓷等材料一直使用 300MPa 以下的压力，其处理舱容器大多采用缠绕结构。缠绕容器结构工艺简单，大多数工厂容易实现，但绕丝周期比较长。随着纳米材料的出现以及目前新能源电池技术的发展，要求等静压机具备高压力≥600MPa，高的温度≥90-150°，这就对等静压机提出更高的技术要求，才能满足电芯材料技术的发展。

基于目前满足电芯材料要求的等静压机涉及的 600MPa 以上的超高压容器，涉及安全和可靠性的运行，需要很高的技术门槛。为便于理解参照下面超高压容器设计规范的截图予以说明（感兴趣学习的同志可以上网查询）：



·第 二 章·

超高压容器的筒体结构型式

最近十年来超高压容器的操作压力越来越高，容器的尺寸越来越大，这就迫使人们去研究超高压容器的新结构和新的设计方法，同时，对容器用材和制造也提出了更严格的要求。已普遍使用或散见于文献中的超高容器的筒体结构种类繁多，新的结构又不断出现。常用的结构有：

1. 单层厚壁筒体
(1) 整体锻造
(2) 整体锻造经自增强处理
2. 双层或多层筒体
(1) 双层缩套
(2) 双层套箍
(3) 双层缩套经自增强处理
(4) 多层缩套
(5) 硬质合金内衬双层筒体
3. 绕丝式筒体
4. 其它形式筒体
(1) 剖分块式
(2) 层间充压式
(3) 其它形式筒体

筒体结构的选择和设计，不仅取决于设备制造厂的生产能力和操作条件，容器的技术经济指标是否先进，同时还要保证在工作条件下能长期连续使用并确保安全。

第一节 单层厚壁筒体

一、整体锻造筒体

整体锻造是厚壁容器中最为常见，也是最早采用的一种结构型式，在国内外应用最为广泛。常用的制造方法是，首先在钢坯中穿孔，加热后在孔心穿一心轴，接着在水压机上锻造成所需尺寸的圆筒体，最后再进行机械加工。容器-筒体顶底部可以与筒体一起锻出，也可以采用锻件经机械加工后，以螺纹连接于筒体上。

单层厚壁容器的应用虽然很多，但它的使用范围却有很大的局限性。这是因为厚壁圆筒在内压力的作用下，圆筒壁内所产生的应力很大。并且应力的分布沿着整个器壁的厚度方向是极不均匀的，内壁应力很大，外壁（应该说离开内壁稍远的位置，如 0.4 倍壁厚处）应力就降低很快，应力变得很低。所以在较高压力作用下，筒内壁受有很高的应力，以至有可能发生屈服或者塑性流动，而外壁应力仍然很低。厚壁筒体在非弹性范围内工作，会使容器的寿命大大受

例，外径 ϕ78 mm、内径 ϕ34 mm、设计压力 3000 kg/cm²、设计温度 350℃，选取自增强为 6446 kg/cm²，自增强率 26%。经过实际生产证明设备是安全的。通过理论计算也证大改善了壁中应力分布状态，增加了安全性，提高了使用寿命。

另一个例子是上海化工研究院用在高压聚乙烯的试验装置中的气流搅拌反应器。此反应设计压力 3000 kg/cm²、设计温度 300℃，用 4340 钢作为釜体的用材。在容器加工完成6500 kg/cm² 的压力进行自增强处理，自增强率为 22.857%。详细结构如图 2-2。

第二节　多层厚壁筒体

使厚壁筒体产生预应力的另一个方法是采用缩套结构。即用二个或二个以上的同心圆口热外层套入内层后冷却(或深冷内层把外层套入内层)使之紧缩在一起，使内筒产生压缩力达到加强的目的。

在超高压容器设计时，不但希望筒体缩套后能存在一部分预应力去抵消一部分工作应力，实现筒体壁中应力均匀分布，而且更希望在设计允许的情况下，尽量加大其预应力，并要整个筒体上能均匀的存在。为达此目的，在双层容器缩套之前，必须对套合面进行精确的加工，并精心地控制套合工艺，以确保理论的套合应力。经机械加工后再作缩套有下列优① 保证筒体的几何形状比较精确；② 保证设计的过盈量；③ 筒体贴合比较紧密，有利于传热，降低筒壁温差；④ 使筒壁的应力分布比较均匀，保证容器的强度；⑤ 有效消除以前工序造成的误差及缺陷。

缩套容器制造须有精良的缩套工艺，套合温度的上限绝不许超过外筒材质的热处理温度。根据厚壁筒体壁上应力分布规律，为了充分发挥材料的各自特性，往往采用高强度的材质内筒，用强度稍低而塑性较好的材质制作外筒。这是采用缩套结构的一个特点。

采用缩套结构的另一个特点，是可以采用不同的结构和不同的内筒材质以满足各种不同求。例如，可用特殊耐磨的高强度材料或耐腐蚀材料制成薄的衬筒作为双层或多层圆筒筒，以防止筒体发生磨损或腐蚀。也可用这些材料制成厚壁筒体作为缩套结构的内筒，以磨损和腐蚀，并承受部分由于内压引起的筒壁上的拉应力。

对于细而长的容器是不宜采用缩套结构，例如对于超高压管式反应器之类的设备是不能缩套结构的。如果必须套合，需要改变套合面的形状，例如改为锥状靠外力推入，或者改环式。

双层缩套筒体

双层缩套筒体是由二个同心的圆筒缩套在一起而形成的。内、外筒材质可选用相同的也可不同的材质。

图 2-3 实例是用于 3500 kg/cm² 压力的常温容器组装图。套合面经精加工，并实测加工，以保证实际热套过盈量为 0.298～0.372 mm。加热外筒体的温度不超过 300℃。筒体号为 CHG125 的材料制造。

双层套箍式筒体

大而长的容器缩套是比较困难的，为此 Maccary 和 Foy 提出，用一系列长度短的圆环代

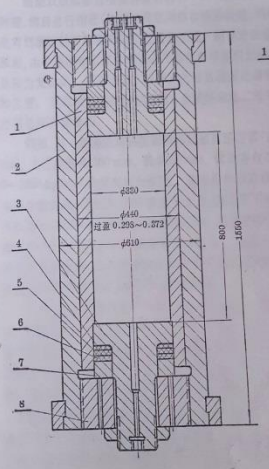


图 2-3　双层缩套容器

1—内筒　2—外筒　3—自紧塞头　4—垫　5—密封垫　6—垫　7—垫块　8—压紧螺母

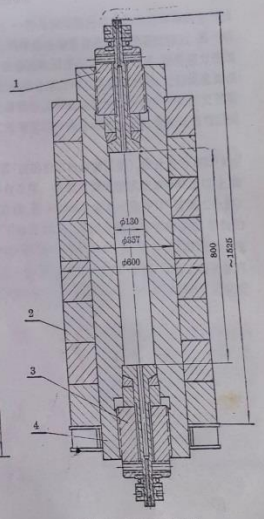


图 2-4　双层-套箍式容器

1—顶塞　2—外筒　3—下塞　4—内筒

替，逐个的套入。这种结构要求内筒有足够大的壁厚，用以承受容器的全部轴向力，即内筒的壁厚按筒体轴向强度决定。至于外套环，仅起周向加强作用。这样，外层筒体套合后就没有环缝焊接，给制造带来很大方便，也有利于保证质量。

此类容器在制作时，特别要注意套合以后各段外筒体端面必须完全接触，以不影响内筒体的受力。但在实际制作后，各段外筒端面之间容易出现间隙，有的达 20 mm 之宽，使在内压作用下，在该处的内筒体上出现不连续应力，这是不允许的。产生这种现象的原因在于：外筒的套合温度比较高，但容量较小，内外筒接触后，内筒被加热，沿环向胀大及沿纵向伸长，不久外筒很快冷却收缩，箍紧在内筒上，影响其变形，使之不能完全收缩回至初始尺寸，于是，在各层外筒间就出现环向间隙。要避免这种缺点，最好采用间歇套合办法，即每套完上一个外筒，待全部冷却后，再套合下一个外筒，并使各段外筒端面完全接触。也可在两个外筒筒节上暂时用 II 形铁点焊固定，待全部套合后才拆除。

这种结构形式的筒体适用于筒体长度方向较长的容器。否则，由于套合次数的增加，套合

是适宜的，如果各层材质不同，那么也可以按上述等强度的理论确定各层有不同的厚度及的 K 值，以达到组合容器失效时，内、外筒同时出现破裂。

在实际选用各层厚度时，有时往往作了各层筒体厚度相等的设计，有时也往往考虑因材施原则，或者考虑各制造厂的制造能力、热处理等因素，而选取了多层缩套容器的各层不同。这些情况对于那些操作条件并不十分苛刻，或者说需要承受的内压并不太高的条件也全可行的。

图 2-6 是上海重型机器厂制造的用于7000 kg/cm² 压力三层缩套超高压容器。三层筒体均为 CHG125。容器外径 ϕ820 mm，内径 ϕ300 mm；内筒的径比 $K=1.535$，中筒体1.89，外筒体 $K=1.28$。二次缩套的套合面都经机械加工，中筒与内筒的过盈量为3 mm，外筒与中筒的过盈量为 1.038 mm。其套合顺序是先加热中筒体，加热温度 400℃，筒与内筒套合成一体，然后实测套合后的中筒体外径，根据外筒与中筒的过盈量值，精确它外筒的内径值并精确加工完毕，最后加热外筒并把它套合在中筒与内筒的缩套体上。外加热温度为 460℃。

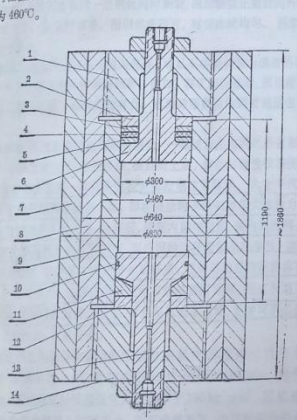


图 2-6　三层缩套容器

1—螺塞　2,3,4,5—垫圈　6—自紧塞头　7—外筒体　8—中筒体　9—内筒体
10—密封圈　11—楔形垫　12—垫圈　13—自紧塞头　14—螺塞

碳化钨合金内衬的双层筒体

在内筒施加预应力提高承载能力的方法受到筒体材料屈服强度的限制，也就是说，自增强和缩套的方法使筒内壁产生的残余压缩应力不能超过筒体材料的压缩屈服强度，否则

会引起二次屈服（或称反向屈服）。所以最大设计压力要取决于内壁允许的残余应力的大小，即取决于材料的压缩屈服强度。

如果内壁采用具有极高的承压能力的材料，那么就能进一步的提高设计压力。硬质合金（例如碳化钨）具有很高的压缩屈服强度，甚至可达 60000 kg/cm² 以上，但其抗拉强度极低，仅仅只有它的 1/4，所以作为缩套筒体的内筒材料是非常理想的，但外筒必须采用强度高，尤其是塑性、韧性好的钢材，以保证安全使用。

碳化钨材质受压强度高、抗拉强度极低，在用它作为内筒的双层或者多层容器时，必须使内筒（即碳化钨层）在使用过程始终处于受压状态，决不能出现拉应力。为确保这一要求，在制造过程也应采取必要的措施。如 ① 套合面必须经过精加工，确保尺寸公差。② 套合后，有很大过盈量，以产生很大压缩残余应力。③ 为保证热套过程不产生拉应力，即不受拉，当热套时把碳化钨内筒放入外筒后，应立即在轴向对外筒加压（用水压机）。碳化钨是一种硬的材质，所以碳化钨内筒的所有机加工必须在缩套以前完成。

碳化钨的杨氏模量比钢高 3 倍，在很大的压力变化下变形很小，很适用于压力脉动较大的场合。

碳化钨筒体是在超高压力挤压成型然后经烧结而成，这就限制了它不可能得到大尺寸的零件。

上述种种，限制了硬质合金（碳化钨）内衬的双层缩套容器只能是小容器，以它制造超高压压缩机的气缸是十分理想的，从国内外情况看，也主要用于这方面。

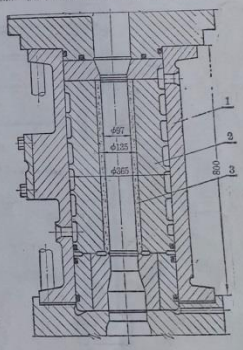


图 2-7　碳化钨内衬的超高压压缩机汽缸结构图

1—缸套　2—外筒　3—碳化钨内筒

图 2-7 是用于高压聚乙烯工程中超高压压缩机一段汽缸的结构图。设计压力 1500 kg/cm² 的双层圆筒，内筒外径 ϕ135 mm，内径 ϕ97 mm，材质碳化钨。外筒外径 ϕ365 mm，内径 ϕ135 mm，材质 33CrNi3MoA，套合过盈量为 0.3～0.35 mm，热套温度 400～420℃（外筒在淬火炉中恒温加热）。套合前，碳化钨需作着色检查、超声波探伤和外观尺寸检查。套合时，套合面涂以 MoS_2。碳化钨内筒套入外筒后，立即在轴向对外套加压 600～700 吨（用水压机进行）。

第三节　绕丝式筒体

绕丝式筒体是一种组合式筒体。它是把高强度的扁形钢带（例如截面尺寸为 4×1 mm 或 6×1.5 mm 等），按照预定的预拉紧力一层层缠绕在内筒上（层数视所需厚度而定），由预拉紧力，缠绕层的弹性收缩对内筒施加一个外压，实现均匀筒壁中应力的目的，从而提高了圆筒的强度。

目前，我国已有一些单位从事绕丝式容器的研究试制工作，在高温等静压工艺中应用尤为。工作压力为2000～3500 kg/cm²，使用温度为1400～1700℃，取得了一定的经验和数此外，也有采用绕丝式结构来设计上万大气压的超高压容器，其直径从数十毫米到数百毫

绕丝式容器是在一内筒外壁缠绕许多层钢丝所制成，钢丝仅能承受周向及径向应力，而对载荷则无作用。因此，绕丝容器的内筒必须有足够的厚度，一则以此厚度来承受由内压力的轴向载荷；二则以此厚度承受在缠绕过程由钢带而给予内筒的外压力，以防止内筒的失失稳定。当然，设计时也可在缠绕层外加一外筒或框架来承受轴向载荷，使内筒不承受载荷。

绕丝筒体的优点：① 可以适当控制缠绕的拉力。容易实现壁中的应力分布均匀化，比控套容器中的过盈量为方便，而且制作比热套容易。② 安全可靠。因为各层钢丝互相错开，某处钢丝破坏，也不可能在同一处钢丝同时断裂，因而能阻止裂纹向外扩展。即提高了容用的安全可靠性。③ 选材容易。用钢丝带即可，材质比较均匀。强度高，总重量可大大，筒体尺寸可缩小。

绕丝筒体的最大缺点是不能承受轴向载荷，而且不能提供较为满意的封头结构。为了克一缺点，许多国家都试制各种新型钢带。例如，制成矩形截面、圆形截面、蛋形截面等等，层间互相嵌入而和筒壁一起承受轴向力。然而异形截面的钢带制造也不方便，所以，使用广泛。

绕丝容器的制作，在过去是把轧制好的钢丝，一端固定在内筒的外表面，另一端用油压机，给钢丝以一个很大拉应力，逐层缠绕，缠到筒上后，钢丝的弹性收缩便把内筒箍紧，使内生预应力。这种缠绕需要一套复杂的拉紧及控制拉力装置。六十年代以来，由于自增强的发展，美国首先采用新的绕制方法，即在绕丝时不给钢丝很大的拉力，只需把钢丝拉紧筒上，此时各层钢丝并无预应力，绕好后，给筒内施加液压，使内筒材料上产生的拉应力超料的屈服限而全部屈服产生塑性变形，而外面的钢丝层则保持弹性。卸压以后，筒体有残形，钢丝层弹性收缩，这等于内筒把钢丝层胀紧，使钢丝层受拉而筒体则由于钢丝层的弹缩而受外压，产生压应力。这就达到了绕丝容器的预期目的。用这种超压处理办法绕制超容器不但可省掉复杂的拉紧缠绕装置，而且可以减薄内筒，至少可不必担心由于绕制而使失稳的问题，节约材料，使用安全。

例如，某一引进的压制硬质合金用的热等静压机中的超高压筒体就是用钢丝缠绕其允许工作压力1600 kg/cm²，筒体内腔尺寸ϕ710×2500 mm，内筒壁厚44.5 mm，层厚度69 mm。所用钢丝的抗拉强度大于或等于190 kg/mm²，屈服强度大于或等于kg/mm²。钢丝给予内筒很大的预应力，在工作状态下，内筒的应力仍处于压应力或接近。

在国内，曾制作使用内径为100毫米、最大使用压力为1300 kg/cm²的钢丝缠绕容器。还内径380 mm、使用压力1500 kg/cm²的超高压筒体。其内筒体由二层圆筒缩套而成，外ϕ450 mm，内径为ϕ380 mm，套合面直径ϕ426 mm。其所以用二层缩套，是因为内筒需开设沟槽通入冷却介质，带走操作中出现的热量，使容器壁温保持不高的温度。内筒材质为35CrMoVA，在内筒体上绕上4×1 mm的65Mn扁钢丝，共38层（图2-8）。这器的筒体与端盖是采用框架结构，所以毋需考虑由内压力引起的轴向力。

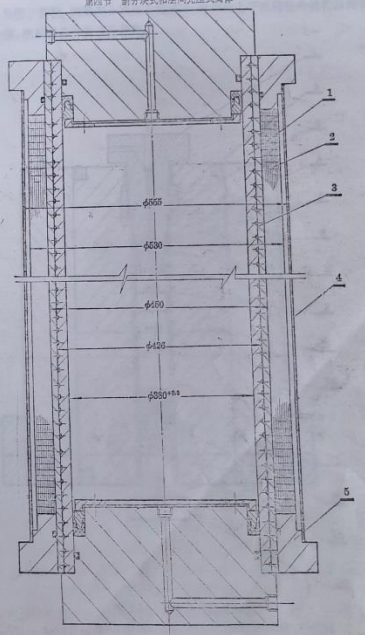


图2-8　绕丝式超高压容器

1—内筒(35CrMoVA)　2—中筒(35CrMoVA)　3—绕丝层(4×1 mm的65Mn扁钢丝绕38层)
4—外壳保护层(A3)　5—法兰(35)

第四节　剖分块式和层间充压式筒体

随着超高压技术的不断发展，新型的、能承受更高压力的超高压容器结构也相继问世。

一、剖分块式筒体

剖分块式是把靠近内壁的一部分筒体作成几块互不相连的剖分块（或者叫径向块，扇形

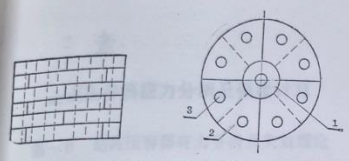


图 2-11　销钉连接剖分块式筒体
1—内筒　2—剖分块外筒　3—销钉

(例如外径达 3.05 m 以上的容器),不存在用其他制造方法要受到材料供应及热处理条制,生产比较简便。

间充压式筒体

种型式的结构是对内筒直接施加液压来降低受载内筒壁上的最大剪应力。由液压施加可以不受温度、疲劳所引起的应力松弛而使筒体失效。

对内筒直接施加外压时,应考虑到所施加外压一般很大,如果内筒内压力一旦降至某一内筒有可能失效,所以,必须严格控制内压值的过大波动。

际上,这种型式还存在许多不易解决的困难和其缺点,如在这样高的压力下需要增加很的压力源来产生外压,如何控制外压,如何密封外压等。

内筒直接施加外压的新型结构,还有很多,例如将筒体放置在另一个压力容器内,使筒受外压作用。这种方法 Bridgman 研究分析过,后来也以此设计压力高达 35000 kg/双层容器,但也因存在如何产生外压,外压的控制以及密封外压等等问题没有得到应

ridgman 还提出用带锥度的外筒体的设计方法,其要点是将压力容器内筒设计成一个的外壁,然后将其套入一个具有内锥配合的厚壁外筒内。由于容器内筒的压力增加,在压机将容器内筒压入锥形外筒后,就使容器内筒承受一外压作用。

之,这些利用外部支承的容器,其最大允许压力将受到作用于内筒上的最大外压和外筒限制,实际应用中,还有不少困难。

第五节　各种筒体结构的比较

上面简要讨论了各种不同结构型式的筒体的设计理论、制造特点及其承载能力。正确选理设计筒体的结构是非常困难的,它必须建立在大量试验研究基础和精确的分析计算,不管何种结构型式,在决定它取舍时,很大程度取决于压力等级以及所选用材料的性

2-12 是各种筒体所能承受的最大工作压力,它假设各种结构的筒体其直径比均相同,应力均为 100000 lb/in² (即 7000 kg/cm²),并以 Tresca 屈服理论为依据。从图中,采用层间充压式或扇形块式的组合筒体其承载能力远比整体甚至比热套式、自增强

式高得多,所以在极高压力下,研制这些新型结构是相当必要的。从图中也可以看到采用100% 自增强处理的圆筒其承载能力将比整体筒增加一倍,当然自增强双层圆筒的承载能力比单层 100% 自增强圆筒还要高出约 30%,而使双层筒也要比单层整体筒的承载能力高出约 80%。因此,通常的超高压力,譬如说 1 万大气压力以下,选用自增强或者缩套型式的结构已足以解决问题。况且,自增强技术、缩套技术已是比较成熟的技术。

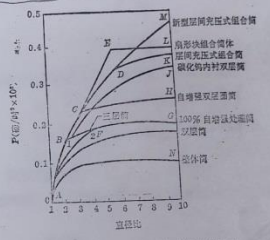


图 2-12　各种筒体承载能力的设计比较

对于整体筒(不存在初始应力),当直径比大于 3.5～4.0 时,用增大直径比的办法来提高弹性失效压力,收效是不大的。对于自增强筒体,当直径比大于 5～6 时,其得益也不大。而对于双层热套容器,当直径比大于 10 以后,不能得到最佳化设计。而三层筒体,或者层数继续增加时,在各种情况下(尤其是在直径比增大后)它的曲线特别接近自增强筒体情况,因此认为当使用中要求达到较高的弹性失效时,过大的增大直径比是意义不大的,与其增大直径比还不如采用高强度钢更有利。此外,从图中比较可知,在所有情况下,自增强处理的容器的弹性失效压力比双层热套容器大得多。因此,自增强技术值得在超高压容器设计中加以推广。

然而,正如本章一开头就述及的结构型式的选择是个复杂的问题,除了上述情况以外,还有诸如温度影响问题(热量传递、温差应力的影响等)、疲劳问题,更为主要的是制造厂的制造经验、制造水平、制造设备能力以及原材料的提供情况等等。所以,必须针对具体情况,合理的决定设计方案,十分慎重的设计超高压筒体的结构型式。

从以上超高压容器的设计规范可以明显看出，超高压容器结构有多种结构形式，并不是每一种都是唯一的结构形式，选择什么样的结构形式要考虑使用工况。而且上面截图第五节各种超高压容器结构比较，已明确说明多层缩套结构可以满足 10000 大气压（1000MPa）超高压容器已经是比较成熟的技术。至于单纯的缠绕结构适合在低压力等静压容器中使用。具体说明如下：

1、结构安全性的比较

缠绕结构高压容器就是在一个薄套容器上不断地缠绕预应力钢带，钢带强度高、韧性差，在缠绕过程中钢带会有焊接接头存在，增加缺陷隐患，钢带层间是一个不连续体，一旦钢带发生断裂，存在失控风险和很大的安全隐患。而多层套合结构超高压容器采用三层特钢结构热缩套合而成一个完整连续体，利用热胀冷缩的原理使容器各层之间形成均匀的预应力，使各层之间相互约束，即使内层发生疲劳破坏，加压过程中会发生层间泄露预警，不会发生整体容器的坍塌意外事故，可确保容器在高压下运行的安全可靠。

2、维修维护性的比较

等静压机中的超高压容器是等静压机的主要承压核心部件，一旦损坏价格昂贵。采用缠绕结构的等静压容器一旦发生质量问题，不可修复，需要重新制造新的等静压容器，会给客户和使用者造成很大的经济损失。而多层套合结构的等静压容器这种复合结构，具有可修复重复使用的功能，即材料的疲劳破坏一般都会发生在容器的内套，一旦容器内套发生层间泄露预警，说明容器内套有问题，整个容器只是更换薄内套，为使用者大大节省了更换整个容器的成本。

为确保目前高压力高温度等静压机的安全可靠运行，可以采用多层套合结构+缠绕结构进行等静压容器的创新性设计，进一步筑牢等静压机运行的安全等级，为等静压机长期运行提供安全屏障。