一种改进的换热器管束封堵系统

1996 年 6 月在 EPRI BOP 大会上发表

Gerald M. Wolf
Davis-Besse 核电站
Toledo Edison Co.
5501 North State Route 2
Oak Harbor, OH 43449-9760

Robert B. Adams
Expansion Seal Technologies
334 Godshall Drive
Harleysville, PA 19438-2008

摘要

通过大量的技术分析和一套综合试验方案确定了一种改进的管道封堵系统的重要参数和更改。新的封堵系统是专门为了在高压换热器中的严酷工作条件下成功发挥性能而设计的。这种新系统有两个重要组成部分。第一个是改进了卡紧和密封功能的新堵头。第二个是为了成功安装堵头而对管道进行准备和尺寸调整的简单过程。

依靠电子测量和计算机记录手段对技术分析和试验提供了辅助。试验系统利用高温炉、带式加热器产生热循环效应、振动和冲击，高压系统能够产生超过 20,000 psi 的压力。接受试验的堵头数量大大超过 1000 个。

在 Davis-Besse 核电站取得的经验表明，新一代封堵系统的成本显著低于焊接堵头。在一个班次中可以安装超过 72 个这种新式堵头。相比之下，焊接堵头需要经验丰富的焊工来安装，而且在同样的时间里只能安装 15 个堵头。从其他发电站的记录来看，他们同样实现了相对于使用爆炸焊接堵头的成本节约。

引言

Davis-Besse 核能发电厂使用一个净装机容量为 874 兆瓦的 B&W PWR 反应堆发电，自 1978 年 7 月开始商业运行。这座由 Toledo Edison 拥有并运营的发电厂遇到了给水加热器泄漏的问题，这种问题在许多核能和化石能发电厂都很常见。该电厂最初认为焊接密封堵头是最好的永久性修理手段，尤其适合高压加热器。但是，焊接也是昂贵而费时的。在一个班次中只能焊接 15 个堵头。要想使焊接成功，除了焊接工作之外，还要花费时间进行认真准备，扩大和正确清洁管道。

在 1994 年，有人向 Davis-Besse 提出了另一种封堵解决方案。一种新的机械 式密封堵头设计 P2 Pop-A-Plug® 已经研制成功，它兼有焊接堵头的性能和安 装方便快捷的优点。这种堵头是由 EST Group, Inc. 的分支机构 Expansion Seal Technologies 制造的。这种新产品的特点之一就是简化的安装系统。当 DavisBesse 维护人员在 1994 年 10 月第一次使用 P2 堵头时，他们在一个班次中就安装了超过 72 个堵头。在这一次停机维修中共安装了 290 个堵头，总计节省 5,000 多美元。

背景

有许多不同的方法可以用来封堵泄漏的热交换器管束。其中既有爆炸堵头或焊钉之类的高成本选择，也有使用人造橡胶或膨胀金属密封的中等成本堵头，更有敲入管道的低成本锥形销。

爆炸堵头因为成本高昂，主要用于高压换热器。它们必须由具备爆炸物处理认证的专业人员来安装，通常只能通过承包商来实现。可能还需要获得许可。承包商必须谨慎地准备和清洁管道。爆炸堵头是套管形的，其中装填了炸药。清洁度非常重要，因为污染物会妨碍堵头和管道在爆炸中相互贴近至必要的程度，从而无法形成良好的结合。这种焊接并非熔焊，因为焊接过程中并未产生足以熔化金属的热量。它是两种材料被巨大的力量紧贴在一起而相互结合的结果。只要不存在污染物，焊点强度就会超过强度最弱的一种材料。套管状的外形非常重要，因为不同的材料会造成显著的不均匀膨胀，产生非常大的应

力，而这种外形可以释放掉这种应力。必须填充相邻的管道，以防管桥断裂和管道-管板连接处受损，除非管心距与管直径的比例超过 1.7 或 1.8。这是最昂贵的方法之一，因为不仅需要高成本的堵头，还需要高成本的认证技术人员来准备管道、保护周边管道和安全安装堵头。此外，换热器停机期间还需要支付高昂的公用事业费用。

将锥形销或套管塞焊接到管道也要求管道具有极高的清洁度，并且需要熟练的焊工来确保焊缝不泄漏。焊接造成的应力可能不会仅限于很小的区域，因为热量很容易传导到周边的金属。当熔融的金属凝固并收缩时，应力就会拉扯管桥和相邻的管道-管板连接处。这些应力会随着热量和熔融金属体积的增加而增大，并可能在焊接刚完成时或日后造成管桥或相邻管道受损。根据记录，在有些情况下，安装后看似密封的焊钉在日后会因为热循环扯开焊缝而开始泄漏。套管形状的焊接堵头则比较可靠，因为它们会释放焊缝处的应力。焊接堵头的安装成本和停机时间造成的经济损失都非常高。但是，许多专家仍然认为它们是最可靠的方法。

成本较低的人造橡胶密封无法保持严格密封，因为它们会在老化和换热器工作温度的影响下失去弹性。最廉价的方法是用锤子敲入锥形销，但它只能在管道末端起到密封作用。必须大力锤击锥形销，使管道末端变形，因为焊接或腐蚀造成的扭曲使管道绝不可能具备完美的平整边缘或圆形管孔。由于必要的管道变形使管桥或相邻管道密封都可能受损，日后可能需要代价高昂的修理。工作人员无法知道必须以多大的力度敲击销钉才能实现密封，同时又不损坏相邻管道。 此外，由于密封面近似于线接触，如果侧面被掉落的工具或敲偏的锤子打击，很容易发生松动。松动的销钉可能会突然向外迸射，击中毫无防备的维护人员。图 1 显示了迸射的销钉对一块 1/2 英寸厚的树脂玻璃板造成的损伤。这种情况可能发生在压力试验中，也可能因为管道中蓄积压力而引发。这种不安全的情况曾经不止一次造成严重伤害。欧洲业界已经禁止使用敲入锥形销的方法，在保护维护人员生命安全方面大大领先于美国。

还有一些中等成本的解决方案是使金属环在管道内部膨胀来实现密封。为此，可以通过将锥形销敲入金属环中使其膨胀。另一种方法是使用螺纹啮合使锥形销穿过金属环。这两种方法都是在敲入锥形销方法基础上的改进，因为它们是通过顶住管道内部实现密封的。但是，安装人员仍然可能因为用力过小而未能使堵头起到密封作用，或者因为用力过大而损坏相邻管道。

有一种堵头设计可以限制管板和相邻管道所受到的力，无论操作人员如何操作，都能保护它们免于受损。这是通过使用一个叫做分离块的张力限制元件而实现的，它会“弹出”并限制金属密封环顶住管道内壁的最大力量。图 2 展示了原版 PRP 系列 Pop-A-Plug®[1] 的设计。图中未显示的液压压头顶住堵头定位器，并将拉杆拉向右侧，从而使金属环膨胀，直至其紧贴管壁实现密封。在管桥或相邻管道可能受损之前，分离块就会在其横截面缩小处断裂。

但是，要想成功安装任何堵头，需要的不仅仅是避免管桥或相邻管道受损。早期的 PRP 系列 Pop-A-Plug® 设计有几个重要缺点。它的安装容限非常狭窄，只允许比管道小 0.007 到 0.016 英寸。因此经常因为堵头尺寸过小或尺寸过大而导致泄漏或弹出。它挤入管道的程度有限，这就限制了它承受压力的能力。需要使用大量的润滑剂来控制销钉和金属环之间的摩擦，这就带来了不必要的可变性。没有好的方法来准备或测量管道。

实施了大规模的研究、开发和试验计划，旨在通过改进 Pop-A-Plug® 的基本设计来获得更可靠的密封。由此产生了一种新的封堵系统，它既有操作简单的优点，又有出色的密封性能。开发目标是在高压换热器中以大大低于焊接或爆炸堵头的成本，获得可与之媲美的长期性能。

新型封堵系统的目标

理想的封堵系统的设计目标是：

1. 堵头必须在换热器的全寿命期间，在极为严苛的条件下表现出可靠的性能。
2. 堵头安装系统必须简单、快捷而可靠。不能对安装人员提出特种技能要求。工厂维护人员应该能够通过遵循一些简单的说明来轻松安装堵头。正确选择堵头尺寸的步骤必须简单且防呆。管道准备、尺寸调整和堵头安装应该只需要使用简单工具操作几分钟即可。
3. 无论操作员进行什么操作，堵头的安装都不能对相邻管道造成破坏。
4. 堵头必须对所有维护人员都安全。
5. 堵头的安装成本必须低于爆炸或焊接堵头。

安装问题和解决方案

任何封堵系统要解决的第一个问题都是堵头尺寸选择。任何已知的封堵系统都不具备“一种尺寸处处适用”的功能。如果堵头太小，就无法实现足够的膨胀来安装堵头，或者即使安装完毕，也会在很低的压力下泄漏或爆裂。基本上，我们必须使用能够嵌入准备好的管孔的最大堵头。每一种堵头都必须能够完美地适用于比可选堵头尺寸的级差更大的管道尺寸范围。

某些换热器会将不同尺寸或不同壁厚的管道集中在一个管束中。即使换热器中的所有管道都是同一种尺寸，它们的实际内径也可能因为多种原因而有显著差异。这些原因中最重要的一个是流体湍流在入口端造成的侵蚀。笔者曾经在一台用了 30 年的旧加热器中见到过高达 0.047 英寸的管壁侵蚀。其他因素包括管板孔的差异、因为滚轧而减少的管壁量和管道本身。如果根据文件上的管道尺寸来选择堵头尺寸，即使考虑到了滚轧的影响，也往往会导致使用尺寸过小的堵头，造成安装不正确。

因此，第一个要求就是安装系统必须方便安装人员准确测量判断要在准备好的管道中使用的堵头的正确尺寸。

第二个问题是堵头在管道中封堵瑕疵的能力。换热器管道通常有很多凹痕，并因为腐蚀和流体湍流而遭到严重侵蚀。管道内部可能不圆，而这又增加了密封的难度。在管道入口，由于较硬的焊点熔核受到侵蚀的速度比较软的管道慢，会发生焊缝凸出现象。这种凸出可能会妨碍安装人员使用正确尺寸的堵头。

如果不经过任何管道准备工作就安装，任何为紧贴管道内部密封而设计的堵头都不可能提供可靠的密封。必须修整管道瑕疵来获得良好的密封效果。但是，任何管道表面都不可能达到完美无缺。我们可以想象，通过施加更大的密封力，可以使管道或堵头变形，从而封堵所有表面缺陷。为什么我们不能使用更高的紧缩力来实现密封呢？换热器都配有很薄的管桥，这是为了降低尺寸和成本。因此，如果我们要防止管桥和相邻管道受损，就必须限制用于使堵头紧贴管道形成密封的力量。而这就要求我们正确地准备管道，使堵头密封所需的力量不至于损坏管桥或相邻管道。

总结一下我们了解到的知识：为了使安装成功，必须对管道进行准备以消除瑕疵，并且必须通过准确测量管道来确定正确的堵头尺寸。

如此看来，尺寸选择问题和管道准备问题是相辅相成的。如果我们先清除入口处的所有凸出部分，就可以使用一种非常简单的通止规来确定要使用的堵头的正确尺寸。正确的堵头尺寸是可以嵌入准备好的管孔的最大堵头。图 3 显示了一个通止规，其“通”端已插入管道中。“通”端的尺寸与相关的堵头相同。“止”端的尺寸就是再大一级的堵头的尺寸。因此，如果“通”端可以嵌入管道而“止”端不能嵌入，那么量规上标出的堵头尺寸就是可以嵌入管孔的最大堵头。或者，我们可以使用堵头本身来确定能够嵌入准备好的管孔的最大堵头。但是，使用堵头本身作为量规可能会损坏外部锯齿，影响密封效果。

“通止”概念比使用卡尺、卡规或分厘卡简单得多，因为使用后几种工具需要专业技能，通常只有具备机械师或检验员资格的人员才掌握。“通止”概念通过简单可靠地确定正确堵头尺寸而降低了要求。

图 4 中描绘了先前提到的管入口处的侵蚀问题。如果我们要准确测量管道内径，并且让正确尺寸的堵头能够通过变窄的入口，就必须清除这种凸出部分。使用锥形铰刀可以轻松清除凸出部分。因为这种铰刀呈锥形，所以只要与管道的夹角不大于铰刀角度的一半，就不会刮伤管道内壁。

准备管道内壁的理想方法是使用一种专门设计和制造的钢丝刷，它可以像翼形刀一样工作。这种钢丝刷是由动力钻机带动的。必须使它在管道中来回移动，以免在管道中造成锥形效果。试验表明这种钢丝刷可以实现多个重要目标。它们是：

1. 经过大约 30 秒的刷除，清除了足够的金属部分，将管道直径扩大到与刷子直径相差不超过千分之几的程度。
2. 刷子起到了消除所有失圆情况的作用。
3. 刷子消除了凹痕。
4. 刷子造成了带有脊状线的表面，可以使堵头和管道更好地卡紧。
5. 刷除操作很简单，任何人经过一点培训都能完成

要有效使用刷子，必须先使用锥形铰刀清除所有焊缝凸出部分，并选择正确的刷子。尺寸正确的刷子是在清除焊缝凸出部分之后直径大于管孔内径的最小刷子。如果使用更小的刷子，就不能方便地清除瑕疵。另一方面，如果使用更大的刷子，就很难插入管道中，而且刷毛会弯曲过度，难以起到翼形刀的作用。因此，过大的刷子的使用效果不如尺寸正确的刷子。第一个刷子可能无法清除所有管道瑕疵。如果曾经用来拔出锥形销或入口套管的钻头在管道中留下了很深的伤痕，这个问题就尤其严重。在这种情况下，刷除约 30 秒后，可以使用再大一级的刷子继续刷除，如此类推，直到清除所有管道瑕疵为止。

图 5 显示了管道尺寸随刷除时间的增加。在此试验开始时，刷子仅比管道大 0.010 英寸。随着材料被快速刷除，管孔接近了刷子尺寸，随后尺寸就只会缓慢增加。因此可以准确地将管孔调整到适合所用堵头的尺寸，但前提是使用正确尺寸的刷子。刷子能够有效发挥作用是因为刷毛比管道材料更硬，而且前提是刷毛没有过度弯曲。

图 6 显示了短时间内连续使用尺寸逐级加大的刷子进行刷除的结果，快速将管道内径增大了几个档次。

这种方法远比钻孔或使用可调节铰刀铰除要好。可调节铰刀是手动操作的，需要操作者非常小心地缓慢削除材料。因为这种工具是沿着整条刀槽进行切割的，而刀槽的直径不一定相同，所以很容易在管道中留下刮痕和凿痕，引发更大的问题。其他用来准备管道的刷子只能起到将管道磨光的作用，因为它们的构造并不适合作为翼形刀使用。

使用通止规和特制钢丝刷的操作过程使安装人员只需要极少的培训和技能就可轻松快捷地完成管道准备。图 5 和图 6 中的图表显示了清除材料的速度有多快。图 5 还显示了管道扩大的速度随着管孔尺寸接近刷子外径而达到极限。这是一个很重要的特点，因为刷子在调整管孔尺寸的过程中起到了钻机的作用。

改进后的新式堵头设计

我们已经在先前的讨论中看到，在正确选择堵头尺寸并正确准备管道之后，还必须使用一定的力量来可靠地密封管道中的缺陷，同时又不能损坏相邻管道。为了实现这个目标，我们必须能够使金属环膨胀，让它挤进所有剩余的管道瑕疵中。我们可

以使用图 7 中的试验装置来测量堵头挤进瑕疵和可靠密封的能力。这种装置使用 LVDT 测量销钉的冲程和作用到销钉上的力，使用压力传感器监测液压压头的压力。图 8 中描绘了取自实际试验的典型数据。
图 8a 显示了一个堵头被安装在内径比初始堵头外径大得多的管道中的情况，其中有四个不同的区间。第一和第二个区间显示力量随着金属环的初始弹性形变和从弹性形变过渡到总塑性形变而快速上升。第三个区间显示了在金属环外径首次接触管道内壁前，使金属环塑性膨胀所需力量的增速较缓。第四个区间是最重要的一个，因为它显示了销钉从金属环首次接触管道内壁到分离块“弹出”为止的行程。第四个区间行程之所以非常重要，是因为它显示了金属环的外锯齿被挤压贴紧管壁的程度。金属环被挤压到管壁的程度随着第四个区间中的行程而增加。很明显，第三个区间中的力量水平必须够低，才能获得最大的第四区间行程和相应的挤压。

图 8b 显示了管道内径与堵头外径的初始尺寸相近时的情况。在这种情况下，金属环在首次接触管道前需要经过的第三区间销钉行程比图 8a 短得多。同样，如果我们想在尺寸相近的管道和更大的管道中都实现相同的挤压效果，那么第三区间的力量相对于分离力就必须很低。

图 9 显示了获得专利的 P2 堵头[2]设计，我们发现图中所示的内锯齿可以降低第三区间的力。这种设计也改变了金属环的形状，使它起到扫除销钉上所有碎片的作用，从而防止其卡在销钉和金属环之间。这样就防止了销钉和金属环之间发生摩损。

最后一个性能量度是堵头的密封能力和承受高压的能力。对数以千计的堵头进行了试验，在高达 10,000 psi 的车间气压和水压下，没有发生一次泄漏。还使用图 10 中的试验设置，通过可检测低达 10^{-10} cc/sec 的泄漏率的 Edwards 氦检漏仪对这种设计的堵头进行了试验。这种试验设置能够测量通过堵头的真实泄漏率。共有 30 个堵头以这种方式接受了试验，在使用最灵敏的检漏仪刻度的情况下，全都没有检测到任何泄漏迹象。

我们还按照规程进行了其他试验，增加各堵头所受压力，直至其从管道弹出为止。该试验是使用图 11 所示设置进行的，压力上限定为略高于 20,000 psi。图 12 显示了碳钢堵头配合通过电动刷除准备的试样的试验结果。图 12 显示了在多种常见尺寸高压换热器管道中的性能，以及堵头外径和管道内径之间的初始间隙的影响。从这些数据可以看出，在大大超出通止规系统允许的 0.020 尺寸范围的情况下，这些堵头性能良好。如果量规的“止”端不能进入管道，就表明管道只比堵头大了不到 0.020 英寸。如果用户忽略了测量管道的步骤，不小心安装了尺寸过小的堵头，堵头定位器将会卡住销钉，或者分离块将会在分离箍的错误一侧断裂。图 13 显示了这两种现象。这两种现象发生任何一种都是在提醒用户，安装的堵头尺寸过小。在这种情况下，必须拔出尺寸过小的堵头，然后正确安装更大的堵头。

在钻有失圆度为 0.012 到 0.016 英寸的椭圆孔的试样中对堵头进行了试验，并与在圆形孔中进行的类似安装做了比较。没有出现泄漏的迹象。图 14 显示了爆裂试验的结果。这张图表说明，爆裂压力并未受到失圆情况的影响。此外还在刷除前失圆度为 0.0150 英寸的孔上使用动力刷进行了试验，结果表明，在 10 秒钟的刷除之后，失圆度降低到了 0.002 英寸。

对图 15 中显示的管板模型进行了试验，以确定安装 P2 堵头对相邻管道施加的应力。管板设计符合 TEMA class R 标准，管桥厚度为 0.180 英寸。管道滚轧为六个外孔，对管道-管板连接处使用 Expansion Seal Technologies G-650 试验枪进行了真空泄漏试验。所有滚轧连接都被判定为在刚滚轧后是无泄漏的。滚轧管道内径的尺寸测量结果是使用电子卡尺在泄漏测试之后测量和记录的。在面向中心孔周围管桥最狭窄部分的管板安装了应变计以测量圆周应力。一个 P2 堵头安装在没有安装管道的中心管板孔中。安装堵头后对六个外管内径的测量结果显示，没有任何超出测量系统可再现能力（优于 0.0005 英寸）的永久形变迹象。测得的因安装堵头而产生的应变小于管道滚轧为管板模型的外孔之一时所产生应变的 30%。此外，在安装堵头后对所有管道-管板连接处进行的真空泄漏试验证明，这些连接处都没有泄漏。

对新设计的堵头进行的最重要试验之一是热循环试验。试验装置见图 16。一个 21/2 英寸直径的试样被一个带式加热器环绕。试验堵头安装在试样中央，堵头的一侧暴露在水压下。通过热电偶和压力传感器监测了水温和压力。带式加热器进行了开关循环，堵头后面的水温先是下降到 400°F，然后又升至 500°F。与此同时，堵头后面的积水压力在大约 5000 到 6000 psi 之间循环。温度上升和下降的速度分别是 750°F/时和 240°F/时。图 17 显示了一部分温度和压力读数。热力瞬变要比任何基本负荷换热器中可能发生的情况更严重，因为小试样的外壁在循环的加热段中经历了 1100°F 的高温。该试验通过目视方法监测堵头的泄漏迹象，并且经历了超过 300 次循环。可以认为这相当于基本负荷装置运行十个月的情况。在整个试验过程中，没有观测到任何泄漏迹象，试验结束时的爆裂压力超过 20,000 psi。有必要也提一下，采用早期设计的机械堵头在不到 50 次循环后就出现了泄漏。

使用图 11 中的设置对堵头进行了压力循环试验，试验中堵头经受了超过 100 次 0 到 7000 psi 的循环。通过手动操作截流阀和放泄阀，使压力在大气压和 7000 psi 之间循环。这个过程是快速进行的，从而产生了图 18 中所显示的压力变化。对堵头进行了监测，没有观察到任何泄漏迹象。结束时的爆裂试验表明卡紧力没有下降，因为爆裂压力超过 19,120 psi。

按图 16 中的设置进行了在 650°F 下长期工作的试验，按 1 小时、10 小时和 100 小时的间隔对 24 个堵头进行了爆裂测试。因为已知蠕变与在这些负荷条件下的时间成对数关系，所以每一时段的蠕变量是相同的。也就是说，第 1 个小时的蠕变量与从第 1 个小时到第 10 个小时的蠕变量相同，也等同于从第 10 个小时到第 100 个小时的蠕变量，以此类推。如果有任何可测量的蠕变速度，可以照此方式外推到更长时段。如果堵头在这些温度下发生蠕变，那么其爆裂压力将会降低，但是从图 19 的数据中看不到这一点。似乎在此温度下长期工作反而增加了堵头的保持力。

使用图 20 的试验设置进行了振动试验。堵头经受了频率为 120hz 的 3g 振动，同时承受的压力差为 7000 psi。经过 13 个小时的试验，没有出现泄漏迹象。虽然因为试验产生的噪声太大，而且对我们的供气源的要求也很高，所以试验的时间比较短，但重要的是堵头经过如此程度的振动之后，其爆裂压力没有出现显著下降。

现场经验

新设计的堵头在 1994 年 4 月首次安装在新泽西州南部一座化石能发电厂的高压换热器中。这些堵头直到今天仍然表现得完美无瑕。从这第一次现场试验开始，已经有数以千计的堵头安装在北美、欧洲和亚洲的换热器中，全都取得了优异的结果。这些新设计的堵头还被安装在超临界发电厂中。

Davis-Besse 核能发电站的换热器是由 Westinghouse Electric Corporation 制造的，工作温度为 500°F，工作压力为 1500 psi。根据 Davis-Besse 的计算，与使用焊接堵头相比，他们首批安装的 290 个 P2 堵头节省了 5,000 多美元。

Pop-A-Plugs® 的另一些用户也实现了显著的成本节约。 Navajo 发电站 Salt River 项目对安装 Pop-A-Plugs® 和爆炸堵头的成本进行了对比研究[3]。他们通过安装 200 个 Pop-A-Plugs® 取代爆炸堵头，节省了 34,000 美元。此外，他们还减少了6.5 天的停机时间，并避免了换热器受损。

在 Santee Cooper 负责给水加热器和冷凝器的主任工程师 Levon Strickland 说，使用爆炸堵头时，每次事故的平均成本是 6000 美元[4]。据他判断，通过使用 Pop-A-Plug，每次泄漏事故可以节省 4500 到 5000 美元。节省率超过 75%。Santee Cooper 是南卡罗来纳州最大的化石能发电厂。

PECO Energy 的 Eddystone 发电站在 1995 年 3 月的一次停工中安装了 14 个 Pop-A-Plug® 取代他们通常使用的爆炸堵头[5]。据 PECO 的维护规划员 John Hugues 计算，仅 7 根管道就节省了 3,300 美元。

鸣谢

许多为 P2 Pop-A-Plug 的开发作出重要贡献的同仁。Eugene Cunningham 贡献了关键的内锯齿创意，解决了一些困难的问题。Jim Berneski 提出了许多创意，并改进了管道准备方法。Henry Brandenburger 也对这个项目作出了重要的贡献。Glenn Craig 和 Jim Berneski 做了大量的试验工作。

参考

1. 美国专利号 4,425,943
2. 美国专利号 5,437,310
3. Navajo 发电站内部文件
4. Power Engineering 1993 年 9 月号的“现场说明”
5. Eddystone 发电站内部备忘录，日期为 95/3/29

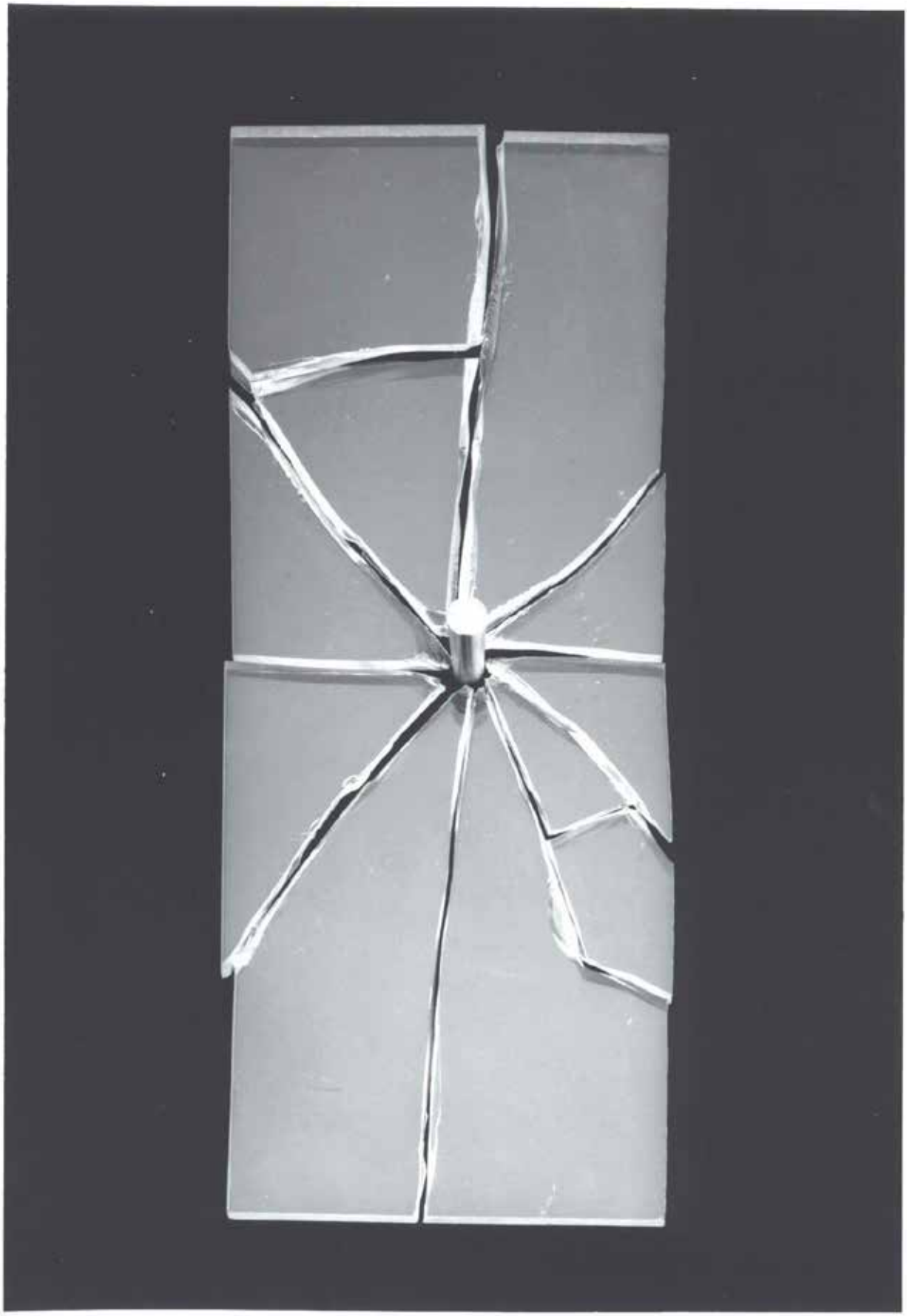

图 1

旧式 PRP POP-A-PLUG

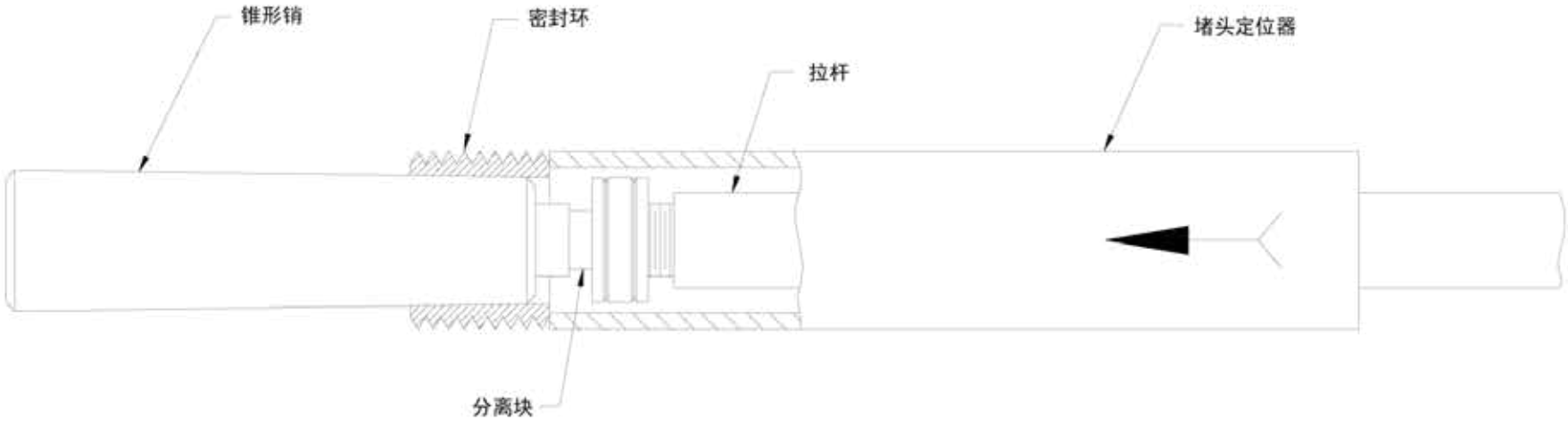

图 2

确定管道尺寸的简单方法

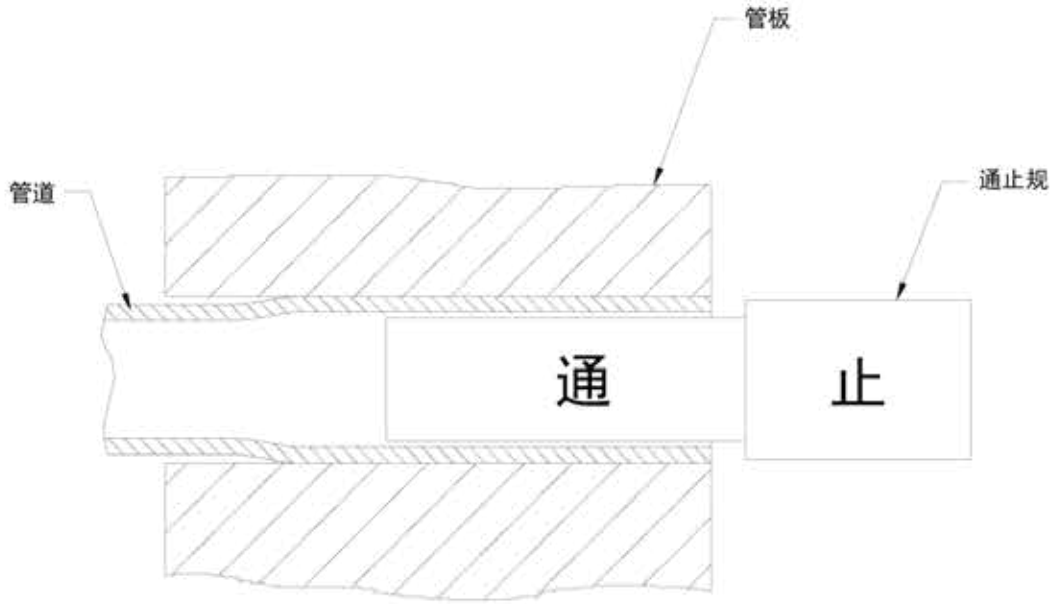

图 3

管入口侵蚀

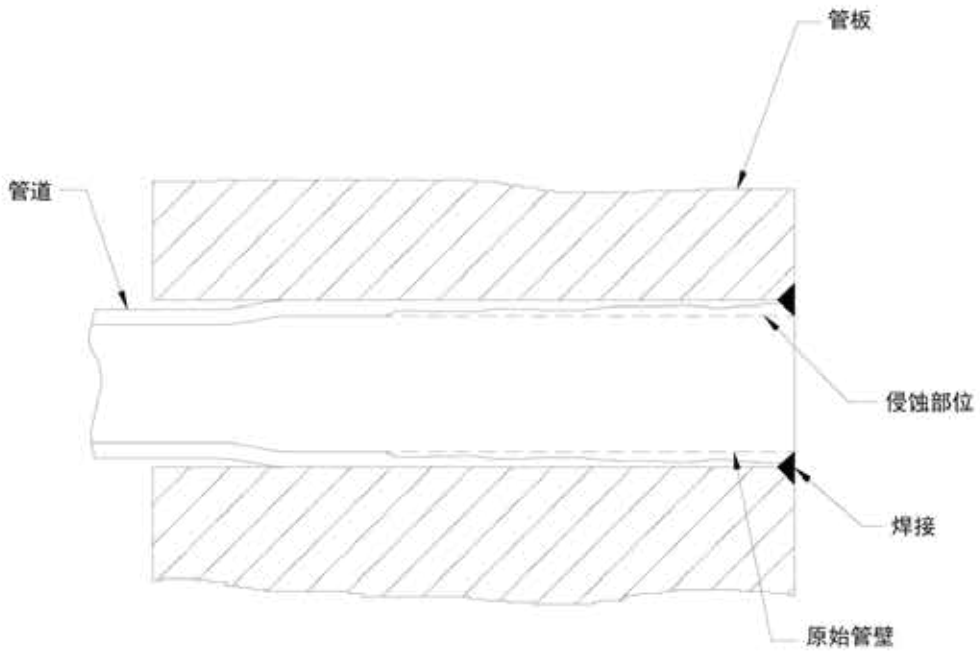

图 4

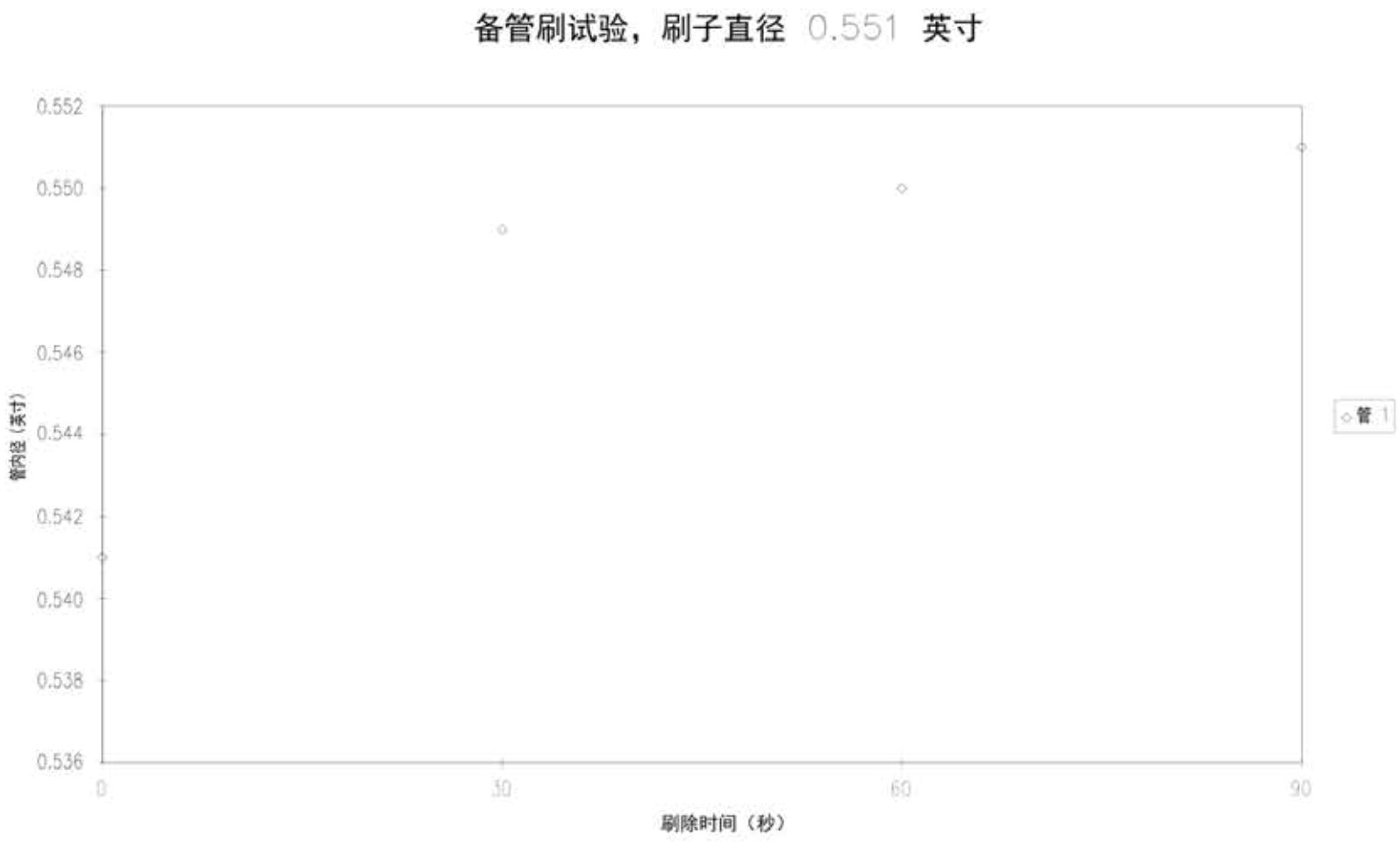
备管刷试验，刷子直径 0.551 英寸
0.552
0.550
0.548
0.546
0.544
0.542
0.540
0.538
0.536
管内径（英寸）
0
30
60
90
刷除时间（秒）
管 1

图 5

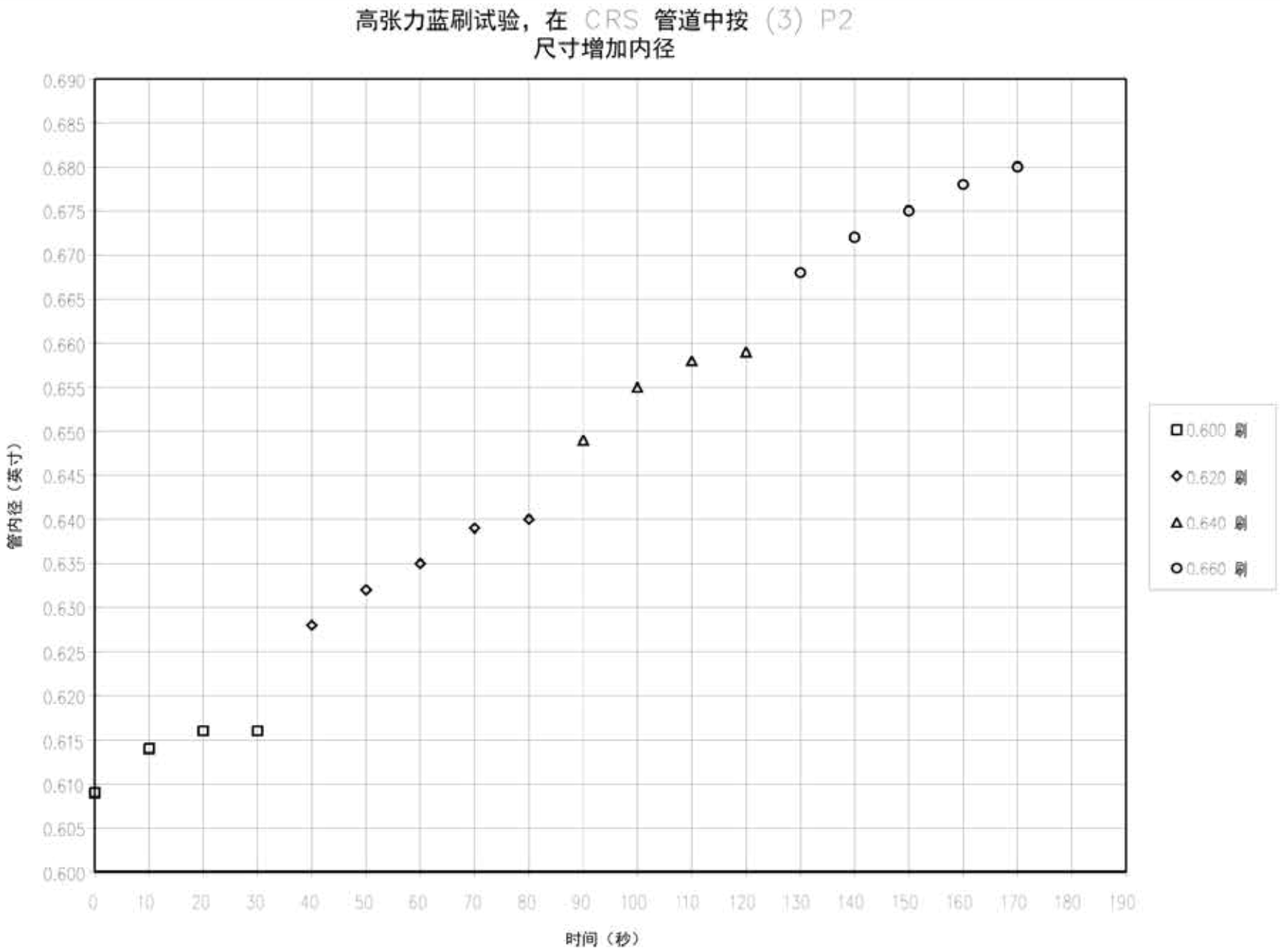
高张力蓝刷试验，在 CRS 管道中按 (3) P2
尺寸增加内径
管内径（英寸）
0.690
0.685
0.680
0.675
0.670
0.665
0.660
0.655
0.650
0.645
0.640
0.635
0.630
0.625
0.620
0.615
0.610
0.605
0.600
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
190
时间（秒）
0.600 刷
0.620 刷
0.640 刷
0.660 刷

图 6

研制试验装置

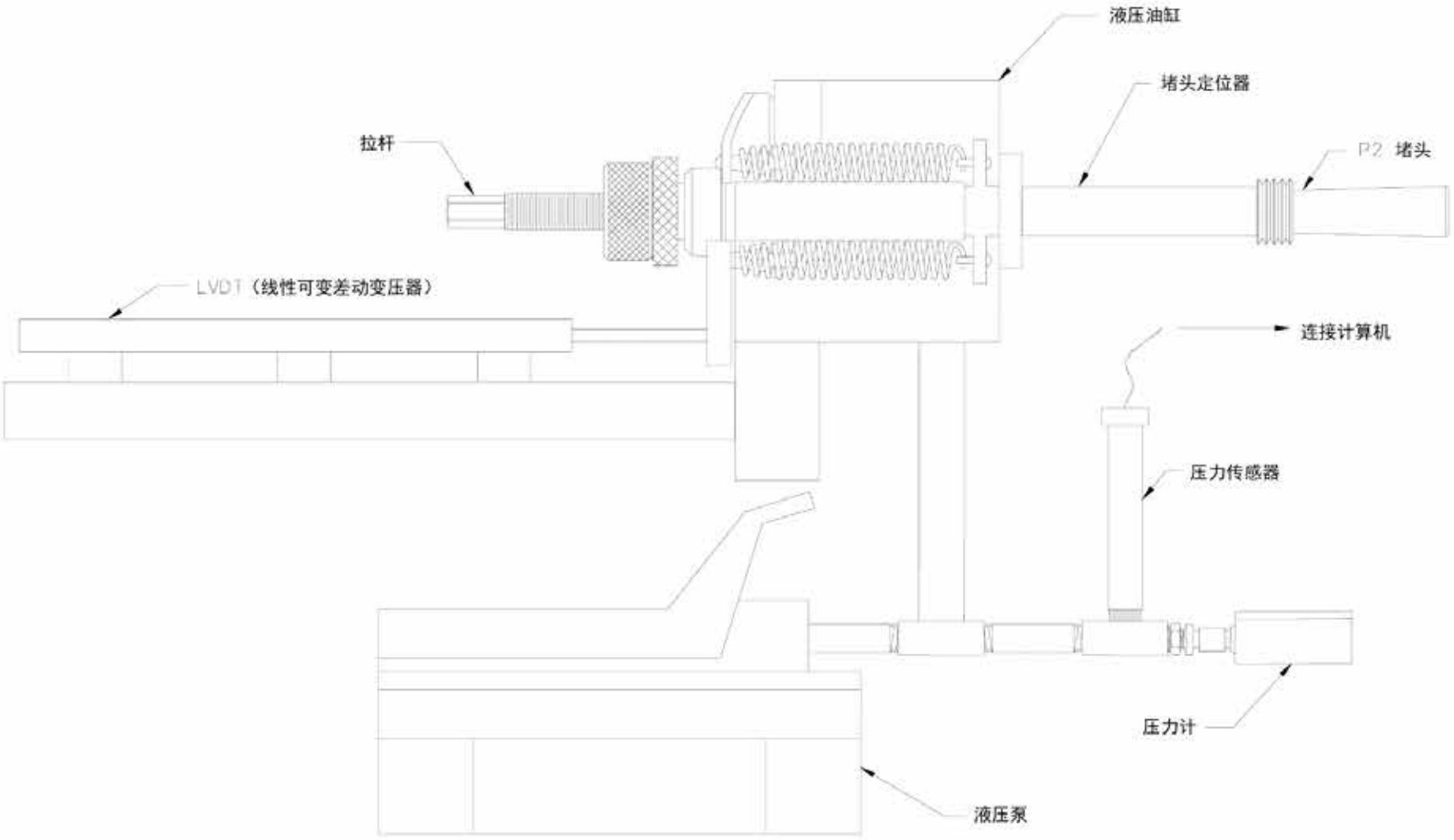

图 7

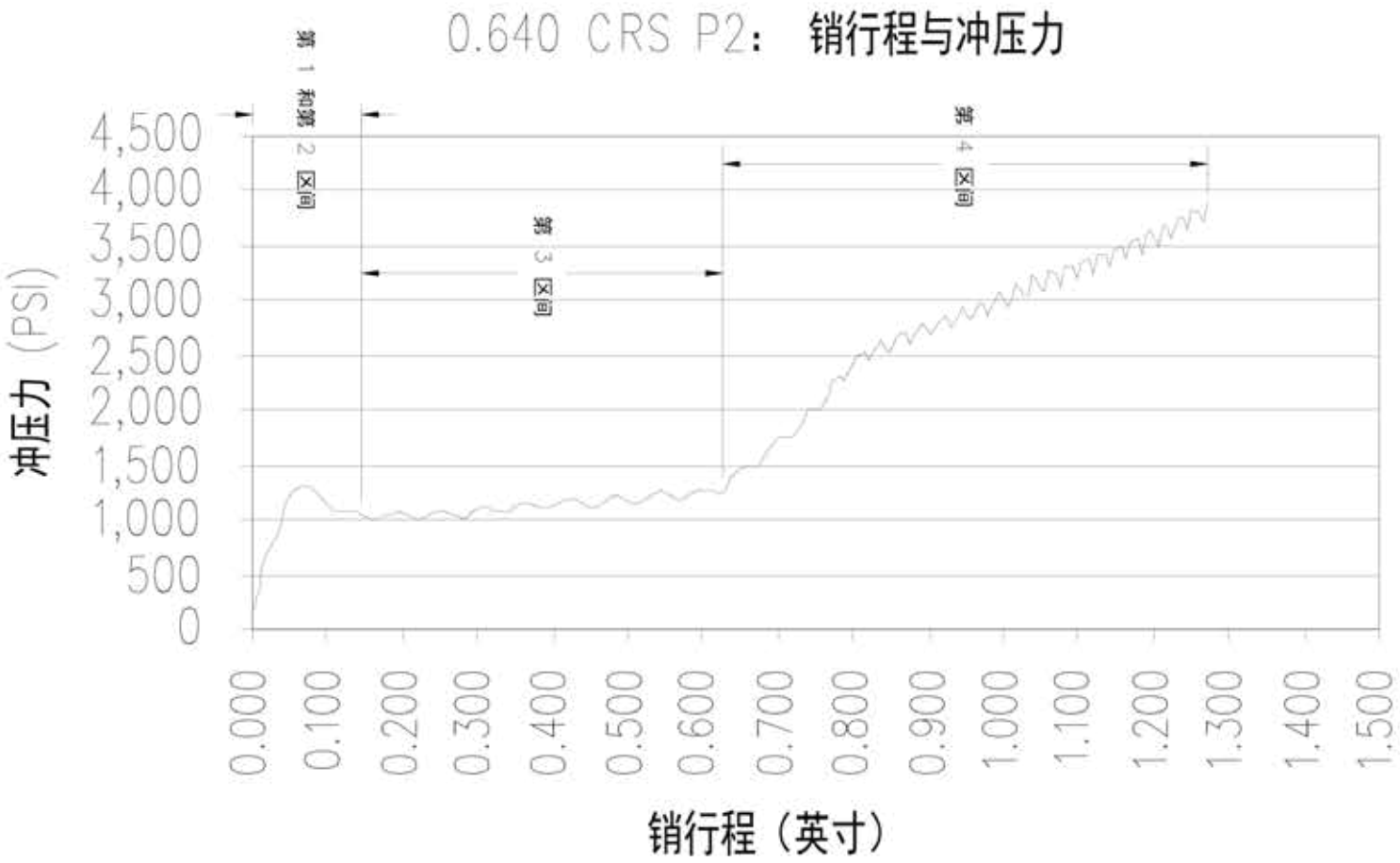
0.640 CRS P2： 销行程与冲压力
冲压力（PSI）
4,500
4,000
3,500
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
500
0
第 1 和第 2 区间
第 3 区间
第 4 区间
0.000
0.100
0.200
0.300
0.400
0.500
0.600
0.700
0.800
0.900
1.000
1.100
1.200
1.300
1.400
1.500
销行程（英寸）

图 8A

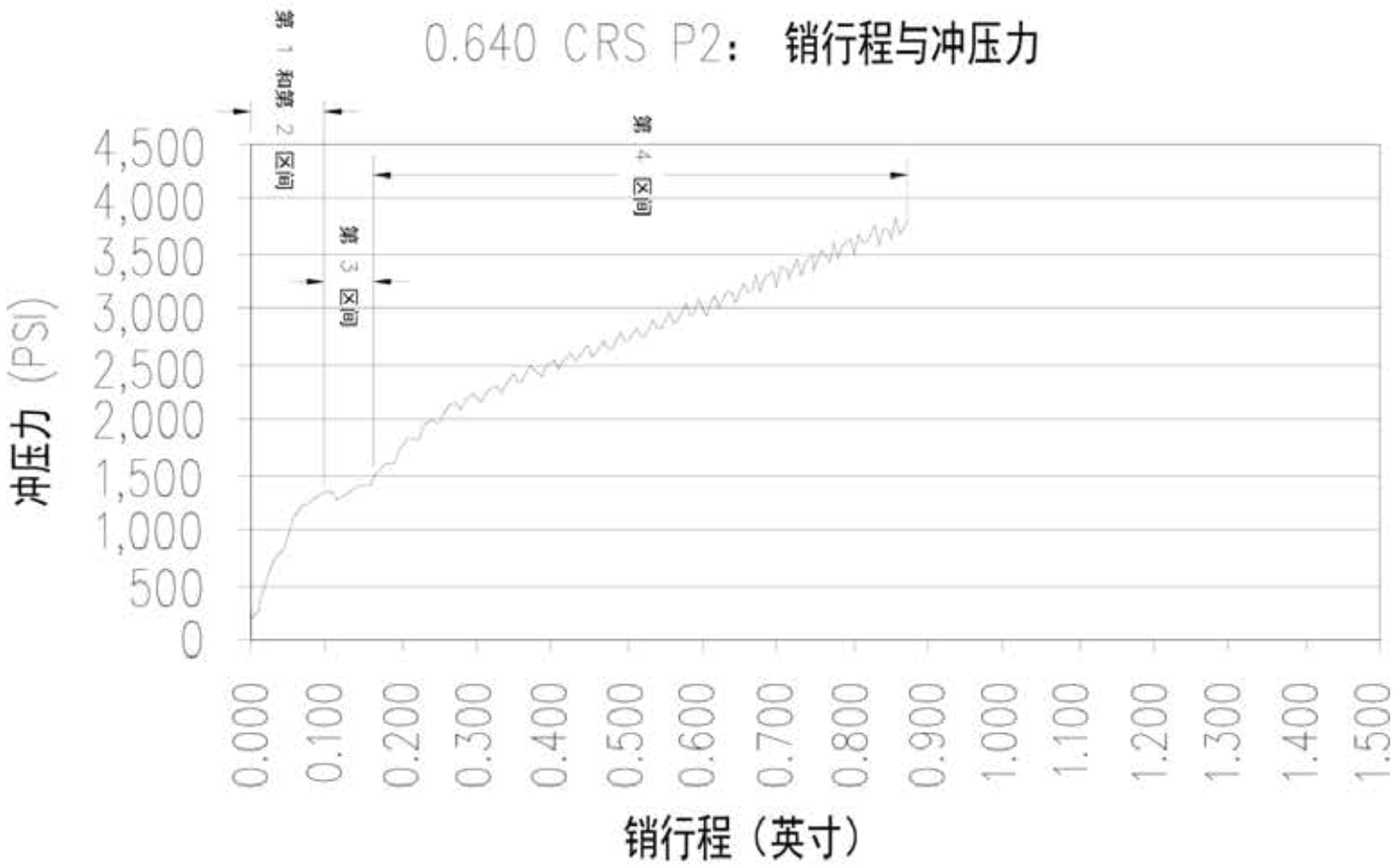
0.640 CRS P2： 销行程与冲压力
第 1 和第 2 区间
第 3 区间
第 4 区间
冲压力 (PSI)
4,500
4,000
3,500
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
500
0
0.000
0.100
0.200
0.300
0.400
0.500
0.600
0.700
0.800
0.900
1.000
1.100
1.200
1.300
1.400
1.500
销行程（英寸）

图 8B

新式 P2 POP-A-PLUG 设计

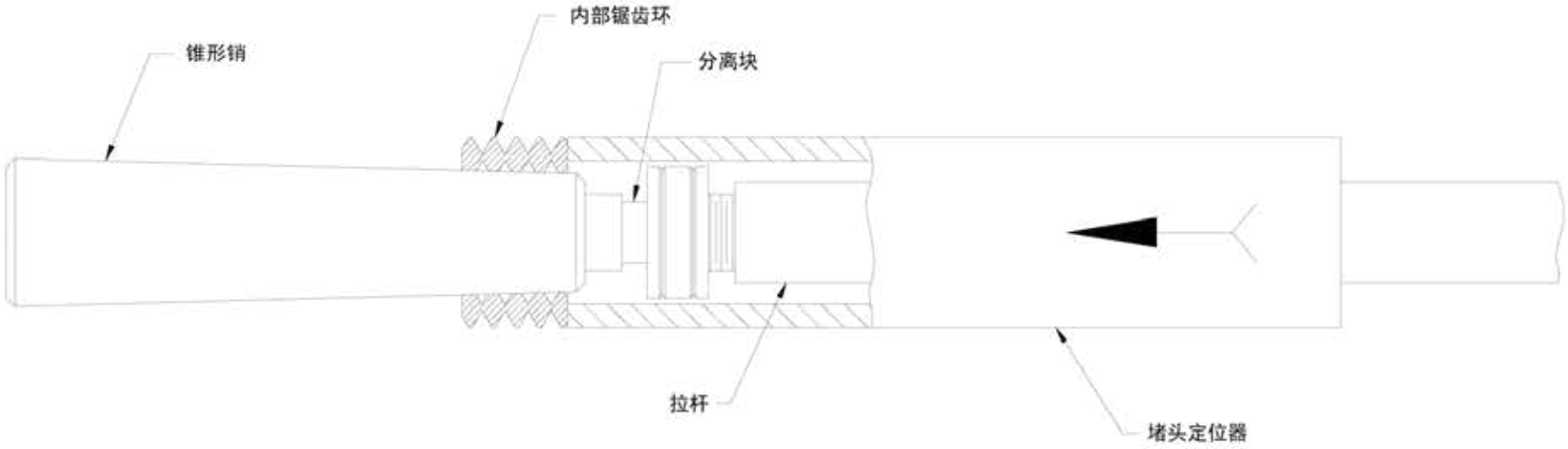

图 9

氦气泄漏试验设置

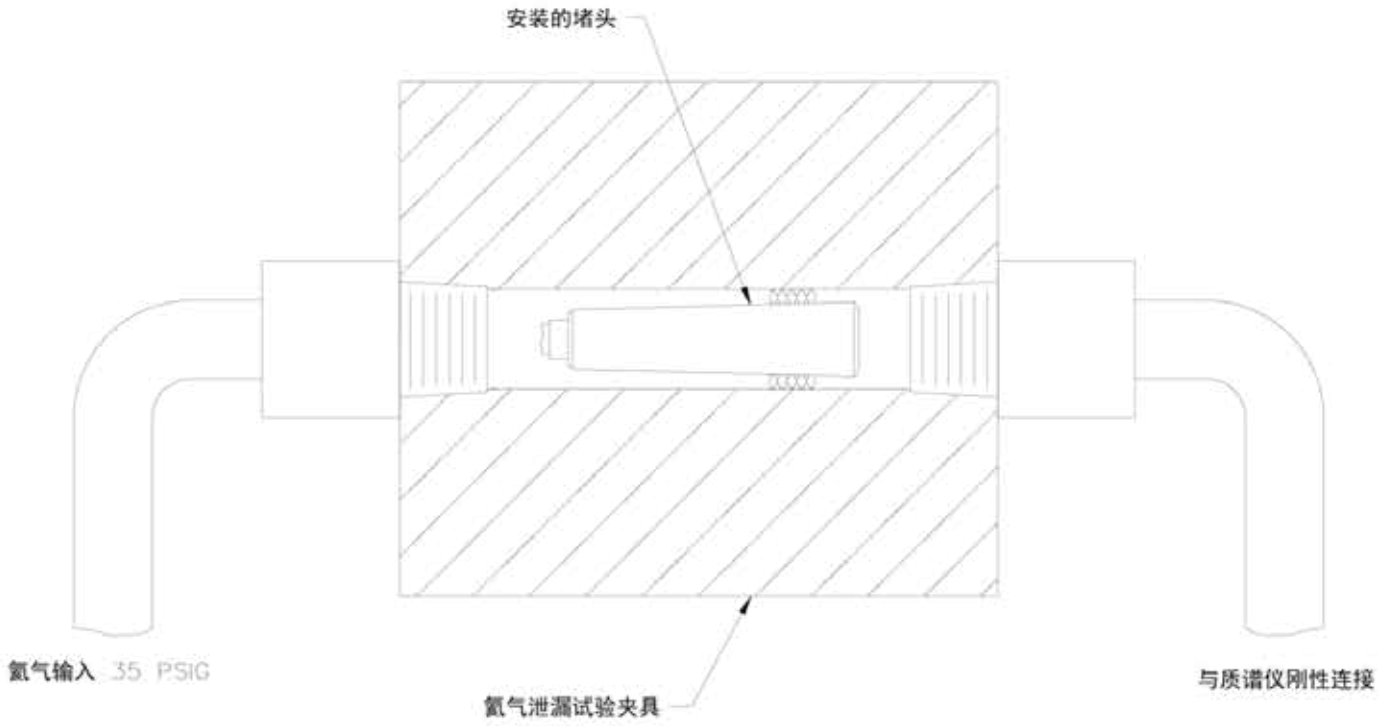

图 10

爆裂试验设置

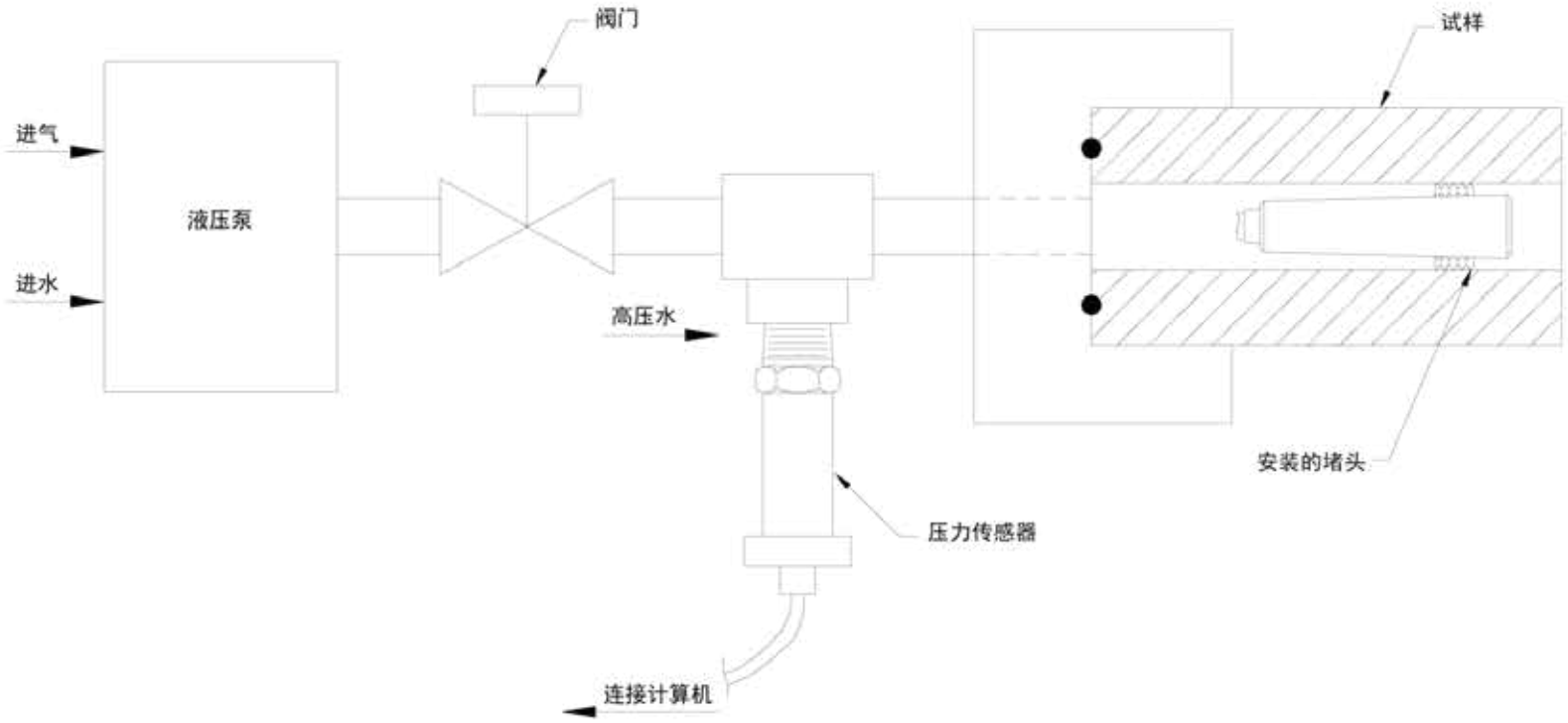

图 11

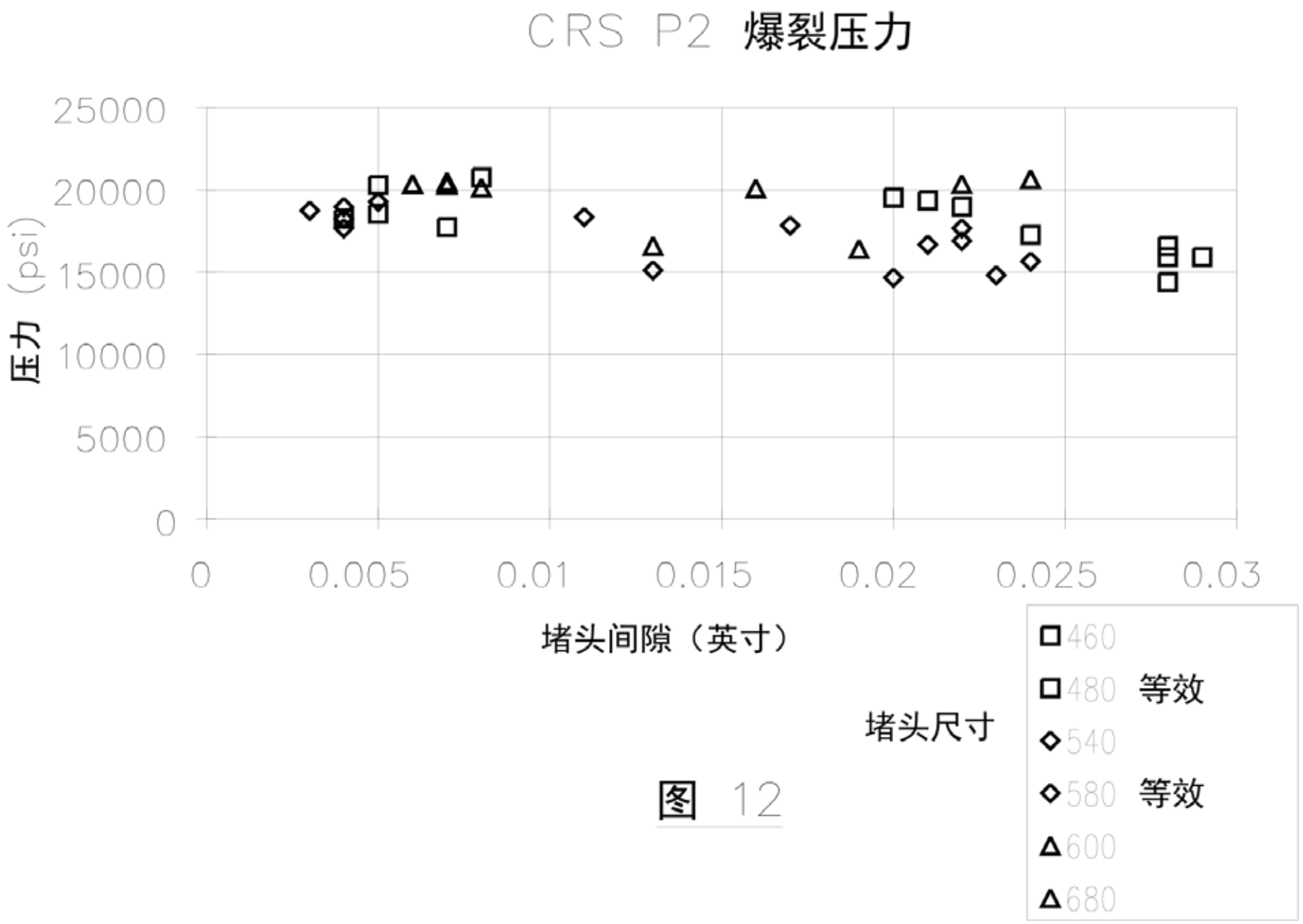
CRS P2 爆裂压力
25000
20000
15000
10000
5000
0
压力 (psi)
0
0.005
0.01
0.015
0.02
0.025
0.03
堵头间隙（英寸）
460
480 等效
540
580 等效
600
680
堵头尺寸

图 12

尺寸过小的堵头的安装

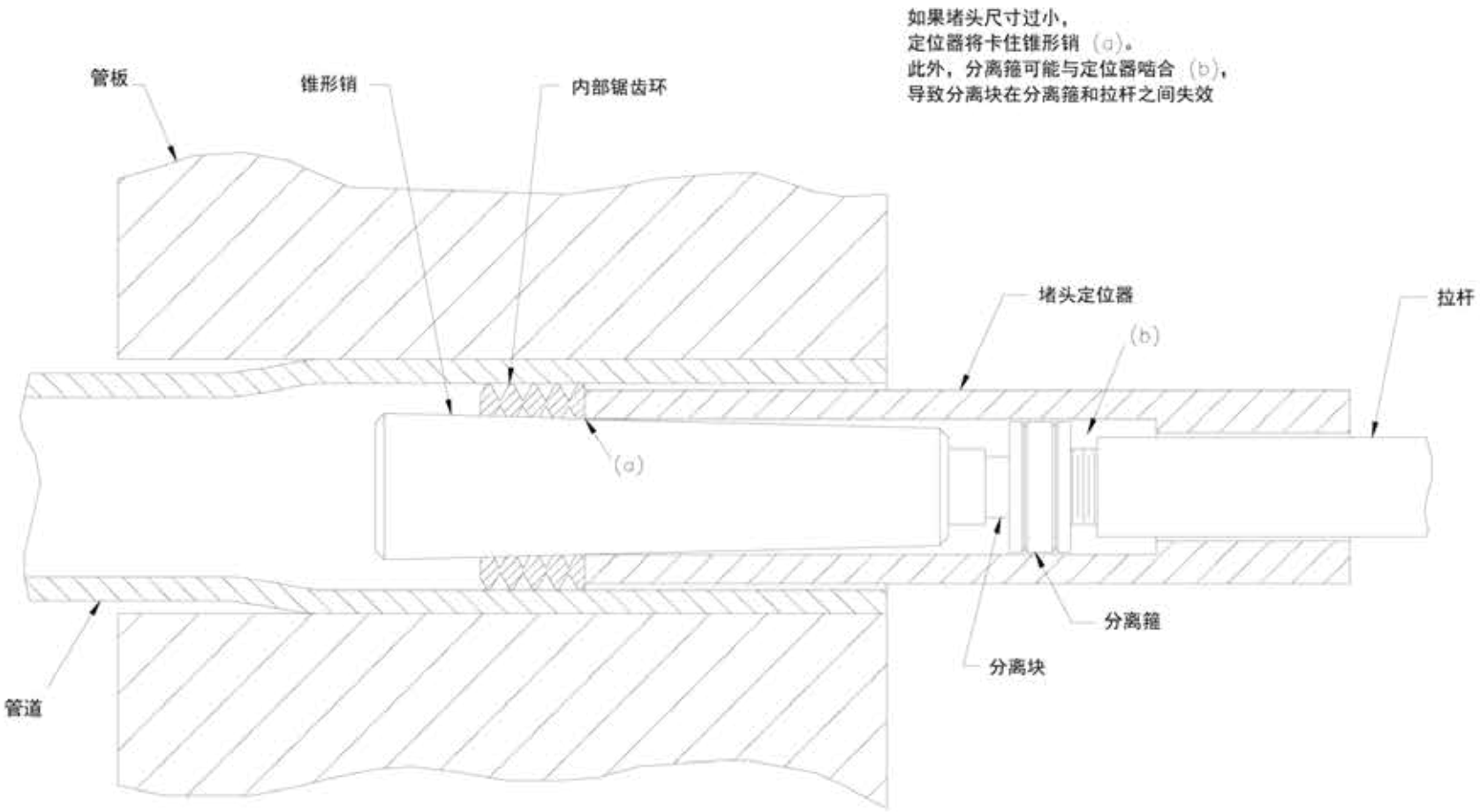

图 13

0.540 CRS P2 不圆管试验
爆裂压力 (PSI)
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0.548
0.550
0.552
0.554
0.556
0.558
管道平均内径（英寸）
不圆度尺寸显示在图例中
0.016
0.013
0.012
0.000

图 14

符合 TEMA CLASS R 的管板模型

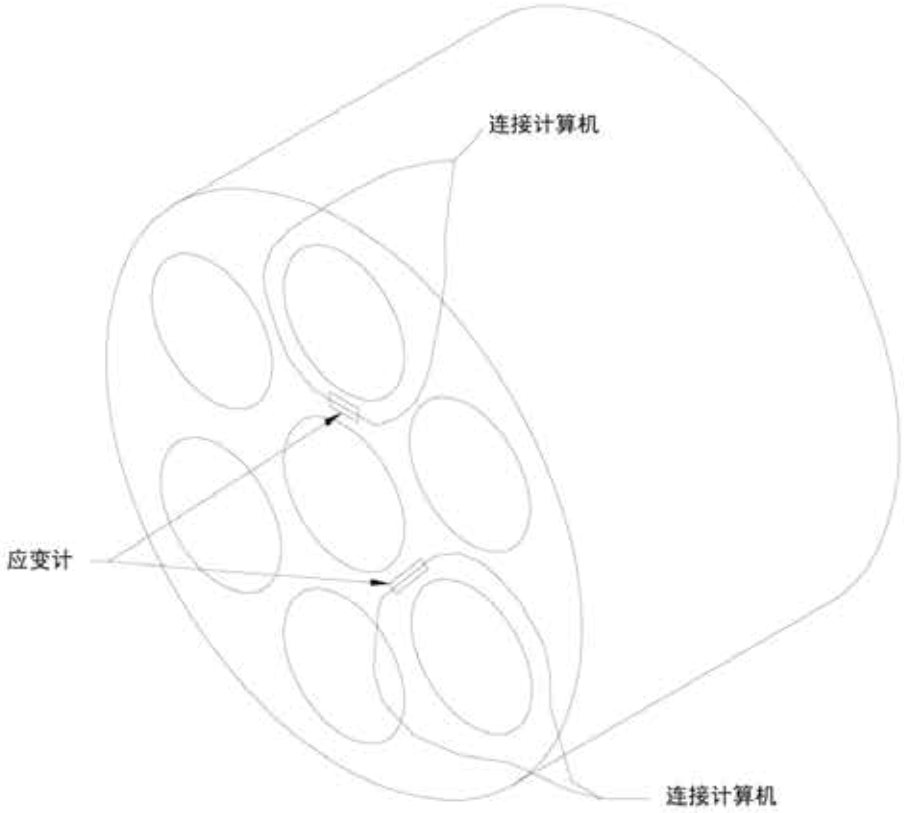

图 15

热循环试验设置

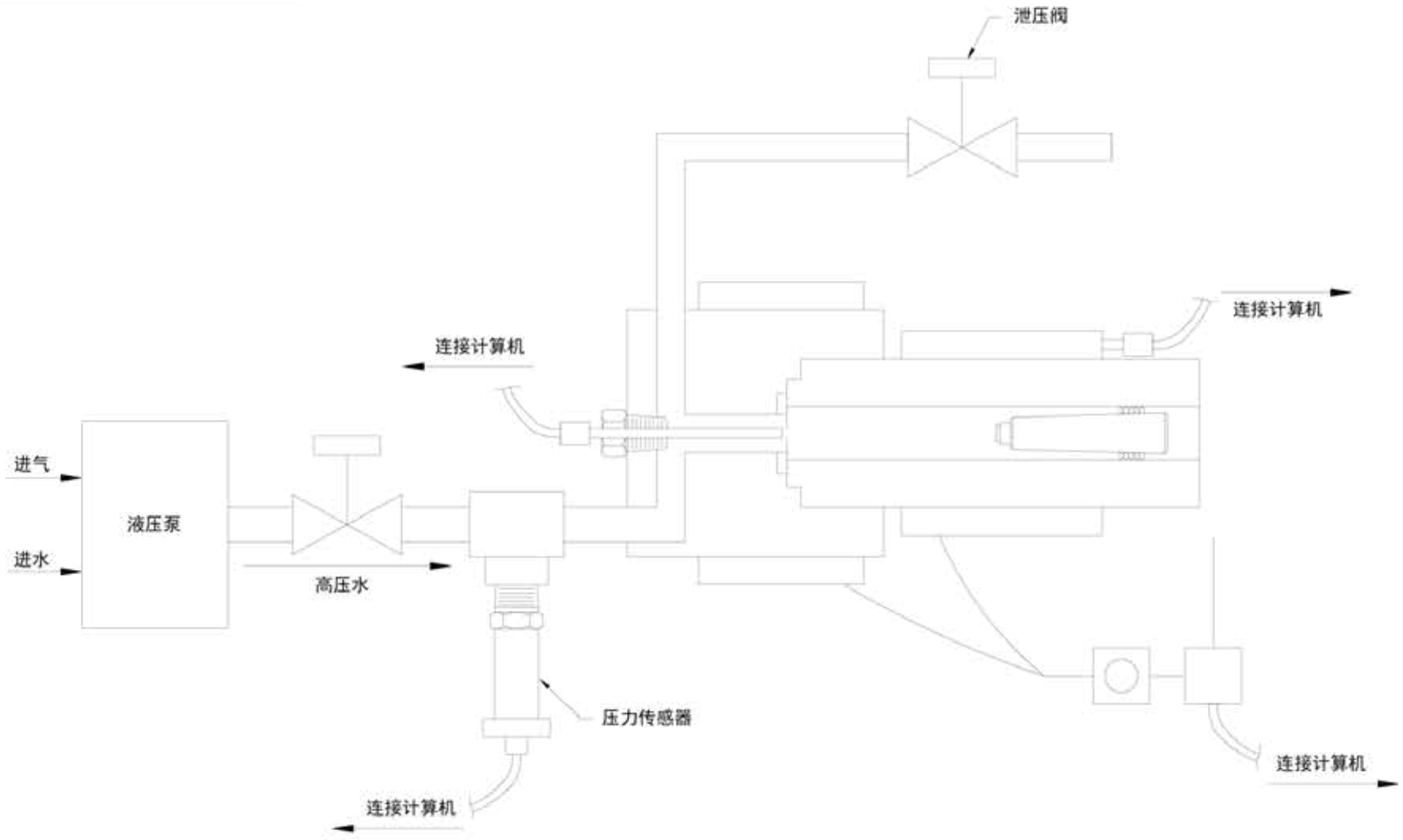

图 16

热循环试验： PSI 和温度随时间的变化 0.600 CRS P2 内径=0.625 94/8/12
压力 (PSI)
7,000
6,500
6,000
5,500
5,000
4,500
4,000
温度（华氏度）
600
500
400
300
200
100
温度（华氏度）
1,200
1,000
800
600
400
200
上午 8:55
上午 11:19
下午 1:43
下午 4:07
下午 6:31
下午 8:55
下午 11:19
上午 1:43
上午 4:07
上午 6:31
上午 8:55
时间

图 17

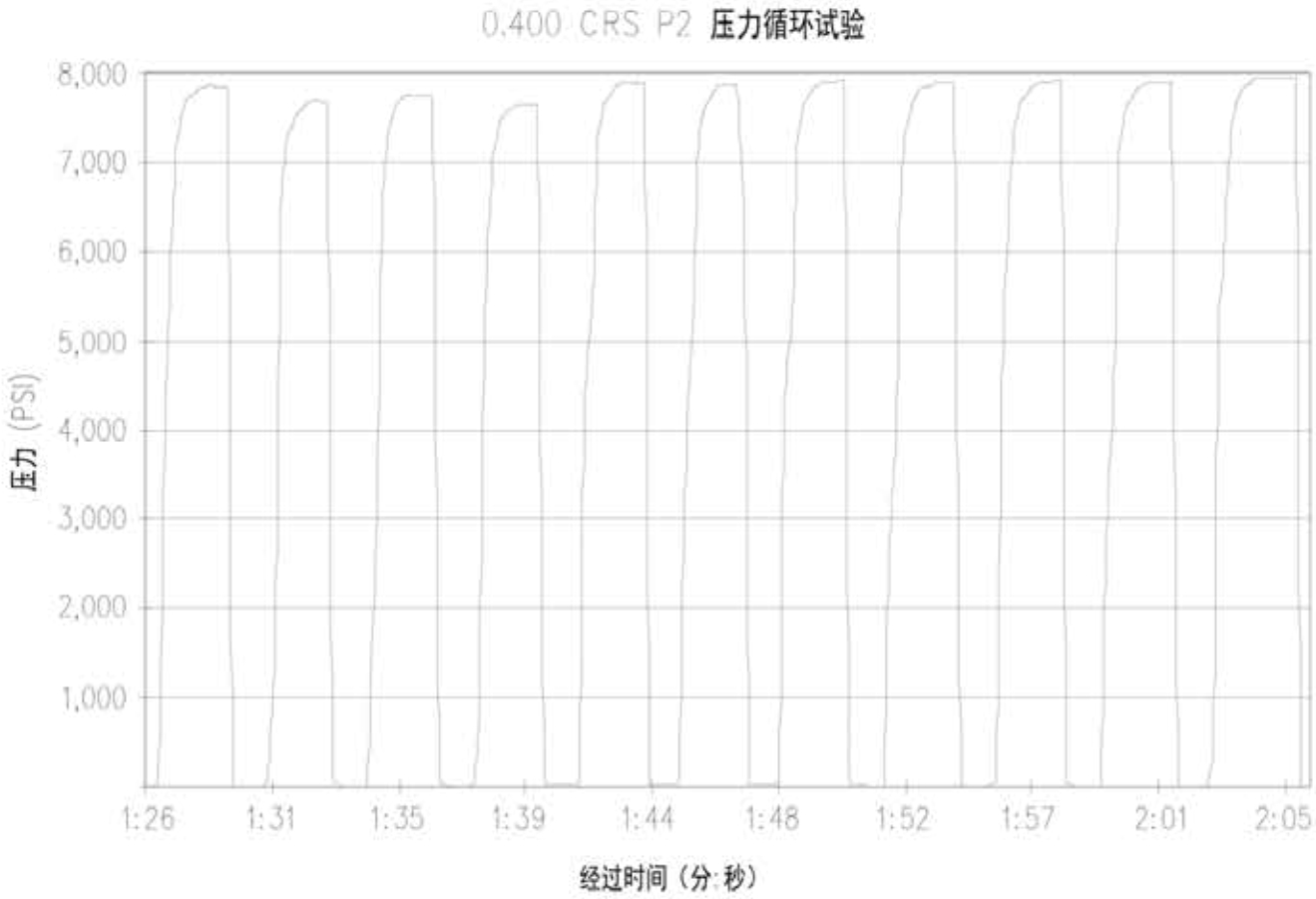
0.400 CRS P2 压力循环试验
8,000
7,000
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
压力 (PSI)
1:26
1:31
1:35
1:39
1:44
1:48
1:52
1:57
2:01
2:05
经过时间（分:秒）

图 18

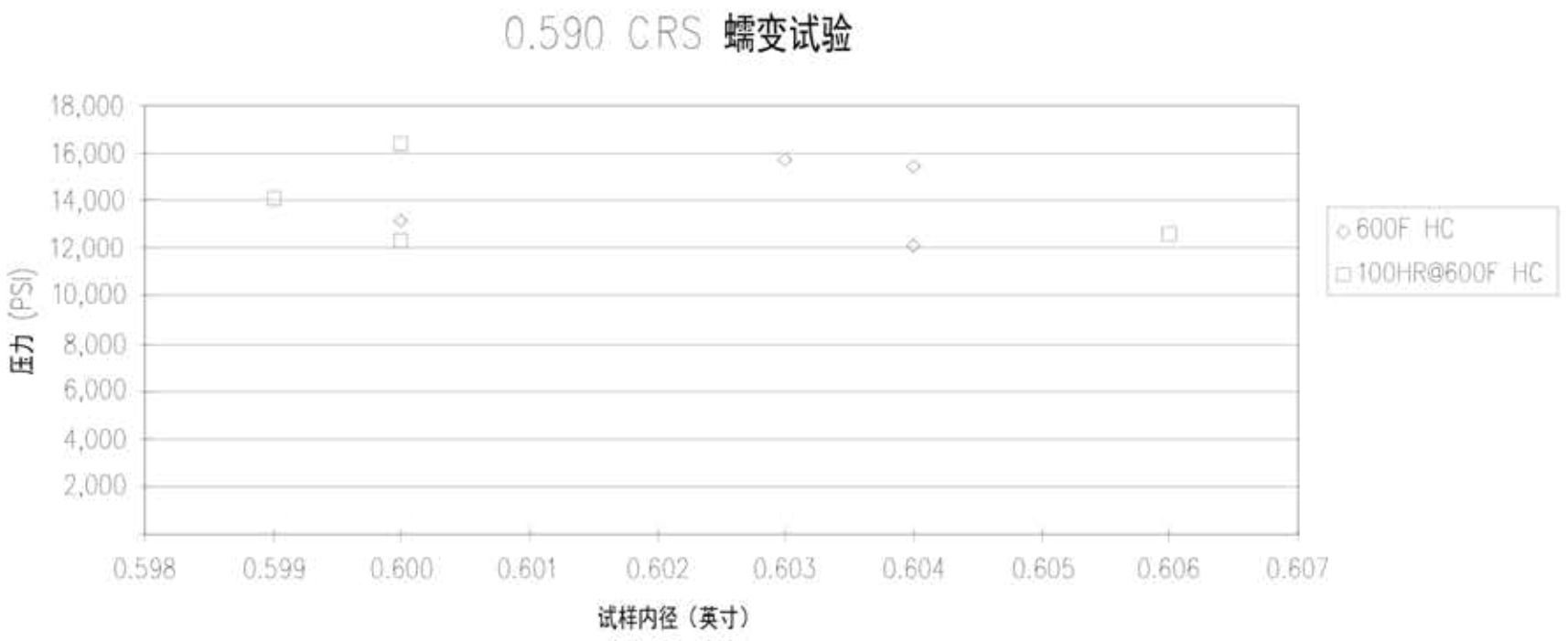
0.590 CRS 蠕变试验
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
压力 (PSI)
0.598
0.599
0.600
0.601
0.602
0.603
0.604
0.605
0.606
0.607
试样内径（英寸）
600F HC
100HR@600F HC

图 19

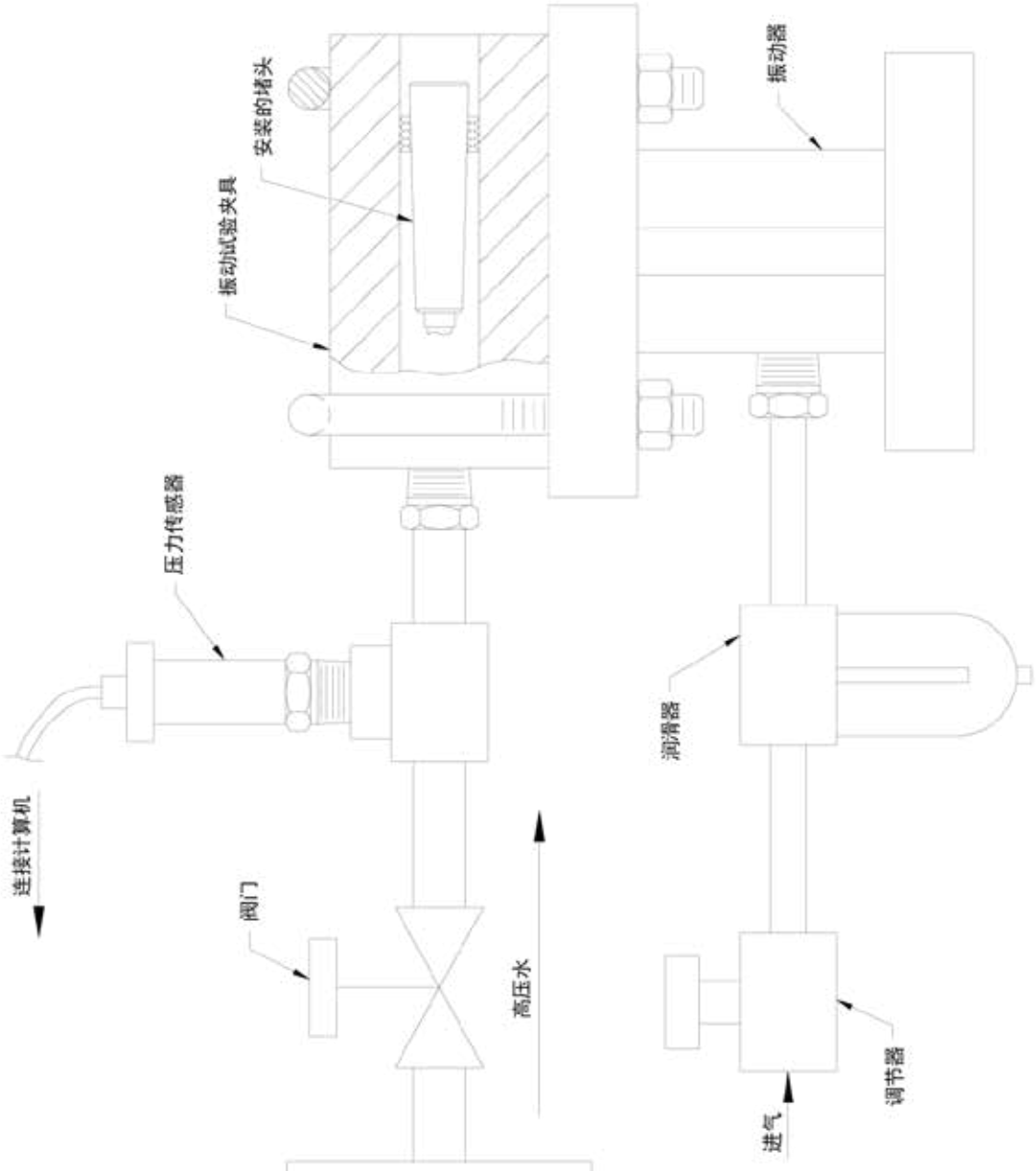

图 20

North, Central & South America **EST Group** 2701 Township Line Road Hatfield, PA 19440-1770 USA | +1.215.721.1100 +1.800.355.7044 | est-info@curtisswright.com
Europe / Middle East / Africa **EST Group B.V.** Hoorn 312D 2404 HL Alphen aan den Rijn The Netherlands | +31.172.418841 | est-emea@curtisswright.com
China +86.400.636.5077 | est-china@curtisswright.com | **Singapore** +65.3158.5052 | est-asia@curtisswright.com

© 2019 Curtiss-Wright EST Group mk0052_1.2025_CHS_A4