

1 管道安装工程

1.1 焊缝探伤的概率问题

一、概述及问题的提出与解答

在压力管道安装和压力容器制作中，焊接是用得最多的、也是最重要的一种连接方式。有关规程、规范和技术标准，按照管道和容器储输介质的化学性质、物理参数及工作环境等不同情况，将它们进行了分类，对各类管道及容器的焊缝，都极其明确地规定了质量要求。其中，以焊口个数或焊缝长度为基数（为叙述方便，以下统称焊口），按规定比例进行无损探伤，是检验焊口是否达到质量标准的重要手段之一。

根据这些规程、规范和标准的规定，应在基本相同的条件下（如焊接材料、焊缝类别、焊缝位置、施焊环境等），将每个焊工所焊的全部 X 个焊口，按规定的比例抽取 N 个焊口进行无损探伤。

如果所抽取的 N 个焊口，无损探伤检验全部合格，则该批 X 个焊口中的未检焊口被认为也合格；如果这 N 个焊口被检出 n 个不合格，除将不合格焊口返修合格外，还应抽取一定数量的焊口，作追加检验。对于追加检验，不同规范规定不一样。

其一是，按原比例加倍，即再抽 $2N$ 个焊口作追加检验。

其二是，按已检验出的不合格焊口数 n 加倍，即再抽 $2n$ 个焊口作追加检验。

不管哪种方法作追加检验，只要追加检验的这些焊口，无损探伤全部合格，则还认为该批 X 个焊口中的未检焊口也合格。

如果在追加检验的这些焊口中，又检出了不合格焊口，那么，就应对全部剩下的焊口逐一进行无损探伤，并将所有不合格的焊口返修至合格。在同一位置返修的次数，按材质的不同有所不同，有的规定最多不得超过两次，有的规定最多不得超过三次。

在实际工作中，有时对“抽检比例”、“追加检验数量”、“追加检验次数”与“焊口合格的概率”之间的关系理解不一，发生过一些争论。

下面以某技术状态稳定的焊工所焊的焊口，在无损探伤检验中的几个概率问题进行讨论，以求理解一致。

经过长时间的考核，该焊工所焊的焊口，在做百分之百无损探伤检验的前提下，得出其一次全检合格率为 $0 < q < 100\%$ 。在某工程中，他焊了 X 个焊口，现按规定的比例 a 抽取 N 个焊口进行无损探伤检验。显然这 X 个焊口中有合格焊口 Y 个，有不合格焊口 Z 个。今取：

$$aX \leq N < (aX + 1) \quad (1)$$

$$(qx - 1) < Y \leq qX \quad (2)$$

$$Z = X - Y \quad (3)$$

上式 (1)、(2)、(3) 中， X 、 Y 、 Z 、 N 都为自然数。

(1) 经第一次无损探伤抽检，这 X 个焊口中的未检焊口，被认为合格的概率为 $P(\bar{I})$ ：

根据概率的意义，该批 X 个焊口经过第一次无损探伤抽检，其未检焊口能被判定为合格的概率 $P(\bar{I})$ ，就是第一次检出的 N 个焊口，作无损探伤检验全部合格的概率 $P(N)$ 。因而有：

$$P(\bar{I}) = P(N) = \frac{C_Y^N}{C_X^N} \quad (4)$$

显然，经过第一次无损探伤检验，这 X 个焊口不被认为合格的概率为 $P(I)$ ，也就是抽检出的 N 个焊口，不全合格的概率 $P(N)$ 。其数值为：

$$P(\bar{I}) = 1 - \frac{C_Y^N}{C_X^N} \quad (5)$$

如果第一次无损探伤抽检的 N 个焊口，从中恰好被检出了 n 个不合格焊口的话，那么这 N 个焊口中，必定有 $(N - n)$ 个合格焊口。第一次无损探伤检验恰出现 n 个不合格焊口的概率 $P(n)$ 为：

$$P(\bar{n}) = \frac{C_Z^n C_Y^{(N-n)}}{C_X^N} \quad (6)$$

$P(n)$ 的值当然还可以按其他的公式计算。

按“和事件”的计算方法可知，经第一次无损探伤抽检，这 X 个焊口认为不合格的概率

$$P(\bar{I}) = \sum_{n=1}^N P(\bar{n}) \quad (7)$$

(2) 如果需作追加检验，作追加检验的 $2N$ 或 $2n$ 个焊口，其全部合格的条件概率

$$P(2N)_n \text{ 或 } P(2n)_n:$$

第一次无损探伤检验的 N 个焊口，如果被检验出了 n 个不合格的焊口，则还应抽检 $2N$ 或 $2n$ 个焊口作追加检验。这时的焊口还有 $(X - N)$ 个，合格焊口有 $Y - (N - n)$ 个，故被抽检的 $2N$ 或 $2n$ 个焊口全是合格焊口的“条件概率” $P(2N)_n$ 或 $P(2n)_n$ 分别为：

$$P(2N)_n = \frac{C_{Y-(N-n)}^{2N}}{C_{X-N}^{2N}} \quad (8)$$

$$P(2n)_n = \frac{C_Y^{2n} - (N - n)}{C_{X-N}^{2n}} \quad (9)$$

显然， $2N$ 或 $2n$ 个焊口不全是合格焊口的“条件概率”为 $P(2N)_n$ 或 $P(2n)_n$ 分别为：

$$P(\overline{2N})_n = 1 - P(2N)_n = 1 - \frac{C_Y^{2N} - (N - n)}{C_{X-N}^{2N}} \quad (10)$$

$$P(\overline{2n})_n = 1 - P(2n)_n = 1 - \frac{C_Y^{2n} - (N - n)}{C_{X-N}^{2n}} \quad (11)$$

(3) 第一次追加检验后，这批 X 个焊口中未检焊口，能被

认为合格的概率 $P(\text{II})$ 及必须作逐一无损探伤检验的概率 $P(\text{III})$):

如果第一次无损探伤检出了 n 个不合格焊口, 而加倍抽检的全部焊口在追加检验时合格, 则这批 X 个焊口中的未检焊口, 被认为合格的概率为 $P(\text{II})_n$, 根据乘法原理, 应该是:

按 $2N$ 作追加检验时是:

$$P(\text{II})_n = P(n)P(2N)_n \quad (12)$$

按 $2n$ 作追加检验时为:

$$P'(\text{II})_n = P(n)P(2n)_n \quad (13)$$

值得注意的是, 上述那几个脚标“ n ”的概率, 都是对应于第一次无损探伤检验, 恰好检出“ n ”个不合格焊口这一特定条件的。事实上“ n ”有多个可能的值, 它可以是不大于 N 的任何一个自然数。所以这批 X 个焊口在追加检验后, 未检焊口被认为也合格的概率 $P(\text{II})$ 应该是:

按 $2N$ 作追加检验时为:

$$P(\text{II}) = \sum_{n=1}^N P(\text{II})_n = \sum_{n=1}^N P(\bar{n})P(2N)_n \quad (14)$$

按 $2n$ 作追加检验时为:

$$P'(\text{II}) = \sum_{n=1}^N P(\text{II})_n = \sum_{n=1}^N P(\bar{n})P(2n)_n \quad (15)$$

如果, 第一次无损探伤检出了 n 个不合格焊口, 而加倍抽检的焊口在追加检验时, 又不是全合格, 则这批 X 个焊口中的未检焊口, 必须作逐一无损探伤检验的概率 $P(\text{III})_n$, 根据乘法原理, 应该是:

按 $2N$ 作追加检验时为:

$$P(\text{III})_n = P(n)P(2N)_n \quad (16)$$

按 $2n$ 作追加检验时为:

$$P'(\text{III})_n = P(\bar{n})P'(2n)_n \quad (17)$$

鉴于前述的那个“值得注意”的理由, 这批 X 个焊口在追加检验后, 对全部剩余焊口必须作逐一无损探伤检验的概率 $P(\text{III})$ 应该是:

按 $2N$ 作追加检验时：

$$P(\text{III}) = \sum_{n=1}^N P(\text{III})_n = \sum_{n=1}^N P(\bar{n})P(\overline{2N})_n \quad (18)$$

按 $2n$ 作追加检验时：

$$P'(\text{III}) = \sum_{n=1}^N P(\text{III})_n = \sum_{n=1}^N P(\bar{n})P(2n)_n \quad (19)$$

至此，对焊缝无损探伤中的几个概率，就可以进行具体计算了，并用这些结果来解决有关实际问题。

二、注意的问题

在施工中，人们对无损探伤结果的注意，集中在以下两点：

其一是：经过第一次抽检后，判定未检焊口合格，这是最愿意看到的；如果不能判定，也希望在追加检验后，能判定未检焊口合格。

其二是：经追加检验后，判定对剩下全部焊口必须作逐一检验，这是不愿意看到的结果。

换句话说，就是希望 $P(\text{I})$ 和 $P(\text{II})$ 的值越大越好，亦即 $P(\text{III})$ 的值越小越好。而事实上绝大部分人对 $P(\text{I})$ 、 $P(\text{II})$ 、 $P(\text{III})$ 的大小及它们受哪些因素的影响，不是十分明确的。下面就几个令人注意的问题加以说明。

(1) 不应随意扩大或缩小抽检比例 a ：

从以上的讨论可以看出，一次全检合格率为 q 的焊工，其待检焊口数 X 一经确定，抽检比例 a 实质上决定了第一次抽检后，未检焊口被认为合格的概率 $P(\text{I})$ 的大小，抽检比例 a 愈大， $P(\text{I})$ 的值愈小，反之 a 愈小，则 $P(\text{I})$ 的值愈大。

如果用具体数字代入，从算出的结果就可以清楚地看出，抽检比例 a 若有小幅度的变化，就能引起 $P(\text{I})$ 的大幅度的变化。这种影响，在工程实践中是不应忽视的。因为扩大抽检比例，意味着增加工程费用，造成不必要的浪费；而缩小抽检比例，工程质量有可能因漏检而造成隐患。所以，只有严格执行规范规定的抽检比例，才能在保证工程质量的前提下，降低工程

费用。

(2) 积极培训焊工，努力提高焊工的一次全检合格率 q ，在工程上是必须的，在经济上是合算。

从 1~3 的讨论中，我们可以清楚看到，当抽检比例 a 一定时，待检焊口数 X 一经确定后，焊工的一次全检合格率 q ，实质上决定了第一次抽检后、未检焊口被认为合格的概率， $P(I)$ 的大小；且 q 愈大，则 $P(I)$ 愈大；反之 q 越小，则 $P(I)$ 也越小。

如果用具体数字代入，从算出的结果就可以清楚地看出，一次全检合格率 q 对第一次抽检后，未检焊口被认为也合格的概率 $P(I)$ 的巨大影响。焊工的一次全检合格率高，意味着他的焊接质量高，需要作追加检验和逐一检验的概率就小，从而缩短了施工周期，降低了工程成本。所以积极培训焊工，努力提高焊工的一次全检合格率，不仅在工程上是必须的，而且在经济上也是合算的。

但手工施焊，受人的经验、精力、情绪的影响太大，所以提高焊口的一次全检合格率 q 的根本途径，应该放在改进焊接工艺、焊接设备，提高机械化施焊水平上。

(3) 有的放矢指派焊工施焊：

施工技术人员如果能根据规范规定的各种抽检比例 a ，设定一个待检焊口的总数 X ，例如 $X=200、150、100、50$ 等等，并按式 (1) ~ (3) 的各个公式，算出本单位焊工 (q 不相同)，在抽检时的概率 $P(I)$ 、 $P(II)$ 、 $P(III)$ ，把它们制成抽检概率一览表，作为资料存于电脑。实际工作时，只需根据具体的抽检比例 a ，随时对照，就可以指派 $P(I)$ 值较大的焊工施焊。

在一般情况下，尽可能指派 $P(I) + P(II) \geq 0.9545$ 的焊工施焊。也就是说，要尽可能不指派作逐一检验概率 $P(III)$ 较大的焊工施焊。

根据小概率不可能的原则，这时我们有很大的把握断定：该

焊工所焊的焊口，在第一次抽检或作追加检验后，就会被判定为合格而不要作逐一检验。

反之，若 $P(I) + P(II) < 0.9545$ ，则说明实际施焊水平，与工程对焊接的要求不相适应，而作逐一检验的可能性较大。

由此可知，掌握焊口探伤的几种抽检概率后，对合理安排焊工施焊，加强自觉性，减少盲目性是很有帮助的。

(4) 较客观地估算探伤作业量

我们把本单位的焊工水平用平均一次全检合格率 q 来描述，那么在抽检概率一览表中，能找出不同抽检比例下的 $P(I)$ 、 $P(II)$ 、 $P(III)$ ，并用此来推算探伤工作量。

在对 X 焊口按比例 a 进行抽检时，如果只经过第一次抽检就能判定未检焊口也合格，当然需只对 aX 个焊口进行探伤。然而，这种情况出现的概率仅为 $P(I)$ ，而其他情况出现的概率尚有 $F(I)$ ，所以从统计的观点来看，第一次抽检的探伤焊口数 t_1 应该是：

$$t_1 = aXP(I) \quad (20)$$

根据(6)式可知，第一次抽检恰出现 n 个不合格的概率为 $P(n)$ ，因 n 有多个可能值，所以只能从统计观点出发，求第一次抽检时出现不合格焊口数的平均值 M_n

$$M_n = \sum_{n=1}^N nP(\bar{n}) \quad (21)$$

如果是按不合格焊口数加倍作追加检验的话，这时还应对 $2M_n$ 个焊口进行探伤；如果是按原比例加倍作追加检验的话，则还应对 $2N$ 个焊口进行探伤。追加抽检后，未检焊口被认为合格的概率，因采用的加倍方法不同而不同。它们分别是 $P(II)$ 、 $P'(II)$ 。

从统计的观点出发，其探伤焊口总数还应包括第一次抽检的 N 个焊口。它们分别是 t_2 及 t'_2 ，其中：

$$t_2 = 3NP(II) \quad (22)$$

$$t'_2 = (2M_n + N)P'(II) \quad (23)$$

所有焊口在做了第一次抽检和追加抽检之后，因不能绝对保证可判定为合格，还可能要对全部剩下焊口作逐一检验。出现这种情况的概率，因采用的追加检验方法不同而不同，它们分别是 $P(III)$ 、 $P'(III)$ 。考虑到几次抽检后，要对不合格焊口进行修复和探伤， $P(III)$ 、 $P'(III)$ 的数值又不太大这两个因素，前两次已作探伤的焊口可以不作扣减。那么对全部剩余焊口作逐一检验的情况发生时，总探伤焊口数量应该是 t_3 及 t'_3 ：

$$t_3 = X P(III) \quad (24)$$

$$t'_3 = X P'(III) \quad (25)$$

综合上述各点可知 对 X 个焊口按比例 a 进行抽检，从统计的观点出发，其探伤焊口数 t 及 t' 应为：

$$\begin{aligned} t &= t_1 + t_2 + t_3 \\ &= aXP(I) + 3NP(II) + XP(III) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} t' &= t'_1 + t'_2 + t'_3 \\ &= aXP(I) + (2M_n + N)P'(II) + XP'(III) \end{aligned} \quad (27)$$

在一个具体工程中，我们可以根据焊口的数量，抽检比例等，按上述方法，用公式 (20) ~ (27) 对焊口的探伤工作量，作出客观的估算。

1.2 管道通球清扫 皮球被卡难找

一、工程概述及发现问题的经过

某山区城市已有一个煤气厂，为解决西区人民的生活用气问题，决定沿市区公路敷设一条 $\phi 377 \times 8\text{mm}$ ，全长 5km 的煤气干管，中间的支线管，暂时只预留短管接头。

虽说是沿市区的公路敷设，但管线的弯道较多，标高变化较大。因为地处交通要道，挖管道沟出来的土，既不能堆积过宽，影响车辆通行，也不准堆积的时间太长。施工场地狭小，条件较差，但工期要求却很紧，给施工带来诸多不便。

施工单位把整个 5km 管道，根据地形情况分成四个独立管段，分别进行安装、试压和清扫，最长的一段管线有 1.40km 长。为了不影响交通，在管道的压力试验合格后，立即进行了管道焊口防腐。防腐层尚未完全固化，就要求覆土回填，恢复路面；只留下对管膛进行清扫这一道较简单的工序了。

该施工单位采用清管球对管膛清扫的工艺，清管橡皮球的皮特别厚、耐磨，中心可注入高压水，以扩充清管球的直径，使其比被清扫管的内径大出 2% 左右。他们事先安装好了收、发球的装置和空气压缩机、接好了压缩空气管，初时，清扫管膛的工作进行得很顺利，空压机在不断地向管内送气，清扫管内的气压基本上在一个稳定的范围内波动，这说明管膛内的清管球在不断地向前推进。大概过了 1.5h 左右，异常的情况发生了：

清扫管段始端的值班人员发现：被清扫管的管膛内气压在缓缓上升！

施工队长判断是清管球在某焊缝处或弯头处受阻，只要空压机继续送气，管内气压增大后，就会把清管球推过去的；所以他并没有太在意，一切仍然按原来的程序进行。

又过了 0.5h 左右，空气压缩机还向被清扫管内送气，始端管膛内的气压不再上升，而管段末端的收球装置内，有气流喷出！

这是一个异常的情况，施工队长一方面要求空压机继续送气，另一方面要求注意观察；可是情况依然如故。队长沉思良久之后，认为情况比较麻烦，这才下令暂停空压机送气，以寻求解决的办法。

在有关专业人员参加的会上，大家都认为清管球是被卡住在某个地方了，但到底卡在什么位置和如何把清管球找到并取出来，未取得一致的意见。他们尝试了几种办法，都未能达到目的。

先是用空压机继续向被清扫的管段送气，以期增大气压把清管球推出来，但因为漏气，气压不往上升，而未成功。继而，他

们用另一台空压机从收球装置端往里送气，因同样的原因，没有结果。后来又分两次，分别从管道的两端发一个清管球，企图用后一个球把前一个球顶出来，结果是第二个球和第三个球都与第一个球一样被卡住了。至此，他们已无更好的办法，于是开始了漫长而艰难的寻找清管球的工作。

据事后了解，他们根据第一次空压机送气的时间，估计卡球的可能位置，前前后后共挖开已经回填和恢复的路面 6 处，与此同时割开已经通过试压和防腐的管道 6 处，才算把清管球给找到。

3 个球紧贴在一起，被一根直径为 $DN50mm$ ，长约 $1600mm$ 的撬杠死死地卡在管膛里！在它们的前后不远处，煤气管道正好各有一个 30° 的弯！如图 1.2-1。

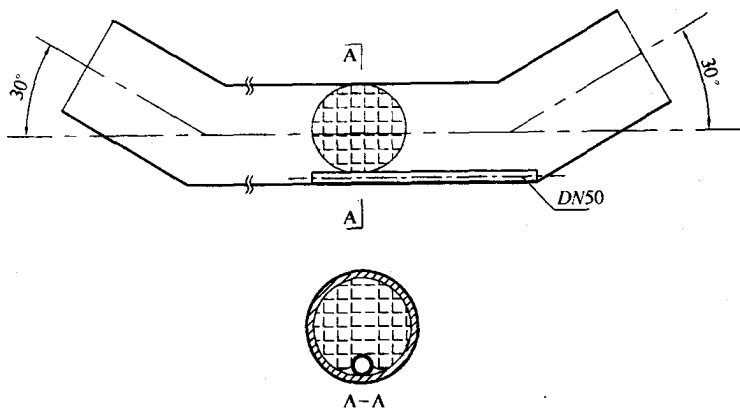


图 1.2-1 清管球位置

等他们把管道恢复好，到最后做完清扫管道的工作，共耽误了一个多月的宝贵时间。

二、造成问题的原因分析

(1) 在施工的过程中，有人在下班的时候，把一根 $DN50mm$ 、长约 $1600mm$ 的撬杠塞进了管膛的较深处，以免被人发现拿走。没想到第二天上班却忘了把它掏出来，铸成此次事故！

(2) 撬杠在管道的两个相距很近的弯头之间，顺着管道的轴线放着，第一个清管球推过来的时候，也推着撬杠走了一小段，到了前一个弯头处，撬杠的一端顶住了弯头的壁，不能再往前走了，可后面的清管球还在推，因被撬杠的头部顶住，也不能轻易前进；因为空压机还在不停地向管内送气，使煤气管内的气压上升，把清管球推上了撬杠，形成骑虎之势，卡在那里。空压机再送气，又因为空气能在这根撬杠小管里通过，起到了泄压的作用，从收球装置一端放散出去了；所以空压机再送气，管内的压力也不上升，也就不可能推动清管球再向前移动了；从收球端送气的情况也是一样，这并不能把清管球退出来。后来发送的第二、第三个清管球，企图把第一个清管球顶出来，却落了个同样下场——被卡死了！其理由是一样的。

三、处理措施及应吸取的教训

(1) 取出清管球后，恢复管道，重新做防腐、重新进行管道的气压试验和管膛清扫工作。

(2) 施工单位必须加强施工管理，加强对施工过程的控制，并严格按基本建设的程序办事；不应该在管道施工未结束前恢复路面，为后来的寻找清管球带来不少的困难。

(3) 应加强对施工人员的素质教育和提高他们的业务水平；清管球的位置，是可以经过计算来确定的，他们却采用了大致估计的办法，结果，做了许多无用工！

1.3 计算确定卡球位置

一、概述及发现问题的经过

在安装气体管道时，按照有关规范的规定，为保证管膛内的清洁，在管道压力试验合格以后，要用一定气量和流速的气体进行吹扫，一般用压缩空气进行吹扫。但是，对管径大于DN200mm、管线较长的管道，尤其是外线管道，用压缩空气进行吹扫，如果没有庞大的设备或现成的气源，吹扫气体的流量

流速都难以达到要求，也就难以保证管腔的洁净度。所以，施工单位常采用压缩空气驱动一个特制的清管球，在管腔内进行清扫，一般清扫 2~3 次就能取得较好的效果。所以用清管球清扫，是一个行之有效的办法。

但是许多单位反映，用清管球清扫管腔，由于存在各种难以预见的因素，有时清管球会被卡死在管腔内，既不能前进，也不能后退，这时只能把管子割开，把清管球取出来！

从何处割管，是一个关键。有的凭经验估算，确定清管球的位置，有的估摸着在管子上试钻孔，去寻找清管球的位置。总之，不能一次找准，十分麻烦，有时甚至特别头痛；人们希望能找到一个较简便、较准确的计算公式。

下面我们来进行这方面的探讨。

在进行具体问题的讨论之前，不妨假定：管道系统压力试验已经合格，管道本身毫不漏气。（见图 1.3-1）这样清管球在管腔内卡死时，只有两种可能：

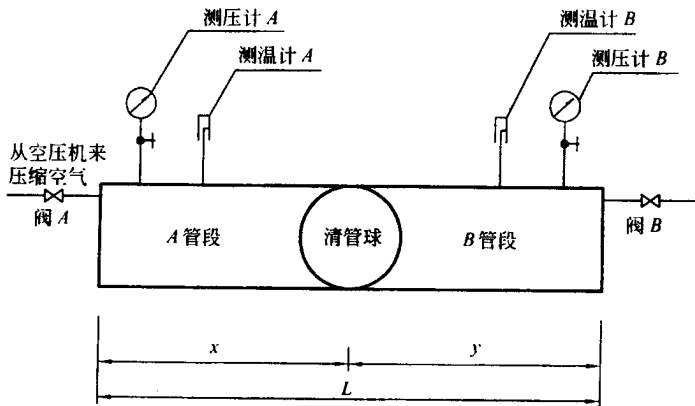


图 1.3-1 清管球示意图

其一、在卡球处，清管球与管内壁之间不严密，漏气。

其二、在卡球处，清管球与管内壁之间很严密，毫不漏气。

图中： x 为 A 管段之实际管长；

y 为 B 管段之实际管长；

L 为整个清扫管段之总长；

即： $x + y = L$

若设： $y/x = n$

则： $x = L / (n + 1)$

图中，管段 L 的两端假设已用堵板封堵；因为 L 的长为已知，只要能求出 n 的值， x 就可以求出，也就是说清管球卡死的位置，就能确定下来。

(1) 先作清管卡死处，是否漏气的判定

通球清扫开始以后，清管球被压缩空气从发球装置推入管段 A ，随着压缩空气的不断输入，迫使清管球慢慢向 B 管段的收球装置运动。在正常情况下，阀 A 、阀 B 都是打开的，测压计 A 的指针呈跳跃状波动，而测压计 B 的指针在“0”位附近晃动。如果适当调小阀 B 的开度，可听到“丝丝”的排气声。

如果发现测压计 A 的指示上升，而在阀 B 处听不到“丝丝”的排气声；或者，发现测压计 A 的晃动较稳定，而在阀 B 处却有大量排气；这两种情况都说明清管球被卡住在管腔内了。此时应设法松动清管球，或者收回清管球，诸如：

1) 在允许压力下，继续升压，增大对清管球的推力，将其推过被卡的地方；

2) 发第二个清管球，把第一个清管球顶出被卡的地方；

3) 把压缩空气的进口，从 A 改为 B ，反向把清管球推出来。

假若上述措施都不见效，说明清管球已被卡死！这时应判定清管球在卡死地方，是否漏气，以便采用相应的处理措施。

此时将阀 A 关闭、阀 B 打开，记下 A 管段内一组测压计与测温计的读数： P_{A1} 、 T_{A1} ；过一段适当的时间，再记下另一组读数 P_{A2} 、 T_{A2} ；

根据查理定律，如果清管球被卡处不漏气，则有：

$$P_{A2} = P_{A1} \frac{T_{A2}}{T_{A1}} \quad \text{若：} \quad P_{A2} < P_{A1} \frac{T_{A2}}{T_{A1}}$$

则说明在清管球被卡死处漏气。

(2) 清管球卡死处漏气时，其位置的确定

若已经判定清管球在卡死处漏气的话，当 A 管段的空气温度降至环境温度时，关闭阀 A 和阀 B，记下 A、B 管段内的压力 P_{A1} 、 P_{B1} 和温度 T_1 。隔一定时间后，再记录一次 A、B 管段内的压力 P_{A2} 、 P_{B2} 和温度 T_2 。

根据理想气体状态方程，对 A 管段有：

$$P_{A1} V_A = \frac{M_{A1}}{\mu} R T_{A1} \quad P_{A2} V_A = \frac{M_{A2}}{\mu} R T_{A2}$$

$$\text{则：} \quad M_{A1} = \mu P_{A1} \frac{V_A}{R T_{A1}} \quad M_{A2} = \mu P_{A2} \frac{V_A}{R T_{A2}}$$

$$\text{所以：} \quad M_{A1} - M_{A2} = \left(\frac{P_{A1}}{T_{A1}} - \frac{P_{A2}}{T_{A2}} \right) \frac{\mu V_A}{R} \quad (1)$$

同理对 B 管段有：

$$M_{B1} = \mu P_{B1} \frac{V_B}{R T_{B1}} \quad M_{B2} = \mu P_{B2} \frac{V_B}{R T_{B2}}$$

$$\text{所以：} \quad M_{B2} - M_{B1} = \left(\frac{P_{B2}}{T_{B2}} - \frac{P_{B1}}{T_{B1}} \right) \frac{\mu V_B}{R} \quad (2)$$

因为管道系统已经试压合格，本身不漏气，所以从 A 管段漏出的气体质量，应等于漏入 B 管段内的气体质量。

$$M_{A1} - M_{A2} = M_{B2} - M_{B1}$$

$$\text{即：} \quad \left(\frac{P_{A1}}{T_{A1}} - \frac{P_{A2}}{T_{A2}} \right) \frac{\mu V_A}{R} = \left(\frac{P_{B2}}{T_{B2}} - \frac{P_{B1}}{T_{B1}} \right) \frac{\mu V_B}{R}$$

$$\text{则：} \quad \frac{V_B}{V_A} = \frac{P_{A1}/T_{A1} - P_{A2}/T_{A2}}{P_{B2}/T_{B2} - P_{B1}/T_{B1}} \quad (3)$$

因为用清管球清扫管道，其管径是不变的，所以管道的容积比等于管道的长度比，即：

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{y}{x} = n \quad (4)$$

将 (4) 代入 (3) 得到：

$$n = \frac{P_{A1}/T_{A1} - P_{A2}/T_{A2}}{P_{B2}/T_{B2} - P_{B1}/T_{B1}}$$

至此，卡球的位置被确定。

(3) 清管球卡死处不漏气时，卡球位置的确定

当已经判定清管球卡死处不漏气以后，打开阀 A，使 A 管段内的空气压力 P_{A1} 降至接近 B 管段内的空气压力 P_{B1} ，并设此时 A、B 管段内的空气质量分别为 M_{A1} 和 M_{B1} 。同时记录管段的空气温度，分别为 T_{A1} 、 T_{B1} 。然后用同一台空压机分别向 A、B 管段内输入相同时间的气，也就是说，向 A、B 管段内输入质量相等的空气 m ，关闭阀 A、B，并记录 A、B 管段内的空气压力 P_{A2} 、 P_{B2} 和温度 T_{A2} 、 T_{B2} 。

此时，两管段内的空气质量分别为：

$$M_{A2} = M_{A1} + m \quad \text{即} : M_{A2} - M_{A1} = m$$

$$M_{B2} = M_{B1} + m \quad \text{即} : M_{B2} - M_{B1} = m$$

所以：

$$M_{A2} - M_{A1} = M_{B2} - M_{B1} \quad (5)$$

根据理想气体状态方程，对 A 管段有：

$$M_{A1} = \mu P_{A1} \frac{V_A}{RT_{A1}} \quad M_{A2} = \mu P_{A2} \frac{\mu V_A}{RT_{A2}}$$

$$\text{则：} \quad M_{A2} - M_{A1} = \left(\frac{P_{A2}}{T_{A2}} - \frac{P_{A1}}{T_{A1}} \right) \frac{\mu V_A}{R} \quad (6)$$

对于 B 管段有：

$$M_{B1} = \mu P_{B1} \frac{V_B}{RT_{B1}} \quad M_{B2} = \mu P_{B2} \frac{V_B}{RT_{B2}}$$

$$\text{则：} \quad M_{B2} - M_{B1} = \left(\frac{P_{B2}}{T_{B2}} - \frac{P_{B1}}{T_{B1}} \right) \frac{\mu V_B}{R} \quad (7)$$

由 (5)、(6)、(7) 三式得：

$$\left(\frac{P_{A2}}{T_{A2}} - \frac{P_{A1}}{T_{A1}} \right) \frac{\mu V_A}{R} = \left(\frac{P_{B2}}{T_{B2}} - \frac{P_{B1}}{T_{B1}} \right) \frac{\mu V_B}{R}$$

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{P_{A2}/T_{A2} - P_{A1}/T_{A1}}{P_{B2}/T_{B2} - P_{B1}/T_{B1}} \quad (8)$$

将（4）式代入（8）式得：

$$n = \frac{P_{A2}/T_{A2} - P_{A1}/T_{A1}}{P_{B2}/T_{B2} - P_{B1}/T_{B1}}$$

至此，卡球的位置被确定。

二、结束语

综上所述，在用清管球进行清扫管膛时，当清管球被卡死以后，不管卡球的地方漏气与否，清管球所处的位置，都可以通过计算来确定。两个计算公式的形式类似，且只与管段内的空气绝对压力和绝对温度有关。

为提高计算的准确度，在条件许可时，应尽量采用精度等级较高的、并经校验合格的测压、测温仪表。在采集数据时，可多采集几组，然后分别计算，进行相互间的比较与核对。

1.4 吹扫合格再施焊 送汽惹祸非一般

一、工程概况及发生问题的经过

某大型企业为满足生产需要，决定扩建热力厂，向鼓风机站供汽。鼓风机是该厂的关键设备，靠汽轮机推动，用蒸汽作动力。有两台汽轮鼓风机及两条蒸汽管道，都是这次扩建安装的，新安装的管道与原来的蒸汽管道并网，能相互切换，向各汽轮鼓风机送汽。

汽轮鼓风机和管道，由两个不同的安装单位进行施工。

所建蒸汽管道，材质为 20 号钢，双管并行，管径为 $\phi 377 \times 18\text{mm}$ 它们将蒸汽先送入一根 $\phi 480 \times 25\text{mm}$ 的分配管，再在其上接出多根 $\phi 273 \times 9\text{mm}$ 的支管，向鼓风站的各汽轮鼓风机送汽。

与此同时，该企业应邻近的 A 厂之要求，要在两根管径为 $\phi 377 \times 18\text{mm}$ 的管道的适当位置，各预留一根支管，给该厂日后的扩建工程供汽用。因为工程设计没有这一内容，所以工程承包也不包括这一内容，故施工单位没有准备阀门。只答应预留了两

根带堵板的短管，留待其扩建工程开工时，再安装支管阀门。

新建管道先用原有管道送气，吹扫合格后，新建锅炉主蒸汽管，也各自独立吹扫合格后，才向新管道送汽。新管道的蒸汽吹扫，不管是蒸汽流量、冲管系数都符合要求，在各个吹扫口所装的靶板，经过监理工程师、业主的认真检验，并签字认可。

新安装的汽轮鼓风机，开始一段时间，用原管道送汽驱动，运行平稳，一切技术指标，经过检测、验收合格。

运行半月后，切换为新建管道送汽驱动，刚开始时，操作人员隐约听到轻微的异常声响，没几天就发现汽轮鼓风机的振动较以前大，又过了一段时间，其振动越来越明显。

把汽轮鼓风机安装单位找来，他们感到困惑不解，最后决定停机，对内部进行检查。把该台汽轮鼓风机打开一看，人们不禁为之一惊：汽轮机原来锃亮的叶片，竟然出现了一层灰黑色的膜！颗粒细密而坚硬，擦之，砵砵有声，有的叶片上，被轰击的印痕，清晰可见！

事实看来比较清楚，振动不是鼓风机安装的原因，而是由于叶片上附着层不均匀，造成偏心所致。这一层坚硬、细密的灰黑色颗粒，是一些氧化铁粉末，可以肯定是从新管道里被蒸汽带来的，说明新管道的吹扫没有达到要求，他们毫不客气，把管道安装单位找来，要求他们来处理！否则追究他们的经济责任。

安装单位再三强调：管道的蒸汽吹扫方案，是经过共同讨论后批准的，管道的吹扫效果是经过各方共同检验的，证明管道已经达到了规范规定的质量标准，所以这些轰击在汽轮鼓风机叶片的铁屑粉末，不是新安装管道内的，故不能由他们负责。

意见不一，相持不下。会后，双方都积极寻找对自己有利的证据，终于找到了大家认可的答案。

二、造成该质量问题的原因

(1) 新管道经过吹扫，由各方认定合格后，在新建管道尚未送汽运行之时，邻厂购进了合适的阀门，要求将支管的阀门装上，施工单位以管道已经吹扫干净，未答应，要他们自己处理。