

# 穿孔工艺的发展和锥辊式穿孔机的复出<sup>(A1)</sup>

—— 《无缝钢管百年史话》(续释 6-1)

**摘要:** 压力穿孔法是将轴向的推力和径向的轧制力同时作用在连铸坯上, 使在穿孔变形过程中只出现压应力, 基本上消除拉伸应力、剪切应力和连续滑动现象, 故使穿孔后的连铸坯金属组织大大改善。介绍了压力穿孔法 (PPM) 的基本原理以及其发展过程, 所具有的优点。试验证明, PPM 可以穿孔包括不锈钢在内的各种钢种的连铸坯, 所穿毛管壁厚均匀, 内外表面良好, 功率消耗低。

**关键词:** PPM; 发展过程; 优点

**中图分类号:** TG335; TG333.8 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2311(2003)01-0056-04

## 1 采用 PPM (PRP) 穿孔连铸方坯<sup>(1)</sup>

自从 19 世纪末, 曼内斯曼兄弟用斜轧穿孔法成功地生产无缝钢管以来, 在无缝钢管及焊管之间始终存在着激烈的竞争。由于焊管生产可以用廉价的带钢作为原料, 再加上焊管技术的迅速发展, 近二三十年来焊管占了一定优势。另一方面, 同一期间在无缝钢管生产技术方面, 除采用个别的高效能的钢管生产设备, 如钢管张力减径机等以外, 就轧管工艺整体来说, 没有什么显著的进展, 致使轧管机老是要采用价格高昂的管坯。因此, 除了石油用管以外, 无缝钢管很难与焊管相竞争。然而, 焊管总是有焊缝存在的。从强度观点来看, 由于焊缝区金属结构性能的影响, 焊缝总是一个薄弱环节。因此, 假如无缝钢管在价格方面能与焊管竞争, 许多应用部门则还是倾向于采用无缝钢管。而要做到这一点, 在无缝钢管生产领域内必须采用连铸坯作为管坯。

为了成功地采用连铸坯轧管, 必须在连铸技术及轧管技术两方面作出相应的改进, 因为轧管生产的一道重要的工序是穿孔, 而在斜轧穿孔过程中管坯承受交替的拉伸应力和压应力。因此, 往往在管坯的疏松、发裂、夹杂缺陷处形成裂纹, 进而在成品管上造成离层、重皮等缺陷。所以, 既需要改进连铸技术以提高管坯质量, 又需要改进轧管技术以降低对管坯的要求, 这两个方面是相辅相成, 缺一不可的。Albert H. Calmes 在进行大量试验的基础上<sup>(2)</sup>发展了一种崭新的穿孔工艺即压力穿孔法 (PPM)<sup>(3)</sup>, 它可以高效能地穿轧连铸方坯<sup>(4)</sup>。

### 1.1 压力穿孔法的基本原理

用压力将经过加热的连铸方坯推向一个后端加

以固定的顶杆, 该顶杆的顶头位于由一对轧辊组成的圆孔型的中心, 因此轴向的推力和径向的轧制力同时作用在方坯上, 使方坯经过顶头和圆孔型被穿孔成为空心坯。在变形过程中只出现压应力, 基本上消除了拉伸应力、剪切应力和连续滑动现象, 故穿孔后的连铸坯的金属组织大大改善。

如图 1 所示, 经过加热的方坯 BL 在消除氧化铁皮和定型后, 被送至压力穿孔机的受料槽内, 并处于液压推钢机 AP 和轧机机架间。液压推钢机 AP 将经过热定心的方坯推入一个坚固的、公差很小的方形入口导套 IG 内, 使方坯同时和穿孔顶头 PP 和轧辊 RG 相遇, 并在整个穿孔过程中维持恒定的推力。具有圆孔型的轧辊对方坯施以径向的变形力, 这种变形力起初是作用在方坯的四个角上, 然后作用在它圆形的外表面上。当空心坯 HB 由轧辊孔型中轧出时, 立即进入坚固的配合得很紧密的出口导套 OG。导环 CG 在穿孔开始时位于顶杆 PB 的前端, 而当空心坯进入出口导套 OG 时, 它与导环 CG 相遇, 并推动导环 CG 前进而空心坯本身逐渐起到定心的作用。因此, 只要正确地调整入口导套 IG, 轧辊 RG 和出口导套 OG 即可保证方坯、顶头与顶杆三者的中心线在同一直线上, 故压力穿孔后, 空心坯壁厚比较均匀。当穿孔操作将要结束时, 液压推钢机的柱塞杆 IP 自动停止前进, 而推钢机外环继续前进, 直至与顶头相遇为止, 此时方坯后部的穿孔全靠径向轧制力来完成。方坯穿孔后, 打开锁门, 水冷顶杆由空心坯内抽出, 其动作和斜轧穿孔机是相同的。

### 1.2 压力穿孔机的发展过程

关于压力穿孔机的试验始自 1958-1959 年,

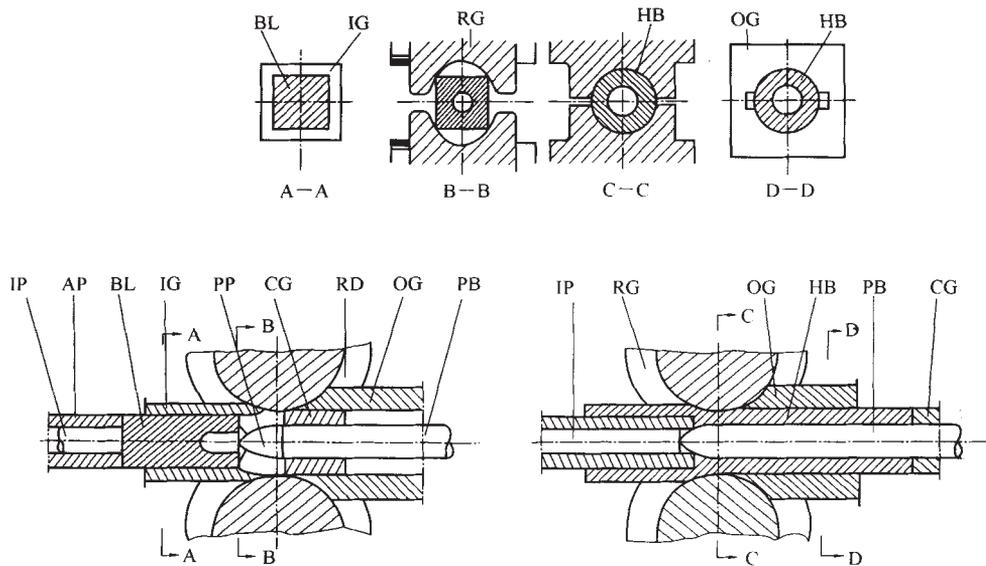


图1 压力穿孔工艺(PPM)原理示意 (符号示意图见正文)

经过初次试验即已证明压力穿孔工艺的基本概念是正确的。进一步试验证实, 由于在变形过程中只有压应力存在, 因此, 穿孔后空心坯内、外表面不产生什么缺陷, 而中心疏松得以进一步弥合。但是, 在试验初期由于轧辊孔型的中心和顶杆的中心难以保持同心, 因此, 空心坯有时出现严重的壁厚不均。在1961年又进行了旨在消除壁厚不均的试验, 采用了如上所述的结构方式。其后, 1964-1965年在1台 $\Phi 406\text{mm}$ (16in)周期轧管机上进行了轧管试验, 其简况如下: 管坯为包括不锈钢在内的各种钢种的 $175.5\text{mm} \times 175.5\text{mm}$ 方钢锭, 穿孔后空心坯的外径为 $209.6\text{mm}$ , 壁厚为 $50.8\text{mm}$ , 当穿孔比为12.5时, 仍然可获得壁厚均匀的空心坯。1966年开始设计、制造和进行工艺性试验压力穿孔机, 1969年制成试验用的压力穿孔机, 所穿孔的空心坯外径为 $254 \sim 419\text{mm}$ 。1968年试验计划的重点放在连铸坯的穿孔, 在斜轧穿孔机上难以穿孔的钢种上, 大量的压力穿孔试验结果如下:

$241\text{mm} \times 241\text{mm}$ 连铸方坯经过加热、定心、定型和清除氧化铁皮后, 在压力穿孔机上穿成的空心坯, 外径为 $298\text{mm}$ , 内径为 $152\text{mm}$ , 方坯穿孔时的延伸系数为 $1.08 \sim 1.18$ <sup>(5)</sup>, 通过轧辊孔型以及出口导套的变换, 可以改变空心坯的外径和延伸系数。当延伸系数为1.10时, 所得的结果最好, 截面也较圆。但应当指出, 压力穿孔法的目的并不在于获得圆的空心坯和较大的延伸率, 而是勿使金属结构受到不利的应力状态影响, 能将方形铸坯穿

孔成为内表面质量良好的圆形空心坯, 最大的穿孔比可达24, 而在水压冲孔机上, 穿孔比仅为6, 若其后设置延伸机, 也只能达到9。在压力穿孔机上, 虽然穿孔比很高, 但其壁厚的偏差仍在允许范围内<sup>(6)</sup>。

除了加热是否均匀以外, 影响壁厚不均率的主要因素是:

#### (1)设计方面

入口导套、出口导套、轧辊孔型、顶杆的中心要在一条直线上;

#### (2)工具方面

要将穿孔工具的公差值减至最小;

#### (3)定心问题

在方坯的前端要有一个准确的中心孔;

#### (4)穿孔顶头和顶杆的强度问题

当方坯加热温度为 $1276 \sim 1293^\circ\text{C}$ 时, 顶杆的单位载荷不应超过 $650\text{MPa}$ 。

### 1.3 压力穿孔法的优点

试验所采用的连铸坯的材质为St35、46Mn5(生产N80高强管)、10CrMo9、304不锈钢和中铬合金钢。以上钢种的连铸坯穿孔后, 由于消除了拉伸应力、切向应力及连续滑移现象, 而只有径向和轴向的压应力作用在方坯表面上, 因此, 金属组织得到了改善, 在方坯中原已存在的表面缺陷也不再发展。

压力穿孔法的另一优点是功率消耗低。液压推钢及径向轧制结合在一起, 吨管所消耗的单位变形

功仅为 1.8~2.2kW,而以同样的延伸率在斜轧穿孔机上穿孔时,则其吨管动力消耗为 12~15kW,后者为前者的 7 倍,这意味着在斜轧穿孔机上穿孔时,有 10~12kW 的能量白白地消耗在作用于钢坯及工具的复杂应力上。

由于轴向及径向压应力的作用,与顶头接触的方坯的中心部分受到均匀的压应力,因此连铸坯的中心受到压缩,在中心疏松不太严重时,其可以得到弥合。另外压力穿孔后空心坯的质量较好,可以在任何形式的轧管机上轧制成具有极佳内表面质量的无缝钢管。同时,晶粒组织也得到改善,如各种钢种的  $\Phi 267\text{mm} \times 63\text{mm}$  压力穿孔空心坯,在延伸机上延伸为  $\Phi 279\text{mm} \times 14\text{mm}$  荒管后,经自动轧管机、均整机和定径机后轧成  $\Phi 267\text{mm} \times 6\text{mm}$  的成品管,壁厚公差为  $\pm 4\% \sim \pm 10\%$ ,而内表面则未发现任何缺陷。此外,各种钢种的  $\Phi 298\text{mm} \times 73\text{mm}$  的压力穿孔空心坯在延伸机上延伸为  $\Phi 292\text{mm} \times 51\text{mm}$  荒管后,经周期轧管机轧成  $\Phi 194\text{mm} \times 6\text{mm}$  的成品管,在任何截面处的平均壁厚公差为  $\pm 5\%$ ,而仅在少数例外情况下为  $\pm 10\%$ 。经检查,在内、外表面均未发现任何缺陷。由此可以得出结论:压力穿孔机可以将各种钢种的连铸方坯穿轧成为质量良好的空心坯。压力穿孔是一种崭新的穿孔工艺,对未来的无缝钢管生产技术将产生很大的影响<sup>(7)</sup>,其主要优点可归纳如下:

(1) 使采用廉价连铸坯生产无缝钢管成为可能。

(2) 可以穿孔包括不锈钢连铸坯在内的各种钢种的管坯。

(3) 压力穿孔的空心坯壁厚比较均匀,具有良好的内外表面质量。

(4) 功率消耗低,仅为斜轧穿孔工艺功率消耗的 1/7。

## 2 注 释

(A1) 本章论述管坯连铸技术和管坯穿孔技术发生在 20 世纪后 1/3 时间的发展过程。先是方管坯连铸技术在 60 年代中期获得成功,接着压力穿孔(PPM)应运而生。从此无缝钢管生产究竟采用连铸方坯还是连铸圆坯的问题也就提到议事日程上来,正像连铸方坯影响压力穿孔技术的发展一样,圆坯连铸技术刺激了斜轧穿孔技术的发展,这是狄塞尔穿孔机发展的内在原因。最后才是锥辊式穿孔机“复活”,人们把它称作无缝钢管生产领域中的

“近终形”技术,它使得无缝钢管生产向二步轧管技术(CPS 轧管工艺)迈进了一大步。因此,按时间顺序,先后出现了压力穿孔机、狄塞尔穿孔机和锥辊式穿孔机,这是 20 世纪后 1/3 时间里管坯穿孔技术发展的三步曲。当然,这三种穿孔工艺技术不是在较长时间共存的。随着圆坯连铸技术的发展完善,压力穿孔工艺也就基本上消失了。至于狄塞尔穿孔机和锥辊式穿孔机二者之间又是什么关系呢?简单一句话:“同属斜轧穿孔技术,两者可以兼并”。

(1) 这里只拟对 PPM 和 PRP 两者的关系作一些注释。1974 年,意大利 Dalmine 厂对压力穿孔工艺进行了工业性试验,而三年后日本最大的钢铁公司新日铁(NSC)就肯定了这一工艺,这表现在:

a. 1977 年 10 月,《新日铁新闻》报道了用方坯经 PPM 穿孔所生产的钢管要比用圆坯经斜轧穿孔直接穿孔所生产的钢管要好,壁厚不均小;

b. 1978-1979 年新日铁生产技研、新日铁制品技研、八幡技研联合对 PPM 进行了研究,先后发表了 8 篇关于改进 PPM 的研究,这就是著名的新日铁“PPM 八报”;

c. 根据以上的研究开发,新日铁提出关于压力穿孔工艺的专利申请,并将这种工艺称之为 PRP(即 Press Roll Piercer);

d. 1983 年建半浮动芯棒连轧管机组时,不接受 MDM 关于采用圆坯进行斜轧穿孔的建议,仍坚持采用方坯经 PPM(PPR)穿孔的工艺。

应该指出,新日铁关于 PPM 过程中影响壁厚不均因素的研究是有成果的,但是将这种工艺易名为 PRP 似不妥,更何况在 20 世纪 80 年代初还坚持将这种工艺纳入连轧管机组中就更加不妥了。

(2) A. HCalmes 为发展 PPM 而做的大量试验始于 20 世纪 50 年代末,于 60 年代末制成试验轧机,接着,在 Dalmine 钢管厂进行了工业性试验。

1974 年意大利 Dalmine 厂建立了一个由加热到压力穿孔的完整的工业性试验车间,并试验证明,PPM 可以实现连铸方坯的穿孔。所以,1978 年 8 月在意大利 Bergamo 投产的世界上第一个 MPM 轧管厂就是采用了 PPM,这台压力穿孔机轧辊辊径为 1 280mm,电机功率为 500kW,推料机的最大推力为 2 300kN,压力穿孔机前设有两个导向装置。一个是辊式导向装置,另一个是板式导向装置。后者是日本八幡厂滚动式导板装置的一个改进,4 块导板各由液压缸压向钢坯,使方坯保持在

中心线上。压力穿孔机的推杆是一根圆棒，前端有一个方形推头，在推杆的中部有一段 1m 左右的方形截面的导向段，在其四面镶有可以更换的耐磨衬板。在推钢时，这一段方形导向段不通过轧辊，而只在辊式导向装置中起导向作用。

压力穿孔顶头和顶杆拧在一起，穿孔结束后，顶杆连同空心坯一起横向移出到一条辊道上，在此挡住穿孔坯而将顶杆（及顶头）抽出。穿孔后空心坯的壁厚不均平均为 15%，经过一次延伸以后，壁厚不均可降低 70%。因此，荒管的壁厚不均约为  $\pm 5\%$ ，具体数据是：对于壁厚为 5.5~6.35mm 的荒管壁厚不均  $\Delta S = \pm 7\%$ ，对于壁厚为 15~18mm 的荒管  $\Delta S = \pm 3.5\%$ 。

穿孔后的空心坯要在延伸机上延伸，减小管壁厚度，消除壁厚不均。

(3) Calmes 是在改进方坯连铸技术和水压穿孔技术两个方面的基础上发展起来的 PPM，在 PPM 发明之前解决连铸坯穿孔问题的几个途径主要是：

- a. 将连铸方坯轧成圆坯后，再用斜轧穿孔机穿孔；
- b. 采用三辊式穿孔机对低碳钢的连铸坯进行穿孔，至于其他钢种则用经过轧制的连铸坯进行穿孔；
- c. 在水压冲孔机上对连铸坯进行冲孔。

而 PPM 可以直接对连铸方坯穿孔，这在技术发展史上不能不说是一大进步。

(4) 无缝钢管生产领域使用连铸坯始自方坯，这是因为当时方坯连铸技术已是现成技术。20 世纪 60 年代初供生产线材和小型圆钢用的边长为 75~150mm 的连铸方坯要占连铸设备总生产能力的一半左右。由于无缝钢管对管坯的要求较严，因此，要将连铸方坯用作管坯还得从解决连铸坯中存在的皮下气孔、非金属夹杂和方坯的对角线

差异及裂纹等问题入手，使之处于允许范围内，并在轧管技术方面作一些必要的改进。经过若干年的改进，到 20 世纪 60 年代中期，连铸方坯才作为管坯用于无缝钢管生产领域。

(5) 压力穿孔机的延伸系数很小，平均延伸系数约为 1.1，这不能不算是一个缺点。因此，要使用延伸机，其一个主要作用是改善壁厚不均，但亦有助于提高第一变形阶段的延伸系数。

(6) 压力穿孔坯的壁厚不均确是个大问题，据意大利 INNSE 称，当  $L/D = 25$  时，穿孔坯的壁厚不均度不超过 20%。从八幡厂的样本来看，壁厚不均约达 30%。因此，日本新日铁公司加强对这一问题的研究，连续发表关于 PPM 壁厚不均问题的研究报告（八次），认为产生壁厚不均的直接原因是顶杆前端的弯曲和入口导板间隙太大，需通过模拟轧机对最佳穿孔条件及工具形状进行研究才能解决，当然，从现在来看这一研究的意义不太大。

(7) “压力穿孔法……对未来的无缝钢管生产技术将产生很大的影响”这句话可没有言中，这涉及连铸技术和斜轧穿孔技术这两个方面的发展。从连铸圆坯来说，实际上在 PPM 刚问世时，这方面的连铸技术已经过关。据德国曼内斯曼钢管公司提供的资料，到 1979 年 8 月，RK1 和 RK2 两台连铸管机组已累计使用 100 万 t 连铸圆坯轧管。由于立式或弧型连铸机均可以生产合格的连铸圆坯，因此，采用优质、价廉的连铸圆坯为原料生产无缝钢管就不存在问题了。从斜轧穿孔技术来看，狄塞尔穿孔机也能很好地穿轧连铸坯（见续释 6-2，将在钢管 2003 年第 2 期刊出）。

综合以上两方面，可以说压力穿孔机没有存在的必要，更不会对无缝钢管生产技术的发展产生影响。

（待 续）

金如崧译注

## ● 信 息

### 俄罗斯萨哈林岛一期输气管线工程合同签订

俄罗斯萨哈林岛一期输气管线工程所需的 7 万 t 钢管已通过国际招标获得，日本 4 家集团公司中标。合同于 2002 年 10 月签订，交货期为 2003 年 4 月。

该项目二期工程将包括敷设从萨哈林岛至日本北海道和本州的输气管线。

俄日输气管道工程计划在 2003 年开始施工。

（攀钢集团成都钢铁有限责任公司 高少华）