

我国缸筒用高精度冷拔钢管的技术与发展

刘铁军

(合肥钢铁集团有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要: 介绍了运用平面应变理论, 在预应力高刚性全液压冷拔管机上, 通过专减壁厚拔管的变形方式, 直接拔制液压气动缸筒用管。分析了拔管时的拔制力、合理减壁率及冷拔工艺与设备特点。提出了全面控制工艺系统精度是提高产品质量的关键。实践证明, 采用高精度冷拔钢管制造缸筒, 其强度、刚度、耐磨性能好, 且具有内表面硬外表面韧的特点。高精度冷拔缸筒管是直接制造各类缸筒的理想金属材料。

关键词: 冷拔; 高精度钢管; 平面变形; 专减壁厚拔管技术; 发展

中图分类号: TG356.11 文献标识码: B 文章编号: 1001-2311(2003)02-0001-05

Development of Manufacturing Technology of Cold-drawn Steel tube for Cylinder Casing Service

Liu Tiejun

(Hefei I & S Corp., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: Based on the plane strain theory, the steel tube for hydraulic/pneumatic cylinder casing service is produced with the prestressed, hi-rigidity and full hydraulically-operated cold-drawing bench and the deformation process for wall thickness reduction only. The drawing force, desirable wall thickness reduction and characteristics of both the cold-drawing technology and equipment are discussed, emphasizing that to enhance product quality it is crucial to take an overall control of accuracy of the technological system. Relevant operation has proven that the cylinder casing made of the hi-precision cold-drawn steel tube provides such advantages as satisfactory strength, high rigidity, good wear-resistance as well as hard inner surface and tough outer surface. The said hi-precision cold-drawn steel tube for cylinder casing service as an excellent metallic material can be processed directly into various kinds of cylinder casings.

Key words: Cold drawing; Hi-precision steel tube; Plane deformation; Pipe drawing process for reducing wall thickness only; Development

0 前言

长期以来, 我国冷拔管技术的表现形式, 始终停留于减壁必须减径的传统变形方式, 使用的冷拔机也一直沿用单体模座。由于传统变形方式与设备结构缺乏创新机制, 所以阻碍了某些高精度产品通过冷拔工艺向近终形方向拓展。

20世纪80年代中期, 为了节能、节材, 提高管材产品技术含量和附加值, 优化产品结构, 我国自行设计研制成功了新颖独特的冷拔工艺系统。采

用这类系统能直接有效地拔制高精度冷拔钢管——液压气动缸筒。本文就此择要介绍。

1 采用平面应变原理拉拔成型

如图1所示, 由拔模和芯头组成锥-柱状孔型, 采取专减壁厚平面变形的方式进行拔管, 避免了传统拔管工艺的诸多缺点。其优点是: ①允许减壁的变形量增加, 内外壁可同时得到加工, 从而提高了钢管塑性加工精度、表面光洁度和机械性能。②解决了用大直径管缩径为小直径管材的不合理性。

由图1可以看出, 模孔与芯头表面母线决定了拉拔的变形过程。实践证明, 这种模型对拉拔过

刘铁军(1931-), 男, 安徽当涂人, 教授级高级工程师, 长期从事冷拔高精度无缝钢管工艺研究。

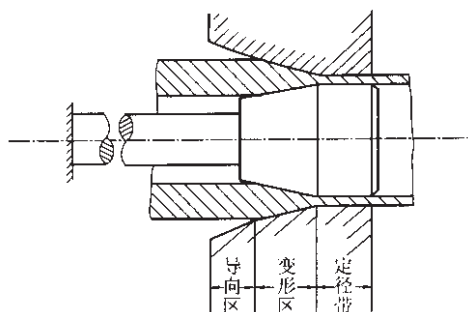


图1 专减壁厚拔管示意

程、产品质量、规格范围、拔机产量等均有利。

1.1 拉拔变形力分析

从图1可以看出,在专减壁厚拔管过程中,拔模与芯头和金属的接触表面存在塑性变形区(以下简称变形区)和弹性变形区(以下简称定径带)。拔管前,固定芯头和拔模分别直接贴入预先加工有一定锥度的管坯头部,使拉拔时管子的直径不变。随着拉拔管坯前进的夹持装置位移的增大,芯头与拔模和金属的接触面积逐步增大,形成变形区。从a点开始,拔制力也呈线性增大(图2)。由于没有周向应变,故可视为平面应变问题。当拔管到达b点后,纯径向压缩完成。由于从a点到b点的瞬时径向减壁量不再发生变化,所以在变形区内减壁变形引起的拉拔力也不再发生变化。但在变形结束后的金属进入定径带内时,其应力应变关系仍遵循虎克定律。因此,按照弹性卸载定律,这部分金属仍处于弹性变形状态,力图在径向扩张。由于在bc段受到拔模与芯头之间的径向压力,所以在b点以后总的拉拔力仍略有增加,到c点时达到最大值。根据以上分析,拉拔力应等于克服变形区内金属的拉拔应力和定径带内金属移动阻力之和。

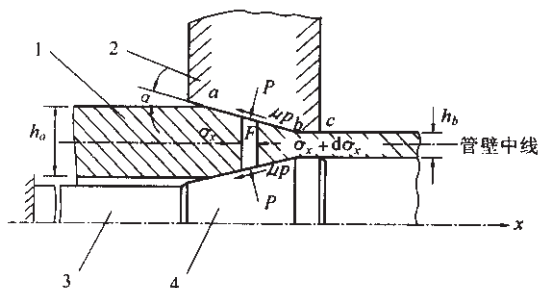


图2 拔管变形区受力示意

图2 拔管变形区受力示意

1.1.1 变形区金属拉拔应力计算

由图2所示,现对拔模与芯头之间的管坯单元

体的应力分量进行分析。假定模壁上的压力等于芯头上的压力,引用G·W·ROWE推导的固定芯棒闭式锥孔模拉拔出口处的轴向应力公式^[1],计算图2b点处模壁或芯头上的应力。即

$$\sigma_{xb} = S \left[(1+B)/B \right] \left[1 - (h_b/h_a)^B \right] = \bar{\sigma}_p \left[(1+B)/B \right] \left[1 - (1-\varepsilon)^B \right] \quad (1)$$

式中 S —— 冷变形后的屈服应力;

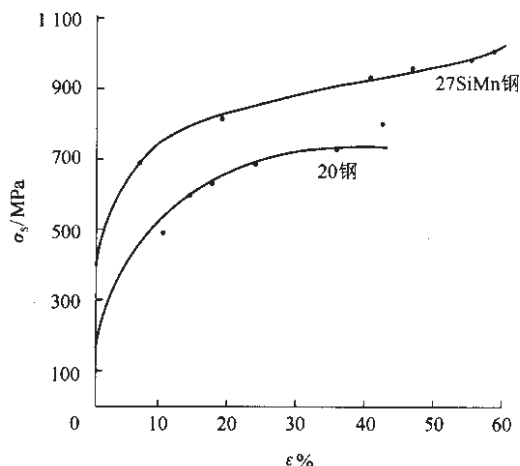
B —— 拔制工艺参数, $B = \mu/\tan \alpha$, μ 为芯头、拔模表面上的摩擦系数, α 为拔模半角;

ε —— 拔管壁厚减壁率,

$$\varepsilon = [(h_a - h_b)/h_a] \cdot 100\%;$$

$\bar{\sigma}_p$ —— 平面应变条件下的平均压缩屈服应力。

根据减壁率 ε 的大小,由采用实际测定和数学解析方法所制定的图3中可查得 $\bar{\sigma}_p$ 。

图3 $\bar{\sigma}_p - \varepsilon$ 实验值与回归曲线图 ($\bar{\sigma}_p = 1.155$ 时)

1.1.2 定径带金属移动阻力计算

经过变形后的钢管在进入定径带后不再承受塑性变形,但这部分金属仍处于弹性变形状态下,在作整体移动时力图在径向涨大,因而受到定径带拔模与芯头的径向压力。为求出定径带内这一压力和摩擦作用而产生的阻力,在定径带的管壁上取一单元体(见图4),分析其平衡状态微分方程。

根据最大切应力理论,定径带金属未达到塑性状态的条件 $\sigma_{\max} = \sigma_s/2$,因而这部分金属所受的径向压应力 σ_r 最大不会超过 $\sigma_s/2$ 。假设 $\mu\sigma_r$ 的最大值 $|\mu\sigma_r| = \sigma_s/2$,代入微分方程后,积分整理得到定径带出口处(c点)钢管的移动阻应力为

$$\sigma_{xc} = 2\mu\sigma_s l / (D - d) \quad (2)$$

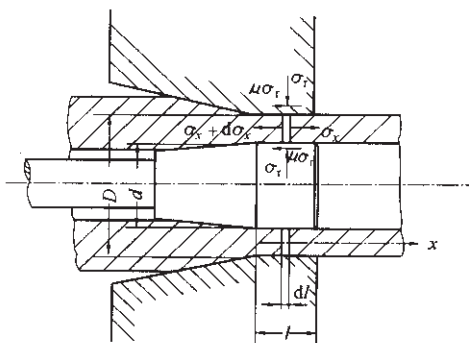


图4 定径带管壁受力分析

式中 D, d —— 分别为拔模、芯头定径带直径；
 l —— 定径带长度；
 σ_s —— 拔管的屈服强度。

1.1.3 拔制力计算公式

综上所述, 减壁厚拔管的单位拔制力 P 应为

$$P = \sigma_{xb} + \sigma_{xc} \quad (3)$$

将式(1), (2)代入式(3)得

$$P = \bar{\sigma}_p \left[(1+B)/B \right] \left[1 - (1-\varepsilon)^B \right] + 2\mu\sigma_s l / (D-d) \quad (4)$$

用 20 钢、27SiMn 钢热轧管, 分别在 1 470kN 和 2 450kN 预应力高刚性全液压冷拔管机上进行正常拔管测压试验, 其实测数据与公式(1), (2), (4)计算的拉拔应力、移动阻力及总拔制力数据比较, 计算结果比实测值平均大 1% 左右, 可见计算式的精度还是比较高的。

1.2 合理减壁率

采用固定式芯头组成锥形孔型拉拔, 金属在变形区内始终保持平面应变的条件。但由于拔制的是高精密管, 所以最终限制每道次减壁率 ε 大小的不是拔管的强度极限, 而是其屈服极限。因此, 根据拉拔应力计算式(1)可求出每道次的最大减壁率

$$\sigma_s / \bar{\sigma}_p = \left[(1+B)/B \right] \left[1 - (1-\varepsilon)^B \right]_{\max} \quad (5)$$

这里, 工艺参数 B 的摩擦系数取 $\mu = 0.05$, $\alpha = 6^\circ$, 平均压缩屈服应力 $\bar{\sigma}_p = 1.155 \sigma_s$ 。

代入式(5), $\varepsilon_{\max} = 1 - 0.66 = 0.34$ 。

由此表明, 拔制高精密管的道次减壁率的极限值可达 34%。但是, 如果在大变形量条件下拔制, 当管子离开模孔后, 因管内无支撑, 在轴向拉应力作用下, 管子可能会沿周向收缩, 由此影响拔管的精度等级。根据经验, 拔制缸筒管的道次减壁率还应参考拔管的钢种与其成品管内径 d 与壁厚 δ 的比值, 当其比值小于 20 时, ε 可在 $\geq 20\%$ 的范

围内选取; 高碳钢、合金钢或 $d/\delta \geq 20$ 时, ε 不应 $> 15\%$ 。

2 高刚性拔管机的拔管精度

由我国设计的高刚性全液压冷拔管机为预应力多座式机架结构(见图 5)。机架由 3 个闭口牌坊、4 根拉杆、8 根撑管通过预紧力紧固成框架结构, 使整个拔管机架保持整体性。

拔管在预应力状态下工作, 承载时, 牌坊不发生震动和倾斜变形, 受力均匀, 极大地提高了拔管的刚度、强度和精度。通过加载棒保压试验, 实测了拔管牌坊位移、轨道梁挠度等各项性能参数, 试验表明, 各项参数均低于理论计算允许值。

目前, 我国已建成预应力高刚性冷拔管机 27 台, 拔制力为 1 470 ~ 5 390kN。现将该类型冷拔管机的主要特点分述如下。

2.1 结构简单、制造方便

该型冷拔管机各零部件均属简单断面, 易于加工。另外预应力框架结构的机架提高了拔管的强度、刚性及承载力。由于具有这些特点, 因此该型拔管机可以进行大变形量拔制, 且对钢管的椭圆度、壁厚差有较强的纠偏作用, 有利于获得低粗糙度表面、内外径尺寸公差较小的高精度等级管材。

2.2 同心度高

由于主油缸活塞杆的拉力作用线, 拔模、芯杆和拉管装置行走轨迹的中心线以及钢管的轴线完全一致, 所以在拔制过程中拉管始终沿拔制线运行, 不产生径向跳动, 其同轴度和直线度高。

2.3 无级调速

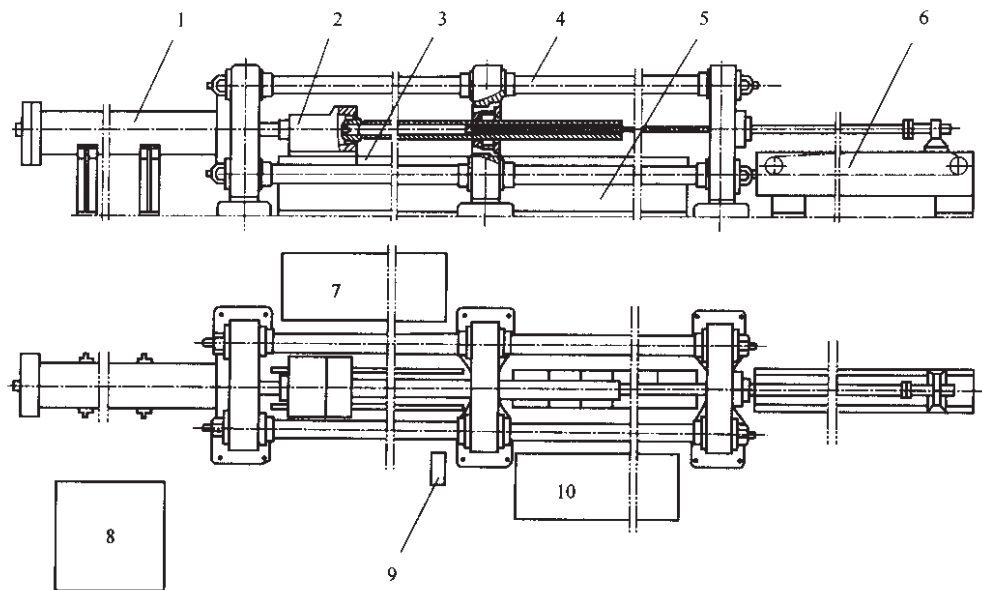
液压系统采用插装阀集成块工作, 拉拔速度可在较宽范围内平滑调整, 操作灵活、方便。根据拔管品种和道次变形量, 可实行低速咬入, 高速拉拔的操作制度。

2.4 拉管装置新颖

该装置由套口式锁紧油缸及卡块组成。拉拔时钢管无偏心、打滑、断头现象, 比钳口式夹持装置优越, 由此节省了钳口板, 减少了管端车头长度, 提高了成材率。

2.5 设备基础简易

由于缸座、模座和尾座是用拉杆联结而成的框架整体结构, 使拔管时的拉力在整个机架中自行封闭, 地基不承受拔管水平拔制力, 只承受设备重量, 从而节省了大量的设备基础费用。



1—主油缸 2—拉管装置 3—轨道床 4—机架 5—喂料床 6—芯杆伸缩系统
7—下料台架 8—液压传动系统 9—操作控制系统 10—上料台架

图5 预应力高刚性全液压冷拔管机结构示意图

2.6 全液压操作，维修方便

整个拔机的主辅助设备动作全部由液压缸完成，除少量密封圈、挡圈需定期更换外，拔机上无任何易损传动件，无需解体维修。

3 实行工艺系统监控，保证产品质量

直接拔制内径尺寸公差符合 GB1801-1979《公差与配合尺寸至 500mm 孔、轴公差带与配合》标准规定要求的液压气动缸筒用管，除要求足够的拔机刚度及合理的模具服役性能外，还必须有充分的工艺系统精度保证。拔机、模具、芯杆、夹持装置和管坯等构成了一个完整的工艺系统。缸筒用管的几何精度主要取决于整个工艺系统的精度保证。工艺系统误差称为原始误差。引起原始误差的因素很多(图6)。成品管的几何精度反映了工艺系统的精度。因此，在实际生产中，首先要找出工艺系统中存在的影响原始误差的主要因素^[2]，并对其进行有效控制，以尽力消除或减少其产生某个静误差与动误差的影响，在确保工艺系统稳定的基础上，保证产品的高质量要求。

4 冷拔缸筒管产品性能优越

采用高刚性全液压冷拔机冷拔的缸筒用管，其尺寸精度高，内表面粗糙度值低。经权威计量部门检

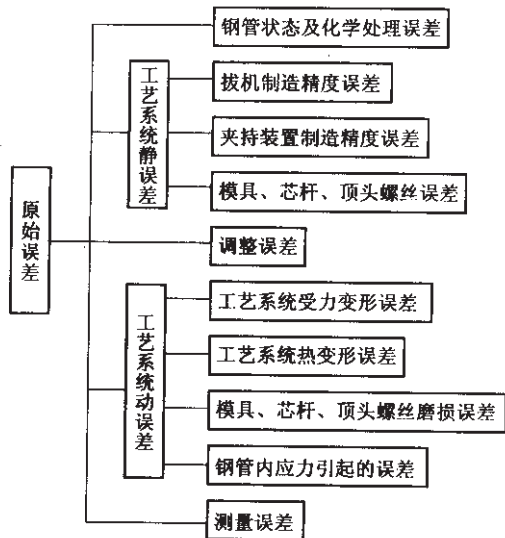


图6 影响缸筒用管几何精度的因素

测，均达到 GB8713-1988《液压和气动缸筒用精密内径无缝钢管》和 ISO4394/I-1980(E)《流体传动系统和元件——缸筒》标准要求，单位质量的断面性能优于同型切削加工—调质产品(如表1)，而且四个象限的性能均匀一致。特别对于壁薄、细长难于加工的缸筒，用冷拔产品更为有利。该系列产品于1989年被国家计委确定为国家级新产品^[3]。

根据专减壁厚拔管的不同变形方案，缸筒管还可具有不同的性能特征。例如：用 20 钢 Φ56

表 1 冷拔缸筒管与调质管的力学性能对比^[4]

钢种	冷拔状态				调质状态			
	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ ≥	σ_b/MPa ≥	$\delta_5\%$ ≥	HB ≥	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ ≥	σ_b/MPa ≥	$\delta_5\%$ ≥	HB ≥
20	560	700	9	180	500	600	21	170
30	620	730	8	200	590	630	15	210
45	682	780	7	215	650	750	12	250
20Mn2	624	791	8	195	590	785	10	187
27SiMn	810	950	8	230	835	980	12	255

注：①冷拔状态数据指内壁，均为 3 个数的平均值；调质状态数据选自文献[5]；②冷拔状态随拔制规格，不同，变形量分别在 25% ~ 35% 之间。

(H8) mm × 5mm 缸筒管制成的叉车用升降缸筒，在门架试验台上(泵站压力 17.5MPa)连续作 8 万次(行程 125km)疲劳试验。试验结果：缸筒的尺寸、形位公差精度无变化，无磨损痕迹；缸筒外壁沿径向(大于壁厚 1/2 的基体上)的金相组织显示出轻微变形或未变形的特征，基本上保持了原管坯的组织结构；强度变化不明显，拉力试样的断口为典型的杯状塑性断口，表现出高塑性与高韧性的特征。缸筒管的这种内硬外韧特征，恰好与缸筒在受内压时所产生的周向应力分布相一致。

由此可见，冷拔缸筒管具有高强度、高刚度及内表面硬、外表面韧等优异性能，选其制造液压气动设备，可在相同的耐压度下减小缸筒的壁厚，减轻缸体的实物重量，达到降低制造成本的目的。

5 结 论

运用平面变形原理，采取专减壁厚的拔管方式，在预应力高刚性冷拔机上直接拔制高精密缸筒管，是冷拔技术的一大突破。10 多年来的工业

生产与实际使用表明，采用冷拔工艺直接生产液压气动缸筒用管，技术先进可靠，比采用金属切削工艺生产缸筒的金属利用率提高 15% ~ 30%；节约电能 70% ~ 80%；提高工效数 10 倍，具有较高的经济价值和社会效益。

目前，我国生产该系列产品的品种规格(内径 × 壁厚：Φ40 ~ 317mm × 3 ~ 25mm)已达到 150 余种。产品广泛应用于煤矿液压支柱、支架；工程机械、汽车制造等领域。产品覆盖全国，市场前景广阔。

6 参考文献

- 1 张子公，陈金德，陈楚杰译. 工业金属塑性加工原理[M]. 北京：机械工业出版社，1984. 123 ~ 125.
- 2 刘铁军. 液压气动缸筒用高精度冷拔钢管生产的回顾与展望[J]. 钢管，1996，26(4)：8 ~ 9.
- 3 中国新闻社编. 国家级新产品选(下册)[M]. 1989. 388.
- 4 刘铁军. 高精度冷拔管制造液压缸筒的优越性分析[J]. 钢管，1999，29(1)：20.
- 5 徐灏主编. 机械设计手册(第一卷)[M]. 北京：机械工业出版社，1991. 2 ~ 248.

(收稿日期：2002 - 01 - 18)

●信 息

中国台湾从德国引进 1 台钢管机械扩径机

台湾万机钢铁工业股份有限公司向德国 SMS MEER 有限责任公司订购了 1 台单头钢管机械扩径机，计划在 2003 年完成安装和调试工作。

该设备用于直缝埋弧焊管的扩径。扩管规格为 Φ406.4 ~ 1 422.4mm，长度 8.0 ~ 12.2m，壁厚 7.9 ~ 31.8mm，可扩管材钢级 X70。主油缸设计最大扩径力为 11MN。在钢管终焊完成后，由插入管内的扩径头从内部对钢管进行定径，并对钢管全长进行矫直，扩径率为直径的 1% ~ 1.5%。经过扩径的焊管具有良好的物理性能和机械性能且几何尺寸精确，该类钢管现已广泛用在油气输送工程的管道上。

(攀钢集团成都钢铁有限责任公司 高少华)