

◀加工制造▶

不锈钢衬里复合管的液压胀合装置及技术要点*

王学生**

郭茶秀 魏新利 王定标

(上海交通大学制冷与低温工程研究所)

(郑州大学化学工程学院)

摘要 为了防止流体输送管道的腐蚀,并针对现有复合管生产方法的不足及国外生产复合管的装置复杂,固定投资大、密封结构不可靠等缺陷,研制开发了一种新型不锈钢衬里复合管液压胀合装置。分析了该装置的工作原理和技术特点,并从复合管液压胀合的条件及液压胀合成形压力的确定等方面讨论了该技术的应用要点。新型复合管液压胀合装置在液压胀合过程中,内层管与外层管的受力均匀,可显著提高复合管的生产质量。装置结构简单,生产效率高。

关键词 液压胀合 复合管 不锈钢衬里

复合管的制造技术分析

在石油化工、医药等领域,遇到腐蚀恶劣的环境,输送流体时常采用纯不锈钢管道。然而,纯不锈钢管道材料的成本较高,特别是在流体压力较高工况下,管道管壁较厚,所需成本就更高。为此,采用外层为普通碳素钢,内层为不锈钢合金的不锈钢衬里复合管,可达到节省钢材、降低成本的目的。

目前,我国生产不锈钢复合管,主要有机械胀接成形^[1]和爆炸成形^[2]两种方法。机械胀接成形法滚胀压力不均,难以进行理论分析,生产效率不高,劳动强度较大,胀接质量主要依靠经验来保证,而且制造中两管之间贴合力不足时往往需要多次滚胀,这样易造成衬里的减薄、开裂或抗腐蚀能力的下降;爆炸成形法对于较长的复合管炸药量很难准确确定,具有一定危险性,加工成本较高,生产效率较低。目前不锈钢衬里复合管仅限于小批量加工,还未能成为一种正式的工业产品普及应用。

液压胀合成形生产复合管,内管没有反复的碾压过程,因而内管内表面无加工硬化现象,减薄效应也不明显;又由于在胀合时,内管受到的液压分布均匀,从而在设计时就可以根据胀合后所要达到

的层间贴合残余应力水平,准确地确定所需胀合液压,液压胀合需通过液压大小控制胀合质量。液压胀合生产复合管的关键技术之一是管两端的液压密封。国外液压胀合的方法中,两端液压密封都是采用金属堵头结构来完成,有锥形堵头结构^[3,4]和球形堵头结构^[5],通过油缸沿管轴向向堵头施加外力,使堵头与复合管内层管的端部形成线接触或面接触的接触压力,以达到承受管内胀合液压不致泄漏的目的。因此液压胀合成形生产复合管的方法与其他方法相比较,在产品质量和生产效率等方面有较大的优势。目前世界上只有日本、英国、德国等少数国家拥有此项技术,但均未得到广泛应用。

为此,笔者开发了一种新型复合管液压胀合装置。2001年1月,利用该装置成功制造出了规格为 $\phi 121 \times (5+2)$ 和 $\phi 159 \times (6+2)$ 的不锈钢衬里复合管,目前生产最大复合管长度可达6 m。经检验,复合管的质量良好。

复合管口径越大,不锈钢材节省越多,经济效益就越显著。对生产石化行业大直径复合管而言,只要解决好装置的密封及内外管的装配问题,复合管的直径越大,所需的胀合液压越低,理论上更容易实施胀合。我们现正在进行复合管生产的大型化和系列化工作,相信不锈钢衬里复合管的广泛应用

* 该技术于2001年5月获中国专利,专利号:ZL 000249539.2。

** 王学生,副教授,生于1965年,2001年毕业于华东理工大学化工机械专业,获博士学位,现从事过程装备强化、压力容器及压力管道技术方面的教学与科研工作。地址:(200030)上海市华山路。电话:(012) 62932601。E-mail:wangxs@znu.edu.cn。

(收稿日期:2002-08-28;修改稿收到日期:2002-10-28)

会给我国的经济建设带来明显的经济效益。

工作原理及技术特点

1. 工作原理

新型复合管液压胀接装置如图1所示。装置安装时, 先把内层管与外层管套装在一起, 再将芯杆装入内层管内, 在胀头的两端依次装上O形密封圈及异形密封圈; 旋紧两端的螺母, 使异形密封圈的两侧面贴紧。胀合操作开始时, 按密封圈初始密封条件所需压强的高压液体(水)先通过左胀头的上部通道及右胀头下部通道, 并同时进入异形密封胶圈的凹腔内, 在高压液体的压力下, 密封圈径向胀大, 其外径与内管的内径接触形成密封面, 在液压下密封圈两翼轴向张开, 由于自紧密封原理, 诸密封面比压均远高于液压, 达到预紧密封的目的。然后开启阀门将此高压液体(水)从左胀头的下部通道注入内层管与芯杆组成的胀合腔内, 腔内气体从右胀头上部通道排出。提高水压, 随着内部液体压力的升高, 密封腔内压力也同步升高, 用以提供足够的密封比压。加压到工艺规定的胀合压力并保压一会儿后, 就可以实现复合管的胀合。随后密封腔内及胀合腔内同步泄压, 就完成了1根复合管的整个胀合工艺。

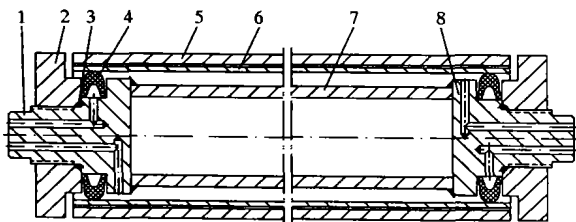


图1 新型液压胀合复合管生产装置

1—左胀头; 2—螺母; 3—O形密封圈; 4—异形密封圈; 5—外层管; 6—内层管; 7—芯杆; 8—右胀头

2. 技术特点

(1) 设计了一种径向位移变形能力强的自紧式异形橡胶密封圈及芯杆结构, 取代了两端堵头的密封结构, 因此取消了两端的液压油缸及笨重的支承装置, 大大减少了投资。

(2) 自紧式异形橡胶密封圈为软性密封, 其密封性能远优于金属堵头的硬性密封, 不仅适用于内衬为无缝不锈钢管的复合管生产, 对卷焊有缝薄壁不锈钢管为内衬的胀合也能保证密封, 从而实现了卷焊有缝不锈钢管为内衬的复合管生产技术, 这样不锈钢的消耗量将成倍减少。

(3) 芯杆结构大大减少了液压胀合时的充液

量, 既减少了高压泵的负荷, 节省能源消耗, 又大大缩短充压时间, 从而显著提高产量, 降低生产成本。

(4) 自紧式异形橡胶密封圈内液压等于或低于胀合液压时均可保证密封, 因而只需要一个液压源, 从而省去了国外装置所需的两套压力源之间的协调控制系统, 减少了投资, 且操作方便, 大大提高了复合管的生产效率。

技术应用要点

液压胀合时, 胀合压力均匀地作用于内管的内壁, 因而可容易地对胀合进行分析。内层管与外层管贴合时, 内层管将发生较大的塑性变形, 故应考虑材料的强化。假设内层管为线弹性强化材料模型, 而外层管在复合成形时一般控制在弹性范围之内, 即使发生塑性变形也非常小, 对于塑性较好的材料大都落在其屈服平台内, 因此可忽略材料的强化, 认为外层管为理想弹塑性材料模型。复合管在液压成形过程中, 采用两端开式的自紧式密封结构, 内外管的轴向力很小, 故管子受力状态可忽略轴向力的影响, 按平面应力分析。

1. 复合管液压胀合原理

复合管的液压胀合原理如图2所示。将两管套装在一起, 则管间存在原始平均间隙 δ , 对内层管, 在胀合液压的内压力作用下, 首先发生弹性变形(曲线a段), 然后产生塑性变形(曲线b段), 随液压力的增加达到T点, 在内压下内、外管之间的间隙消除, 液压继续升高时内管自由变形被外管阻止, 在内管外壁与外管内壁间产生接触压力 p_c , 外管内壁发生弹性变形(曲线c段), 甚至可能产生部分塑性变形(曲线d段)。当胀合液压达到所需的胀合压力 p_i 值(如外管内壁刚刚屈服则胀合液压为上限 p_{imax}), 泄去胀合压力, 内管与外管就会发生弹性回复, 如外管内壁的自由弹性回复量大于内管外壁的自由弹性回复量, 由于外管的内径不可能小于内管的外径, 自由弹性回复受阻, 就会在内管与外管之间产生残余接触压力 p_c^* , 即如图2所示。内、外管之间要想获得残余接触压力, 必须要求在卸压时的外层管的自由弹性回复能力 O_1M 大于内层管的自由弹性回复能力 O_2M , 由于内管外径不可能大于外管内径, 变形协调的结果是外管内径等于内管外径, 外管内壁的应力状态处于点A, 内管外壁的应力状态处于点B, 从而残留在外

管内壁上有接触压力 p_c^* (内压), 在内管外壁上留有相反接触压力 $-p_c^*$ (外压)。接触压力 p_c^* 的大小与内外管几何尺寸、材料应力应变关系及胀合液压 p_i 有关^[6]。

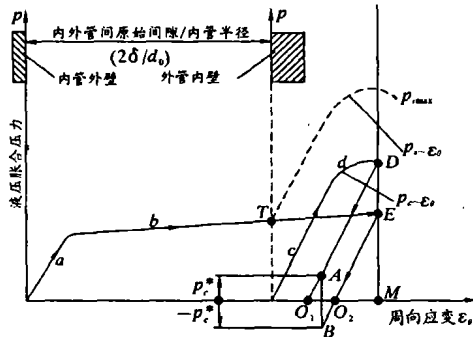


图2 液压胀合原理图

2. 内、外管实施液压胀合的条件

由图2可知, $\overline{O_1M}$ 和 $\overline{O_2M}$ 为外管及内管的弹性卸载应变变化量, 且 $\overline{O_1M} = \varepsilon_{\theta_o} = \frac{1}{E_o}(\sigma_{\theta_o} - \nu_o \sigma_{r_o})$,

$\overline{O_2M} = \varepsilon_{\theta_i} = \frac{1}{E_i}(\sigma_{\theta_i} - \nu_i \sigma_{r_i})$, 两式中, σ_{θ_o} 及 σ_{θ_i} 分别为在胀合压力 p_i 下外管及内管贴合壁面上的周向应力, σ_{r_o} 及 σ_{r_i} 分别为在胀合压力 p_i 下外管及内管贴合壁面上的径向应力。因复合管能胀合的条件为 $\overline{O_1M} > \overline{O_2M}$, 内外管材料的弹性模量 E 和泊松比 ν 相差不大, 为计算方便可认为近似相等, 同时内外管贴合时 $\sigma_{r_o} = \sigma_{r_i} = -p_c$, 故内外管能实现胀合的条件为内外管贴合后 $\sigma_{\theta_o} > \sigma_{\theta_i}$ 。

由于不锈钢衬里的厚度 t 较小, 一般 $t = 2 \sim 3$ mm, 且实际工程应用中外层管大部分也为薄壁圆筒, 因此内外管应力状态均简化为单向应力状态。因此根据复合管的液压胀接原理, 复合管的内层管与外层管之间能产生残余接触压力, 至少必须使 $\sigma_{\theta_o} > \sigma_{\theta_i}'$ 。这可作为内外管能否实施液压胀合的判断。由于内层管材料屈服后有一定的强化幅度, 因此内层管与外层管之间间隙 δ 在满足装配方便的前提下应尽量减小, 以免内层管材料强化后应力超过外层管的屈服强度。

3. 液压胀合成形压力 p_i 的确定

根据胀合过程中内外管的变形协调, 得出复合管液压成形液压力 p_i 与残余接触压力 p_c^* 的理论计算公式及最大和最小胀合液压的计算式, 实验证明可应用于工程实际^[6]。

$$p_i = \left(\frac{K^2 - 1}{2K^2} + \ln k \right) \sigma_{si}' + \frac{k^2 K^2 - 1}{K^2 (k^2 - 1)} p_c^* \quad (1)$$

由于内层管与外层管之间的最终残余接触应力 $p_c^* \geq 0$, 因此其胀合成形最小液压力为

$$p_{i\min} \geq \left(\frac{K^2 - 1}{2K^2} + \ln k \right) \sigma_{si}' \quad (2)$$

在一定范围内残余接触压力 p_c^* 随液压力 p_i 的增加而增大, 但外层管的弹性变形是有限的, 当外层管内壁开始屈服时, 其弹性变形达到最大。此时卸压最终可获得最大的残余接触压力 $p_{c\max}^*$ 。

当外层管内壁开始屈服时内外管之间接触压力 p_c 为

$$p_c = \frac{K^2 - 1}{2K} \sigma_{so} \quad (3)$$

因此胀合成形的最大液压力为

$$p_{i\max} = \frac{K^2 - 1}{2K^2} \sigma_{so} + \sigma_{si}' \ln k \quad (4)$$

如果内外管刚度差别较大, 最终内外管之间的残余接触应力 p_c^* 会引起内层管的反向屈服, 在不考虑材料包辛格效应时, 内层管内壁不发生屈服的残余接触压力为

$$p_c^* \leq \frac{k^2 - 1}{2k^2} \sigma_{si} \quad (5)$$

实际操作时, 将式(5)代入式(1), 求得结果与式(4)比较取小者。

结 论

- (1) 新型不锈钢衬里复合管液压胀合装置结构简单, 生产效率高。
- (2) 液压胀合过程中, 内层管与外层管的受力均匀, 可显著提高复合管的生产质量。
- (3) 一定的范围内, 两管残余接触压力与胀合液压成正比; 在胀合液压升至 $p_{i\max}$ 使外层管内壁开始屈服时泄压, 两管可获得最大的残余接触压力 $p_{c\max}^*$; 当升压超过最大胀合液压 $p_{i\max}$, 两管获得的残余接触压力几乎不增加, 且将影响到复合管生产安全, 因此复合管胀合加工时外层管的变形应限制在弹性变形范围内。胀合液压一般控制在 $p_{i\min} < p_i < p_{i\max}$ 之间。

符 号 说 明

- E_i, E_o ——内层管、外层管材料的弹性模量, MPa;
 σ_{so} ——外层管材料的屈服强度, MPa;
 σ_{si}' ——内层管材料的应变强化应力, MPa;
 ν_i, ν_o ——内层管、外层管材料的泊松比;

(下转第23页)

冷拔冷轧联合加工工艺

1. 电潜泵泵体钢管生产工艺流程

电潜泵泵体钢管冷拔冷轧联合加工工艺流程图见图3。

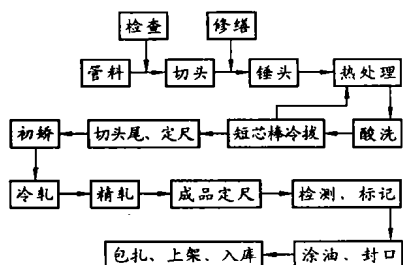


图3 电潜泵泵体钢管冷拔冷轧联合加工工艺流程图

2. 电潜泵泵体钢管质量保证措施

(1) 严格控制管料表面质量和壁厚均匀度，是控制泵管生产质量的第一道环节。对有缺陷的管料表面应修磨清理；对壁厚差 ≥ 1.1 mm的管料要筛选，分档投料、归类，区别不同工艺组织生产。

(2) 建立冷拔冷轧中间工序控制点，重点控制变形参数和酸洗润滑质量，组织半成品过程的“自检、互检、专检”活动，是进行全过程质量控制的中心环节。

(3) 采用PC装置控制无水冷辊底式燃烧轻质柴油连续退火炉炉温，在喷嘴、换热器上应用专利技术，可保证力学性能和金属材料内部组织质量。

(4) 根据产品技术特性，除对冷拔的中式模

具进行必要的改进设计以控制半成品壁厚的均匀变形外，还对LD型冷轧管变形工具的滑道工作面曲线进行数理统计分析，改进和加长芯棒工作段长度，合理选取轧辊孔型侧壁圆弧开口角，是缩小泵管尺寸偏差、提高表面质量和成品矫直前的直线度的有效措施。

(5) 为了使泵体钢管最终达到直线度标准，需在七辊立式矫直机上对成品实施精矫。以局部偏差值 d 为基本值，采用同压下量，通过多次弹性变形实现机矫，对不合格者再做微调重矫和检测，用1 m长的规范通径规检验，以顺利通过为合格。

(6) 采用专业设计制造的泵管综合测量仪，对成品泵管的尺寸偏差、壁厚均匀度、内孔圆度、表面粗糙度、直线度等做综合检测，是供货者和用户双方衡量泵管是否符合技术要求的基准条件。

综上所述，可得如下结论：

(1) 冷拔冷轧联合加工工艺生产泵体钢管比切削加工、冷拔、冷轧有明显的优势。冷拔冷轧属冷加工变形，能使金属晶粒细化，从而保证泵体钢管良好的综合力学性能。目前该工艺在QYB88—130系列电潜泵的泵体加工中使用，效果良好。

(2) 国外采用冷拔方法制造泵体钢管，其原材料一般为直缝焊管，电阻焊管的壁厚较均匀，表面质量好，用作制造泵体钢管的坯料比较理想。目前国内焊管机组在泵体钢管用坯料的材质、壁厚、规格和内焊缝处理质量等方面存在一定困难，尚待解决。

(本文编辑 任建民)

(上接第20页)

参 考 文 献

- d_i, d_o ——内层管内、外直径，mm；
- D_i, D_o ——外层管内、外直径，mm；
- t ——内层管的壁厚，mm；
- δ ——内层管外壁与外层管内壁之间间隙，mm；
- $\sigma_{\theta}, \sigma_{\theta'}$ ——在胀合压力 p_i 下外管及内管贴合壁面上的周向应力，MPa；
- σ_r, σ_r' ——在胀合压力 p_i 下外管及内管贴合壁面上的径向应力，MPa；
- $\epsilon_{\theta}, \epsilon_{\theta'}$ ——内层管、外层管贴合壁面上的弹性回复周向应变；
- p_i ——液压胀合成形压力，MPa；
- p_c ——复合管成形过程中内层管与外层管的接触压力，MPa；
- p_c^* ——复合管成形后内层管与外层管之间的接触压力，MPa；
- k, K ——外内径比，其中 $k = d_o/d_i, K = D_o/D_i$ 。

- 1 章新生．一种可用于双金属管和内壁耐磨金属管生产的方法．中国专利，CN1174767A，1998
- 2 樊新民，徐天祥．铝合金与钢爆炸复合界面的研究．稀有金属材料与工程，1992，21(4)：29~32
- 3 出願人に同じ，高内圧による复合管の制造装置．特许公报[日]，昭42-10796，1967
- 4 安田武夫．二重管制造装置．特许公报[日]，昭58-37050，1983
- 5 Spence M A, Roscoe C V. Bi-metal CRA-lined pipe employed for north sea field development. Oil & Gas Journal, 1999, 97(18)：80~88
- 6 王学生，王亚辉，李培宁等．液压胀合复合管的应力应变分析．郑州工业大学学报，2001，22(1)：33~35

(本文编辑 刘 峰)