

液压成型双金属复合管复合参数的研究

朱纪刚, 李 丽

(中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安 710018)

摘 要:介绍了双金属复合管的主要生产工艺。重点研究了液压成型双金属复合管的成型原理, 给出了成型压力、衬管尺寸的计算公式。分析了影响衬管长度的主要因素, 并通过实例分析了衬管的尺寸变化情况。分析认为: 衬管复合后长度会缩短, 衬管原始长度和径壁比是影响复合后最终长度的主要因素; 衬管复合后长度的计算值与实测值基本相符, 计算值比实际缩短量稍大。

关键词: 双金属复合管; 液压成型; 成型压力; 复合参数

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2022.6.58.62

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Cladding Parameters of Hydraulically-formed Bimetallic Composite Pipe

ZHU Jigang, LI Li

(China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Elaborated here in the paper are the main manufacturing processes for the bimetallic composite pipe. The formation principle of the hydraulically-formed bimetallic composite pipe is studied as the focus, and the formulas for the forming pressure and the liner tube dimensions are presented. Moreover the key factors as affecting the length of the liner pipe are analyzed. The variation of the liner pipe dimensions are also analyzed via relevant actual cases. It is revealed via the analysis that after being clad, the length of the liner pipe is shortened, and the original length and D/S of the liner pipe act as the main factors affecting the after-cladding final length; and that the calculated value of the after-cladding length of the liner pipe is basically in compliance with that of the measured value, which means that the former is slightly bigger than the actual shortening amount.

Key words: bimetallic composite pipe; hydraulically-formed; formation pressure; cladding parameter

双金属复合管是由两种不同的金属材料通过一定的工艺复合在一起制成的管子^[1-4], 内层为衬管, 外层为基管。由于内外材料不同使得复合管同时具备两种材料的优点, 在油气输送、化工、供水、装饰、食品、医疗、核电等领域广泛应用^[4-5]。

双金属复合管的生产主要有冶金复合与机械复合两种方法^[1,4]。冶金复合主要有堆焊、热挤压、钎焊、熔铸^[6], 或直接采用双金属复合板为原料卷焊成管等工艺; 机械复合主要有拉拔、旋压、爆炸、液压成型等生产工艺。目前采用机械复合生产方法

比较多。

流体输送用双金属复合管一般采用碳钢作为外层基管, 壁厚比较厚, 有很高的强度与承压性能; 不锈钢作为内衬管^[7-9], 壁厚较薄, 有较高的表面光洁度和耐腐蚀性。两种材料各自的特点使得这种复合管在满足同等性能条件下比单一金属具有更高的性价比, 因此这种复合管应用最广泛, 目前生产这种复合管主要采用爆炸成型和液压成型工艺。

爆炸压力成型也是机械复合管的一种生产方法, 是将内外管套在一起, 将内管两头封堵, 里面填上炸药, 通过爆炸来将内管密闭空间内的压力瞬间增大, 使得内管发生塑性变形与基管的弹性变形产生残余应力达到复合的目的。爆炸成型工艺简

朱纪刚(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事冶金设备设计研发工作。

单,但是压力不好掌控,分布也不均匀,且存在一定危险性和不确定性。

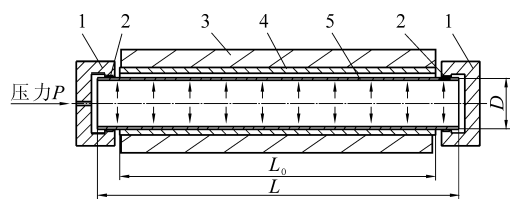
液压成型是将薄壁的衬管预先套进基管,然后封堵衬管两端,里面充满水或其他液体进行加压,使得衬管产生塑性变形与外面基管接触后继续变形,最终基管产生弹性变形。撤除压力后由于衬管的塑性变形使得基管的弹性变形不能完全消除,产生残余应力,衬管外壁就与基管内壁紧贴在一起。液压成型方法压力易于控制,变形过程连续平稳,内部压力均匀,因此产品质量较好。

德国 BUTTING 公司是世界上较早采用液压成型技术生产复合管设备的厂商,英国 PROCLAD 公司也采用了液压成型技术。中国重型机械研究院股份有限公司从 2012 年开始研发液压复合技术,制成了一台液压复合试验机,并采集了大量试验数据;2013 年为浙江久立特材科技股份有限公司成功研制了双金属复合管液压成型机,也采用了同样的复合原理。

现主要研究液压成型双金属复合管的成型原理和生产主要参数的计算,通过实例分析衬管变形后的尺寸变化。

1 液压成型原理

成型前将衬管套入基管,在基管外侧加装模具。液压复合成型如图 1 所示,外层为基管,内层为衬管,基管外侧为成型模具。基管长度为 L_0 ,衬管原始长度为 L ,按照复合要求,衬管与基管之间须留出足够的空间,一方面为了便于穿管,另一方面满足发生塑性变形的应变空间。



1 — 密封头 2 — 密封圈 3 — 模具 4 — 基管 5 — 衬管

图 1 液压复合成型示意

将衬管两端密封好后充满水并排出管内的空气,然后对管内加压;随着压力增大,衬管发生弹性变形后继续发生塑性变形,与基管紧贴在一起;继续加压到基管发生弹性变形。基管外侧的模具限制基管变形过大甚至产生塑性变形。保压一段时间

后卸除管内压力。由于衬管产生塑性变形紧贴于基管内壁,使得基管的弹性变形无法完全回复,残余应力使得两管紧贴在一起形成复合力。

复合结束后,由于残余应力的存在,基管有收缩的趋势。因此,这种液压复合管在运输压力流体时有明显的优点,承压能力强。

2 复合参数的选取

在复合过程中,需要选择的参数很多,如衬管的尺寸和材质、基管的尺寸和材质、液压压力等。尺寸参数选定后,成型压力的大小也会直接影响生产。压力过大会使基管产生塑性变形甚至破裂;压力过小则变形量不够,不能达到充分的塑性变形,复合效果不好。

(1) 复合管材质的选择。

由于复合管的用途不同,根据不同的使用要求,制造复合管的主要材料有碳钢、合金钢、耐腐蚀钢、铜及铜合金、铝及铝合金、镍合金、钛、锆等^[10]。基管材质主要采用碳钢及合金钢,衬管材质主要采用不锈钢、有色金属及镍合金、钛、锆、钽等难熔金属。实际生产中可根据产品不同使用要求选取相应的材料,或按用户要求定制。

(2) 成型压力的计算。

目前液压成型压力普遍接受的理论是弹塑性理论,文献[11-13]等从不同方面进行理论分析,有些也给出了复合压力的取值范围,文献[14]通过有限元分析优化了压力参数,但是这些结果比较复杂,并且在一定条件下是取值参考范围,具体应用中颇有不便。实际生产中制定复合工艺应给出确定的数值,因此需对成型压力进行简化计算。

常用的复合管都选用塑性材料,为了简化问题,假设为理想弹塑性材料。另外作为限制条件,基管外侧要安装模具以防止其发生过大变形。

由复合成型原理可知,成型压力 P 由两部分组成,即:

$$P=P_1+P_2 \quad (1)$$

式中 P_1 —— 衬管发生塑性变形所需压力, N;

P_2 —— 基管产生弹性变形所需压力, N。

为了计算受内压钢管压力与应力的关系,取一段钢管作为研究对象,并将其沿轴线剖开,分析其一半的受力情况。钢管受内压分析如图 2 所示,该分析钢管的长度为 l ,内径为 d ,壁厚为 a ,内部压力为 p ,剖面在内压的作用会产生拉力 F ,对应的

拉应力为 p_1 。根据受力关系, 这个拉应力就是钢管所受的周向应力。

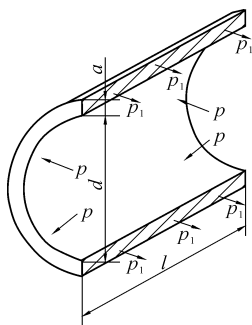


图2 钢管受内压分析示意

根据图2所示几何关系, 可知拉力 F 为:

$$F = pdl \quad (2)$$

又根据剖面面积与剖面上的拉应力的关系有:

$$F = 2p_1la \quad (3)$$

联立公式(2)~(3)可得出:

$$p = \frac{2p_1a}{d} \quad (4)$$

公式(4)即是钢管所受内压力与周向拉应力之间的关系。

按照弹塑性理论^[15], 衬管发生塑性变形时, 周向拉应力 p_1 将达到材料的屈服强度 σ_s , 将内径 $D-2s$ 代入到公式(4)中可得出内部压力为:

$$p_1 = \frac{2s\sigma_s}{D-2s} \quad (5)$$

式中 D —— 衬管原始外径, mm;

s —— 衬管原始壁厚, mm。

同样, 在压力复合过程中, 基管发生弹性变形, 其弹性应变为 ε (一般碳钢管的最大弹性应变取 0.15%~0.25%), 基管管壁产生的周向应力^[16]为 $E\varepsilon$ (E 为基管材料的弹性模量), 将内径 D_0-2t 代入到公式(4)中得出内部压力为:

$$p_2 = \frac{2tE\varepsilon}{D_0-2t} \quad (6)$$

式中 D_0 —— 基管原始外径, mm;

t —— 基管壁厚, mm。

在复合过程中, 应合理控制基管的应变使得基管不发生塑性变形, 采用在基管外面加装模具的方法也能达到同样的目的。在实际生产中, 压力上升应保持平稳, 不得出现太大的波动; 控制保压时间, 使得衬管充分发生变形; 卸荷时也应该平稳卸压, 压力下降不得太快。液压复合时理想的压力曲

线如图3所示, 实际生产中, 钢管内压力控制应该尽量跟随该曲线。

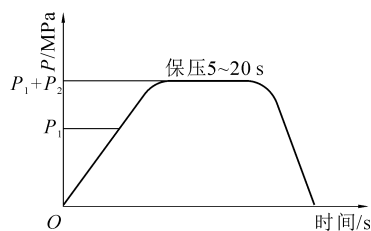


图3 液压复合时理想的压力曲线

按照上述分析结果选定成型压力, 对不同规格的钢管进行试验, 结果见表1。基管选用 Q235B 无缝钢管, 衬管选用 316L 不锈钢焊管, 从试验结果来看复合效果还是比较满意的。

表1 不同规格复合管的成型压力

基管外径/mm	基管壁厚/mm	衬管壁厚/mm	成型压力/MPa
88.9	4.0	3	72.53
88.9	4.4	3	77.78
101.6	4.0	3	62.43
101.6	4.4	3	66.90
114.3	6.0	3	74.62
168.3	7.9	3	60.95
219.1	12.7	3	70.19
273.1	12.7	3	54.89
273.1	25.4	3	112.60

(3) 衬管直径的选择。

基管尺寸是按产品要求选择的, 确定基管尺寸后, 应按照基管内孔尺寸来确定衬管尺寸, 以保证复合效果。衬管直径的选择需要考虑两点因素: 第一要使衬管发生充分的塑性变形; 第二便于生产时穿管。但是衬管直径不能太小, 防止由于塑性变形过大复合后产生减壁现象。因此, 衬管原始外径 D 应略小于基管内径。笔者通过实验机进行了试验数据对比分析, 认为一般塑性材料可按照经验公式(7)进行选取:

$$D = 0.98(D_0 - 2t) \quad (7)$$

另外, 由于液压成型一般采用径向密封, 径向密封圈一般都有标准的尺寸规格。通过公式(7)选取的衬管外径尽量向下圆整符合密封圈的尺寸, 目的是减少密封圈的规格, 增加通用性。

(4) 衬管壁厚的选择。

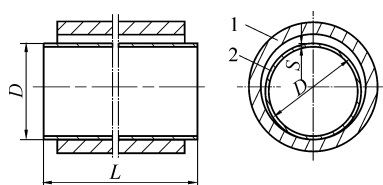
为了节约金属材料,降低复合压力节约能耗,衬管原始壁厚 s 在满足产品要求的前提下应尽量选小一些,一般采用 $0.4\sim 5.0\text{ mm}$ ^[10],或者按用户要求定制。

(5) 衬管长度的计算。

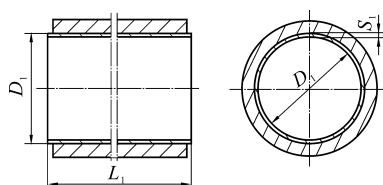
基管与衬管复合前后状态如图4所示。复合前后衬管体积为:

$$V_{\text{前}} = [\pi D^2 - \pi (D-2s)^2] L / 4 \quad (8)$$

$$V_{\text{后}} = [\pi D_1^2 - \pi (D_1-2s_1)^2] L_1 / 4 \quad (9)$$



(a) 复合前



(b) 复合后

L_1 — 衬管变形后长度 D_1 — 衬管变形后直径

s_1 — 衬管变形后壁厚

1 — 基管 2 — 衬管

图4 基管与衬管复合前后状态

根据前文的假设,一般衬管材料为不锈钢,存在明显的弹性变形与塑性变形阶段,因此按照理想弹塑性材料简化计算。根据材料力学弹塑性理论^[16]及衬管变形的应力-应变关系可得:

$$D_1 = (1 + \varepsilon_1) D \quad (10)$$

$$s_1 = (1 - \mu \varepsilon_1) s \quad (11)$$

式中 ε_1 —— 衬管变形后的径向应变;

μ —— 衬管材料周向变形系数。

由于衬管变形前后体积不变,则公式(8)~(9)相等,并将公式(10)~(11)代入并整理可得:

$$L_1 = \frac{L}{1 - \mu \varepsilon_1} \times \frac{D - s}{(1 + \varepsilon_1) D - (1 - \mu \varepsilon_1) s} \quad (12)$$

令 $\lambda = D/s$, λ 为衬管的直径壁厚比,则公式(12)可表示为:

$$L_1 = \frac{L}{1 - \mu \varepsilon_1} \times \frac{\lambda - 1}{(1 + \varepsilon_1) \lambda - (1 - \mu \varepsilon_1)} \quad (13)$$

常用衬管选材如前文所述,其 $\mu < 0.4$ ^[17],且应变 $\varepsilon_1 < \mu$,将这两个条件代入公式(13)并进行分析比较,可以得出 $L_1 < L$,也就是说衬管变形后长度将会缩短。衬管材料确定后,衬管长度变化量与 λ 和原始长度 L 有关, λ 是表征管材管壁薄厚的重要指标,为了节约金属并减少复合功耗,一般衬管都采用极薄壁管,即 $\lambda > 40$ ^[10]。

由公式(13)可推导出衬管原始长度 L :

$$L = \frac{(1 + \varepsilon_1)(1 - \mu \varepsilon_1) \lambda - (1 - \mu \varepsilon_1)^2}{\lambda - 1} \times L_1 \quad (14)$$

实际生产中,为了保证衬管变形后密封良好,需要考虑密封圈尺寸,取 $L_1 = L_0 + F$ 。其中, F 是衬管密封长度,mm。 L_1 确定后即可按照公式(14)选择衬管原始长度。

3 实例分析衬管长度变化

试验用复合管变形前尺寸见表2,基管采用Q235B无缝钢管,衬管采用316L不锈钢焊管,复合前磨平衬管外焊缝,采用径向密封。基管外侧安装有模具,试验压力46.58 MPa,试验介质为水,保压时间10 s。

表2 复合管变形前尺寸 mm

基管		衬管		
外径	壁厚	壁厚	外径	长度
219.1	7.5	4	200	12 000

基管复合后外径实测值为219.3 mm,衬管变形后长度实测值为11 826 mm,衬管变形后直径 D_1 实测值为204 mm。将 D_1 、周向变形系数 $\mu = 0.26$ ^[17]和径向应变 $\varepsilon_1 = 0.02$ 代入公式(12)可计算得出衬管变形后长度 $L_1 = 11\ 820\text{ mm}$ 。计算与实测结果均表明,复合后衬管的长度会减小,复合后衬管轴向尺寸变化非常明显。从结果来看,计算值11 820 mm与实测值11 826 mm基本一致,计算值比实测值缩短量稍大,这是由于在复合过程中不锈钢衬管受到拉伸金属产生滑移^[18],内部高压使得衬管与基管接触产生很大的摩擦阻力,限制了衬管金属的轴向流动所致。

4 结 论

笔者对复合管成型参数进行理论分析,也给出了复合参数的选取方法。在制定工艺参数时应合理选择复合压力及衬管的原料尺寸来保证达到预期的

复合效果。生产过程中,应控制压力平稳变化使得复合过程中金属变形均匀连续,这也是保证复合质量的重要手段。复合后衬管长度会缩短,缩短量与原始长度和直径壁厚比 λ 有关。制定复合工艺时应充分考虑到衬管长度缩短的因素,合理选择衬管的原始长度,保证留有足够的轴向余量与密封空间,避免在复合过程中脱离密封圈而造成的泄压。

通过计算选择复合参数,经过实验机和实际生产实践也得到了满意的结果。由于采用了液压复合工艺,其压力可精确控制,生产过程中衬管长度变化均匀平稳,两端变形量基本一致。这也从生产实践中得到印证。

5 参考文献

- [1] 曹晓燕,邓娟,上官昌淮,等.双金属复合管复合工艺研究进展[J].钢管,2014,43(2):11-15.
- [2] 李发根,魏斌,邵晓东,等.高腐蚀性油气田用双金属复合管[J].油气储运,2010,29(5):361-364,315.
- [3] 内衬不锈钢复合钢管:CJ/T 192—2017[S].2017.
- [4] 魏斌,李鹤林,李发根.海底油气输送用双金属复合管研发现状与展望[J].油气储运,2016,35(4):343-355.
- [5] SPENCE M A, ROSCOE C, SCHAFFER K, et al. Bi-metal, CRA-lined pipe employed for north sea field development[J]. Oil & Gas Journal, 1999, 97(18): 80-88.
- [6] 凌星中.冶金结合复合钢管研制和应用[J].焊管,2006,29(1):42-46.
- [7] 许爱华,院振刚,杨光,等.双金属复合管的施工焊接技术[J].天然气与石油,2010,28(6):22-28,90.
- [8] 流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管:GB/T 31940—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [9] LEE W S, LIU C Y. The effects of temperature and strain rate on the dynamic flow behaviour of different steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 426(1-2): 101-113.
- [10] 席正海.国外双金属复合管生产工艺[J].四川冶金,1989(4):52-58,26.
- [11] 王学生,王如竹,李培宁.复合管液压成形装置及残余接触压力预测[J].中国机械工程,2004,15(8):662-666.
- [12] 王学生,王亚辉,李培宁,等.液压胀合复合管的应力应变分析[J].郑州工业大学学报,2001,22(1):33-35.
- [13] 郑茂盛,高航,滕海鹏,等.双金属复合管液压胀形过程的受力分析[J].焊管,2016,39(9):1-5.
- [14] 张阁,李兰云,肖彦英.双金属复合管液压胀形工艺参数的优化设计[J].热加工工艺,2021,50(17):99-103.
- [15] 王仲仁,苑世剑,胡连喜,等.弹性与塑性力学基础[M].2版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [16] 刘鸿文.材料力学(Ⅱ)[M].5版.北京:高等教育出版社,2011.
- [17] 成大先.机械设计手册(第1卷)[M].5版.北京:化学工业出版社,2008.
- [18] 赵赫,夏勇,姚再起,等.304不锈钢薄壁管环向材料力学行为的实验表征[J].汽车安全与节能学报,2015,6(3):250-258.

(收稿日期:2021-11-02;修定日期:2022-05-09)

● 简 讯

天津钢管制造有限公司新一代钛合金特殊螺纹 TP-G4(Ti) 油管下井成功 [发布日期:2022-12-16] 2022年11月26日—12月2日,天津钢管制造有限公司(简称天津钢管)研发的新一代钛合金特殊螺纹 TP-G4(Ti)油管在中石化西南油气分公司元飞203H侧井顺利入井,12月12日油管管柱一次试压合格,标志着公司与中石化西南油气分公司在钛合金领域的合作得到进一步加深,本次共入井钛合金油管产品567支、5515.47m,螺纹现场拧接后逐支试气全部合格。本次成功应用的 TP-G4(Ti)特殊螺纹是在国家重点研发计划支持下研发成功的新一代适用于钛合金的特殊螺纹结构,该结构具有持久密封能力强、抗螺纹黏结能力强、使用方便等特点,设计时引入了先进钛合金表面处理技术,各项螺纹参数检验一次合格,各项性能指标均达到国际先进水平。
(摘自:TPCO 天管在线)