

新型双金属 CRA 复合管热液压成形新工艺

范贤勇, 王学生, 陈琴珠

(华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:开发了一种新型双金属 CRA 复合管热液压成形工艺,设计了一套双金属复合管热液压成形装置。通过新装置的机理分析、理论研究和实验验证,证实了该热液压成形工艺的先进性和可靠性。结果表明,该双金属复合管热液压成形装置密封性能好、复合管结合强度高,可广泛应用于工业生产,为工业应用大口径复合管提供了高效及可靠的方案。

关键词:双金属 CRA 复合管; 热液压; 成形工艺; 成形装置

中图分类号:TH 162 **文献标志码:**A

文章编号:1006 - 7167(2018)11 - 0067 - 04



the Novel Thermo-hydraulic Forming Technology of Bimetallic CRA-lined Composite Pipes

FAN Xianyong, WANG Xuesheng, CHEN Qinzhu

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: A new type of hot hydro-forming technology is developed for bimetallic CRA liner pipe. It is an advanced manufacturing process of composite pipe in China. According to the new technology, a set of bimetallic liner pipe hot hydraulic forming devices are designed. The analysis of the working principle of the new devices, the theoretical research and the experimental verification have proved the advancement and reliability of the thermal hydraulic forming process. The research results show that the thermal hydraulic forming devices of the bimetallic liner pipe have a good sealing performance, and the composite pipe has a high bonding strength. These devices can be widely applied to industrial production, and it provides an efficient and reliable scheme for large diameter liner pipes for industrial applications.

Key words: bimetal CRA-lined pipe; thermo-hydraulic forming; residual compressive pressure; forming device

0 引言

双金属 CRA 内衬管已广泛应用于石油、海水和天然气运输等行业,该内衬管是由能承受高压的碳钢外管与耐腐蚀合金(CRA)内管复合而成的^[1]。考虑到

生产效率、成本、能耗及耐腐蚀性等因素,在工业生产中采用双金属 CRA 复合管而非纯 CRA 管,内层(复合管)厚度仅为 1.5 ~ 3 mm 耐腐蚀合金,可有效防止介质在运输过程中的腐蚀^[2],而且批量生产成本低。

近年来,国内外许多研究人员采用了各种方法来制造双金属 CRA 复合管,例如,冶金结合工艺或液压成形工艺已被广泛应用于该领域^[3],尽管热处理在冶金结合过程中是必不可少的,但它可能导致应力腐蚀开裂或降低双金属 CRA 复合管在高温下的抗腐蚀性^[4],液压成形过程可避免高温条件,生产出高质量的复合管。由于液压成形 CRA 复合管的两端密封困难,制造双金属 CRA 复合管需要较大的成形压力,而且两端密封机械结构复杂且庞大。虽然国外所使用的

收稿日期:2018-03-29

作者简介:范贤勇(1978-),男,布依族,贵州清镇人,博士生,研究方向:承压设备。

Tel.:13764928566; E-mail:13764928566@163.com

通信作者:王学生(1965-),男,上海人,教授,博士生导师,主要研究方向:环保与再生能源技术。

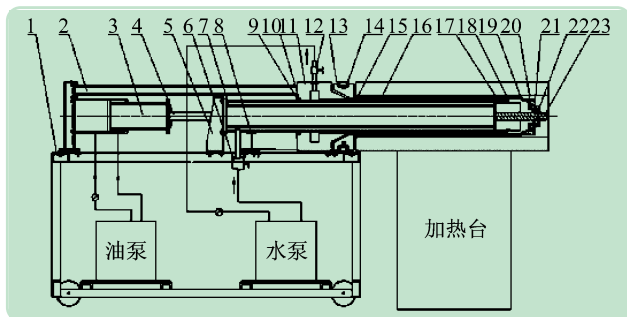
Tel.:021-64251768; E-mail:wangxs@ecust.edu.cn

两端装式油缸(锥形或球形)可以解决制造双金属 CRA 复合管时的密封问题^[5-6];国内王学生研制的芯管自密封圈装置已被国内多家生产厂家采用,该装置结构简单,可以防止液体从管道漏出^[7-10],但上述两种方法主要解决小口径的复合管,对于大口径复合管需要成形压力很高,随着管内膨胀压力的升高密封存在泄漏问题,如果成形压力不高,内外管无法紧密复合产生缝隙。

本文提出了一种新型热液压成形工艺及研制的成形装置,采用自紧式密封设计,成形压力越高密封性能越好,解决了传统的液压泄漏问题。由于外管加热,复合管通过温度差产生的过盈量弥补了抱紧力的损失,因此复合管结合强度非常高。

1 热液压成形装置工作机理

结合材料性能和液压成形工艺特点,开发了一种新型双金属复合管制造技术,称为热工水力成形工艺。该技术充分利用了以往工艺中的优点以及热处理和液压膨胀压力下碳钢和 CRA 钢的特点,研制了双金属复合管热液压成形设备,见图 1。



1-可移动支架, 2-连接杆, 3-液压缸, 4-推杆, 5-复合管支架, 6-进水口, 7-芯管, 8-管支架, 9-O形圈, 10-O形圈盖, 11-可动模具, 12-出水口, 13-固定模具, 14-固定模具支架, 15-复合管, 16-外管, 17-芯管端子, 18-滑动导向器, 19-滑动器, 20-O形圈, 21-O形圈, 22-端子螺母, 23-螺钉

图 1 液压膨胀装置

该成形装置的机械结构组成有自紧密封机构、可移动内管膨胀机构、外管加热机构,对生产大口径复合管具有生产效率高、结合力大等特点。其工作原理如下:首先,由固定模具 13 和活动模具 11 将 CRA 内管 15 安装并固定到新装置上,然后启动油泵。将外管 16 放入高温炉中,并在指定的时间加热。外管被加热到指定的温度后外管内径增大,移动可移动支架 1,将 CRA 内管 15 插入外管 16 中。此时保持油泵工作,并且启动高压水泵,打开进水口 6,让水进入芯管 7 与衬里管 15(膨胀腔)之间的空腔内,不要关闭出水口 12,直到膨胀腔充满水为止。将液压增加到指示值,CRA 内管 15 将膨胀以贴合外管的内表面,外管受到液压力和内外管之间受到相互作用力的作用。当液压力增加

到特定值时,停止加热,外管受到冷却回弹,回弹力促使内外管紧密接触产生很大的结合力。

2 热液压成形理论分析

2.1 热液压成形装置新工艺

热工水力成形工艺的工作机理如图 2、3 所示,横坐标轴的值代表内管的外径或外管的内径;纵坐标轴的值表示成形过程中的水压膨胀压力或残余压应力。首先,当外管在高温移动炉中加热时,外管的内径从点 1'到点 2'逐渐变大,应变 ε_0 是由热膨胀引起的。其次,用水填充复合管,产生液压膨胀压力,使整个过程膨胀并冷却内管。随着水填充到管内,内管的直径也从点 1 扩展到点 2,当复合管的直径在点 2 以下时,从内管的内表面开始的塑性变形。然后,内管移入外管内径,内管在接触外管道的内表面(点 3)之前不断地膨胀继续加压。此时内管液压膨胀压力对外管作出反应,复合管的变形量等于内管与外管之间的原始间隙加上 ε_0 之和。当液压膨胀压力增加到指定值时,外管开始出现弹性变形,而复合管仍处于塑性变形状态,从点 2'到点 3'的应变 ε_1 是由于在水力膨胀压力下外管的变形引起的。当复合管和外管的合成压力分别达到点 4 和点 3'时,液压被释放并且复合管在空气中冷却。值得注意的是,由于外管的热收缩效应,两根管的回弹压力和附加压应力都在复合管中产生,在这些压力的共同作用下,内衬管和外管紧密配合并产生应变 ε_2 和 ε_0 。最后,外管具有小的拉伸压力,复合管具有残余压应力, ε_3 和 ε_1 是由这些不同压力的作用引起的,图 2 显示了双金属 CRA 复合管的热成形过程。

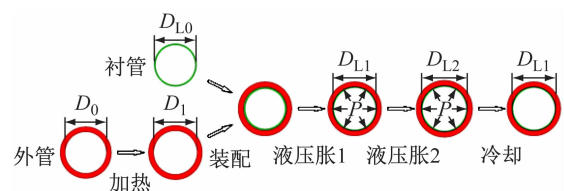


图 2 双金属 CRA 复合管的热液压成形过程

2.2 双金属复合过程中应力应变分析

如图 3 所示,可以看到内管和外管之间的应变关系,解决双金属复合管中成形所需要的压力,内管和外管之间的应变关系为

$$\varepsilon_0' + \varepsilon_1' - \varepsilon_3' = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \quad (1)$$

$$\varepsilon_0' = \sqrt{\frac{1 + 3\alpha\Delta T}{1 + \alpha\Delta T}} D_{1'} - D_1' \quad (2)$$

式中: ε_0' 为外管内径的热变形量^[11]; α 为管的线膨胀系数($1/^\circ\text{C}$); ΔT 为温差(外管在高温炉中加热时的升温); D_1' 为外管内径(mm)。

如图 1 所示,装置采用了芯管和自紧密封圈来解决密封问题,降低了工艺过程中的用水量。该结构具

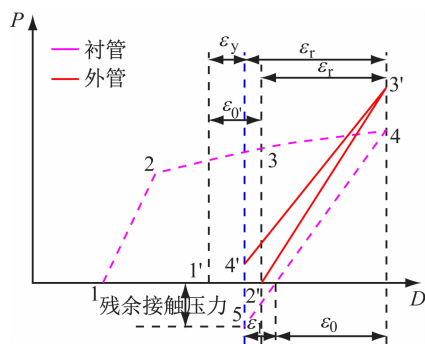


图 3 双金属 CRA 复合管的热水力成形过程

有显著的优点:由于轴向载荷可忽略不计,只有径向力施加在内管和外管上。因此,很容易分析水力膨胀下的应力和应变问题。

在复合管的外径达到点 2' 的值之后,液压膨胀压力开始对内管和外套作出反应。因此,外套具有施加给内管的压应力 p_c ,图 4 表示了内管和外套的力分析。此时,内管中存在塑性变形,而弹性变形作用于外套。根据特雷斯卡屈服准则,复合管内的圆周应力和径向应力可由下式计算^[12]。

$$\sigma_{r_1} = -p_c \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta_1} = \sigma_{i_1} - p_c \quad (4)$$

$$p_i - p_c = \sigma_{i_1} \frac{2t}{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} - t} \quad (5)$$

式中: σ_{i_1} 为复合管的应变强化应力; t 为内管壁的厚度。

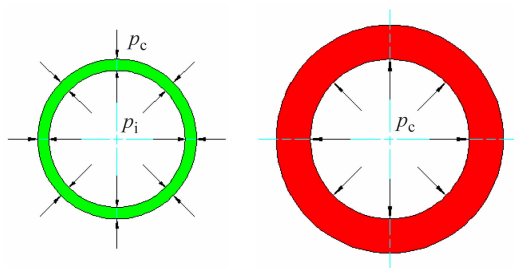


图 4 内管和外套径向载荷图

根据图 4 中的方程和厚圆柱体的弹性理论,外套中的圆周应力和径向应力可以通过下式计算。

$$\sigma_{r_1} = -p_c \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta_1} = \frac{D_{1'o}^2 + D_{1'}^2}{D_{1'o}^2 - D_{1'}^2} = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} p_c \quad (7)$$

式中: $D_{1'o}$ 为外套的外径; K 为 $D_{1'o}/D_{1'}$ 。

因此,环向应变 $\varepsilon_{1'}$ 和 ε_0 的产生可分别由 p_c 和 $-p_c$ 根据广义胡克定律给出。

$$\varepsilon_{1'} = \frac{1}{E_{1'}} (\sigma_{\theta_{1'}} - \mu_{1'} \sigma_{r_{1'}}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{E_1} (\sigma_{\theta_1} - \mu_1 \sigma_{r_1}) \quad (9)$$

式中: μ_1 为复合管的泊松比; $\mu_{1'}$ 为外套的泊松比。

将式(3)~(5)代入式(8),式(6)和(7)代入式(9),就可以得到 ε 和 p_i 之间的关系:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{E_1} \left[\sigma_{i_1} - (1 - \mu_1) \left(p_i - \sigma_{i_1} \frac{2t}{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} - t} \right) \right] \quad (10)$$

$$\varepsilon'_{1'} = \frac{1}{E'_{1'}} \left(p_i - \sigma_{i_1} \frac{2t}{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} - t} \right) \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu'_{1'} \right) \quad (11)$$

在此复合过程中,液压膨胀压力增加至点 4,释放压力并冷却空气中的管道,内管和外套的径向载荷如图 5 所示。

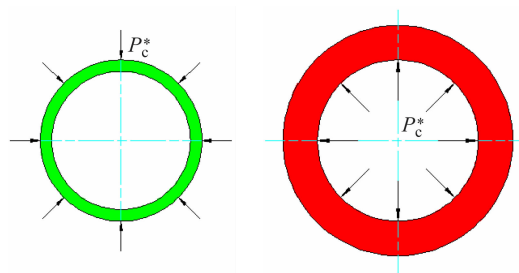


图 5 内管和外套的径向载荷

同样,在 Tresca 屈服准则、弹性理论和广义胡克定律的基础上, $\varepsilon_{1'}$ 和 $\varepsilon_{3'}$ 可以用下式计算:

$$\varepsilon_{1'} = \frac{1}{E_{1'}} p_c^* \left(\frac{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'}}{2t} - \mu_{1'} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{3'} = \frac{1}{E_{1'}} \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_{1'} \right) p_c^* \quad (13)$$

将式(1)、(2)、(10)~(13)综合考虑,可以总结出 p_c^* 和 p_i 的关系式:

$$\left[\frac{1}{E_{1'}} \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_{1'} \right) + \frac{1}{E_1} (1 - \mu_1) \right] p_i = \left[\frac{1}{E_{1'}} \left(\frac{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'}}{2t} - \mu_{1'} \right) + \frac{1}{E_{1'}} \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_{1'} \right) \right] p_c^* + \left(\frac{1}{E_1} + \frac{2t}{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} - t} \left[\frac{1}{E_{1'}} \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_{1'} \right) + \frac{1}{E_1} (1 - \mu_1) \right] \right) \sigma_{i_1} - \sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} + D_{1'} \quad (14)$$

当复合管材料为 CRA(0Cr18Ni9)时,外套材料为碳钢(20#),根据机械设计手册有 $E_{1'} \approx E_1 \approx E$ 和 $\mu_{1'} =$

$\mu_i = \mu_c$ 。式(13)可以简化为

$$p_i = p_c^* 2K^2 \left[K^2 + 1 + \frac{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} (K^2 - 1)}{2t} \right] + \left(\frac{K^2 - 1}{2K^2} + \frac{2t}{\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} - t} \right) \sigma_{i_1} - \left(\sqrt{\frac{1+3\alpha\Delta T}{1+\alpha\Delta T}} D_{1'} - D_{1'} \right) \frac{(K^2 - 1)E}{2K^2} \quad (15)$$

p_i 是这种热工水力膨胀成形过程中的最终成形压力。从式(15)可见, p_i 值比其他研究人员提出的前一个过程要低, 说明该热液压成形工艺所需要的成形压力低, 密封性能好。

3 实验分析

3.1 试样拉伸试验

为了获得更准确的力学性能, 测试了金属材料的力学性能。本实验中, 复合管为 $\phi 208 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 焊接不锈钢管, 外管为 $\phi 219 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 碳钢管(20#)。试样尺寸如图 6 与表 1 所示。

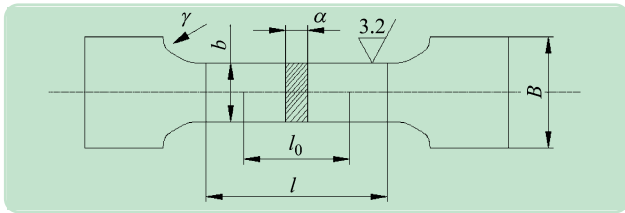


图 6 内管和外管的标准试样

表 1 内外管材料试样的几何尺寸 mm

	l	l_0	a	b	r	B
内管(0Cr18Ni9)	76	36	2	20	25	30
外管(20#)	83	57	5	20	30	30

表 2 内外管材的力学性能

材料	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ %
内管 0Cr18Ni9	205	580	196	49
外管 20#	245	390	206	27

经过多次测试, 拉伸曲线如图 7、8 所示。

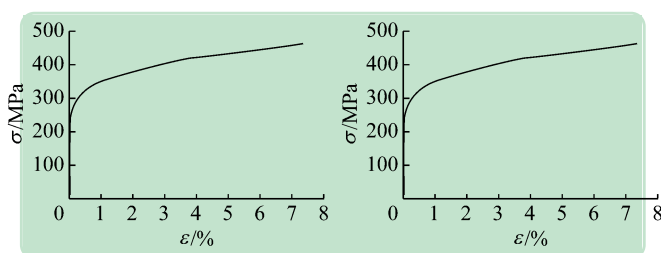


图 7 复合管的拉伸曲线

图 8 外管拉伸曲线

3.2 液压成形实验

按照图 2 所示的液压成形过程, 管道尺寸如图 9 所示。在上述成形过程中进行实验验证, 外管加热到 230°C , 内管液压设定为 11.2 MPa , 然后内管插入外管继续扩张, 5 min 后, 外管停止加热后内管泄压, 双金属管复合形成。内管(不锈钢)和外管可以紧密连接, 结合力比普通复合管增大 30% , 完成的样品如图 10 所示。

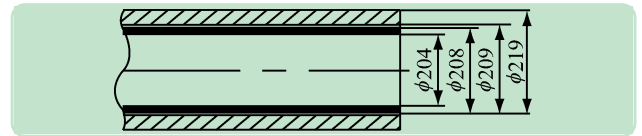


图 9 管道尺寸(mm)



图 10 双金属 CRA 复合管(部分)

4 结语

本文提出了一种结合热液压成形和水力膨胀成形的新技术(热工水力成形工艺), 在现有的复合管工艺中, 首次给出了与热力学、弹塑性力学相结合的液压膨胀压力方程。通过力学和理论分析, 新工艺可用于工业。研发了一种制造双金属 CRA 复合管的新设备。采用自紧式密封结构和可移动支架, 操作工序简单, 密封效果好, 结构紧凑, 生产效率高等诸多优点, 可用于制造大口径双金属复合管。通过外管加热内管加压的快速配合工艺, 使内外管套间间隙很小, 配合过盈量更大, 结合强度高。

参考文献(References):

- [1] 王学生, 王如竹, 吴静怡, 等. 基于径向自紧密封的双金属复合管液压成形[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 905-908.
- [2] 王学生, 王如竹, 李培宁, 等. 自紧密封不锈钢衬里复合管液压胀接研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 72-76.
- [3] 郭明海, 刘俊友, 庞于思, 等. 双金属管复合技术的研究进展[J]. 钢管, 2013, 42(1): 11-16.
- [4] 华东理工大学. 液压胀接制造衬里复合管的装置: 中国, CN00249539.2[P]. 2001-9-26.
- [5] 谭伟雄. 一种液压胀接制造复合管装置: 中国, CN92212822.7[P]. 1994-12-28.
- [6] A manufacturing technology of hydraulic expansion device for stainless steel liner pipe. Japan, JP 58-37050[P]. 1998-4-26

(下转第 99 页)

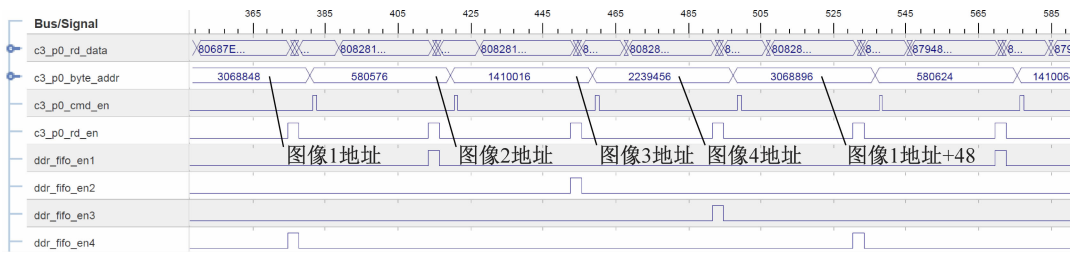


图 5 DDR3-SDRAM 切换操作时序图

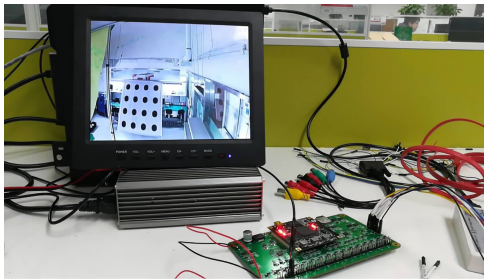


图 6 单路 PAL 显示

5 结 语

本设计以 SPARTAN-6 XC6SLX150 为控制核心, 结合 ITU-RBT. 656 编码与 DDR3-SDRAM 并行输出的方式实现 4 路 PAL 制式图像的同步显示。目前该模块已经成功应用于某图像控制器的环境试验验证环节, 在此基础上进行系统测试, 简化测试环境, 提高了测试效率, 通过对图像输出的 CVBS 接口扩展, 可以产生多组 4 路 PAL 制式图像输出, 进而实现对多台产品的并行测试。

参考文献 (References) :

- [1] 安长暖, 孙洪拓. 电子产品环境试验概述[J]. 环境技术, 2009, 27(6): 54-58.
- [2] 胡志强. 军工产品环境工程中的测控技术[J]. 测控技术, 1998(5): 2-4.

- [3] 刘 强, 潘 明, 李永伟. 基于 FPGA 的汽车单目测距系统设计[J]. 液晶与显示, 2014, 29(3): 422-428.
- [4] 李轶博. 基于 FPGA 视频图像处理的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [5] 刘云川, 龚向东. BT. 656 数字视频流的处理及其硬件实现[J]. 液晶与显示, 2013, 28(2): 238-243.
- [6] 杨 钦, 周云飞, 胡永兵. 基于 FPGA 的视频图像采集与显示系统设计[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6): 1988-1992.
- [7] 陈占良, 金龙旭, 陶宏江, 等. 高速图像压缩系统中 DDR3 控制器的实现[J]. 电光与控制, 2016, 23(8): 85-88.
- [8] 李 娟, 刘艳滢. 基于 FPGA 的图像采集模块的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2012(10): 27-30, 49.
- [9] 冯建文. 有限状态机在 FPGA 硬件实验中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(6): 138-141.
- [10] 徐文超, 于意仲, 柴耀龙, 等. 基于 Spartan-6 FPGA 的 DDR2 控制器接口设计[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(S1): 167-171.
- [11] 赖冬寅, 吴云峰, 叶玉堂, 等. 基于 FPGA 实现由多路复合信号传输到 Camera Link 传输的研究[J]. 电子器件, 2009, 32(3): 666-668.
- [12] 毕 然. 基于 DDR3 的 CMOS 高速图像采集系统的 FPGA 设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [13] 邹 晨. FPGA 设计中跨时钟域信号同步方法[J]. 航空计算技术, 2014, 44(4): 131-134.
- [14] 王康景, 陈卫松, 方立军. 一种基于 FPGA 的多路视频合成及传输方法[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(1): 44-46.
- [15] 刘 潇, 高 峻. 采用 FPGA 通过 BT. 656 接口实现传输 4 路视频流的方法[J]. 电子工程师, 2006(4): 8-10.

(上接第 66 页)

- [11] Lichtenthal J D. 2007 power systems conference advance metering, protection, control, communication, and distributed resources[C]// 2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources. [S. l.]: [s. n.], 2007: 51-56.
- [12] Wang X H, Song Y H, Jung C K, et al. Tackling sheath problems: Latest research developments in solving operational sheath problems in underground power transmission cables [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(10): 1449-1457.

(上接第 70 页)

- [7] 孙显俊, 陶 杰, 郭训忠. 铁/铝爆炸复合双金属管界面的结合性能(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(10): 2175-2180.
- [8] 鲍 岩. 双金属复合无缝钢管轧制成型过程的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [9] 潘 旭, 周永亮, 冯志刚, 等. 双金属复合管内衬塌陷问题与建

- [13] Aloui T, Amar F B, Derbal N, et al. Real time prelocalization of underground single-phase cable insulation failure by using the sheath behavior at fault point[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(10): 1936-1942.
- [14] Benato R. Multiconductor analysis of underground power transmission systems: EHV AC cables[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(1): 27-38.
- [15] 冯美英. 一起低压联络电缆短路事故的分析与处理[J]. 现代电子技术, 2013(10): 153-155.
- [10] 李明亮. 多层复合管液压胀接原理与工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [11] 罗 哉, 陆 艺, 郭 斌, 等. 圆柱轴类零件径向与轴向热变形异常现象研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(12): 1479-1481.
- [12] 王学生. 液压胀合复合管制造装置及复合管胀合与使用的力学分析[D]. 上海: 华东理工大学, 2001.