

◀石油管工程▶

# 油气管道新型柔性带复合衬垫内对口器研制\*

张锋<sup>1,2</sup> 王长江<sup>1,2</sup> 于开勋<sup>3</sup> 倪洪源<sup>4</sup> 刘然<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油天然气管道科学研究院有限公司 2. 油气管道输送安全国家工程实验室

3. 大庆油田有限责任公司试油试采分公司 4. 辽河油田建设有限公司)

张锋, 王长江, 于开勋, 等. 油气管道新型柔性带复合衬垫内对口器研制. 石油机械, 2021, 49 (10): 137-142.

**摘要:** 为实现曲率半径不低于 $5D$  ( $D$ 为钢管直径)的热煨弯管的外根焊自动焊接, 采用差速驱动、衬垫侧向伸缩、刚性与柔性转换等技术, 研制了新型柔性带复合衬垫内对口器。针对单材质铜衬垫存在的焊缝渗铜、表面烧损或破损时不易修复且修复后精度降低, 以及单材质烧结陶瓷衬垫使用时易因焊接高温反复影响而出现的表面烧损严重且不可修复、开裂、剥离、脱落等问题, 设计了基于金属与陶瓷材料的、满足基体重复利用及陶瓷涂层再修复的复合衬垫。进行了柔性内对口器过弯管、爬坡、刚柔转换、管口组对等系列试验及工程现场测试。结果表明: 柔性带复合衬垫内对口器具备对于曲率半径 $5D$ 热煨弯管的良好通过能力及 $30^\circ$ 爬坡能力, 实现了直管与热煨弯管不同组合形式的精确组对、不大于 $30^\circ$ 坡度施工环境下的外根焊自动焊接与焊缝背面强制成形及刚性与柔性的适时转换; 复合衬垫有效解决了单材质铜衬垫及烧结陶瓷衬垫易出现的问题, 使用寿命、重复利用性及可修复性等综合性能更优。新型柔性带复合衬垫内对口器的研制成功提高了油气管道的焊接质量和施工效率, 降低了施工成本。

**关键词:** 油气管道; 焊接; 柔性; 复合衬垫; 内对口器; 热煨弯管

**中图分类号:** TE973.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.10.020

## Development of New Flexible Composite Gasket Embedded Internal Clamp for Oil and Gas Pipelines

Zhang Feng<sup>1,2</sup> Wang Changjiang<sup>1,2</sup> Yu Kaixun<sup>3</sup> Ni Hongyuan<sup>4</sup> Liu Ran<sup>1,2</sup>

(1. China Petroleum Pipeline Research Institute Co., Ltd.; 2. National Engineering Laboratory for Pipeline Safety; 3. Well Test and Production Test Branch of Daqing Oilfield Company Limited; 4. Liaohe Oilfield Construction Co., Ltd.)

**Abstract:** In order to realize the automatic welding of external root pass of hot bending pipe with curvature radius no less than  $5D$  ( $D$  is the diameter of steel pipe), the technologies such as differential drive, lateral expansion of gasket and rigid and flexible conversion were used to develop a new flexible composite gasket embedded internal clamp. In order to solve the problems of copper gasket such as copper infiltration in welding seam, surface burning loss or difficult to be repaired at the time of failure and loss of accuracy after repair, as well as of sintered ceramic gasket such as severe burnt and irreparable surface, cracking, peeling off and falling off due to the repeated influence of high welding temperature, a metal and ceramic material based composite gasket that can meet the reuse of matrix and repair of ceramic coating was designed. Moreover, a series of tests such as flexible internal clamp crossing elbow, climbing, rigid-flexible conversion and pipe end alignment as well field engineering test were carried out. The results show that the flexible composite gasket embedded internal clamp has good throughput capacity in hot bending pipe with curvature radius of  $5D$  and  $30^\circ$  climbing capacity, which realizes the accurate alignment of

\* 基金项目: 中国石油集团工程股份有限公司科学研究与技术开发项目“第三代管道自动焊关键技术研究”(2017ZYGC-01-01)。

different combinations of straight pipe and hot bending pipe, the automatic welding of external root pass and the forced forming of weld back under the construction environment of no more than 30° gradient, and the timely conversion of rigidity and flexibility; the composite gasket effectively solves the problems of copper gasket or sintered ceramic gasket, and the overall performance such as service life, reutilization and repairability is better. The successful development of the new flexible composite gasket embedded internal clamp improves the welding quality and construction efficiency of oil and gas pipelines and reduces the construction cost.

**Keywords:** oil and gas pipeline; welding; flexible; composite gasket; internal clamp; hot bending pipe

## 0 引言

以中俄东线天然气管道工程为标志的智能管道建设,要求全线采用全自动焊接技术。目前长输油气管道工程现场焊接采用的全自动焊接技术主要有两种:以内焊机进行钢管组对及内部根焊和自动外焊机进行热焊、填充焊、盖面焊的全自动焊接技术;以内对口器进行钢管组对和自动外焊机进行单面焊双面成形根焊、热焊、填充焊、盖面焊的全自动焊接技术<sup>[1-7]</sup>。鉴于带衬垫外根焊工艺的日渐成熟、根焊焊接效率高、机组构成简单及综合施工成本低等因素,以带衬垫内对口器为基础的全自动焊接技术备受施工单位青睐,尤其对于施工环境复杂多变的中俄东线南段建设,该技术优势更为明显。然而,现有普通型刚性带衬垫内对口器只能通过曲率半径不低于40倍钢管外径的冷弯管,无法实现曲率半径更小的热煨弯管的全自动焊接。另外,现有普通带衬垫内对口器一般采用单材质铜或烧结陶瓷作为衬垫材料,单材质铜衬垫存在焊缝渗铜、表

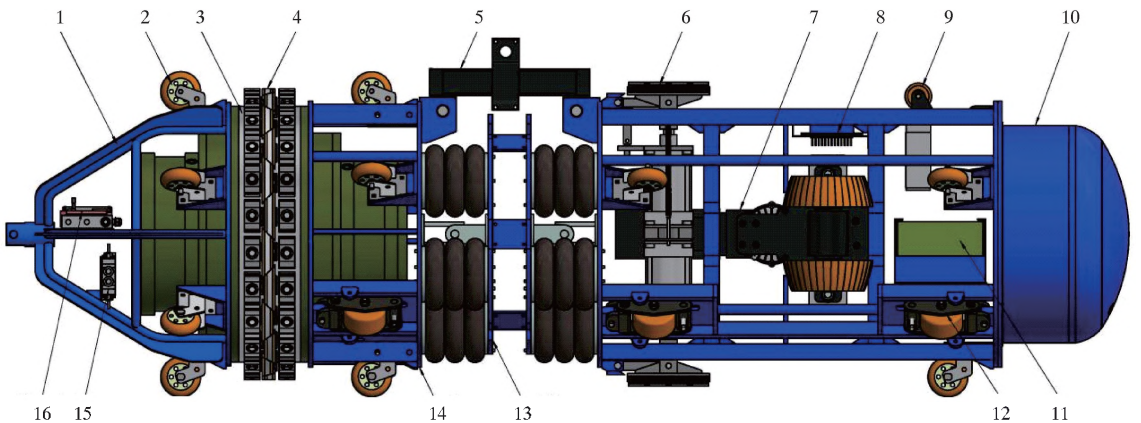
面烧损或破损时不易修复且修复后精度降低,以及单材质烧结陶瓷衬垫使用时易因焊接高温反复影响而出现表面烧损严重且不可修复、开裂、剥离、脱落等问题,不同程度影响焊接质量、施工效率与施工成本<sup>[8-12]</sup>。

鉴于以上问题,结合热煨弯管标准要求和工程施工特点,研制了基于复合衬垫和5D(D为钢管外径)的热煨弯管通过性的新型柔性带复合衬垫内对口器(以下简称柔性内对口器)。

## 1 结构设计

### 1.1 总体结构

柔性内对口器采用两节式长构架结构设计,主要由护笼、双排涨紧机构、侧向伸缩式衬垫机构、差速驱动机构、刚柔转换机构、吊装机构、刹车机构、浮动支撑轮、调整轮、连接架、供电单元、储气罐、驱动器和电磁阀等组成,如图1所示。侧向伸缩式衬垫机构、差速驱动机构及刚柔转换机构是其关键组成部分。



1—护笼;2—浮动支撑轮;3—双排涨紧机构;4—侧向伸缩式衬垫机构;5—吊装机构;6—刹车机构;7—差速驱动机构;8—驱动器;9—平衡轮机构;10—储气罐;11—供电单元;12—调整轮;13—刚柔转换机构;14—连接架;15—电磁阀;16—遥控控制系统。

图1 柔性内对口器结构示意图

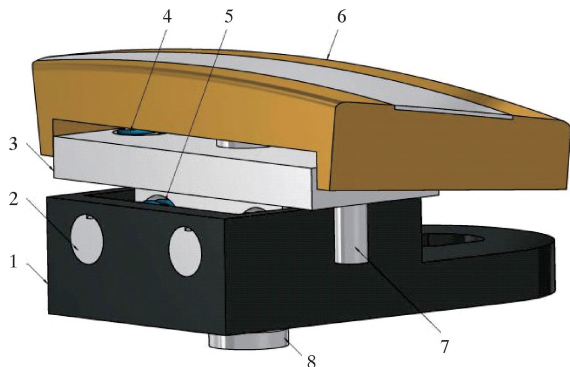
Fig. 1 Schematic diagram for structure of flexible gasket embedded internal clamp

### 1.2 侧向伸缩式衬垫机构

衬垫机构是实现外根焊缝背面强制成形的关键机构,采用侧向伸缩式结构设计,主要由底座、复

合衬垫、导向轴、连接轴和弹簧等组成,如图2所示。底座可与涨靴采用整体式或分体式设计,使用时与涨紧机构的前排涨杆对应安装。复合衬垫可在

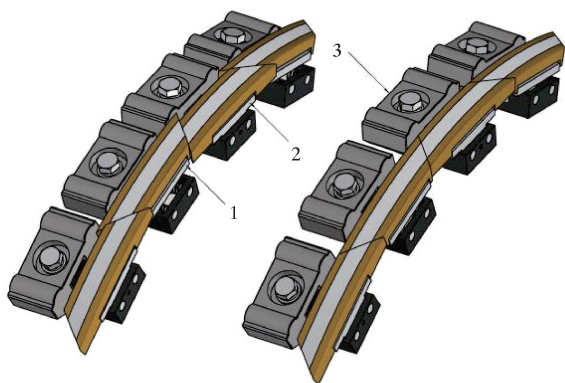
纵向弹簧作用下垂直浮动, 其高度可通过衬垫连接轴调节, 为使复合衬垫与钢管对口环缝内表面紧密贴合以保证外根焊焊缝背面良好成形, 复合衬垫高度宜高于对应涨靴最高点 2 mm 以上。衬垫机构分为活动式与固定式, 区别在于支撑体能否沿横向导向轴水平位移, 安装时间隔分布, 借助涨杆升降实现复合衬垫升起时的精确组圆、与对口焊缝内表面的紧密贴合及复合衬垫降下时的均匀错位分布。衬垫升降状态如图 3 所示。



1—底座; 2—横向导向轴; 3—支撑体; 4—纵向弹簧; 5—横向弹簧; 6—复合衬垫; 7—纵向导向轴; 8—衬垫连接轴。

图 2 衬垫机构

Fig. 2 Gasket mechanism



1—活动衬垫机构; 2—固定衬垫机构; 3—涨靴。

图 3 衬垫升降状态

Fig. 3 Gasket fluctuation

复合衬垫由可重复利用的金属基体及可修复的陶瓷涂层组成, 不同形式的复合衬垫如图 4 所示。金属基体形状可设计为弧面等腰梯形、弧面直角梯形、弧面平行四边形等, 建议采用铬钴铜或含氧铜等材料制作, 且基体上弧面加工具有一定宽度与深度的方形槽。陶瓷涂层采用耐 1 700 °C 高温的纳米陶瓷材料进行超音速热喷涂及封孔处理, 以提高涂层密度及涂层表面抗热性能, 降低涂层表面粗糙度。当陶瓷涂层因连续焊接出现表面烧损或因碰撞出现划痕、裂纹、剥离、脱落等问题时, 可对复合

衬垫进行修复。修复时用专用工具或设备清除原有涂层后, 按照具体要求重新喷涂陶瓷涂层。

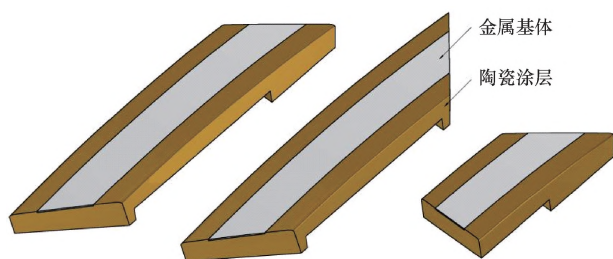
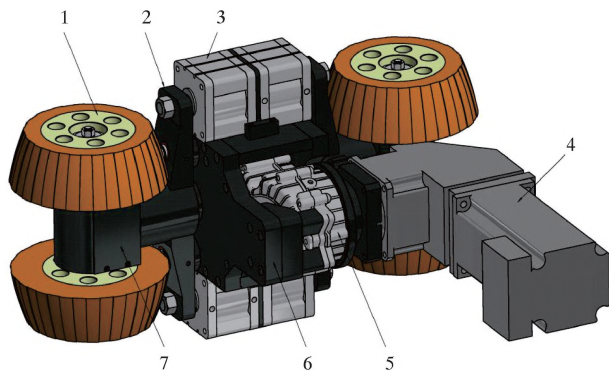


图 4 不同形式的复合衬垫

Fig. 4 Different forms of composite gasket

### 1.3 差速驱动机构

差速驱动机构是实现柔性内对口器管内行走及顺利转弯的关键机构, 主要由差速组件、滑动组件、伸缩气缸、伞齿轮组、驱动轮组件、动力组件和支撑体等组成, 如图 5 所示。差速组件设计时首次引入其他行业成熟应用的差速器相关技术<sup>[13-15]</sup>, 可根据热煨弯管的内部弯曲情况进行两侧输出的自动调节, 继而实现顺利过弯; 伸缩气缸作用于滑动组件可实现驱动轮组件与钢管内壁的紧密接触, 为设备驱动提供足够的摩擦力; 伞齿轮组用于力的传递与改变力的方向; 动力组件为机构提供动力, 可选择伺服电机、气动马达和液压马达等作为动力源; 驱动轮组件是差速驱动机构与钢管内表面直接接触且执行驱动的部件, 驱动轮采用铝制轮芯外裹聚氨酯制成, 聚氨酯包裹层外表面弧度与钢管内表面弧度吻合, 以达到更好的贴合效果。



1—驱动轮组件; 2—滑动组件; 3—支撑气缸; 4—动力组件; 5—差速组件; 6—支撑体; 7—伞齿轮组。

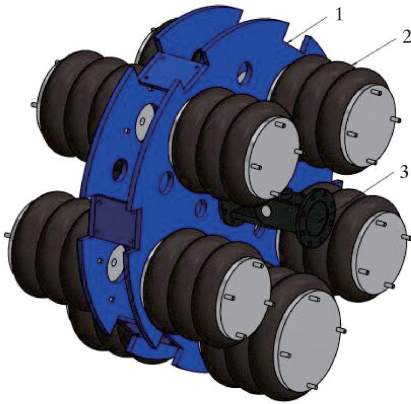
图 5 差速驱动机构

Fig. 5 Differential drive mechanism

为保证柔性内对口器在管内的工作安全性, 差速驱动机构与刹车机构采用“行走+解刹”及“停止+刹车”的联动设计, 即柔性内对口器行走时刹车解除, 利于行走; 停止时刹车机构作用, 实现安全驻车。

### 1.4 刚柔转换机构

刚柔转换机构是决定柔性内对口器能否适应5D热煨弯管内部状态的关键机构，主要由空气弹簧、连接板和万向节等组成，如图6所示。结合热煨弯管曲率半径及柔性内对口器结构与尺寸参数，刚柔转换机构设计时首次引入空气弹簧相关技术<sup>[16-22]</sup>，并充分考虑空气弹簧的最小安装高度、最大压缩时外径、安全行程、允许偏转角度、节数、工作压力、适应温度、力值曲线等因素及在连接板上的合理布局。通过空气弹簧的充气与放气可实现带衬垫内对口器的相对刚性与柔性转换，其在5D热煨弯管中的状态如图7所示。连接板用于固定空气弹簧与万向节，且为压缩气体分输阀块与空气弹簧管路提供安装空间。



1—连接板;2—空气弹簧;3—万向节。

图6 刚柔转换机构

Fig. 6 Rigid-flexible conversion mechanism



图7 5D热煨弯管中柔性内对口器状态

Fig. 7 State of flexible internal clamp in 5D hot bending pipe

## 2 控制系统与气路系统

### 2.1 控制系统

柔性内对口器的控制系统以PLC为主控元件，采用无线遥控控制方式，由无线信号发射器、无线信号接收器、PLC控制单元和线路分输模块等组成，其原理如图8所示。PLC控制单元与无线信号接收器由供电单元进行供电。无线信号发射器由普

通电池进行供电。无线信号发射器控制面板上包含涨紧机构两排涨靴独立升降、刚柔转换机构空气弹簧充放气、刹车与解除、差速驱动机构支撑气缸伸缩、前进与后退、平衡轮升降等动作按钮。通过操作无线信号发射器上的相应按钮发出动作指令，无线信号接收器接收动作指令并传送至PLC控制单元，经程序处理后通过线路分输模块传递给相应机构完成动作执行。

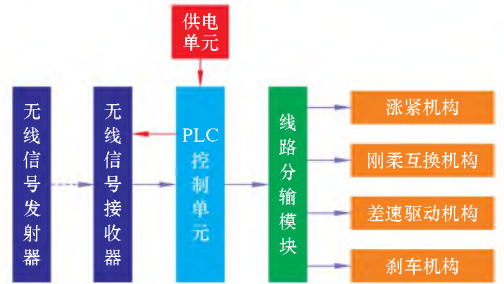


图8 无线遥控控制系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram for wireless remote-control system

### 2.2 气路系统

储气罐作为整个气路系统的供气单元，为涨紧机构气缸、刚柔转换机构空气弹簧、刹车气缸、差速驱动机构支撑气缸和平衡轮机构支撑气缸等气动元件供气。储气罐里的压缩空气经气动三联件后输送至各气动元件执行相应动作，在钢管管口组对与外根焊焊接期间可通过连通快插接头由压缩机为储气罐快速补气。为防止电磁阀或控制系统故障引起涨紧机构涨靴或刹车机构无法动作继而导致柔性内对口器卡在管内，设计了应急处理管路，通过快插接头连通外部压缩机，压缩空气促使涨紧机构的气缸及刹车机构的气缸缩回继而降下涨靴与收回刹车片，此时通过施加外力可将柔性内对口器拖出。应急处理管路避免了对于大口径钢管工人进入管内处理故障带来的安全风险，且解决了对于小口径钢管工人无法进入管内处理故障的问题。

## 3 工作方式与试验测试

### 3.1 工作方式

柔性内对口器应用前，需根据对应管径钢管的壁厚，通过加减专用垫片调整涨紧机构的涨靴高度及通过调节调整轮的高度使其中心线与钢管中心线基本一致，同时保证供电单元电量和储气罐气量充足。应用时，对刚柔转换机构的空气弹簧充气，使其具有相对刚性。外力施加吊装机构吊起设备，由储气罐端按顺序入管，操作工人辅助稳定设备，避

免入管时碰撞。当差速驱动机构的驱动轮组件完全进入管内时,即可对支撑气缸充气,通过推动滑动组件使驱动轮组件与钢管内壁紧密接触,按下无线信号发射器操控面板上的后退按钮,柔性内对口器后退至刹车机构完全进入管内时停止,刹车机构作用,实现其在管内的安全驻车。卸下吊梁,操作柔性内对口器后退至连接架上的调整轮与浮动轮完全进入管内时对刚柔转换机构的空气弹簧排气,转为柔性状态。继续后退至固定式衬垫机构的复合衬垫陶瓷涂层覆盖钢管端面时,升起涨紧机构的后排涨靴,完成柔性内对口器与待组对钢管的准确定位。需组对的另一根钢管从护笼端穿入,待两根钢管端面无间隙接触时升起涨紧机构前排涨靴,复合衬垫随前排涨靴升起,实现衬垫间的精确组圆及与对口环缝内表面的紧密贴合,管口组对完成。此时,可根据带衬垫外根焊工艺进行该管口的外根焊自动焊接作业。根焊结束后,降下涨紧机构的前后涨靴,操作柔性内对口器前进至下一道待组对管口。

在管口组对与根焊焊接时,可通过外部发电机及气泵对供电单元与储气罐进行间歇式能量补充。内对口器整体吊装出入管时进行刚性与柔性转换,正常工作时保持柔性状态。

### 3.2 试验测试

对柔性内对口器进行了过弯管、爬坡、刚柔转换和管口组对等相关试验,而后在中俄东线管道工程现场进行了试验测试。测试结果表明,柔性内对口器满足5D热煨弯管的通过能力、30°爬坡、刚性与柔性的适时转换及直管-直管、直管-弯管等不同状态管口的精确组对,为中俄东线南段管道工程热煨弯管现场焊接采用带衬垫自动外根焊工艺奠定了基础。另外,柔性带衬垫内对口器拆除复合衬垫后变成普通柔性内对口器,可用于基于无间隙或有间隙管口组对的单面焊双面成形外根焊技术与工艺。

## 4 结 论

(1) 柔性内对口器具备5D热煨弯管通过能力及30°安全爬坡能力,实现了直管与热煨弯管不同组合形式的精确组对、不大于30°坡度施工环境下的外根焊自动焊接与焊缝背面强制成形及刚性与柔性的适时转换。

(2) 基于金属与陶瓷的复合衬垫,有效解决了单材质铜衬垫与单材质烧结陶瓷衬垫存在的问题,实现了金属基体的循环利用及陶瓷涂层的再修

复,使用寿命长、可修复性好。

(3) 无线遥控控制系统可精准控制柔性内对口器的各项动作,操作更为便捷。

(4) 柔性带衬垫内对口器拆除衬垫后可用于无间隙或有间隙管口组对单面焊双面成形外根焊自动焊接。

### 参 考 文 献

- [1] 陆阳, 邵强, 隋永莉, 等. 大管径、高钢级天然气管道环焊缝焊接技术 [J]. 天然气工业, 2020, 40 (9): 114-122.  
LU Y, SHAO Q, SUI Y L, et al. Girth welding technology for large-diameter high steel grade gas line pipes [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40 (9): 114-122.
- [2] 苏汉臣, 范进章. 管道全位置自动焊接技术 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40 (19): 187-189.  
SU H C, FAN J Z. Pipeline all position automatic welding technology [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40 (19): 187-189.
- [3] 隋永莉. 油气管道环焊缝焊接技术现状及发展趋势 [J]. 电焊机, 2020, 50 (9): 53-59.  
SUI Y L. Current situation and development trend of girth welding technology for oil and gas pipeline [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50 (9): 53-59.
- [4] 方利强. 长输管道焊接技术进展及发展方向 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37 (14): 163-164.  
FANG L Q. Progress and development direction of welding technology for long distance pipeline [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37 (14): 163-164.
- [5] 隋永莉, 吴宏. 我国长输油气管道自动焊技术应用现状及展望 [J]. 油气储运, 2014, 33 (9): 913-921.  
SUI Y L, WU H. Current and future applications of automatic welding technology for long-distance oil/gas pipeline in China [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33 (9): 913-921.
- [6] 鹿峰华, 马霞, 王俊红, 等. 管道外根焊自动焊工艺 [J]. 焊接技术, 2018, 47 (7): 63-68.  
LU F H, MA X, WANG J H, et al. Automatic welding process of pipe external root welding [J]. Welding Technology, 2018, 47 (7): 63-68.
- [7] 吕健, 马子健, 王亮. 中俄东线 D1 422 mm 管道自动焊装备应用及分析 [J]. 焊接技术, 2019, 48 (6): 61-64.  
LYU J, MA Z J, WANG L. Application and analysis of automatic welding equipment for D1 422 mm pipeline in

- China-Russia Eastern pipeline project [J]. *Welding Technology*, 2019, 48 (6): 61-64.
- [8] 罗智超, 汪宏辉, 路焰, 等. 长输管道外自动根焊采用铜衬垫焊接接头组织与性能分析 [J]. *焊接*, 2014 (12): 42-47.  
LUO Z C, WANG H H, LU Y, et al. Analysis on microstructure and properties of welded joint with copper liner for external automatic root welding of long distance pipeline [J]. *Welding & Joining*, 2014 (12): 42-47.
- [9] 鹿峰华. X65 管线钢根焊工艺中铜衬垫渗铜研究 [J]. *焊接*, 2015 (7): 37-41.  
LU F H. Influence of copper content in root-pass welding of X65 pipeline steel [J]. *Welding & Joining*, 2015 (7): 37-41.
- [10] 汪宏辉, 雷正龙, 杨雨禾, 等. X70 钢管道采用铜衬垫根焊的焊接接头疲劳性能 [J]. *焊接学报*, 2015, 36 (10): 100-104.  
WANG H H, LEI Z L, YANG Y H, et al. Fatigue property of X70 steel pipeline girth welding joint with copper back-up shoes root welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36 (10): 100-104.
- [11] 邢钧魁, 岳理想, 赵猛, 等. 陶瓷衬垫在环形对接焊缝焊接中的应用 [J]. *工程机械与维修*, 2020 (增刊1): 182-184.  
XING J K, YUE L X, ZHAO M, et al. Application of ceramic liner in girth butt welding [J]. *Construction Machinery & Maintenance*, 2020 (S1): 182-184.
- [12] 王亚彬, 张文军, 亢天佑. 药芯焊丝陶瓷衬垫打底焊裂纹产生原因分析 [J]. *焊接技术*, 2020, 49 (5): 94-97.  
WANG Y B, ZHANG W J, KANG T Y. Cause analysis of cracks in flux cored wire ceramic backing welding [J]. *Welding Technology*, 2020, 49 (5): 94-97.
- [13] 陶泽南. 差速器总成结构与性能参数分析 [J]. *内燃机与配件*, 2019 (7): 38-40.  
TAO Z N. Analysis of structure and performance parameters of differential assembly [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2019 (7): 38-40.
- [14] 叶权. 机械差速器的结构分析及在离心机中的应用 [J]. *机械研究与应用*, 2020, 33 (1): 178-180.  
YE Q. Structural analysis on mechanical differential and its applications in centrifuge [J]. *Mechanical Research & Application*, 2020, 33 (1): 178-180.
- [15] 寇杰, 张济民, 周和超, 等. 机械差速器耦合轮对轨道车辆导向性能分析 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55 (8): 128-135.  
KOU J, ZHANG J M, ZHOU H C, et al. Analysis of guiding of the mechanical differential coupling wheels for railway vehicle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55 (8): 128-135.
- [16] SARIOĞLU B, DURMUŞ A. Manufacture and testing of air springs used in railway vehicles [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44 (9): 7967-7977.
- [17] VINOGRADOV B. Mechanical systems with air spring flexible elements [J]. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*, 2019, 103: 199-207.
- [18] JIRÍ R, MICHAL S. Modeling of the controlled air spring [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 69 (3): 107-112.
- [19] IIDA T, NOZAKI K, TANAKA T. Construction of railway vehicle simulation model taking into account air springs deflation [J]. *Quarterly Report of RTRI*, 2019, 60 (2): 103-108.
- [20] 于航, 姚国凤. 空气弹簧随温度变化静刚度特性分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39 (6): 148-153.  
YU H, YAO G F. Analysis of static stiffness characteristics of air springs with temperature change [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2019, 39 (6): 148-153.
- [21] 葛国华, 卢超. 空气弹簧参数对其静态力学性能影响的试验与计算分析 [J]. *现代制造工程*, 2018 (1): 119-125, 145.  
GE G H, LU C. Studied with calculation and experiment about effect of air spring parameters on static stiffness properties [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018 (1): 119-125, 145.
- [22] 孙晓亮, 王伯铭, 贺建功. 空气弹簧参数对动力学性能的影响 [J]. *电力机车与城轨车辆*, 2012, 35 (4): 10-13, 28.  
SUN X L, WANG B M, HE J G. Influence of air spring parameters to dynamic performance [J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2012, 35 (4): 10-13, 28.

第一作者简介: 张 锋, 高级工程师, 集团公司高级技术专家, 生于1970年, 1995年毕业于华北电力学院机械制造工艺与设备专业, 获硕士学位, 现从事油气管道焊接施工装备研发及焊接工艺的研究工作。地址: (065000) 河北省廊坊市。

通信作者: 王长江, E-mail: yjywangchj@cnpc.com.cn。

收稿日期: 2021-04-23

(本文编辑 刘 峰)