

X52 材质大口径钢制管道全位置自动焊应用总结

李超华,刘井坤

(中石化中原油建工程有限公司,河南省濮阳市 457001)

摘要:针对 X52 管线钢的全自动焊焊接接头,充分考虑双焊炬的相互影响以及施工环境的影响,对焊接工艺参数进行了调整和优化,通过拉伸试验、弯曲试验、刻槽锤断试验及硬度试验等机械性能试验验证了焊接工艺的可靠性,形成了焊接工艺评定;同时分析并解决了现场焊接中出现的问题,提炼总结了双焊炬自动焊焊接工艺参数优化的要点,形成了适用于 X52 管线钢的铜衬垫全自动焊工艺。对焊缝进行了金相分析和硬度试验,从微观上分析了焊缝金属组织结构的分布情况,发现 X52 管线钢焊缝、热影响区及母材硬度分布与对应区域金相组织中珠光体含量呈正相关,进一步验证了该焊接工艺条件下焊缝金属及热影响区金相组织的一致性。结果表明,铜衬垫全自动焊工艺适用于大口径钢制管道的焊接,采用该工艺可以明显提升焊接质量和焊接效率。

关键词: X52 材质 大口径 钢制管道 自动焊接 焊接设备 焊接工艺 焊接性能 硬度试验

DOI:10.20138/j.cnki.issn1002-106X.2024.02.006

近年来,管道全位置自动焊技术在国外大口径油气长输管道施工中应用较广,在国内油气管道上逐步得到推广应用。中东地区某装置大口径钢制管道采用了 X52 材质,总长 12 km,管径 1 500 mm,设计壁厚 9.53 mm。为了提高施工效率,在该项目主线路焊接过程中采用了铜衬垫全位置自动焊工艺。该项目累计采用全位置自动焊工艺完成了 800 道焊口的焊接工作,管道焊接一次合格率达到 97.5% (按焊口计)。对于大口径钢制管道的焊接,采用全位置自动焊工艺对提高焊接质量和劳动效率、减轻操作工人的劳动强度具有重要意义。浅析了大口径钢制管道的全自动焊工艺,并对采用该工艺焊接得到的环焊缝开展了力学性能测试和金相分析,证明了该焊接工艺的实用性和适用性。

1 焊接设备的选型

按照焊接工艺类型分,目前国内外长输管道应用较为普遍的双焊炬全自动焊接工艺主要有两种:内焊机根焊+双焊炬外焊技术,外焊机根焊+双焊炬外焊一体化焊接技术。前者代表为美国的 CRC EVANS 公司和英国 NOREAST 公司的内外焊机^[1-2],后者代表是意大利 PWT 公司和法国 SERIMAX 公司的外焊机。国内的中石油管道局

研究院和熊谷有限公司等参照 CRC 公司的工艺研发了一系列产品,在国内得到了成功应用,但尚未得到普遍接受和认可。

CRC 公司研发了一系列自动焊技术,在世界范围内得到了成功应用,其中最具特色的是 IWM 自动内焊机+P600 双焊炬全自动焊机的组合。内焊机有 6~8 个焊炬并和内对口器形成组合体,能够自动进行焊接。该套自动焊系统在长输管道弧焊方面效率是最高的,缺点是一次投入较大,内焊机仅适用于较大口径管道,且单一设备规格适用范围较窄。

SERIMAX 公司的产品示意图 1:通过采用带铜衬垫的内对口器,实现了单面焊双面成型;机头整合了两个焊炬,两个焊炬前后间距 100 mm,机头小巧轻便,实现了从根焊、填充到盖面的全位置一体化焊接。该全自动焊接设备简单,焊工易于操作,故障率低,焊接设备整体价格适中,维修成本相对较低。缺点是根焊焊缝存在夹铜的瑕疵,但是经过多年来的试验验证和成功应用,表明

收稿日期:2023-09-12;修改稿收到日期:2023-12-15。

作者简介:李超华,高级工程师,硕士,2015年毕业于中国石油大学(北京)材料工程专业,主要从事长输管道与大型场站工程的项目管理工作,研发了 2 个专利,发表论文 10 篇。联系电话:13839337959, E-mail:lichao.hua.osec@sinopec.com。

局部附着的铜对管道的力学性能、腐蚀性能无明显影响,可以满足工程施工规范^[3-4]。该工艺在中东地区得到了广泛的认可和应用。

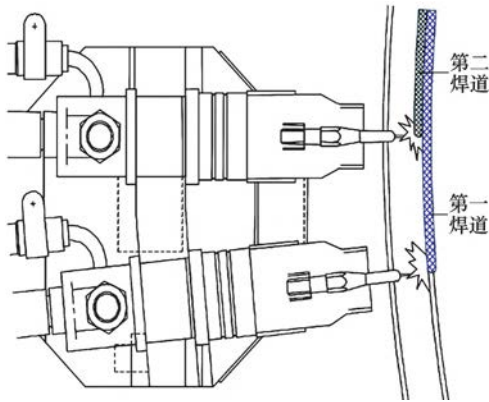


图1 双枪自动焊示意

Fig.1 Schematic diagram of dual gun automatic welding

通过分析施工效率、经济性和适用性等因素^[5],该项目最终选用了SERIMAX公司的Saturnax 05型双枪自动焊接装备。

2 全位置自动焊工艺

2.1 坡口型式和焊道设计

减小焊接熔敷金属的填充量是有效提高焊接速度的主要手段之一,因此铜衬垫全自动焊工艺采用了窄间隙U型坡口,熔敷金属量较以往V型坡口工艺减少60%左右,传统V型坡口单坡面角度一般在30°左右,而该铜衬垫全自动方案所要求的坡口单坡面角度小于10°。在窄间隙U型坡口上采用传统的手工焊、半自动焊的操作难度非常大。结合焊接工艺的特点,应在保证质量的基础上,选择合理的窄间隙坡口型式,提高施焊效率。坡口参数见表1,窄间隙U型坡口型式及焊道顺序见图2~3。

表1 窄间隙U型坡口参数

Table 1 Parameters of U-shaped groove with narrow gap

壁厚 WT/mm	10.5
外坡口角度 $\beta/^\circ$	5 ± 1
内坡口角度 $\alpha/^\circ$	4 ± 1
圆弧半径 R/mm	2.4 ± 0.2
钝边高度 T/mm	1.9 ± 0.1
内坡口宽度 H/mm	5 ± 3
拐点直边 L/mm	0.1 ± 0.1

2.2 焊接工艺参数及优化

按图2和图3进行坡口加工并组对后进行焊接,焊前预热温度最小为50℃,预热方式为电感

应加热或红外加热。针对上述母材和设备,选择采用实心焊丝AWS A5.18 ER70S-6,该焊丝直径为1.0mm,所用保护气体为50%氩气和50%二氧化碳的混合气体,焊接方向为下向焊,采用滴状过渡方式。母材和焊材的成分见表2。其中根焊采用铜衬垫强制成型的单面焊双面成型工艺,热焊(根焊完成之后立即快速进行的第二层焊道)与根焊同时完成,采用双焊炬工艺可以一次完成两层焊道的焊接,盖面采用双焊炬工艺可以一次完成盖面两条并列焊道的焊接。

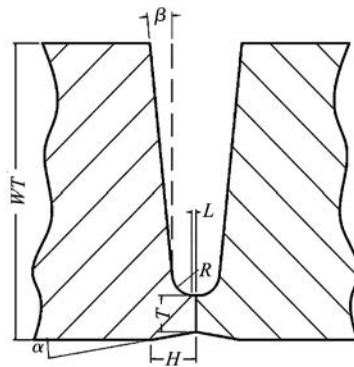


图2 窄间隙U型坡口设计

Fig.2 U-shaped groove with narrow gap

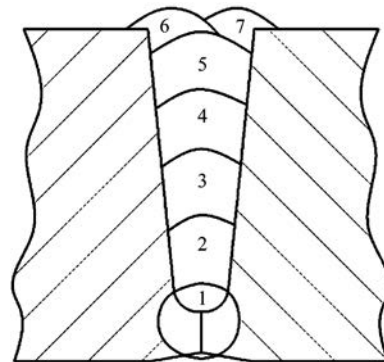


图3 窄间隙U型坡口焊道顺序示意

Fig.3 Bead sequence of U-shaped groove with narrow gap

正确选择和合理运用焊接工艺参数,是保证管道全位置自动焊获得优质焊接接头的关键。焊接过程中需要控制的典型工艺参数为焊接速度(焊接小车行走速度)、焊接电压、送丝速度(焊接电流)、焊枪的摆幅及摆频。

施工现场试验了22道焊口,并进行了质量跟踪检查,发现焊接工艺参数和现场配套设备等方面存在一些问题。焊接缺欠主要有层间未熔合、内表面密集气孔、根焊过流和烧穿、电弧不稳定/飞溅过大、填充盖面密集气孔等,其中层间未熔合

和密集气孔占比达 80% 以上。经过分析认为,造成未熔合的主要原因是管材剩磁超标、焊接电流过小、焊嘴不居中及送丝速度与机头行走速度不匹配等,造成密集气孔的主要原因是环境风速超

标、保护气体配比不正确或者含水率超标、焊接电流过大等。针对以上原因,分段逐步调整焊接工艺参数,消除影响因素。优化后的焊接工艺参数见表 3~4。

表 2 X52 钢母材和焊丝成分

Table 2 Composition of X52 steel base material and welding wire

w, %

材 料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti + Zr	Cu	N	Fe
API X52	0.110	0.310	1.500	0.017	0.004	0.040	0.002	0	0.002	0.030	0.040	0.002	97.943
ER70S-6	0.090	0.870	1.450	0.008	0.007	0.020	0	0.010	<0.010	<0.010	0.160	0.003	>97.362

表 3 打底 + 热焊焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters of root and hot bead

项 目	电弧电压/V		焊接电流/A		送丝速度/(m/min)		焊接速度/(mm/s)	摆动频率/min ⁻¹	摆动宽度/mm	左摆延迟时间/ms	右摆延迟时间/ms
	前枪	后枪	前枪	后枪	前枪	后枪					
焊机机头角度/(°)											
0	24	25.0	265	235	12.0	10	100	200	0.6	100	100
15	24	25.0	265	235	12.0	10	102	200	0.6	100	100
45	24	25.0	270	235	12.0	10	108	200	0.6	100	100
90	24	25.0	275	240	12.0	10	116	200	0.6	100	100
130	24	25.0	270	235	12.0	10	108	200	0.6	100	100
160	24	25.0	265	235	12.0	10	102	200	0.6	100	100
180	24	25.0	265	235	12.0	10	100	200	0.6	100	100
启动	25	25.5	270	240	11.0	9	100	200	0.4	100	100
停止	19	19.0	210	210	12.5	10	15	200	0.4	100	100

表 4 盖面焊接工艺参数

Table 4 Welding parameters of cap bead

项 目	电弧电压/V		焊接电流/A		送丝速度/(m/min)		焊接速度/(mm/s)	摆动频率/min ⁻¹	摆动宽度/mm	左摆延迟时间/ms	右摆延迟时间/ms
	前枪	后枪	前枪	后枪	前枪	后枪					
焊机机头角度/(°)											
0	24	24	230	220	9.0	9.0	76	200	1.8	100	100
15	24	24	230	220	9.0	9.0	78	200	1.7	100	100
45	24	24	230	220	9.0	9.0	80	200	1.6	100	100
90	24	24	230	220	9.0	9.0	84	200	1.6	100	100
130	24	24	230	220	9.0	9.0	80	200	1.6	100	100
160	24	24	230	220	9.0	9.0	76	200	1.7	100	100
180	24	24	230	220	9.0	9.0	70	200	1.8	100	100
启动	25	25	240	230	8.5	8.5	78	200	1.4	100	100
停止	19	19	200	200	10.0	10.0	15	200	1.4	100	100

采用全位置自动焊接技术的工艺参数总结如下。

(1) 根焊宜采用较大的焊接电流,若根焊的电流低,很容易发生未熔现象,但是电流也不能太高,过高的焊接电流容易引起电弧回烧、烧穿、气孔等缺欠。

(2) 根焊时在 90° 立焊位置左右有较大的焊接电流和送丝速度,焊机头有较快的运行速度。

(3) 双焊炬焊接时,第二个焊炬的焊接电压

和焊接电流比第一个略小。

(4) 热焊、填充焊的焊接电压与打底焊的焊接电压相比变化不大,焊接电流减小较为明显,送丝速度略有下降,焊机头的运行速度明显降低,焊炬摆动频率明显下降,摆幅增大。

(5) 单焊炬在不同层之间焊接时,焊接电压、焊接电流、送丝速度、焊机头的运行速度等焊接工艺参数变化不大。

(6) 排焊前后焊炬的焊接工艺参数基本一

样。排焊焊接工艺的机头运行速度相比其他焊接工序有所增大。

(7)全自动焊焊缝宽度均匀,焊接效果良好。焊接工艺参数优化后,一次焊接合格率达96%以上,提高了工作效率和焊接合格率,降低了劳动强度。

(8)由于中东地区夏季的气温较高,应该控制层间温度不高于200℃,避免较高的层间温度使焊缝粗晶区的平均宽度增加及焊缝组织粗大,从而避免造成热影响区的韧性降低^[6]。

3 焊接接头性能

根据API 1104 规范和设计文件的要求对焊缝进行了力学性能试验和金相试验。试验内容包括拉伸试样4个、面弯试样4个、背弯试样4个、刻槽锤断试样4个、硬度试样2个,检测结果均符合验收标准。焊接接头的拉伸强度、面弯背弯及刻槽锤断结果差异性不大,不再进行分析;根据API 1104 规范和设计文件,没有进行冲击试验。为了进一步分析X52 管线钢的焊缝金相组织和硬度分布规律并验证金相组织的一致性,进行了额外的金相组织观察和硬度测试。

3.1 母材及焊缝金属金相组织观察

从母材中、焊缝区、热影响区(HAZ)和焊缝熔合区各取两个试样,经过磨光、抛光制备成金相试样,用4%(体积分数)硝酸酒精溶液腐蚀,然后用金相显微镜观察金相组织,见图4~7。

常温下X52 管线钢的组成为铁素体+珠光体。在中等倍数下观察,片状珠光体中铁素体呈白亮色,而渗碳体呈黑色条纹状。图4中白色的为铁素体(F),黑色的为珠光体(P)。

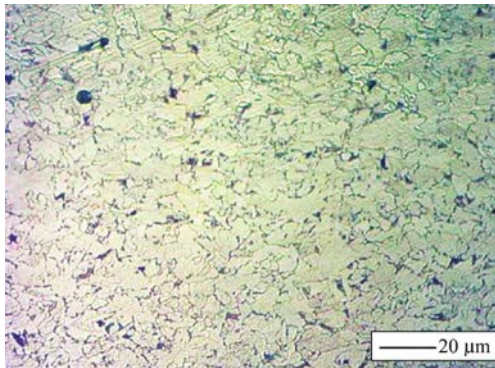


图4 管线钢X52母材金相图

Fig. 4 Metallograph of pipeline steel X52 base material

由图5与图4对比可以看出,母材中白色块

状的铁素体与渗碳体在焊缝组织中呈条状分布。焊缝组织中黑色物质的比例明显增加,这表明珠光体的比例增加。珠光体的性能介于铁素体和渗碳体之间,韧性较好。

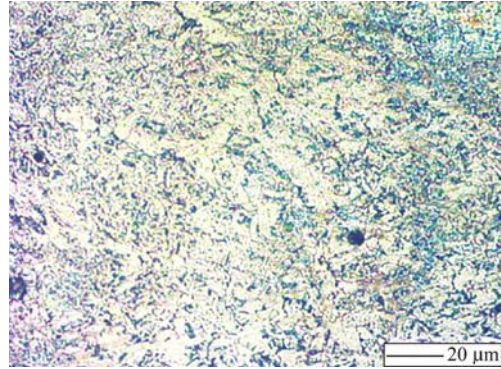


图5 焊缝区金相图

Fig. 5 Metallograph of weld seam zone

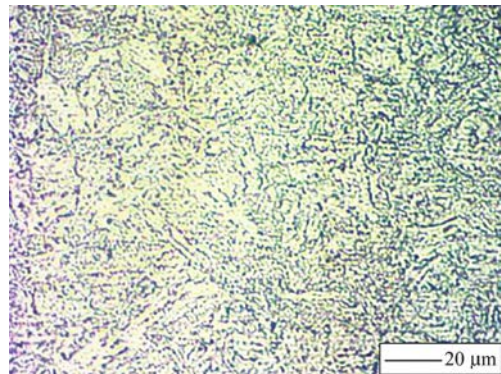


图6 焊缝热影响区金相图

Fig. 6 Metallograph of HAZ

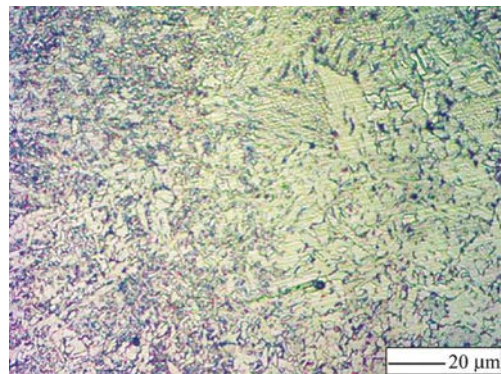


图7 焊缝熔合区金相图

Fig. 7 Metallograph of fusion zone

对比图4~7可知,珠光体的含量由小到大依次为母材、HAZ、熔合区、焊缝。图7中,熔合区与HAZ的分界线较为明显,深色区域为熔合区,浅色区域为热影响区。相比HAZ,熔合区珠光体的含量明显增加。熔合区在焊接期间经历了熔化和凝固,并经过了后续焊道的多次焊接热循环,虽然

熔合区的尺寸小,但其化学成分与组织性能很不均匀,显著影响了焊接接头的强度及韧性^[7]。

3.2 母材及其焊缝金属硬度试验

硬度试验采用维氏硬度计测量,载荷为 10 kg。硬度测量点位置分布如图 8 所示,每个试样 20 个点,共对 4 个试样的 80 个点进行了试验。

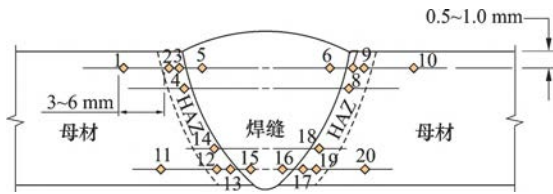


图 8 硬度测量点位置分布

Fig. 8 Distribution of hardness measurement point positions

4 个试样的硬度试验结果汇总见图 9 (数据为平均值)。按热循环的差异,管线钢的 HAZ 一般分为熔合区、粗晶区、细晶区、不完全重结晶区和时效脆化区^[8]。其中粗晶区的奥氏体晶粒处于过热状态而急剧长大,冷却后得到粗大的组织,是焊接接头的薄弱地带。

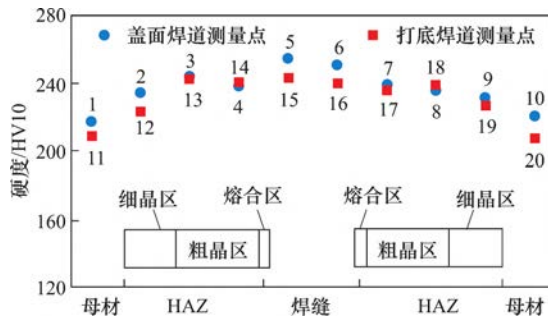


图 9 硬度试验结果

Fig. 9 Scattergram of hardness test result

从图 9 可以看出:HAZ 中细晶区的硬度值略高于母材,而粗晶区的硬度值稍高于细晶区,但仍略低于焊缝金属^[9];从母材、热影响区到焊缝金属的平均硬度值递增。分析母材和焊缝金属的化学成分以及焊缝金属的结晶特点,认为焊缝的硬度高于母材是因为焊缝组织中析出相差异,与金相分析中珠光体在母材、热影响区和焊缝金属中的含量逐步递增趋势一致。从图 9 还可以看出,盖面层的焊缝硬度值比根焊层的焊缝硬度值稍高,与金相分析中珠光体在根焊、盖面焊缝中的含

量正相关。通过观察焊缝金属、HAZ 及母材的金相组织及硬度分析,该焊接工艺所施焊的焊接接头完全达到设计文件及相关标准规范规定的技术规格要求。

4 结论

(1) 采用全位置自动焊工艺焊接大口径钢制管道需要对焊接工艺参数进行调整和优化,焊接工艺参数要充分考虑双焊炬的相互影响以及施工环境的影响;除了传统的机械性能试验外,还要进行金相分析进一步确认焊缝金属及 HAZ 金相组织的一致性,以保证焊接接头的性能满足标准和使用要求;验证了铜衬垫全自动焊工艺适用于大口径钢制管道焊接的实用性和适用性。

(2) 经过对 X52 材质管道焊缝的金相组织及硬度的分析,母材、HAZ 到焊缝的平均硬度值递增,与各自金相组织中珠光体含量的增长呈正相关。盖面层的焊缝硬度值比根焊层的焊缝硬度值稍高,与金相分析中珠光体在根焊、盖面焊缝中的含量正相关。

参考文献

- [1] 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.
- [2] NADEAU F, TAHASH G, NORRISH J. Automation of rolled welding in process piping prefabrication[J]. Welding review international, 1994, 13(4):357-362.
- [3] 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.
- [4] 鹿锋华. X65 管线钢根焊工艺中铜衬垫渗铜研究[J].焊接,2015(7):37-41.
- [5] 董嘉琪,杨小龙,费纪纲,等. X80 钢级长输管线自动焊接技术探讨[J].油气田地面工程,2016,35(11):77-80.
- [6] 徐道荣,李平瑾. 3.5% Ni 钢焊接接头低温韧性的研究(一)[J].压力容器,1997,14(3):9-17.
- [7] SHANMUGAM S, MISRA RDK, HRTMANN J. Microstructure of high strength niobium-containing pipeline steel[J]. Material science and engineering: A, 2006, 441:215-229.
- [8] 张婷婷. 高强度管线钢焊接热影响区组织与性能研究[D].北京:燕山大学,2009.
- [9] 王瑜,黄继强,薛龙,等.不同环境压力下 X65 管线钢焊接接头的组织及硬度[J].铸造技术,2016,37(10):2193-2196.

(编辑 彭扬)

Summary of the application of full-automatic welding for X52 material large diameter steel pipe

Li Chaohua, Liu Jingkun

(SINOPEC Petroleum Engineering & Construction Zhongyuan Corporation, Puyang, Henan 457001)

Abstract: For the full-automatic welding joint of X52 line steel, the welding process parameters were adjusted and optimized while fully considering the mutual influence of double torch and the influence of construction environment. Mechanical tests such as tensile test, bending test, nick break test, and hardness test were conducted to verify the reliability of the welding process, forming a welding process evaluation; At the same time, the problems encountered in on-site welding were analyzed and solved, and the key points for optimizing the welding process parameters of dual torch automatic welding were summarized, forming a full-automatic welding technology with copper backing for X52 pipeline steel. By conducting metallurgical analysis and hardness test on the weld seam, the distribution of the microstructure of the weld metal was analyzed from a microscopic perspective. The positive correlation between the hardness distribution of the X52 pipeline steel weld seam, heat affected zone, and base metal and the content of pearlite in the corresponding metallographic structure was obtained, further verifying the consistency of the metallographic structure of the weld metal and heat affected zone under the welding process conditions. The results indicated that the full-automatic welding process for copper liners could be applied to the welding of large diameter steel pipe, and the use of this process could significantly improved welding quality and efficiency.

Keywords: X52 material, large diameter, steel pipe, automatic welding, welding equipment, welding process, welding performance, hardness test

(上接第 16 页)

Study on electrochemical performance of petroleum coke lithium-ion battery anode materials

Liu Shumin¹, Liu Tianbo², Zhao Lei², Feng Zhenheng², Wang Jitong¹

(1. State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237;

2. SINOPEC Jinan Refining & Chemical Company, Jinan, Shandong 250102)

Abstract: The quality of anode material is the key factor determining the performance of lithium-ion batteries. Artificial graphite is an important anode material for lithium-ion batteries. Petroleum coke has low thermal expansion coefficient, low porosity, low impurity content, high conductivity and easy graphitization. This study selects three types of common petroleum coke, and prepares artificial graphite by graphitization. Analyze and characterize three types of original petroleum coke samples and three types of graphitized samples, study the changes of petroleum coke after graphitization, and verify whether the performance of petroleum coke after graphitization reaches the level of commercial lithium battery anode materials through electrochemical analysis. The experimental results show that after graphitization treatment at 2,750 °C, compared with the original petroleum coke sample, the graphitized samples rearrange their structures and have a more obvious regular layered structure; the carbon content increases, and the content of other miscellaneous elements such as H and O and metal elements decreases; all show lower electrode potential and stable charge-discharge platform, with the initial coulombic efficiency of 85.00%, 78.20% and 82.96%, respectively. After 150 cycles, the mass specific capacities are maintained at 273.00, 259.00 and 226.20 mAh/g, respectively, and the coulombic efficiency is close to 100%, which is a potential precursor of lithium-ion battery anode materials.

Keywords: petroleum coke, lithium-ion battery, anode material, electrochemical performance, degree of graphitization, initial coulombic efficiency (ICE), specific capacity