

DOI: 10.11973/jxgccl202202009

不同工艺参数下 0Cr18Ni9 钢薄壁管脉冲钨极氩弧焊接头的组织与拉伸性能

李 宁¹, 刘少龙², 丁雪松¹, 徐雨红¹, 范文磊², 苏焕朝¹, 王博玉³

(1. 华电国际电力股份有限公司朔州热电分公司, 朔州 036000; 2. 华电山西能源有限公司, 太原 030006;
3. 西安理工大学材料科学与工程学院, 西安 710048)

摘要: 采用脉冲钨极氩弧焊(P-TIG)对规格为 $\phi 14\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的 0Cr18Ni9 钢管进行焊接, 研究 50% 脉宽比以及不同基值电流(20~30 A)、峰值电流(40~60 A)、脉冲频率(0.3, 0.5 Hz)下接头的组织及拉伸性能。结果表明: 不同工艺参数下接头焊缝区组织均为奥氏体+ δ 铁素体, 但 δ 铁素体形态及含量有明显差异, 热影响区奥氏体晶粒发生明显粗化。当脉冲基值电流为 20 A, 峰值电流为 40 A, 脉冲频率为 0.3 Hz 时, 接头焊缝区 δ 铁素体呈蠕虫状, 含量较多, 热影响区奥氏体晶粒尺寸较小, 接头拉伸性能最优, 屈服强度为 401.38 MPa, 抗拉强度为 701.51 MPa, 屈强比为 0.57, 断口由形状均匀且尺寸较小的等轴韧窝组成。

关键词: 脉冲钨极氩弧焊; 奥氏体不锈钢管; δ 铁素体; 拉伸性能

中图分类号: TG407

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2022)02-0058-05

Microstructures and Tensile Properties of 0Cr18Ni9 Steel Thin-Wall Tube Welded Joints by P-TIG Under Different Process Parameters

LI Ning¹, LIU Shaolong², DING Xuesong¹, XU Yuhong¹, FAN Wenlei², SU Huanchao¹, WANG Boyu³

(1. Shuozhou Thermal Power Branch, Huadian Power International Co., Ltd., Shuozhou 036000, China;

2. Huadian Shanxi Energy Co., Ltd., Taiyuan 030006, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Pulse tungsten inert gas arc welding (P-TIG) was applied to weld 0Cr18Ni9 steel tubes with specification of $\phi 14\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, and the microstructure and tensile properties of joints under different base current (20–30 A), peak current (40–60 A), pulse frequency (0.3, 0.5 Hz) and pulse width ratio of 50% were studied. The results show that the microstructures of the weld of joints under different process parameters were all austenite + δ ferrite, but the shape and content of the δ ferrite were significantly different; the austenite grains in the heat-affected zone were significantly coarsened. Under the pulse base current of 20 A, the peak current of 40 A and the pulse frequency of 0.3 Hz, the ferrite in the weld of the joint was vermicular with relatively high content, and the austenite grain size in the heat affected zone was small; the tensile properties of the joint was the best with yield strength of 401.38 MPa, tensile strength of 701.51 MPa and yield ratio of 0.57, and the fracture was composed of equiaxed dimples with uniform shape and small size.

Key words: P-TIG welding; austenitic stainless steel tube; δ ferrite; tensile property

0 引言

0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢是在 18-8 型奥氏体不锈钢的基础上发展而来的一个钢种, 因其具有优异

的耐腐蚀性能及热稳定性, 而广泛应用于电站管道工程中^[1-2]。在我国不锈钢管道施工中, 主要采用钨极氩弧焊(Tungsten Inert Gas Arc Welding, TIG)的方式连接不锈钢管^[3]。在采用普通 TIG 焊接小口径薄壁不锈钢管时, 焊接热输入较高, 常常会引起焊缝金属力学性能下降, 导致管接头性能达不到技

收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-12-21

作者简介: 李宁(1971—), 男, 山西阳泉人, 高级工程师, 学士

术要求而失效。脉冲钨极氩弧焊(P-TIG)是在钨极氩弧焊工艺基础上发展起来的一种新工艺,该工艺通过峰值电流、基值电流、脉冲频率及脉宽比之间的配合控制焊接热输入,脉冲工艺参数的交替影响使熔池发生电磁震荡,破碎粗大的晶粒,从而提高焊缝金属的力学性能^[4],因此可采用 P-TIG 焊接小径薄壁不锈钢管来避免管接头出现力学性能下降的问题。目前国内对小口径薄壁不锈钢管 TIG 的研究主要集中在背面保护气体的选择^[5]、工艺优化^[6-7]及焊接变形的控制^[8-9]方面,但是有关 P-TIG 工艺的研究较少。作者以电站管道工程电液调节(EH)系统用 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢管为研究对象,通过改变 P-TIG 焊的峰值电流、基值电流、脉冲频率等参数焊接不锈钢管,对比研究了不同工艺参数下接头焊缝区及热影响区的组织及拉伸性能,为小径薄

壁 0Cr18Ni9 不锈钢管 P-TIG 工艺参数的优化提供参考。

1 试样制备与试验方法

母材为 0Cr18Ni9 钢小径薄壁 EH 油管,规格为 F14 mm×2 mm,长度为 90 mm,室温抗拉强度不低于 520 MPa,屈服强度不低于 205 MPa,断后伸长率不低于 40%,焊丝选择直径为 1.6 mm 的 ER308L 焊丝,母材和焊丝的化学成分如表 1 所示。焊前将钢管对接口内外两侧各 20 mm 区域打磨出金属光泽,并用酒精去除油脂、铁锈等污物。采用 YC-400TX 型焊接电源进行方波脉冲 TIG,采用直流正接,焊接电压为 12 V,在前期研究基础上选取的脉冲工艺参数见表 2。焊接过程的电弧保护及背部保护气体均采用氩气,气体流量分别为 10,5 L·min⁻¹。

表 1 0Cr18Ni9 不锈钢和 ER308L 焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of 0Cr18Ni9 stainless steel and ER308L welding wire

项目	质量分数									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
0Cr18Ni9 不锈钢	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~11.00			余
ER308L 焊丝	0.016	0.54	1.82			19.98	9.73	0.01	0.01	余

表 2 P-TIG 脉冲工艺参数

Table 2 P-TIG pulse parameters

编号	基值电流/ A	峰值电流/ A	脉冲平均 电流/A	脉冲频率/ Hz	脉宽比/ %
1 [#]	20	40	30	0.3	50
2 [#]	25	60	42.5	0.5	50
3 [#]	30	50	40	0.3	50

在焊接接头处切取金相试样,经研磨、抛光,用 4 g 氯化铁+65 mL 盐酸+100 mL 蒸馏水配制的溶液腐蚀后,利用 GX71 型倒置光学显微镜(OM)观察接头焊缝区及热影响区的组织,并利用 ImageJ 软件测量焊缝区 δ 铁素体含量及热影响区中奥氏体晶粒平均尺寸。根据 GB/T 2651—2008,采用整管

拉伸试样,按照 GB/T 228—2016 进行室温拉伸试验,拉伸速度为 1 mm·min⁻¹,每组脉冲工艺取 3 个平行试样,计算平均值,用 VEGA3XMU 型扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 1 可以看出,3 种脉冲工艺下接头焊缝区的组织均为奥氏体+δ 铁素体组织。根据 ER308L 焊丝成分计算得到,铬当量与镍当量之比为 1.76,此时在熔池冷却过程中,铁素体先从熔池内析出后经固态相变转变为奥氏体,来不及转变的铁素体呈蠕虫状、骨骼状、板条状及类板条状残留在奥氏体基

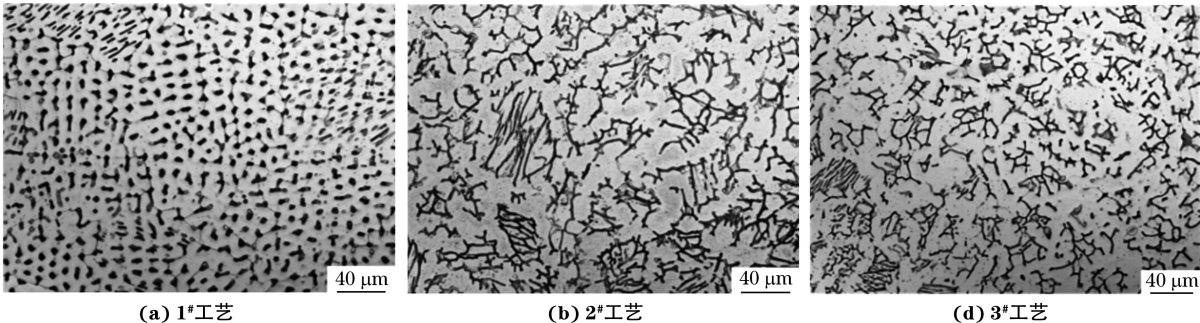


图 1 不同脉冲工艺下接头焊缝区的显微组织

Fig.1 Microstructures of weld of joints under different pulse processes: (a) 1[#] process; (b) 2[#] process and (c) 3[#] process

体中^[10]。1[#]工艺下焊缝区 δ 铁素体呈蠕虫状分布在奥氏体晶界及晶内,统计得到 δ 铁素体面积分数为 18.677%; 2[#]工艺下焊缝区 δ 铁素体呈骨骼状分布在奥氏体晶界及晶内,分布杂乱,无明显方向性, δ 铁素体面积分数为 16.907%; 3[#]工艺下焊缝区 δ 铁素体呈骨骼状分布在奥氏体晶界及晶内,但其枝晶尺寸较小,面积分数为 17.680%。在 δ 铁素体向奥氏体转变的固态相变过程中,在熔池冷却速率及化学成分偏析的影响下,铁素体形成元素富集严重的 δ 铁素体枝晶中心部分以蠕虫状保留至室温,而整个枝晶则以骨骼状保留至室温^[11]。与 1[#]工艺相比,2[#]工艺和 3[#]工艺的脉冲平均电流较大,焊接热输入较大,熔池冷却速率较小,从而保证了 δ 铁素体转变为奥氏体,

室温组织中的残留铁素体含量较少。2[#]工艺与 3[#]工艺相比,一个脉冲周期内脉冲时间相差较小且脉冲平均电流相近,熔池冷却速率主要由脉冲峰值电流决定,3[#]工艺的脉冲峰值电流较小,熔池冷却速率较大, δ 铁素体没有充分时间转变为奥氏体,因此室温组织中的残留铁素体含量较多。

母材及不同脉冲工艺下接头热影响区的显微组织如图 2 所示,统计得到,0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢母材的奥氏体晶粒平均尺寸为 58.43 μm ,1[#]工艺、2[#]工艺与 3[#]工艺下接头热影响区中奥氏体晶粒平均尺寸分别为 87.62,96.17,92.7 μm ,可见 P-TIG 接头热影响区奥氏体晶粒发生明显粗化。靠近焊缝一侧熔合线附近的 δ 铁素体呈柱状晶向焊缝中心生长。

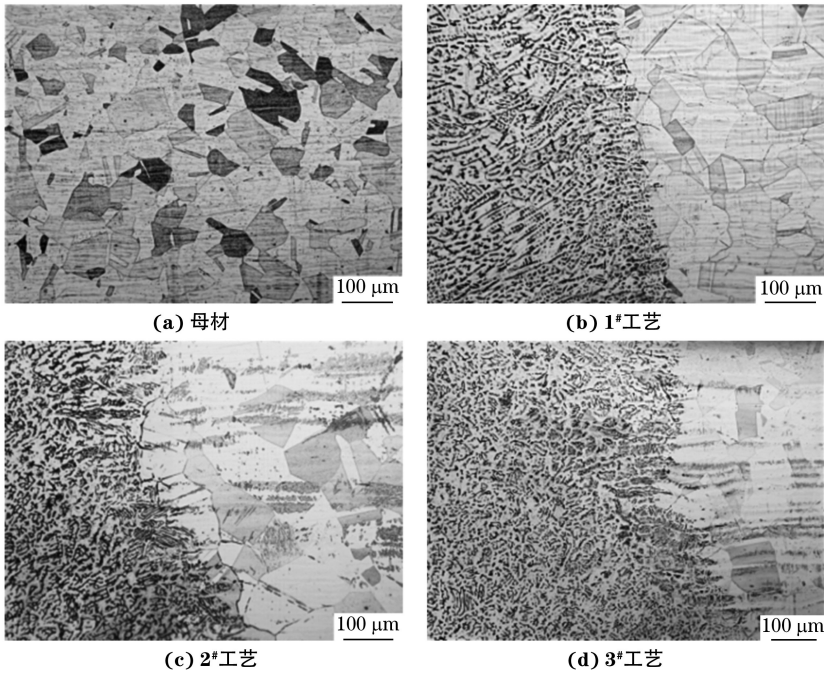


图 2 母材及不同脉冲工艺下接头热影响区的显微组织

Fig.2 Microstructures of base metal (a) and heat-affected zone of joints under different pulse processes (b—d): (b) 1[#] process; (c) 2[#] process and (d) 3[#] process

2.2 拉伸性能

由表 3 可以看出:1[#]工艺下接头的拉伸性能最优,屈服强度为 401.38 MPa,抗拉强度为 701.51 MPa,屈强比为 0.57。1[#]工艺下接头热影响区奥氏体晶粒平均尺寸较小,根据 Hall-Petch 公式,材料的强度与晶粒尺寸呈反比关系,且晶粒尺寸越小,晶界越多,位错在滑移过程中越容易在晶界处产生位错堆积,从而提高材料的强度及塑性。由于 3 组工艺下接头焊缝区奥氏体晶界或晶内存在 δ 铁素体组织,可以抑制含磷、硫等有害杂质的低熔点共晶相在晶界析出,且 δ 铁素体在奥氏体不锈钢焊缝中属于强

化相,在拉伸过程中能够阻碍位错的滑移,从而提高焊缝的强度^[12-14],且 3 组接头热影响区奥氏体晶粒存在明显的粗化现象,因此 3 组工艺下接头拉伸试样均在热影响区或母材处断裂。

表 3 不同脉冲工艺下接头的拉伸性能及断裂位置
Table 3 Tensile properties and fracture location of joints under different pulse processes

焊接工艺	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	断裂位置
1 [#] 工艺	401.38	701.51	0.57	热影响区
2 [#] 工艺	297.47	652.23	0.46	热影响区
3 [#] 工艺	345.21	673.94	0.51	母材

由图 3 可以看出,3 组工艺下接头拉伸断口均由韧窝组成,这是材料经过塑性变形后,在断口处产生的显微空洞经形核、长大后相互连接形成的^[15]。因此,3 组工艺下接头的断裂形式均为典型的韧性

断裂。1[#]工艺下接头拉伸断口韧窝为等轴韧窝,形状均匀且尺寸较小。2[#]工艺与 3[#]工艺下接头拉伸断口韧窝粗大,且深度浅,大韧窝附近存在少量的小韧窝。因此,1[#]工艺下接头的拉伸性能最优。

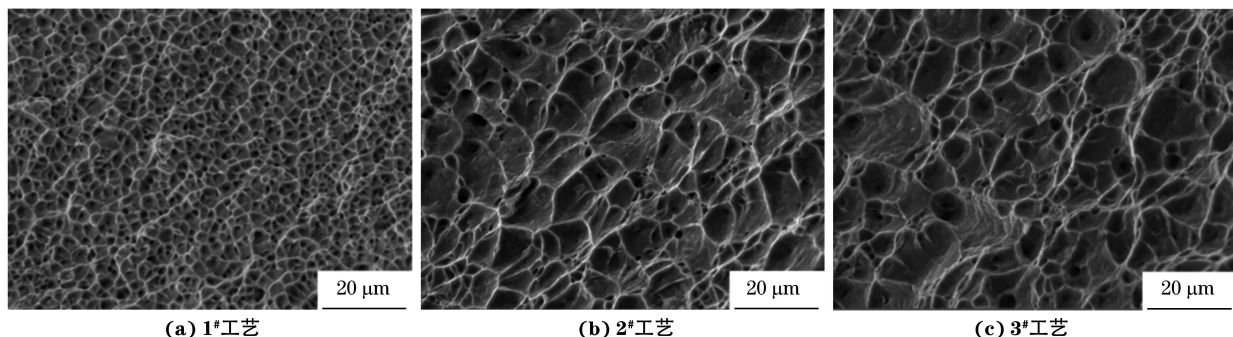


图 3 不同脉冲工艺下接头拉伸断口形貌

Fig.3 Tensile fracture morphology of joints under different pulse processes: (a) 1[#] process; (b) 2[#] process and (c) 3[#] process

3 结 论

(1) 采用脉冲钨极氩弧焊对薄壁 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢管进行焊接,3 组脉冲工艺下接头焊缝区组织均为奥氏体+ δ 铁素体;当脉冲频率及脉宽比一定时,随着脉冲平均电流的增加, δ 铁素体从蠕虫状转变为骨骼状,且 δ 铁素体含量减小;在相同水平的脉冲平均电流及脉宽比下,随脉冲峰值电流由 60 A 减小到 50 A,骨骼状 δ 铁素体尺寸变小、含量增加。接头热影响区奥氏体晶粒发生明显粗化。

(2) 不同脉冲工艺下接头拉伸时均在热影响区或母材处发生韧性断裂。接头的屈服强度及抗拉强度均大于母材强度下限值,且当基值电流为 20 A,峰值电流为 40 A,脉冲频率为 0.3 Hz,脉宽比为 50%时,接头的屈服强度及抗拉强度最高,分别为 401.38,701.51 MPa,屈强比为 0.57,拉伸性能最优,拉伸断口中的韧窝为等轴韧窝,形状均匀且尺寸较小。

参考文献:

- [1] 刘瑜. 奥氏体不锈钢 24Mn18Cr3Ni0.62N 疲劳性能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
LIU Y. Study on fatigue properties of a new type austenitic stainless steel 24Mn18Cr3Ni0.62N[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [2] 邱光银. 奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
QIU G Y. Research on ultrasonic phased array detection technology for austenitic stainless steel pipe weld [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [3] 辛立军, 苏海, 周岐, 等. 不锈钢薄板激光高速焊接的工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(3): 57-60.

XIN L J, SU H, ZHOU Q, et al. Study on high speed laser welding process of stainless steel sheet [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(3): 57-60.

- [4] 张晓鸿, 马朋召, 张康, 等. 脉冲 TIG 焊接工艺参数对高温镍基合金焊缝组织的调控研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 93-101.
ZHANG X H, MA P Z, ZHANG K, et al. Study on controlling of welding seam microstructure about nickel-based high-temperature alloy by pulse TIG welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 93-101.
- [5] 郭树伟. S304 薄壁不锈钢管背面充氮保护钨极氩弧焊工艺[J]. 焊接技术, 2001, 30(增刊 1): 98.
GUO S W. S304 thin-walled stainless steel pipe backside nitrogen-protected argon tungsten arc welding process [J]. Welding Technology, 2001, 30(S1): 98.
- [6] 赵勇桃, 赵莉萍, 麻永林, 等. 薄壁 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的焊接试验[J]. 内蒙古科技大学学报, 2008, 27(3): 213-215.
ZHAO Y T, ZHAO L P, MA Y L, et al. The welding experiment of thin-wall 1Cr18Ni9Ti stainless steels [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2008, 27(3): 213-215.
- [7] 秦国梁, 孟祥萌, 付邦龙, 等. 薄壁不锈钢管列置双 TIG 电弧高速焊接工艺[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 83-88.
QIN G L, MENG X M, FU B L, et al. High speed tandem TIG welding of thin-walled stainless steel pipe [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 83-88.
- [8] 张鑫, 杨棉绒. 基于计算机技术薄壁不锈钢管焊接的仿真分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(21): 188-191.
ZHANG X, YANG M R. Numerical simulation of thin-walled stainless steel tube's welding based on computer technique[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(21): 188-191.
- [9] 陶万勇, 徐小明, 王璐. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢薄壁管氩弧焊焊接变形的工艺控制方法研究[J]. 科技创新与应用, 2020(11): 110-111.

- TAO W Y, XU X M, WANG L. Research on process control method of argon arc welding deformation of 1Cr18Ni9Ti stainless steel thin-walled tube[J]. Technology Innovation and Application, 2020(11):110-111.
- [10] 陆娅. 304 奥氏体不锈钢凝固组织的形成及演化规律研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2016.
- LU Y. Research on the formation and evolution of solidified structure of 304 austenitic stainless steel [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [11] 申丽娟. 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢凝固过程组织转变研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2012.
- SHEN L J. Microstructure transformation of 0Cr 18Ni9 Austenite stainless steel under solidification [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2012.
- [12] 陈洋, 吴世凯, 肖荣诗. SUS301L 不锈钢 CO₂ 激光-MIG 复合焊接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1):71-76.
- CHEN Y, WU S K, XIAO R S. Microstructure and performance of CO₂-MIG hybrid welding of SUS301L stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1):71-76.
- [13] KAMIYA O, KUMAGAI K, KIKUCHI Y. The effects of δ -ferrite morphology on low temperature fracture toughness of austenitic stainless steel weld metal[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1991, 9(4):525-531.
- [14] 陈晓晖, 张述泉, 冉先喆, 等. 电弧功率对 MIG 电弧增材制造 316L 奥氏体不锈钢组织及力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(5):42-49.
- CHEN X H, ZHANG S Q, RAN X Z, et al. Effect of arc power on microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steel 316L fabricated by high efficient arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(5):42-49.
- [15] 李红宇, 张录强, 刘杨, 等. 冷变形对 0Cr18Ni10Ti 不锈钢管拉伸性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(3):69-71.
- LI H Y, ZHANG L Q, LIU Y, et al. Effect of cold deformation on tensile properties of 0Cr18Ni10Ti stainless steel tube[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(3):69-71.
- (上接第 9 页)
- [70] GAO D Q, WANG R, CHEN W. Effect of load on the tribological properties of Si₃N₄-hBN composite ceramics sliding against Si₃N₄ [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(9):1699-1705.
- [71] 范凯, 解忠良, 饶柱石, 等. 水润滑复合材料轴承摩擦学性能实验[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1):192-199.
- FAN K, XIE Z L, RAO Z S, et al. Experimental study on friction characteristics of water-lubricated composite-material bearings[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(1):192-199.
- [72] GUAN X Y, WANG L P. The tribological performances of multilayer graphite-like carbon (GLC) coatings sliding against polymers for mechanical seals in water environments [J]. Tribology Letters, 2012, 47(1):67-78.
- [73] XIE G Y, SUI G X, YANG R. The effect of applied load on tribological behaviors of potassium titanate whiskers reinforced PEEK composites under water lubricated condition [J]. Tribology Letters, 2010, 38(1):87-96.
- [74] WANG X, YAMAGUCHI A. Characteristics of hydrostatic bearing/seal parts for water hydraulic pumps and motors. Part 2: On eccentric loading and power losses [J]. Tribology International, 2002, 35(7):435-442.
- [75] 韩高峰, 王建章, 阎逢元. 模拟深海高压摩擦试验机及相关海洋摩擦学的研究[J]. 工程与试验, 2013, 53(增刊 1):1-5.
- HAN G F, WANG J Z, YAN F Y. Development of the friction tester of simulating deep sea high pressure and research on ocean tribology[J]. Engineering & Test, 2013, 53(S1):1-5.
- [76] YANG Y S, ZHANG Q, NIE S L. Development of a multifunctional abrasion and friction test bench with high ambient pressure for seawater hydraulics [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 336/337/338:916-923.
- [77] 陈松, 高万振, 段海涛. 水深对 POM 摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(3):225-232.
- CHEN S, GAO W Z, DUAN H T. Effect of water depth on the tribological properties of polyoxymethylene [J]. Tribology, 2014, 34(3):225-232.