

高压直流换流阀散热器腐蚀机理及防控技术研究

国建宝¹, 崔鹏飞¹, 关胜利², 卢志良¹, 汪广武², 王海军¹, 陈建业³,
黄克峰², 耿曼², 傅宇湘², 杨伟龙², 吴安兵², 邓龙龙¹, 吕闯¹

(1.中国南方电网有限责任公司 超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 2.广州高澜节能技术股份有限公司, 广州 510663; 3.清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: **目的** 研究高压直流换流阀散热器的腐蚀机理及其防控技术。**方法** 通过搭建散热器水冷系统运行平台, 搭载化学镀镍和未镀镍两种不同的水冷散热器, 研究水冷内流道的腐蚀情况及其影响。通过 SEM 及元素分析仪分析腐蚀情况及腐蚀产物的组成, 并通过万能试验机对金属材质的力学性能进行研究, 推导腐蚀机理。另外, 对比镀镍和未镀镍水冷器换热效率的变化规律。**结果** 成功搭建能评估水冷散热器腐蚀性能的试验平台, 且在试验平台模拟下, 镀镍的水冷散热器在水冷设备上运行 3 个月后表面光亮, 无明显腐蚀物和腐蚀痕迹; 而未镀镍的水冷散热器宏观微观上都有较明显的腐蚀产物, 主要为含羟基铝石、硫酸铝以及氯化铝等物质, 且化学镀镍阴极保护处理后, 可使流体在对流换热时的导热热阻减小, 让流体在流道里面的流动变成剧烈无序的湍流状态。**结论** 采用化学镀镍的冷却系统的耐腐蚀性能更为优异, 且同时可降低水冷散热器的热阻, 从而强化换热效果, 改善了水冷散热器的换热性能。

关键词: 换流阀; 散热器; 化学镀镍; 热阻; 水冷器; 腐蚀机理

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)03-0262-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.033

Study on Corrosion Mechanism and Prevention and Control Technology of Radiator with HVDC Valve

GUO Jian-bao¹, CUI Peng-fei¹, GUAN Sheng-li², LU Zhi-liang¹, WANG Guang-wu²,
WANG Hai-jun¹, CHEN Jian-ye³, HUANG Ke-feng², GENG Man², FU Yu-xiang²,
YANG Wei-long², WU An-bing², DENG Long-long¹, LYU Chuang¹

(1.Maintenance & Test Center of CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China;

2.Goaland Energy Conservation Tech. Co. Ltd, Guangzhou 510663, China;

3.Department of Electrical Engineering of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The aims to study the corrosion mechanism and prevention and control technology of high-voltage DC converter

收稿日期: 2019-10-29; 修订日期: 2019-12-27

Received: 2019-10-29; Revised: 2019-12-27

基金项目: 南网超高压输电公司科技项目 (CGYKJXM20160093)

Fund: Supported by Scientific Research Project of CSG EHV Power Transmission Company (CGYKJXM20160093)

作者简介: 国建宝 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事直流输电工程换流阀控制保护技术研究及技术监督工作。

Biography: GUO Jian-bao (1981—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: control protection technology research and technical supervision for converter valves in HVDC transmission projects.

通讯作者: 耿曼 (1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事直流输电工程换流阀冷却技术研究工作。邮箱: gengm@goaland.com.cn

Corresponding author: GENG Man (1982—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: cooling technology for converter valves in HVDC transmission projects. E-mail: gengm@goaland.com.cn

引文格式: 国建宝, 崔鹏飞, 关胜利, 等. 高压直流换流阀散热器腐蚀机理及防控技术研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 262-268.

Guo Jian-bao, Cui Peng-fei, Guan Sheng-li, et al. Study on corrosion mechanism and prevention and control technology of radiator with HVDC valve[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 262-268.

valve radiator. By constructing a radiator water-cooling system operation platform, two different water-cooled radiators, electroless nickel plating and non-nickel plating, were used to study the corrosion and influence of the water-cooled inner flow passage. The corrosion condition and the composition of the corrosion products were analyzed by SEM and elemental analyzer, and the mechanical properties of the metal materials were studied by a universal testing machine to derive the corrosion mechanism. The change law of heat exchange efficiency between nickel-plated and unnicked water coolers is also compared. A test platform capable of evaluating the corrosion performance of the water-cooled radiator was successfully built. Under the simulation of the test platform, the nickel-plated water-cooled radiator was bright after 3 months of running on the water-cooled equipment, and there was no obvious corrosion and corrosion marks; Nickel water-cooled heat sinks have obvious corrosion products on the macroscopic and microscopic scales, mainly composed of hydroxyaluminum, aluminum sulfate and aluminum chloride. Moreover, the electroless nickel plating cathodic protection treatment can reduce the thermal conductivity of the fluid during convective heat transfer, and the flow of the fluid in the flow channel becomes a violent disordered turbulent state. The electroless nickel plating cooling system has better corrosion resistance and can reduce the thermal resistance of the water-cooled radiator, thus enhancing the heat exchange effect and improving the heat transfer performance of the water-cooled radiator. It provides a direction for HVDC project application, radiator corrosion and heat transfer efficiency.

KEY WORDS: HVDC converter valve; radiator; nickel plating; thermal resistance; thermal resistance; water cooler; corrosion mechanism

铝合金由于具有密度低、比强度高、导电导热能力强、加工成形性好以及物理化学性能优异等特点，在航空、交通、能源等领域得到广泛的应用，其中 6061 铝合金是 Al-Mg-Si 系铝合金，具有极佳的加工焊接性能、优良的耐蚀性能，常作为高压直流换流阀冷却系统的散热器主要材料^[1]。换流阀在正常运行时，会产生巨大的热量，导致晶闸管温度迅速上升，为了防止晶闸管被烧坏，需要冷却水进入晶闸管贴合的散热器进行冷却，而冷却水进阀温度的高低直接决定晶闸管结的温度^[2-7]。晶闸管工作时，会因消耗电功率而产生热量集中在晶闸管的 PN 结中，通过散热系统将热量传导外界环境中。在这样较高温度环境和电位差下，水冷系统中散热器内部流道会产生腐蚀，进而形成管路堵塞、漏水，甚至引起直流闭锁或紧急停运事故，给电网安全稳定运行造成隐患^[8-9]。目前，国内外尚未研究出整治散热器腐蚀的有效措施。

本文提出在散热器内部进行化学镀镍，用最直接的方式避免或减少腐蚀的发生，进而减缓结垢的形成，提高换流阀设备运行的可靠性，缩减年度检修期间换流阀的定检工期，减小长期反复检查带来的质量风险。

1 实验

1.1 化学镀镍水冷散热器

本文采用化学镀镍的方式对晶闸管散热器内部阿基米德螺旋线流道表面进行阴极保护处理，先用砂纸粗磨，然后再进行预处理，并通过纯水冲洗干净，而后依次进行超声波纯水清洗、超声波丙酮清洗、7% 氢氧化钠溶液清洗、超声波蒸馏水清洗、超声波乙醇

清洗，然后取出、吹干。用化学镀对流道进行镀镍处理，化学镀镍液组成见表 1。镀镍工艺：控制 pH 值 6.5~6.5，温度 75 °C^[10]。

表 1 化学镀镍液配方
Tab.1 Formula of electroless nickel plating bath

Component	Content
NiCO ₃ ·2NiO ₂ H ₂ ·4H ₂ O	10 g/L
C ₆ H ₇ O ₈ ·H ₂ O	5 g/L
(H ₄ N) ₂ S	0.001 g/L
NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	20 g/L
NH ₃ ·H ₂ O	30 mL

1.2 换流阀冷却系统运行评估平台的搭建

散热器整体立式布置，散热器上端有进出水口各一个（不分进出水方向，见图 1）。将待测试评估的散热器与晶闸管模拟装置接触表面涂抹导热硅脂贴合，并进行机械固定^[11-13]，通过电加热方式，模拟高压直流输电（HVDC）单个晶闸管满负荷运行时的发热量，监控进出水温度、压力、散热器结温，调整冷却水流量，监测散热器进出水前后压差^[14-15]。

1.3 性能测试

使用 SEM（SU8220，Hitachi）及元素分析仪对晶闸管散热器内流管试片表面形貌进行表征。使用蔡司金相显微镜（Axio Imager M2m，放大 200 倍）对试片表面进行表征。使用 Rigaku DMAX-RB12KW X 射线衍射仪（XRD）分析腐蚀产物组成。

将散热器同类材料 6061 铝合金裁剪成 60 mm×30 mm×4 mm 大小，保留直径为 2 mm 小孔，用砂纸打磨至 1500#，而后置于丙酮中除油，随后用去离

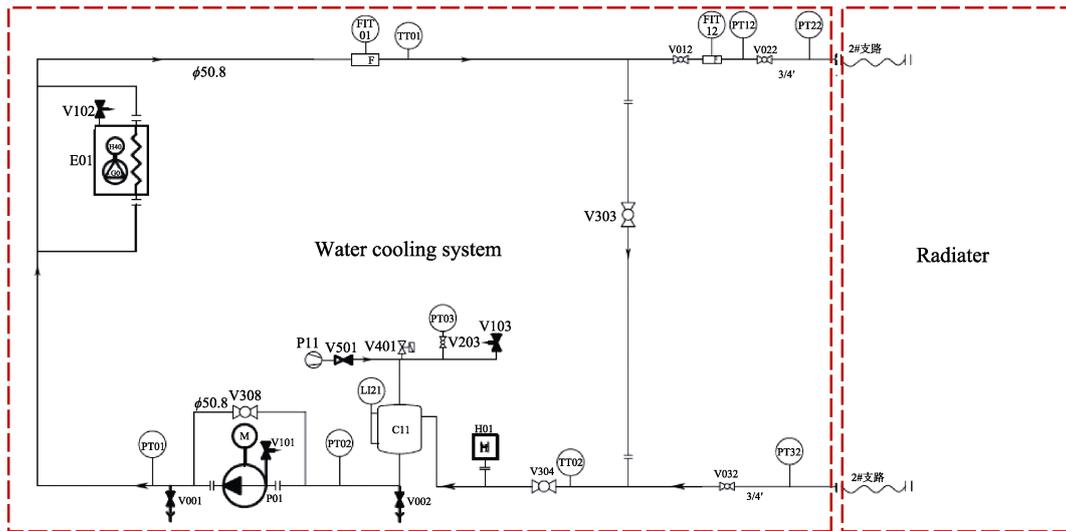


图1 工艺流程图
Fig.1 Process flow chart

子水与酒精清洗，吹干后，静置于干燥皿中 24 h。拉伸试样按照 GB/T 16865—1997《变形铝、镁及其合金加工制品拉伸试验用试样》加工成矩形拉伸试样。

2 结果与讨论

2.1 换热器内流管表面形貌分析

试验平台稳定运行 3 个月后，对散热器内部流道

表面形貌进行观察。图 2a 是未镀镍的阿基米德螺旋线，可以看到表面生成了灰白色或黑色腐蚀产物，而且流道内发生了不同程度的点蚀。与之对比的是图 2b 中镀镍的阿基米德螺旋线，仍然保持光亮，表面没有明显的灰暗或黑色的腐蚀产物。将图 2a 中腐蚀较严重的区域进行切割，得到出现明显点蚀现象的样品（图 2c）和能清楚看到表面有明显腐蚀的管道壁（图 2d）。这些图形都能说明，在搭建的实验平台上



a 未镀镍发生腐蚀的阿基米德螺旋线



b 镀镍未发生腐蚀的阿基米德螺旋线



c 未镀镍阿基米德螺旋线局部腐蚀图



d 未镀镍阿基米德螺旋线隔板腐蚀图

图2 运行3个月后阿基米德螺旋线水道图

Fig.2 Images of the internal flow path of the radiator after three months of operation: (a) image of Archimedes helix corroded without nickel plating; (b) image of Archimedes helix uncorroded with nickel plating; (c) image of Archimedes helix corroded without nickel plating; (d) image of Archimedes helix corroded without nickel plating

运行 3 个月后，镀镍和未镀镍的阿基米德螺旋线的腐蚀情况区别非常明显，由此可以看出镀镍对于预防腐蚀的积极作用。

2.2 换热器内流管腐蚀成分研究

将换热器内流管阿基米德螺旋线切割样品进行扫描电镜分析，结果如图 3 所示。通过对图 3 中 SEM 形貌的观察和分析可知，图 3a 表明了未进行化学镀镍的散热器内部流道经长时间运行后，表面发生不均

匀腐蚀的现象，有腐蚀颗粒及块体附着，且图 3c 表明其表面腐蚀裂纹较为明显。图 3b 表明经化学镀镍后的散热器内部流道表面呈光滑平整状，无腐蚀颗粒凸出，局部表面分散均匀，与图 3a 相比，其致密性有明显提高，整体形貌保持较为完整，有利于降低运行中散热器的流阻和热阻。

表 2 为散热器内部流道进行化学镀镍前后的能谱结果，表明在对散热器内部流道进行化学镀镍后，其流道表面材质发生明显变化，镍元素占比较高。

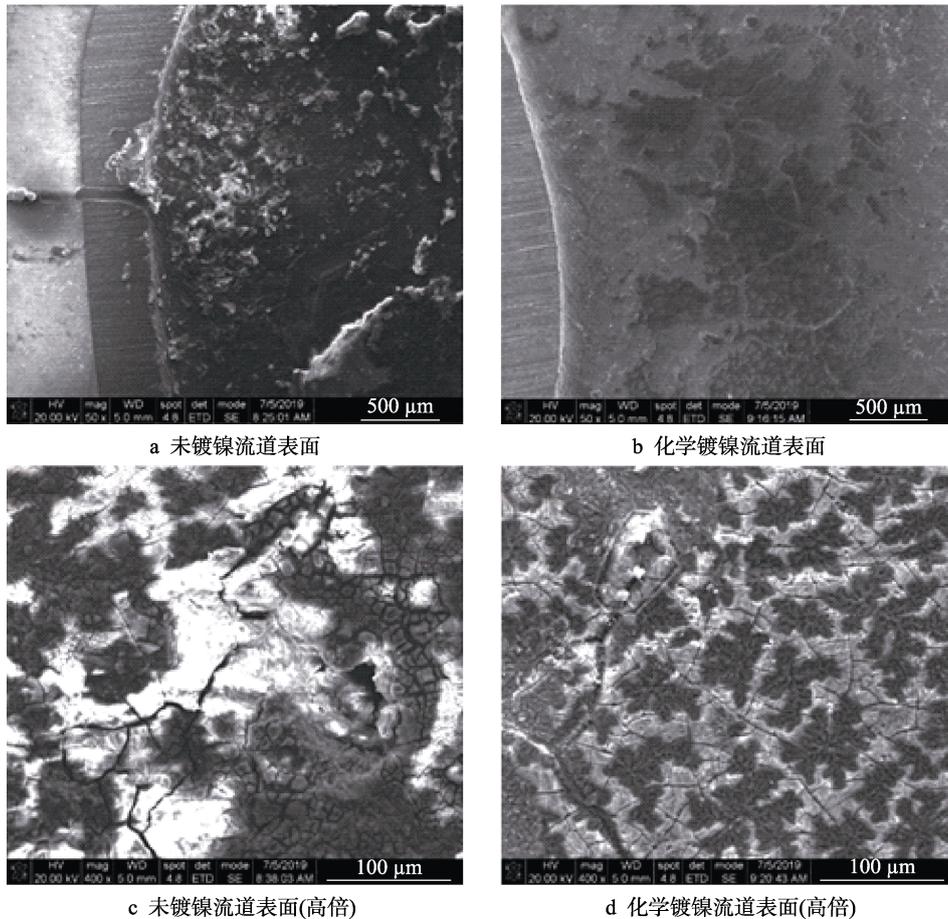


图 3 运行 3 个月后散热器内部流道表面 SEM 图

Fig.3 SEM images of the internal flow path of the radiator after three months of operation: (a) the surface of the unnicked nickel path; (b) the surface of the electroless nickel plated path; (c) the surface of the unnicked nickel path; (d) the surface of the electroless nickel plating path

表 2 散热器内部流道表面材质元素含量

Tab.2 Radiator internal flow path surface material element content

Type of elemente	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Ni	wt%
Surface material of channel without nickel plating	98.61	0.32	0.57	0.10	0.22		
Surface material of channel with nickel plating	10.56	0.01	0.06	0.02	0.01	88.34	

对阿基米德螺旋线上的腐蚀产物进行物相分析及元素分析，结果见图 4 和表 3，可知 6061 铝合金表面的腐蚀产物主要由 Al、O 和 H 组成，因此可以推断腐蚀产物由含氧的铝基混合物组成。从腐蚀发生

的形貌特征来看，主要形成腐蚀裂纹。在换流阀冷却系统运行平台加速作用下，未镀镍的氧化膜被破坏。一般情况下，暴露于空气中的 6061 型铝合金会在表面形成较为致密的氧化膜，随后会产生 Al_2O_3 或 $Al(OH)_3$ 。

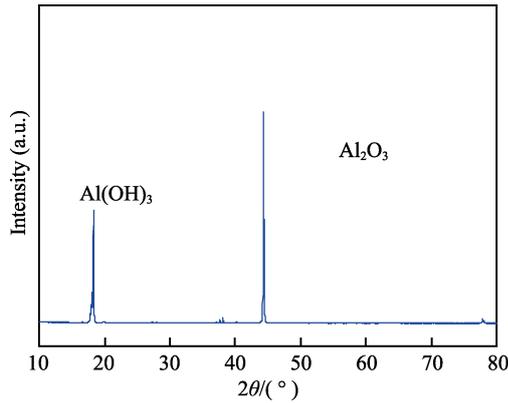


图4 腐蚀产物的XRD图
Fig.4 XRD of corrosion

表3 散热器内部流道表面腐蚀产物元素含量
Tab.3 Element content of corrosion products on the surface of internal flow channel of radiator

			wt%
Al	O	H	
58.4	38.1	3.5	

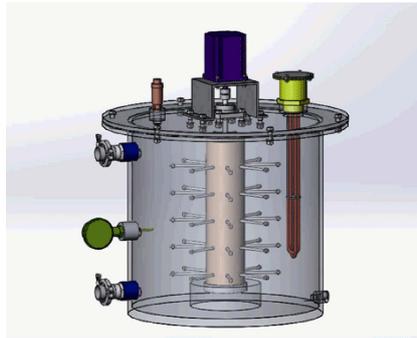
2.3 力学性能研究

在换流阀冷却系统运行平台上,在换热器之前串联接入试样贮存器(见图5),将1.4节所述的6061型铝合金试样置于贮存器(参照SH/T 0088—91以及ASTMD277076进行设计)中。以流量6 L/min、进口温度26 °C为条件,运行不同时间后的断面形貌如图6所示。对6061铝合金试样进行力学性能测试,通过计算得到7个试样的抗拉强度(σ_b)、屈服强度($\sigma_{p0.2}$)及断裂伸长率(δ)的平均值,结果见表4,

表4 实验平台运行后铝合金试样的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of aluminum alloy samples after operation of the experimental platform

Running time (months)	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ /%
Original sample	270.3	322.8	15.3
0.5	269.8	319.1	14.9
1	267.1	315.4	14.8
1.5	264.2	311.3	14.4
2	262.5	308.8	13.5
2.5	260.1	306.1	13.1
3	257.3	303.1	12.0



三维模型图



实物图

图5 试片贮存器
Fig.5 Test piece reservoir

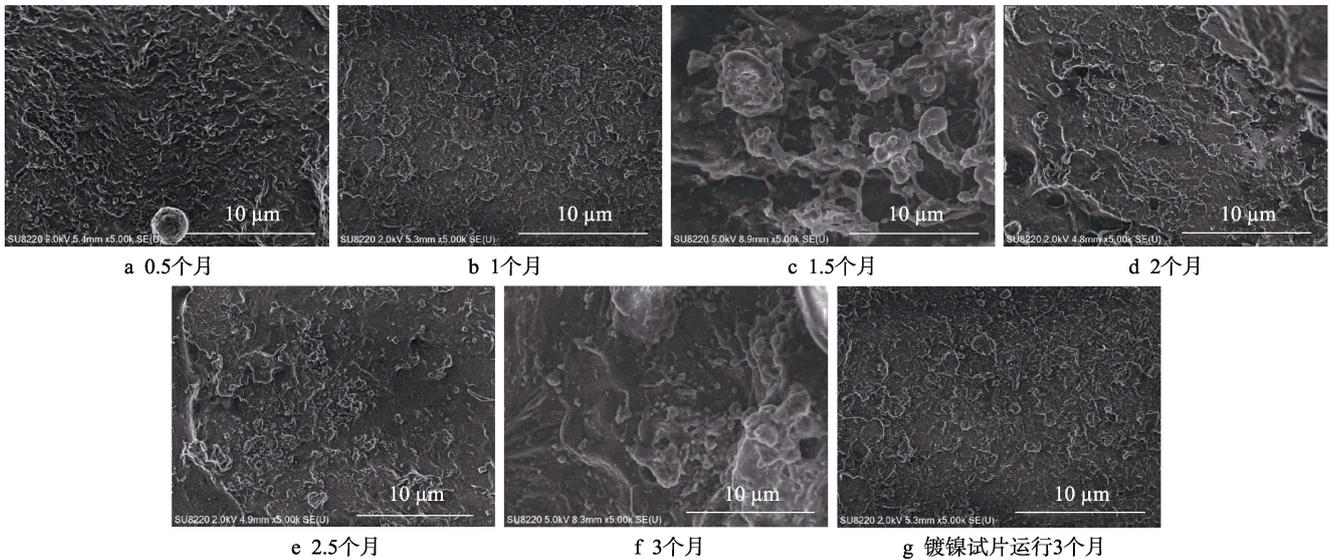


图6 不同运行时间的铝合金试样断面SEM图

Fig.6 SEM imagines of aluminum alloy sample with different operation time:

(a) 0.5 month, (b) 1 month, (c) 1.5 month, (d) 2 months, (e) 2.5 months, (f) 3 months, (g) 3 months (with nickel)

可知在运行的 3 个月期间，6061 型铝合金的抗拉强度和屈服强度下降并不明显，与初始的差值小于 6%，因此在整个运行过程中，腐蚀并没有对换热器的力学性能造成太大影响。但断裂伸长率下降较大，3 个月后降至 78.4%，这可能是铝合金加工过程中，由于腐蚀导致应力集中^[16-22]，当拉伸应力作用在腐蚀裂纹处时，会形成裂纹，并沿腐蚀界面发生断裂（见图 7）。

2.4 换热性能影响

将镀镍后的水冷器替代原来的水冷器，在试验平台上运行，其运行指标见表 5。发现与未镀镍的水冷器相比（见图 8），镀镍水冷器的导热热阻减小，让流体在流道里面的流动变成剧烈无序的湍流状态，从而强化了换热效果，改善了水冷散热器的换热性能，降低了水冷散热器的热阻。通过镀镍处理，提高了换

热器的工作效率。

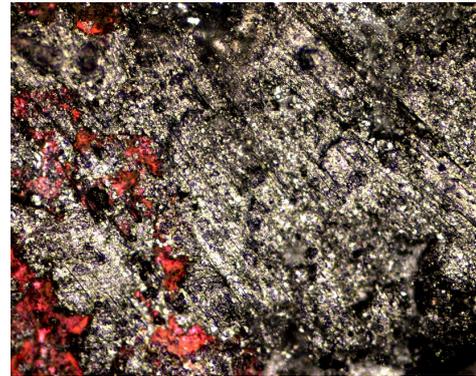


图 7 金相显微镜下放大 200 倍的微观形貌
Fig.7 Micrograph magnified 200 times under metallographic microscope

表 5 换流阀冷却系统运行指标

Tab.5 Operation index of cooling system of converter valve

Flow/(L·min ⁻¹)	Inlet temperature/°C	Radiator shell temperature/°C	Input electric heating power/W	Thermal resistance/(°C·kW ⁻¹)	Flow resistance/kPa
6	26.0	46.5	3093.2	6.63	18.5
7	25.7	46.3	3121.1	6.60	25.2
8	25.7	45.0	3121.1	6.18	32.8
9	25.7	44.1	3135.0	5.87	41.5
10	25.7	43.2	3065.3	5.71	51.7
11	25.7	42.3	2988.7	5.55	62.3
12	25.7	42.1	3009.6	5.45	73.1

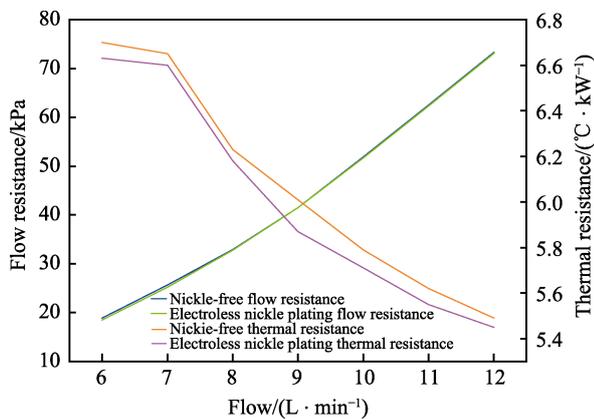


图 8 散热器流阻和热阻曲线
Fig.8 Heat resistance and thermal resistance curve of radiator flow

3 结论

- 1) 成功搭建试验平台评估水冷散热器腐蚀性能，可模拟真实工况条件下，对设备的腐蚀性能进行评估，可以明显看出，采用化学镀镍的冷却系统具有更优异的耐腐蚀性能。
- 2) 镀镍的水冷散热器具有更优异的耐腐蚀性能，在水冷设备上运行 3 个月后表面光亮，无明显腐蚀物

和腐蚀痕迹。而未镀镍的水冷散热器宏观微观上都有较明显的腐蚀产物，主要为含氢氧化铝和氧化铝等物质。

3) 分析 6061 型铝合金水冷散热器在实验平台下不同运行时间的力学性能中发现，抗拉强度和屈服强度下降并不明显，小于 6%；由于宏观上存在晶间腐蚀，导致断裂伸长率降低很快，3 个月后就降到了 78.4%。

4) 采用化学镀镍阴极保护处理后，可以使流体在对流换热时的导热热阻减小，从而强化换热效果，改善了水冷散热器的换热性能，降低了水冷散热器的热阻。

参考文献：

- [1] 杨浪, 赵起越, 贺建, 等. 6061 铝合金在模拟工业-海洋大气环境下的腐蚀研究[J]. 中国材料进展, 2018, 37(1): 28-42.
YANG Lang, ZHAO Qi-yue, HE Jian, et al. Corrosion behavior of 6061 aluminum alloy in simulative industry-marine atmospheric environment[J]. Materials China, 2018, 37(1): 28-42.
- [2] 习贺勋, 汤广福, 刘杰, 等. ±800 kV/4750 A 特高压直

- 流输电换流阀研制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 15-22.
- XI He-xun, TANG Guang-fu, LIU Jie, et al. +800 kV/4750 A UHVDC converter valve development [J]. China journal of electrical engineering, 2012, 32(24): 15-22.
- [3] 唐田田, 党沛琳, 赵倩, 等. 铝合金表面预处理及其电镀工艺优化[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(5): 820-825.
- TANG Tian-tian, DANG Pei-lin, ZHAO Qian, et al. Surface pretreatment of aluminium alloy and optimization of nickel plating process[J]. Journal of materials science and engineering, 2017, 35(5): 820-825.
- [4] 于坤山, 汤广福, 吴文伟, 等. 晶闸管水冷散热器: 中国, CN1767183C[P]. 2006-05-03.
- YU Kun-shan, TANG Guang-fu, WU Wen-wei, et al. Thyristor valve water cooled radiator: China, CN1767183[P]. 2006-05-03.
- [5] 张雷, 常忠, 王珊丹, 等. 大容量高压 SVC 装置用晶闸管水冷管路优化设计[J]. 电气应用, 2014, 33(11): 70-73.
- ZHANG Lei, CHANG Zhong, WANG Shan-dan, et al. Optimum design of thyristor valve water-cooling pipeline for large capacity and high voltage SVC device[J]. Electrical application, 2014, 33(11): 70-73.
- [6] 闻福岳, 古哲韬, 屈海涛, 等. 6250 A/±800 kV 特高压直流换流阀设计[J]. 智能电网, 2017, 5(6): 590-596.
- WEN Fu-yue, GU Zhe-tao, QU Hai-tao, et al. 6250 A/+800 kV UHVDC converter valve design[J]. Smart grid, 2017, 5(6): 590-596.
- [7] 周会高, 张长春, 许钊, 等. ±800 kV 特高压换流阀运行试验系统研发[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2): 26-30.
- ZHOU Hui-gao, ZHANG Chang-chun, XU Fan, et al. +800 kV UHV converter valve operation test system research and development[J]. South China power grid technology, 2010, 4(2): 26-30.
- [8] 金锐, 雷林绪, 温家良, 等. 特高压直流碳化硅晶闸管阀损耗探讨[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 8-13.
- JIN Rui, LEI Lin-xu, WEN Jia-liang, et al. Discussions on loss of silicon carbide thyristor valves in UHVDC[J]. Power grid technology, 2011, 35(3): 8-13.
- [9] 朱铭炼, 熊文, 王斐, 等. MMC 阀保护晶闸管的电流分配与结温计算[J]. 电力电子技术, 2017, 51(5): 116-119.
- ZHU Ming-lian, XIONG Wen, WANG Fei, et al. MMC valve-protected thyristor current distribution and junction temperature calculation[J]. Power electronics technology, 2017, 51(5): 116-119.
- [10] 杨环宇, 高增, 赵明辉, 等. 镀镍高硅铝合金真空钎焊工艺研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(3): 86-90.
- YANG Huan-yu, GAO Zeng, ZHAO Ming-hui, et al. Vacuum brazing technology of nickel-plated high silicon aluminium alloy[J]. Science and engineering of military materials, 2019, 42 (3): 86-90.
- [11] 李海生, 李宝德, 谭建成. 直流融冰兼 SVC 装置晶闸管阀组通态损耗研究[C]//中国电机工程学会年会. 北京: 三角洲, 2013.
- LI Hai-sheng, LI Bao-de, TAN Jian-cheng. On-state loss of thyristor valve assembly in DC ice melting and SVC device[C]//Annual meeting of China electrical engineering society. Beijing: Delta, 2013.
- [12] 杜雪涛, 王玉珏, 李勇, 等. 水冷型热管散热器水冷散热器结构的数值模拟及试验研究[J]. 机械设计与制造, 2016(2): 12-16.
- DU Xue-tao, WANG Yu-juan, LI Yong, et al. Numerical simulation and experimental study on the structure of water-cooled heat pipe radiator[J]. Mechanical design and manufacture, 2016 (2): 12-16.
- [13] 贺荣, 龚曙光, 李纯, 等. 基于 Fluent 的水冷散热器式散热器数值模拟与试验研究[J]. 流体机械, 2010, 38(2): 57-60.
- HE Rong, GONG Shu-guang, LI Chun, et al. Numerical simulation and experimental study of water-cooled radiator based on fluent [J]. Fluid machinery, 2010, 38(2): 57-60.
- [14] 王硕. 用于电子功率模块冷却的水冷基板试验台及其试验方法: 中国, CN103063249A[P]. 2013-04-24.
- WANG Shuo. Water-cooled substrate test bench for cooling electronic power module and its test method: China, CN103063249A[P]. 2013-04-24.
- [15] 李长亮, 刘晓萍, 贾瑞清. 特高压直流换流阀水冷系统的分流试验台的设计[J]. 液压与气动, 2012(6): 34-36.
- LI Chang-liang, LIU Xiao-ping, JIA Rui-qing. Design of diversion test bench for water cooling system of UHVDC converter valve[J]. Hydraulic and pneumatic, 2012(6): 34-36.
- [16] ALEXOPOULOS N D, PAPANIKOS P. Experimental and theoretical studies of corrosion-induced mechanical properties degradation of aircraft 2024 aluminum alloy[J]. Materials science & engineering A, 2008, 498(1): 248-257.
- [17] ALEXOPOULOS N D. On the corrosion-induced mechanical degradation for different artificial aging conditions of 2024 aluminum alloy[J]. Materials science & engineering A, 2009, 520(1): 40-48.
- [18] VERA R, DELGADO D, ROSALES B M. Effect of atmospheric pollutants on the corrosion of high power electrical conductors: Aluminium and AA6201 alloy[J]. Corrosion science, 2006, 48(10): 2882-2900.
- [19] AHMAD Z, UL-HAMID A, JAA B. The corrosion behavior of scandium alloyed Al5052 in neutral sodium chloride solution[J]. Corrosion science, 2001, 43(7): 1227-1243.
- [20] PRATIKNO H. Aging treatment to increase the erosion-corrosion resistance of AA6063 alloys for marine application[J]. Procedia earth and planetary science, 2015, 14: 41-46.
- [21] CHEN Xin, TIAN Wen-ming, LI Song-mei, et al. Effect of temperature on corrosion behavior of 3003 aluminum alloy in ethylene glycol-water solution[J]. Chinese journal of aeronautics, 2016, 29(4): 1142-1150.
- [22] ORLIKOWSKI J, JULIUSZ R, JACEK J, ET al. Instantaneous impedance monitoring of aluminum alloy 7075 corrosion in borate buffer with admixed chloride ions[j]. Corrosion, 2015, 71(7): 828-838.