

换流阀冷却用相变乳状液的制备及其性能

周建辉¹, 王 航¹, 刘 杉¹, 魏晓光¹, 贺之渊¹, 谯 耕²

(1. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102211; 2. 全球能源互联网研究院有限公司欧洲研究院, 德国 柏林 10623)

摘要: 为提高换流阀冷却能力, 以相变材料 (高级脂肪酸酯 CrodaTherm™ 47 和 CrodaTherm™ 53)、乳化剂 (硬脂醇聚醚 Brij™ S2 和油醇聚氧乙烯醚 Sympatens AS-100) 和成核剂 (聚乙烯醇) 以及去离子水为原料, 制备了换流阀冷却用相变乳状液。探究了相变乳状液的配方和制备工艺等对相变乳状液性能的影响, 确定了最佳配方 (相变材料、乳化剂、成核剂和去离子水的质量分数分别为 16%、1.6%、2.4% 和 80%) 和剪切工艺 (剪切速率 50 ks^{-1} , 持续 5 min)。对制备的换流阀冷却用相变乳状液进行了对流换热系数、电导率、带电稳定性以及与冷却系统兼容性等分析。结果表明, 与去离子水相比, 所制备的相变乳状液的表现比热容提升了约 50%, 换热能力提升了 2 倍左右。其电导率、绝缘耐压等关键性能参数均能满足高压条件下换流阀冷却的应用要求。

关键词: 换流阀; 冷却系统; 冷却介质; 相变乳状液; 对流换热系数; 表现比热容; 功能材料

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2022) 01-0086-09

Preparation and performance of phase change dispersion for converter valve cooling system

ZHOU Jianhui¹, WANG Hang¹, LIU Shan¹, WEI Xiaoguang¹, HE Zhiyuan¹, QIAO Geng²

(1. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102211, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute Europe GmbH, Berlin 10623, Germany)

Abstract: In order to improve the cooling capacity of the converter valve, phase change dispersion (PCD) for converter valve cooling system were prepared using phase change materials (CrodaTherm™ 47 and CrodaTherm™ 53), emulsifiers (stearyl alcohol polyether Brij™ S2 and oleic alcohol polyoxyethylene ether Sympatens AS-100), nucleating agent (polyvinyl alcohol) and deionized water as raw materials. The effects of formulation and preparation process of PCD on the properties of PCD were investigated. The best formulation (the mass fractions of phase change material, emulsifier, nucleating agent and deionized water being 16%, 1.6%, 2.4% and 80%, respectively) and shear process (shear rate 50 ks^{-1} , lasting time 5 min) were determined. The convective heat transfer coefficient, conductivity, voltage stability and compatibility with cooling system of PCD for converter valve cooling system were analyzed. The results showed that compared with those of deionized water, the apparent specific heat capacity of PCD was increased by about 50%, and the heat transfer capacity was increased by about 2-fold. The key performance parameters such as conductivity, insulation and withstand voltage could meet the cooling application requirements of the converter valve.

Key words: converter valve; cooling system; cooling medium; phase change dispersion; convective heat transfer coefficient; apparent specific heat capacity; functional materials

随着高压直流输电 (HVDC) 技术的发展, 换流阀在运行中会承担较高电压, 并因大电流带来严

重的损耗问题。目前, 水冷显热的冷却方式被广泛应用, 但其存在冷却效率低、温度分布不均以及尺寸

较大等缺点^[1-4]。相变乳状液 (PCD) 具有储能密度高和换热温差小等优点, 成为传热领域中的研究热点^[5-9]。目前, 国内外研究主要集中在 PCD 的制备^[10-12]和强化换热^[13-16]两大方面, 对 PCD 在高压大电流应用环境下的研究有待展开。

PCD 主要包括分散相 (相变材料、乳化剂、成核剂) 和连续相。使用 PCD 替换常规的去离子水作为高压大电流应用环境下的冷却介质, 除满足去离子水冷却介质基本特性^[17]以外, 需重点考虑如下几方面: (1) 冷却系统在换流阀内承受着较高电压, 冷却介质需要尽可能低的电导率以降低泄漏电流^[17], 维持系统均压, 因此, 所有材料都必须保持低导电性, 要尽可能减少 PCD 中其他阴、阳离子的引入; (2) 冷却系统通过并联去离子回路处理金属管路析出来的离子, 以维持冷却介质稳定的低电导率 ($<0.3 \mu\text{S}/\text{cm}$)^[18], 所以 PCD 与离子交换树脂的兼容性也是不可忽视的问题; (3) 在确保 PCD 低电导率和与去离子树脂优异兼容性的基础上, 需要综合考虑 PCD 的换热性能、稳定性、黏度及环保性等, 以实现换流阀冷却能力提升, 进而实现提高输电容量的目的。首先, 文献报道的 PCD 使用石蜡相变材料作为分散相^[5], 在工业应用中石蜡不容易降解, 会在热交换器 (空冷器、阀片散热器) 中发生部分冻结, 清理时易导致产生难降解、难清理和污染环境的废渣, 这将给实际使用带来诸多不便。因此, 采用非导电、可再生资源的高级脂肪酸酯作为相变材料, 可以保证 PCD 的低电导率和较高的换热性能并降低对环境的污染^[9]; 另外, 根据当前换流阀典型的进水温度条件 ($44 \text{ }^\circ\text{C}$) 和出水温度条件 ($55 \text{ }^\circ\text{C}$) 确定相变材料的熔点应在 $47\sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$; 其次, 为了提高 PCD 的物理稳定性必须加入乳化剂以防止相分离而造成聚集和沉淀^[9]。离子型乳化剂在使用过程中会分散出离子, 使得 PCD 的导电率增加, 这在高压大电流应用环境下是极其危险的。使用非离子型乳化剂不仅可以保证 PCD 的低电导率还可以降低 PCD 的黏度。工业上比较常见的非离子型乳化剂有: 脂肪酸酯、乙氧基化脂肪醇、甘油酯及前述组合。最后, PCD 在晶闸管散热器内需要吸热, 在外冷设备中将热量排放到空气中。因此, 在 PCD 中需要添加合适的成核剂来防止或减少过冷^[6]。将聚乙烯醇作为成核剂加入 PCD 中不仅可以有效地降低过冷度还可以提高 PCD 与冷却系统的兼容性^[8]。基于上述材料制备非导电型 PCD 的方法还需深入系统研究。

本文借鉴电气设备绝缘问题的解决思路^[19-20], 提出在换流阀去离子水中添加适量非导电型 PCD

来提高冷却容量和换热能力的方法, 以解决过负荷和温度分布不均的问题, 减少冷却设备尺寸。通过研究不同因素对 PCD 性能的影响, 制备了换流阀冷却系统用 PCD, 还研究了 PCD 的电导率特性、带电电压稳定性以及与冷却系统的兼容性, 证明所制备的 PCD 能在高压大电流环境下使用。最后研究了 PCD 的换热能力。

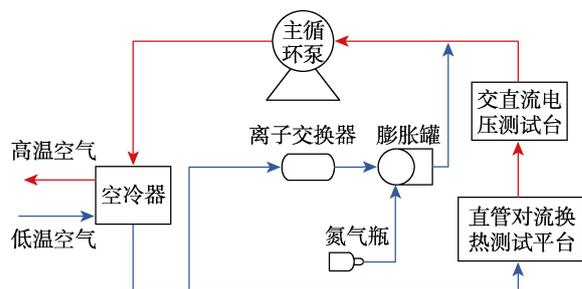
1 实验部分

1.1 试剂与仪器

相变材料高级脂肪酸酯 Croda ThermTM 47 (CT47, 十六酸十四酯和十八酸十四酯按质量比 1:2 混合)、高级脂肪酸酯 Croda ThermTM 53 (CT53, 十六酸十六酯)、乳化剂硬脂醇聚醚 BrijTM S2 (BS2) 和硬脂醇聚醚 BrijTM S721 (BS721), 工业品, 禾大化学品 (上海) 有限公司; 油醇聚氧乙烯醚 Sympatens AS-100 (SAS100), 工业品, 南通辰润化工有限公司; 聚乙烯醇 (质量分数为 86%~89%), 分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司; 去离子水, 自制。

L70/2171 型激光导热仪, 德国 Linseis 公司; Rheolab QC 型流变仪, 奥地利 Anton Paar 公司; Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪, 英国 Malvern 公司; DSC3 型差示扫描量热仪, SG23 型电导率测试仪, 瑞士 Mettler Toledo 公司; Lumisizer 型稳定性分析仪, 德国 LUM 公司; 直管对流换热测试台, 交直流电压测试台和换流阀冷却系统集成装置为定制设备。

图 1 是集成装置的工作原理示意图和交直流电压测试台中的电极装置。相变乳液通过主循环泵加压进入空冷器将热量排放到空气中, 冷却后进入直管对流换热测试平台将其产生的热量带走, 最后经过交直流电压测试台中的电极装置回流到主循环泵进口, 形成密闭式循环冷却系统。为适应换流阀冷却系统在高电压条件下的使用要求, 减少高电压环境下产生漏电流, 在主循环冷却回路上并联了去离子回路。一定流量的冷却介质流经离子交换器, 然后通过膨胀罐与主循环回路中的相变乳液在主循环泵进口汇流。



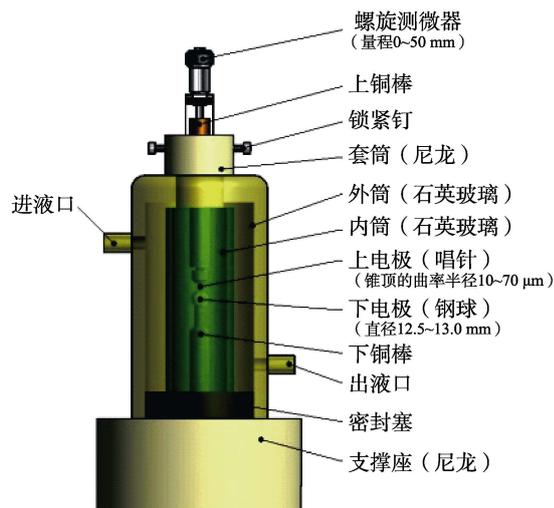


图 1 集成装置工作原理示意图和电极装置

Fig. 1 Schematic diagrams of test equipment and electrode device

1.2 PCD 的制备

换流阀冷却用 PCD 采用高能法制备而成。具体流程如下：首先，称取 40 g 高级脂肪酸酯 CT47 和 40 g 高级脂肪酸酯 CT53 作为混合相变材料，将这 80 g 混合相变材料放入油相罐用蒸汽加热并搅拌，温度设定为 75 °C，确保其充分液化且混合均匀。然后，称取 6.4 g 油醇聚氧乙烯醚 SAS100 和 1.6 g 硬脂醇聚醚 BS2 作为混合乳化剂，将这 8 g 混合乳化剂放入烘箱中预热至 75 °C。再将真空乳化罐温度设定为 75 °C，将 400 g 去离子水泵入真空乳化罐，在搅拌状态下将上述混合乳化剂和 12 g 成核剂聚乙烯醇缓慢加入去离子水中，使其在水相中溶解并分散均匀直至无块状物。将油相罐中已经液化的混合相变材料泵入真空乳化罐，然后在真空状态下，同时开启搅拌器及剪切乳化机，在 5000 r/min 条件下，剪切速率为 50 ks⁻¹ 剪切分散处理 5 min。待分散处理结束后，继续低速搅拌并开启水冷系统，将冷却水引入真空乳化罐外侧夹套进行搅拌冷却。当体系温度冷却至 30 °C 以下后，将制得的 PCD 泵入准备好的成品桶，灌装并密闭储存。

1.3 测试与表征

1.3.1 粒径分布测试

将 PCD 用去离子水稀释至固体质量分数为 1%，采用激光粒度分析仪测定 PCD 的粒径分布。

1.3.2 差式扫描量热 (DSC) 分析

在 N₂ 保护下，取 3~5 mg 样品置于 0~60 °C 范围内，分别以 1 和 5 K/min 的升温速率采用差示扫描量热仪进行测试。

1.3.3 流变性测试

采用流变仪分别在恒定温度 (25 °C) 不同剪切速率下和恒定剪切速率 (100 ks⁻¹) 不同温度下测定

PCD 的黏度。

1.3.4 稳定性测试

在 25 °C 下对 PCD 使用离心机进行稳定性实验。将所得数据与重力加速度相乘即可得到静态稳定时间，并以此来评价 PCD 的稳定性。

1.3.5 电导率测试

使用电导率测试仪测试 PCD 的电导率，并与高压直流换流阀冷却介质的规定值 (0.3 μS/cm) 作比较来评价 PCD 的绝缘特性。

1.3.6 对流换热实验

直管对流换热测试平台由三根不锈钢管 (长度为 5.32 m，直径为 14 mm)、加热缠绕电缆 (确保每一根管获得均匀的热流边界条件)、绝热石棉、稳压电源以及温度流量测量仪器等组成。采用直管对流换热测试平台对冷却介质 (PCD 和去离子水) 在入口温度约为 44 °C 下开展两种工况实验。实验工况 1: 冷却介质质量流量为 8.3 kg/min，雷诺数为 4357，加热功率 3.2 kW。实验工况 2: 冷却介质质量流量为 6.3 kg/min，雷诺数为 3200，加热功率 2.5 kW。

1.3.7 带电稳定性测试

±800 kV 换流阀冷却回路在交直流电压下要求爬电比距 ≥ 20 mm/kV，即 20 mm 长的换流阀冷却管路内冷却介质承受的电压不会超过 1 kV，为简化实验，本研究采用晶闸管级设备^[1]开展带电实验。交直流电压测试台包括电极装置和交直流电压装置，通过交直流电压装置给电极提供规定参数的交直流电压，并采用螺旋测微器进行电极间距离调整，可以获得不同电压条件、不同电极间距下 PCD 的耐压性能。调整两个电极间距为 40 mm，分别在直流电压 2 kV 和交流电压 2 kV 下测试 PCD 的耐压性能。

1.3.8 冷却系统兼容性测试

将约 30 mL 树脂 AMBERJET UP6150 (粒径约为 0.6 mm 的苯乙烯-二乙烯基苯树脂) 放入一个密闭的玻璃容器中，然后将 500 g PCD 也放入玻璃容器，将混合物每天搅拌 4 次，每次搅拌 2 h，持续搅拌两周；在换流阀冷却系统样机中开启去离子回路，并采用电加热装置模拟热源对 PCD 加热，用空冷器实现冷却。按照去离子水测试中所用的程序，对 PCD 进行反复测试来评价 PCD 与冷却系统的兼容性。

2 结果与讨论

2.1 PCD 的配方优化

2.1.1 乳化剂种类及比例的优化

采用 BS2、SAS100 和 BS721 3 种产品作为候选乳化剂，测试不同乳化剂种类及其质量比对 PCD 性能的影响。表 1 是不同乳化剂的配方。

表 1 乳化剂配方及其比例
Table 1 Formula and proportion of emulsifier

	R3	R4	R5	R6
乳化剂种类	BS721+ BS2	BS721+ BS2	SAS100+ BS2	SAS100+ BS2
乳化剂质量比	4 : 1	1 : 1	4 : 1	1 : 1

图 2 是不同乳化剂种类和比例对 PCD 粒径的影响, 其他条件同 1.2 节。

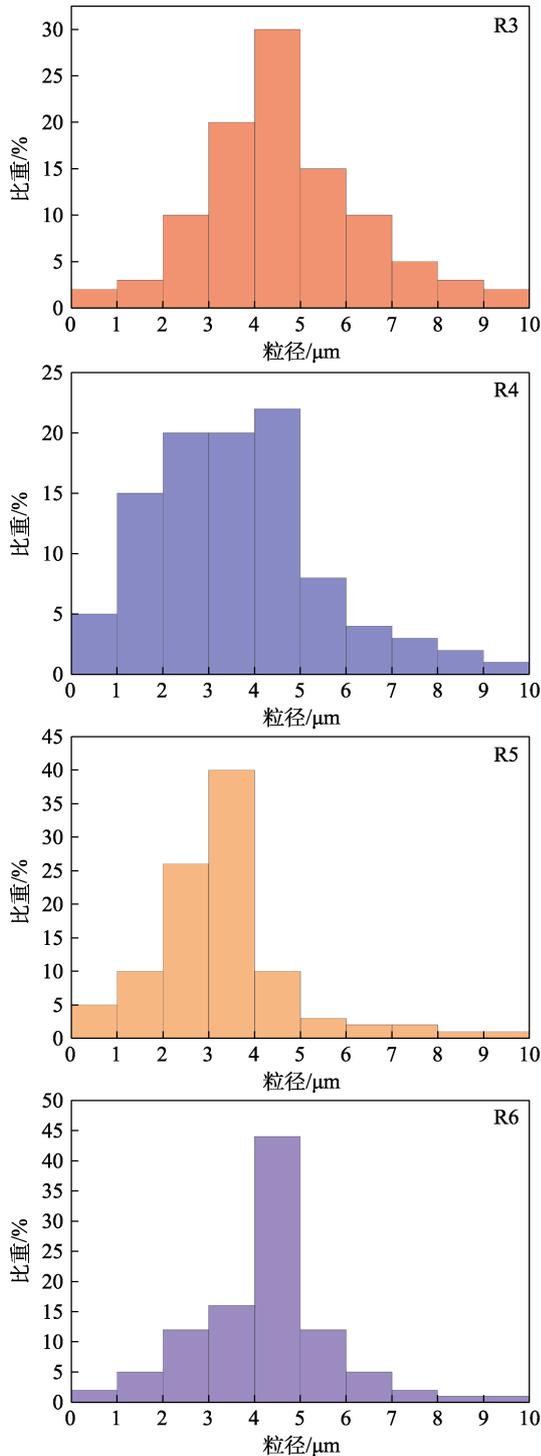


图 2 乳化剂种类及比例对粒径分布的影响

Fig. 2 Effects of emulsifier type and proportion on particle size distribution

由图 2 可知, 与 R3 和 R4 相比, R5 的粒径分布更加集中。与 R5 相比, R6 的粒径分布峰值向更大值偏移, 但其分布更加集中。从粒径分析中可以看到, 从 R3 到 R5, 粒径分布图逐渐向左侧移动, 意味着与 R3、R4 相比, R5 粒径较小。此外, R5 分布相对集中说明与 R3 和 R4 相比, R5 粒径分布更加均匀。

图 3 是 R3~R6 在两种不同加热速率 (1 和 5 K/min) 下的 DSC 分析结果。由图 3 可知, R3、R4、R6 测得的潜热和最小过冷度在不同速率下差异较大, 而 R5 在低速率和高速率下测量的潜热 (约为 34 J/g) 和最小过冷度基本相同。

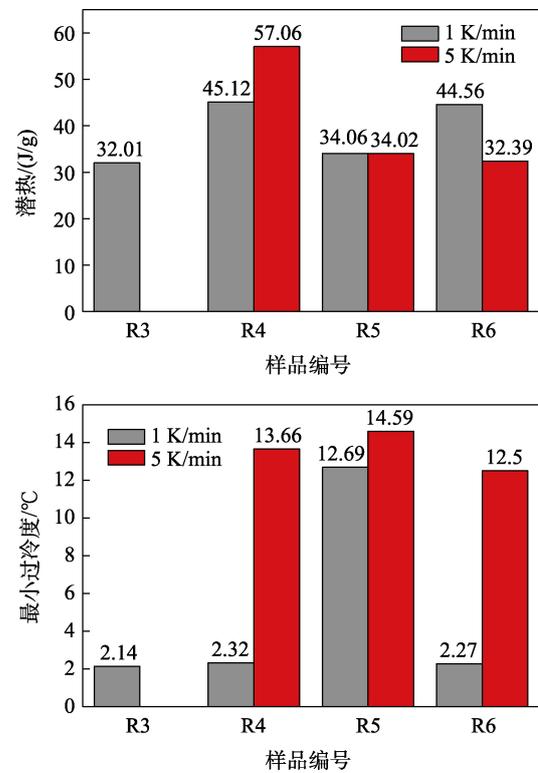
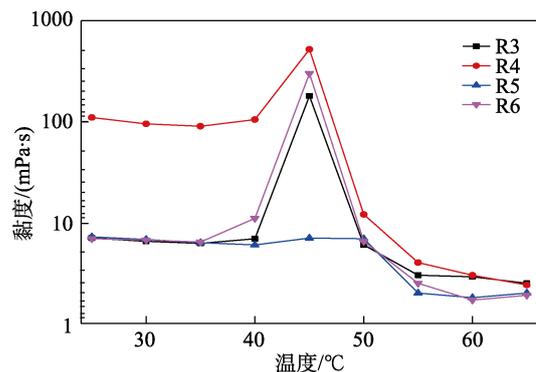


图 3 R3~R6 的 DSC 分析 (潜热和最小过冷度)

Fig. 3 DSC analysis of latent heat and minimum supercooling degree of R3~R6

图 4 是不同剪切速率和温度对 PCD 黏度的影响。



黏度(mPa·s)

温度/°C

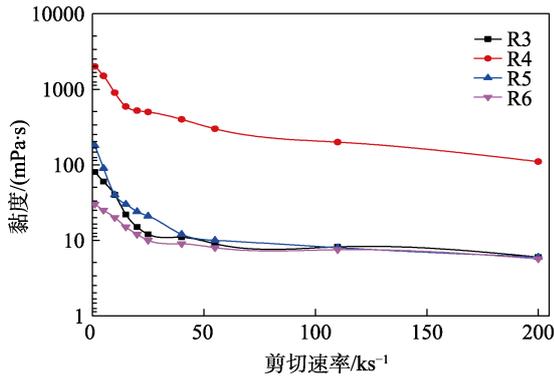


图 4 R3~R6 的流变特性分析

Fig. 4 Analysis of viscosity characteristics of R3~R6

由图 4 可知,在恒定温度(25 °C)下,随着剪切速率增加,PCD 黏度降低并维持稳定;在恒定剪切速率(100 ks⁻¹)下,黏度在相变温度区间出现较高值。R6 在剪切速率为(1~200) ks⁻¹的测试范围内表现出较低的黏度,并且随着温度升高,R6 表现出更好的流变特性。而在恒定剪切速率下,R5 表现出最佳的流变性能。

图 5 是 R5 的稳定性分析结果。在 25 °C 下进行离心稳定性实验。R5 和 R6 的平均重力加速度分别为 2160 和 2155 m/s²。由图 5 可知,测试在大约 6.993 h 后结束,R5 和 R6 的最终不稳定性指数分别为 0.445 和 0.507。此外,R5 的静态稳定时间为 497 h,约为 21 d,R6 的静态稳定时间为 27 d。

综上所述,R5 是性能最优的 PCD 配方。但是 R6 在黏度和稳定性方面也表现出良好的性能,给 R5 优化提供了参考,即将 SAS100 的质量分数从 80%减少到 75%,以及将乳化剂 BS2 的质量分数从 20%增加到 25%。因此,最优乳化剂体系配比为 $m(\text{SAS100}) : m(\text{BS2}) = 3 : 1$ 。

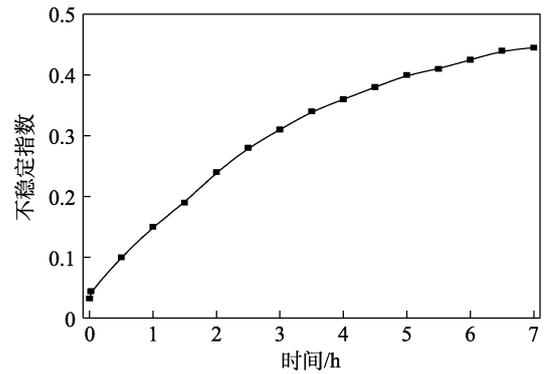


图 5 R5 的稳定性分析

Fig. 5 Stability analysis of R5

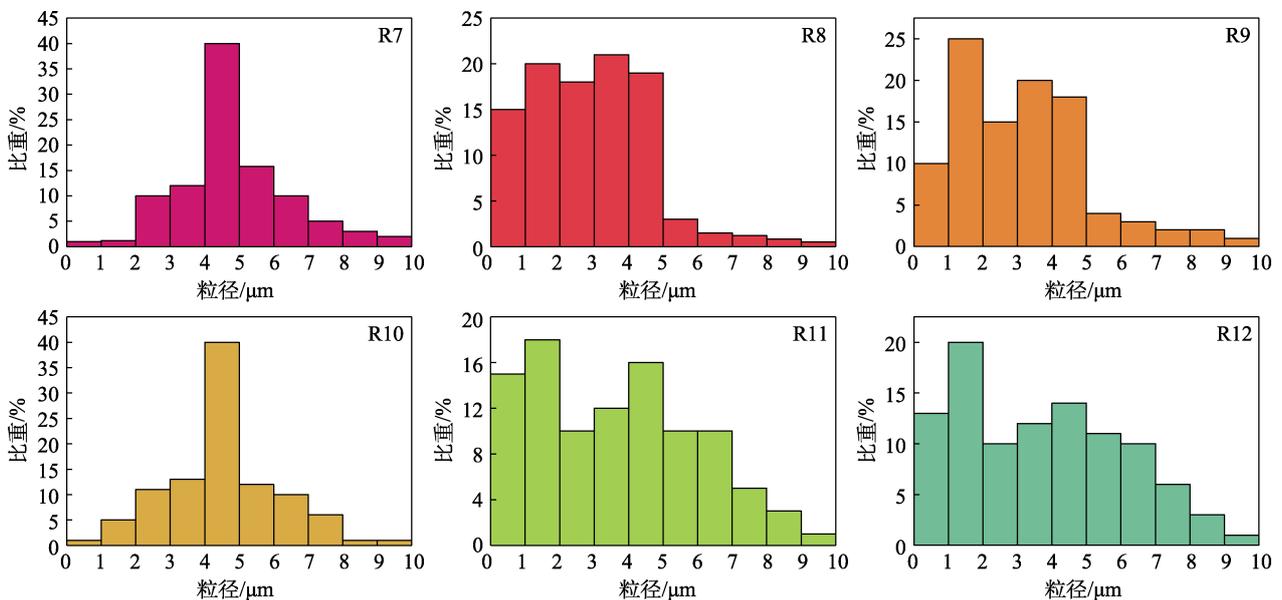
2.1.2 剪切速率及分散时间的优化

为分析制备过程中剪切速率(Γ)和分散时间(t)对粒径分布和热流性能的影响,按照当前最优配方在不同剪切速率和分散时间作用下制备了 9 种 PCD (R7~R15)。表 2 是 3 种剪切速率(20、50 和 100 ks⁻¹)及 3 个分散时间(1、5 和 10 min)的组合。

表 2 不同制备工艺参数下制得 PCD
Table 2 Nine kinds of PCD prepared under different process parameters

	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
$\Gamma / (\text{ks}^{-1})$	20	50	100	20	50	100	20	50	100
t / min	1	1	1	5	5	5	10	10	10

图 6 是不同剪切速率和不同分散时间对 R7~R15 粒径的影响。由图 6 可知,R9 的粒径分布分散成 3 个部分,这意味着其中含有多种不同直径的粒子。其次,R8、R11、R12 和 R14、R15 的粒径分布较为分散,在不同直径的两个部分分散开来。



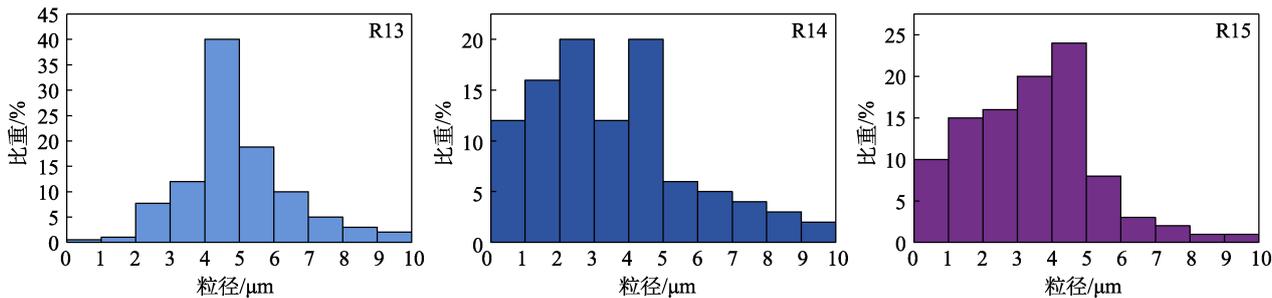


图 6 粒径分布

Fig. 6 Particle size distribution

此外, R7、R10 和 R13 的粒径分布集中, 主要分散在粒径在 3~6 μm 的范围内。R11 颗粒的粒径集中分布在 0~7 μm 之间, 且其中各粒径颗粒所占比重接近。与 R12 相比, 制备过程中剪切速率相对更低。

图 7 是不同剪切速率和温度对 R7~R15 黏度的影响。由图 7 可知, 在恒定剪切速率和恒定温度下, R8~R12 以及 R15 表现出较好的流变特性, 但需结合粒径分布进行综合分析。虽然 R8 和 R9 具有低黏度的特征, 但它们的颗粒在所有的 PCD 样品中呈现出十分分散的粒径分布, 表明其粒径并不均匀。相比于 R11, R12 具有相似的分布但其粒径更大 (即便在更高剪切速率 100 ks⁻¹ 下产生)。R15 虽然具有非常低的黏度, 但颗粒粒径分布相对分散, 且在制备过程消耗的能量最大 (剪切速率 100 ks⁻¹, 持续时间 10 min)。

综上所述, 考虑到能量消耗, R11 在分散相粒径分布和黏度方面有最好的综合表现, 优化后的制备工艺为: 剪切速率 50 ks⁻¹ 持续 5 min。该研究还表明, PCD 可通过施加剪切速率进行再次分散, 可以得到更好的粒径分布情况。因此, 为了保持换流阀冷却系统中 PCD 的长期运行稳定性, 可安装一个在线再生分散单元, 可以减小粒度防止 PCD 凝聚, 保持其稳定性。

2.1.3 分散相比例 (质量分数) 的优化

保持其他参数恒定 (相变材料 CT53 和 CT47 按 1 : 1 质量配比, 乳化剂 SAS100 和 BS2 按 3 : 1 质量配比, 分散时间 5 min, 剪切速率 50 ks⁻¹), 本研究分析了当分散相质量分数为 20% (R16)、30% (R17) 和 40% (R18) 时 PCD 的性能。通过粒径分析可知, R16 具有最好的粒径分布。图 8 是不同分散相比例对 R16~R18 流变性能的影响。

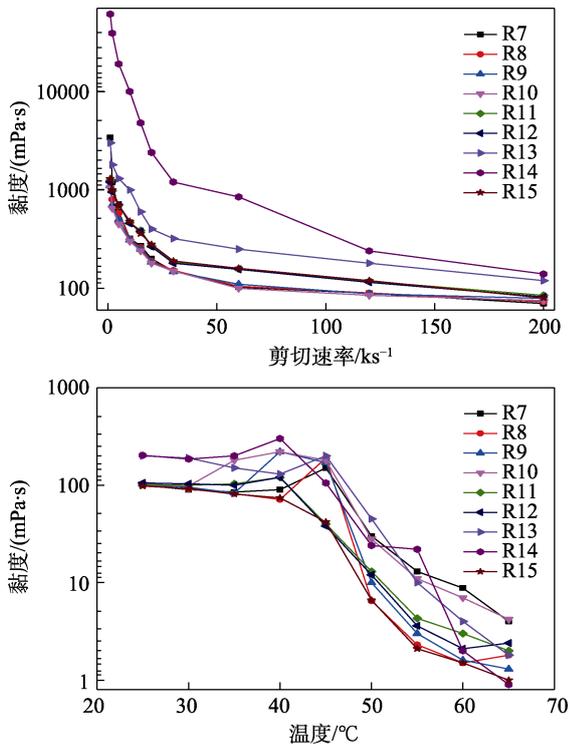


图 7 R7~R15 的流变特性分析

Fig. 7 Analysis of viscosity characteristics of R7~R15

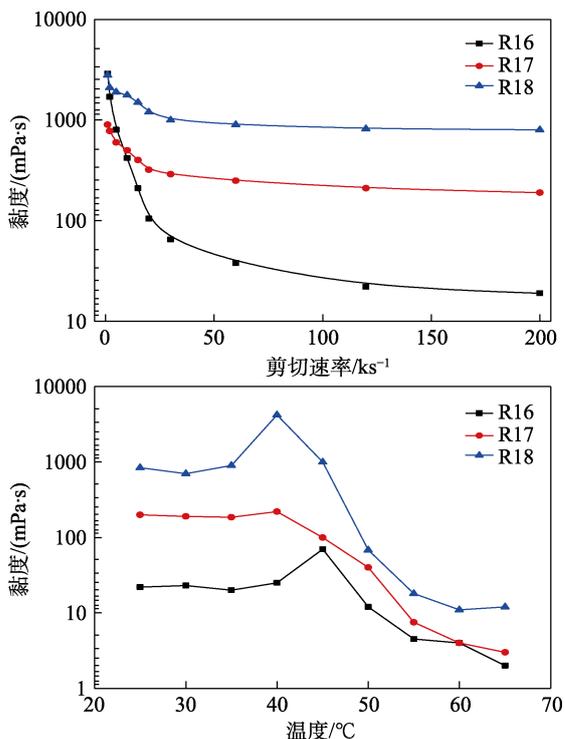


图 8 R16~R18 的流变特性分析

Fig. 8 Analysis of viscosity characteristics of R16~R18

由图 8 可知, R18 的黏度明显过高, 在所有配方中 R16 具有最好的流变特性, 而 R17 的流变特性在所有配方中处于中间位置。

由于 R18 的黏度太高, 不考虑其稳定性实验, 仅比较了 R16 和 R17。测试在 25 °C 下进行, R16 和 R17 的平均重力加速度分别为 2144 和 2224 m/s²。图 9 是不同分散相比例对 R16 和 R17 稳定性的影响。由图 9 可知, R16 在大约 6.956 h 后的最终不稳定性指数为 0.460, 而 R17 不稳定性指数为 0.236。此外, R16 的静态稳定时间为 1136 h, 约为 47 d, R17 的静态稳定时间为 115 d。综上, 考虑黏度这一项关键指标, R16 是最适合本研究应用的配方。

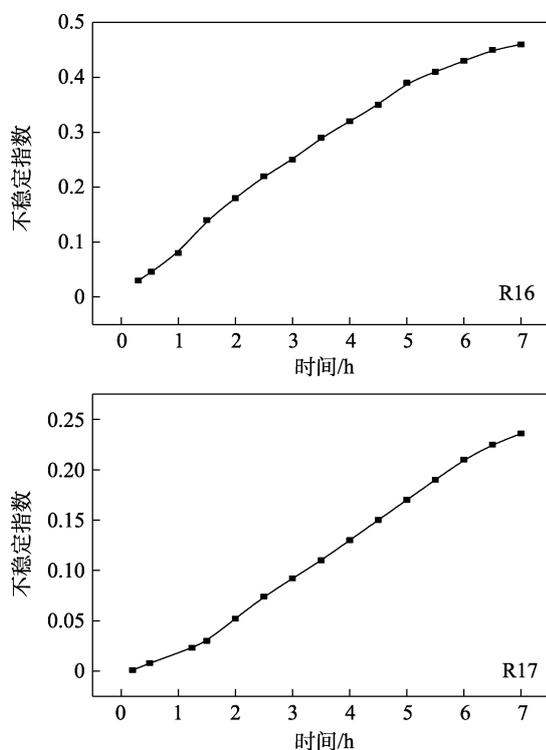


图 9 R16 和 R17 的稳定性分析

Fig. 9 Stability analysis of R16 and R17

由以上分析确定了最优 PCD 配方和制备工艺, 即当相变材料、乳化剂、成核剂和去离子水的质量分数分别为 16%、1.6%、2.4%和 80%时, 在剪切速率为 50 ks⁻¹ 的条件下持续 5 min 来制备。其中最佳相变材料的质量比为 $m(\text{CT47}) : m(\text{CT53}) = 1 : 1$, 最合适的乳化剂质量比为 $m(\text{SAS100}) : m(\text{BS2}) = 3 : 1$ 。

2.2 PCD 的性能分析

2.2.1 冷却系统兼容特性分析

换流阀冷却系统主要包括主泵、过滤器、去离子装置(含离子交换树脂)、管道、阀门、仪表、外冷设备以及换流阀散热器等^[21]。经过 1 年时间在换流阀冷却系统样机中的测试运行, 开发的 PCD 化学性能稳定, 具有良好的环保特性和阻燃特性, 对管

道材料不发生腐蚀, 通过在线再生分散单元可以实现乳化液的再生, 保持性能稳定。没有发现主泵机械轴封明显磨损现象, 在管道内不发生团聚沉淀, 可以顺利通过精密过滤器不发生堵塞。因此, 本研究重点考察 PCD 与去离子装置的兼容性。PCD 不流动的静态兼容性测试结果是 PCD 没有产生相分离, 表明离子交换树脂不会使 PCD 的相变微粒发生聚结。在冷却系统中 PCD 循环流动的动态兼容性测试结果表明, PCD 的电导率可从初始投入的 374 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (与正常饮用水质量相当的极高值) 降至 0.27 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相当于初始值的 1/1385。动态测试后未检测到任何分散体分离或质量下降的现象。上述结果说明, PCD 与去离子装置兼容性好。

2.2.2 电导率和带电稳定性分析

本研究采用的原料为有机物, 都不含离子, 已经尽可能地降低了材料本身的导电性对 PCD 的影响。另外, 为了保持在运行过程中 PCD 稳定的低电导率, 通过去离子装置进行了去离子处理。经冷却系统检测, 制备的 PCD 经过去离子树脂处理后, 其电导率能保持在 0.27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下 (低于 0.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 长期稳定运行, 说明 PCD 具有良好的绝缘特性。在满足不带电动态稳定性后还需重点考虑带电下动态的稳定性, 分别进行带直流电和交流电稳定性实验。两种实验结果均表明, 去离子水和 PCD 在高电场条件下表现出相同效果, 即无击穿跳闸现象发生。

表 3 是带电压测试前后 PCD 的物性数据。图 10 是带电压测试前后 PCD 的粒径分布。由表 3 可知, 在电压测试前后, PCD 的热物理特性、电导率等性质没有发生明显变化。由图 10 可知, PCD 的粒径分布变化很小, 这说明带电压对粒径分布的影响并不显著。经过 Lumisizer 加速分离后, 稳定性仍保持在 >48 d, 表明 PCD 经过电压测试后稳定性没有明显变化, 通过换流阀冷却系统中去离子装置和在线再生分散单元 PCD 可以保持长期稳定工作。

表 3 带电压测试前后 PCD 的物理性质

Table 3 Physical properties of PCD before and after high voltage test

	测试前	测试后
比热容/[J/(g·°C)]	7.09	7.10
导热系数/[W/(m·°C)]	0.55	0.54
电导率/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0.27	0.26

以上结果说明, PCD 可以直接替换换流阀冷却系统中的去离子水, 所制备的 PCD 可以满足高压直流条件下对冷却介质低电导率 (低于 0.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$)、绝缘耐压性能和稳定性能 (物性参数无明显变化) 的要求。

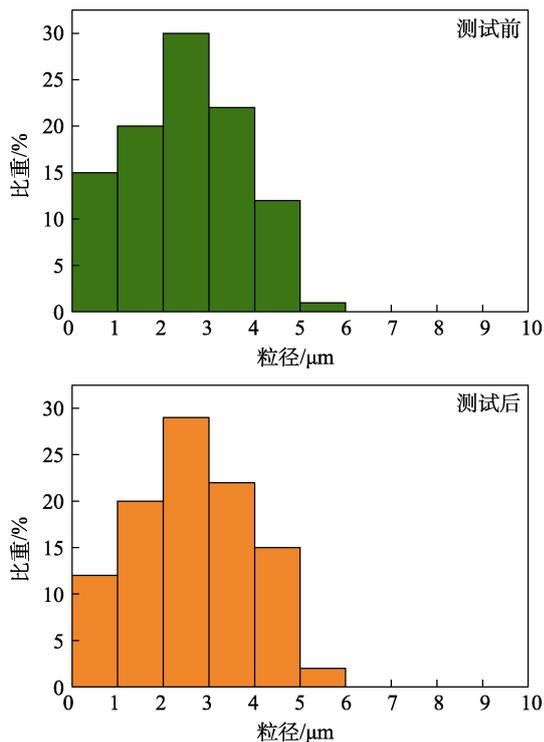


图 10 带电压测试前后 PCD 粒径分布
Fig. 10 Particle size distribution of PCD before and after high voltage test

2.2.3 对流换热能力分析

按照前面两种工况参数 (1.3.6 节) 开展 PCD 和去离子水的直管对流换热实验。图 11 是冷却介质和管壁的温度随直管长度的变化曲线。

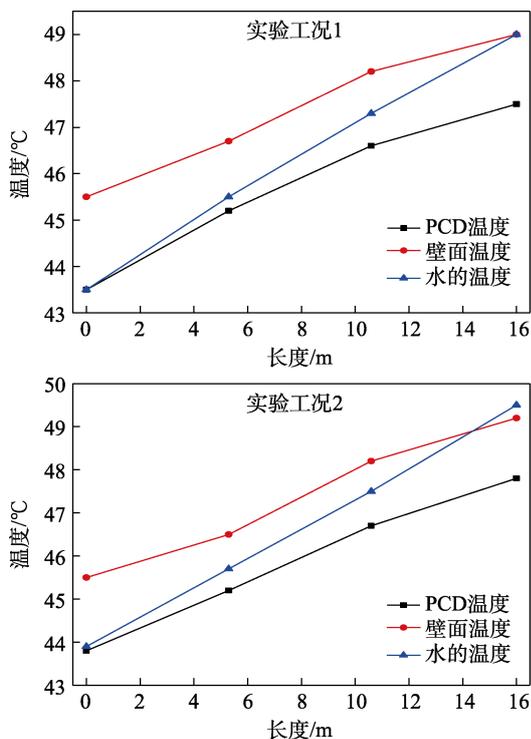


图 11 管壁及冷却介质温度沿管路变化
Fig. 11 Temperature of the pipe wall and cooling medium changing along the pipeline

由图 11 可知, 两个实验的入口温度约为 44℃, 图 11 中最上和最下两条线表示采用 PCD 作为冷却介质时, 管壁及流体温度分布情况, 中间一条线表示采用水作为冷却介质时水温变化。首先, PCD 的出口温度低于采用水作为冷却介质时的出口温度 2℃左右, 这表明 PCD 具有更强的吸热及储热能力, 在冷却过程中, 温升变化小同时可以降低被冷却物体的温度。此外, 由于管壁均匀热流密度加热, 冷却介质流体和壁面的温度均沿着管长方向 (与流动方向一致) 增加, 壁面温度总是高于冷却介质温度。同时, 由于 PCD 对温度升高的抑制效果, 大部分熔化发生在第 3 管段 (10.6~16.0 m)。最后, 将 PCD 和水的温度进行比较, PCD 温度较低, 表明第 1 管段 (0~5.3 m) 出口处 PCD 已熔化, 并且沿着管路流动方向 PCD 继续发生熔化。

图 12 是根据所测量参数计算出各段钢管内冷却介质 (PCD 和去离子水) 的表观比热。

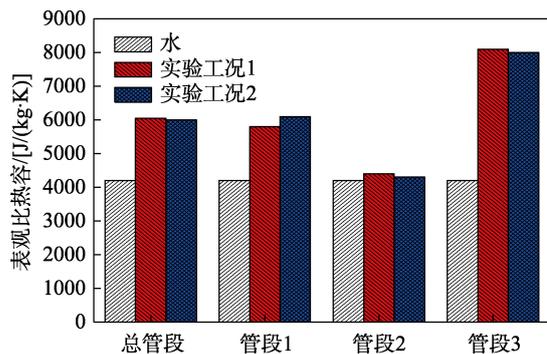


图 12 PCD 与水的表观比热
Fig. 12 Apparent specific heat of PCD and water

由图 12 可知, 在两个实验工况中, 第 3 管段内 PCD 的表观比热容最高 (相对于水), 这表明这段管路中 PCD 的熔化程度最高, 即大部分 PCD 在此段钢管内熔化吸热, 有效降低了冷却介质及管壁的温升。在第 3 管段的实验工况 1 下, PCD 的表观比热容 (C_p) 约为 8200 J/(kg·K), 而在工况 2 中 PCD 的热 C_p 约为 7900 J/(kg·K)。这是因为工况 1 使用了较高的热量输入和质量流量。第 3 管段 PCD 的表观比热容相对于水增加了近 90%。另外, 第 2 管段 (5.3~10.6 m) 的实验结果表明, 工况 1 PCD 的表观比热容高于工况 2 PCD 的表观比热容, 两者储存的热量均比水储存的多。而对于第 1 管段, 工况 2 的表观比热容比工况 1 更高, 表明 PCD 的熔化更多发生在工况 2 中的这一区域, 两个实验这一管段储存的热量均高于水储存的热量; 第 1 管段表观比热容由于流动换热入口段效应导致略大于第 2 管段。此外, 还计算了两种实验工况下 PCD 和水在整个管长中

的总表观比热容。工况 1 的总表观比热容略高于工况 2，而且两者均高于水。这是因为工况 1 的热量输入较高，并且 PCD 两种实验工况下均有相变潜热和显热，而水实验只有显热，综合考虑所有管段，PCD 的表观比热容相对于水提升了约 50%。

通过壁面热流密度、壁面和冷却介质的温差可以计算对流换热系数，进一步可以得到努赛尔特数 (Nu)^[22]。图 13 是两种实验工况下对流换热系数和 Nu 与管路长度的关系。

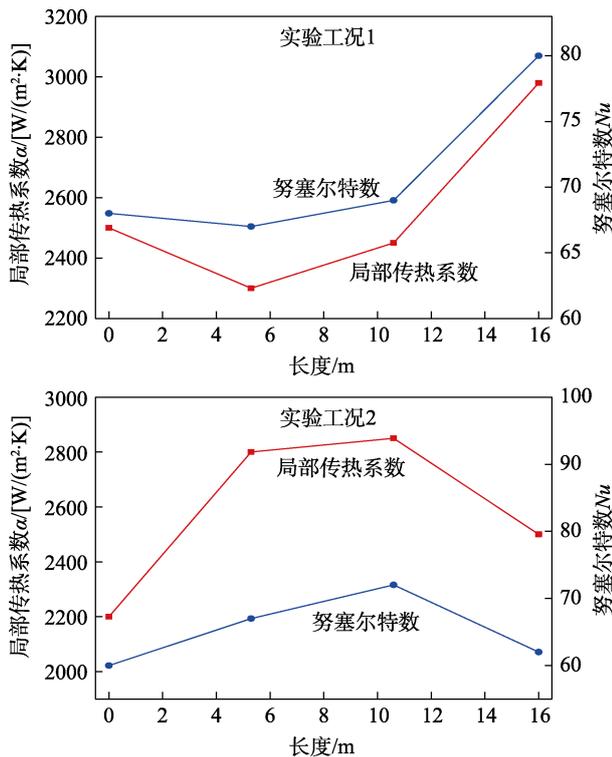


图 13 不同管段的 PCD 局部传热系数和努赛尔特数
Fig. 13 Local heat transfer coefficient and Nusselt of different pipe sections for PCD

由图 13 可知，工况 1 中的局部传热系数沿着管的长度（第 3 管段内）增大，这归因于 PCD 进一步熔化（这与表观热容观察结果一致）；而在工况 2 中的局部传热系数沿着管的长度整体减少，但从第 1 管段到第 2 管段有所增大，这表明第 2 管段对流换热能力提高，为第 3 管段主熔化区提供了准备。此外，工况 1 的最大传热系数约为 $3 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，而工况 2 的最大传热系数仅为 $2.8 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。同时，工况 1 中的雷诺数 (Re) 比工况 2 中的 Re 高，这很可能有助于产生更大的局部传热系数。另外，局部努赛尔特数的趋势与局部传热系数相同，这进一步证实了工况 1 的雷诺数增大导致对流传热更强。这主要是因为工况 1 的输入热量更高，这会导致产生更大的比热流，因此 Nu 更大。根据文献[22]可以初步估算，在同样尺寸的圆直管内同等流动条件下去

离子水的对流换热系数约为 $1.0 \sim 1.5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，PCD 平均对流换热能力约为去离子水的 2 倍。

3 结论

本文研究了不同配方和制造工艺等因素对 PCD 性能的影响，包括粒径、热性能、对流换热系数、带电稳定性，得到了适用于高电压环境下换流阀冷却系统用的最优 PCD 配方。主要结论如下：

(1) 相变材料的质量比为 $m(\text{CT47}) : m(\text{CT53}) = 1 : 1$ ，乳化剂质量比为 $m(\text{SAS100}) : m(\text{BS2}) = 3 : 1$ 。当相变材料、乳化剂、成核剂和去离子水的质量分数分别为 16%、1.6%、2.4% 和 80% 时，在剪切速率为 50 ks^{-1} 的条件下持续 5 min，所制备的 PCD 的综合性能最佳。

(2) 本研究所制备的 PCD 相变温度区间是 $47 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ，其表观比热容与去离子水相比提升了约 50%，换热能力提升 2 倍左右，其关键性能参数均能满足高压条件下换流阀冷却应用的要求。

本文相关研究成果还可用于大型计算中心、5G/6G 通讯基站等的液体冷却系统中，促进数字化国民经济的发展。

参考文献：

- [1] ZHOU J H (周建辉), GAO C (高冲). HVDC transmission cooling technology[M]. Beijing: China Electric Power Press (中国电力出版社), 2019: 23-210.
- [2] ZHOU J H (周建辉), ZHANG X J (张兴娟), HOU J Y (侯俊义), et al. A new converter valve cooling system based on residual heat recovery[J]. Southern Power System Technology (南方电网技术), 2019, 13(6): 16-23.
- [3] LUAN F F (栾凤飞), YU S Z (余顺周), GUO J H (国建鸿), et al. Application of evaporative cooling technology in high power rectifier devices[J]. Power System Technology (电网技术), 2009, 33(19): 137-142.
- [4] ZHOU J H (周建辉), YANG H (杨涵), SUN L J (孙立军), et al. Natural circulation boiling cooling system of high-power electronic device[J]. Southern Power System Technology (南方电网技术), 2018, 12(11): 66-72.
- [5] LI Y K (黎宇坤), MA S D (马素德), TANG G Y (唐国翌). Study on physical properties and stability of a new phase change microemulsion[J]. Functional Materials (功能材料), 2010, 41(10): 1813-1816.
- [6] WANG F X, ZHANG C, LIU J, et al. Highly stable graphite nanoparticle dispersed phase change emulsions with little supercooling and high thermal conductivity for cold energy storage[J]. Applied Energy, 2017, 188(15): 97-106.
- [7] YOUSSEF Z, DELAHAYE A, HUANG L, et al. State of the art on phase change material slurries[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65(13): 120-132.
- [8] MONICA D, ANA L, JAVIER M, et al. Review on phase change material dispersions and microencapsulated phase change material slurries: Materials, heat transfer studies and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 253-273.
- [9] ALVA G, LIN Y X, LIU L K, et al. Synthesis, characterization and applications of micro-encapsulated phase change materials in thermal energy storage: A review[J]. Energy and Buildings, 2017, 144(12): 276-294.

(下转第 100 页)