

1. 博士论文研究方向：超双疏网膜特殊润湿性转化与自驱动油水分离应用研究

选题类别：

☐基础性研究

☒应用性研究

☐工程技术攻关研究

☐新开辟的研究方向

☐已有研究方向的继续

☐其他

2. 博士论文的选题背景及意义和主要研究内容简介

膜分离技术由于其经济性、基础设施的灵活性和操作的简单性，在过去几十年中得到了迅速发展，被广泛用于水净化。传统的膜分离中常用的有通过生物激发合成的聚合物膜以及具有超润湿表面的无机、陶瓷膜等，其油水分离效果已经被多次报道。然而，这样的膜材料对油和水的选择性较差，当网孔直径较小时分离速度较慢，而且会存在被油污堵塞的现象。而且由于其材料本身的原因，聚合物膜本身存在化学稳定性问题，陶瓷膜则要经过复杂的能源密集型制造工艺，这都大大阻碍了它们在工业上的应用。

油水分离的本质属于表面科学问题。近年来大量学者研究发现，通过在表面进行化学修饰，可以使表面获得一定的润湿性能。而这样的润湿性能通常表现为疏水亲油，即油可以轻松通过网膜，而水却会被网膜阻挡。然而在这种情况下，油会完全浸润网膜，时间久了后难免会被油或油杂质堵塞，同时这种方式更适合重油-水的分离，而在轻油-水的分离情形下效果较差。相比之下，疏油亲水网膜只能使水通过网膜，而油无法浸润网膜表面，从而使网膜具备一定的抗油污能力。但由于水的表面能通常远大于油，使这类违反常理的表面难以进行制备。由于网膜表面的亲水缺陷，现有的疏油亲水网膜也存在易水解、不耐用等问题。

近年来，Janus材料如Janus纳米颗粒、Janus膜等由于其不对称结构而为人们所关注。Janus在古希腊语义为“双面神”，根据其语义命名的Janus膜是一种具备不对称结构的膜，经过一定的物理或化学处理使其两侧呈现不同的润湿性。当液体接触到网膜的疏液侧时，由于Laplace压力差对液体起推动作用使液体快速渗透进入亲液侧，通常称之为Janus网膜的正向；而当液体接触到网膜亲液侧时，Laplace压力差对液体的推动作用较小，甚至在一定条件下起阻力作用，使得液体无法进入疏液侧，通常称之为Janus网膜的反向。由于Janus膜两侧的润湿性差异导致其正反两侧对同一液体的透过性不同，从而实现了液体的单向渗透。

对油水分离而言，Janus网膜正向的自驱动渗透能力有利于油水的快速分离，同时其反向较大的渗透压可以大大提高其分离产物的纯度。目前应用于油水分离的Janus网膜仍然由超疏油/超亲水表面及超疏水/超亲油表面进行组合。因此，这些Janus网膜依然存在超浸润表面固有的缺陷。此外，在Janus网膜中，液体的正向运输通常是从疏液侧进行，而反向阻挡也借助于疏液侧的Laplace压力差。这就导致在Janus网膜中，正向渗透能力和反向承压能力相互制约，无法将二者进行协同，使得油水分离Janus网膜的制备需要严格控制疏液层的厚度。通过将液体层引入到Janus网膜的亲水侧中，利用同相液体自发形成的液体通路，使Janus网膜的正向运输能力大大提高，而反向承压能力几乎不变。基于此，本课题将采用液层复合的方式进行Janus油水分离网膜的制备和研究。根据表界面液体动力学相关理论，在Janus单向渗透模型的基础上，对多层润湿性梯度膜润湿性差异以及液层厚度对油水分离的影响进行分析，建立孔径比、润湿性梯度等因素与Laplace压力差的关系式。此外，基于液助方法提出并建立超双疏网膜的油水分离理论模型，结合Cassie-Baxter公式探究其油水分离的可行性。通过在超双疏表面进行液层复合，得到具有可循环油水分离和自清洁能力的液层复合超浸润网膜，并进行油水分离实验和耐久性试验，验证其较好的机械耐久性。此外，探究上述网膜的孔径比及复合层厚度对油水分离速率及效率的影响，为优化网膜参数奠定实验基础。

3. 该选题所依托的科研项目或研究经费来源情况

本课题来源于国家自然科学基金面上项目《耐久超双疏表面特殊湿润性转化及其在油水分离中的应用研究》（项目编号：51475118）

1. 博士论文研究方向： 固体表面油水润湿替换及具有自清洗性能的抗油污材料研究

选题类别：

☐基础性研究

☒应用性研究

☐工程技术攻关研究

☐新开辟的研究方向

☐已有研究方向的继续

☐其他

2. 博士论文的选题背景及意义和主要研究内容简介

油污广泛存在于自然环境、工业生产和人们的日常生活中，并经常引起危害。其中，功能性表面受油污影响尤其严重，如膜结构、玻璃、金属设备表面和织物等，使其润湿性、透明度和导电性和美观等机能受到损害或失效。开发表面抗油污技术在石油开采、机械设备润滑、含油污水处理等多个工程领域，以及开发具备抗油污性能的特殊镜片、功能性织物和厨房电器等应用方向都具备广阔的应用前景和充分的现实意义。

提到抗油污，最直接的途径是由表面改性使其不易粘油，即具有疏油性。然而，长链碳氟化合物、特殊微纳复合结构是构造超疏油表面的必要前提，这使超疏油表面实用性严重受限。另一种抗油污思路基于超亲水材料的水下超疏油性，即被水润湿后表面完全铺展的水膜可以阻隔油污。虽然目前围绕超亲水/水下超疏油材料已在油水分离、水下结构防污等领域开展了诸多研究，但这类材料的抗油污性能必须以预润湿为前提，干燥状态下被油污染后其亲水性也随之失效。

2015年，有研究报道了超亲水表面的油水润湿替代现象，即固体表面在干燥状态下被油润湿后，再接触水时水会替代油润湿固体表面。这一特殊性质在抗油污材料领域有广阔应用前景，将实现抗油污的途径从难于实现的“不沾油”转化为相对容易的“易清洗”，从根本上为抗油污提供了新思路。

这类特殊的油污自清洗材料相关的研究正处于发展期，对于自清洗过程中油水与固体相分离、相取代的机理尚无定论。其中，油污自清洗膜材料的研究发展相对蓬勃，但对膜材抗污的原理仍不具备普遍性的理论解释。另一方面，在固体设备表面涂覆油污自清洗涂层易于实现且几乎不受外界条件限制，是最具发展前景的抗油污手段，但关于其构造机理的研究相对较少，理论模型也尚不明确。因此，研究油污自清洗表面的抗油污机理、建立构造油污自清洗表面的理论模型，对其发展有较大的意义。同时，开发简单易行的制备方法，研制高抗油性、高稳定性的油污自清洗涂层，对此类表面在抗油污方向的应用有充分的价值。

目前对油污自清洗涂层的研究主要待解决的问题有

（1）目前对油污自清洗的理论解释主要基于经典润湿性理论中超亲水表面水下超疏油性能的机理，从固体表面与水之间的界面相互作用定性理论分析。然而，经典理论并未对固液界面相互作用及三相接触线移动进行机理解释，因此现有的理论无法基于液体的宏观的表面能与微观的分子间相互作用对油、水在固体表面的润湿替换过程做定量描述，目前的研究中也尚未有从能量角度对油污自清洗过程的理论解释。

（2）油污自清洗表面在多个领域有重大的应用价值，构建能实现油、水润湿替代的表面是实现油污自清洗的前提，然而目前尚无具有普遍性的理论模型构造液体润湿替代表面。虽然已有关于分子构型对油污自清洗性能作用规律的研究，但都重点关注某一种具有特定官能团或特定离子的聚合物，所得的结论对构造油污自清洗表面的指导意义相对有限。

（3）油污自清洗性能主要得益于表面高极性，目前的研究中油污自清洗涂层也几乎都基于含有高极性组分的超双亲表面实现。然而，高极性组分使表面极易与水成键并剥脱，导致涂层耐水性差。虽然一些研究通过构造特殊的表面形貌或引入油性组分提高了耐水性，但会同时降低涂层透明度、耐磨性能等其他重要性能，变相限制了涂层的应用范围。

（4）构造高极性的超双亲涂层实现油污自清洗虽然简单易行，但表面色散度也对油污自清洗其重要影响。然而，目前尚无关于高极性/低色散度，即亲水疏油性油污自清洗涂层的研究。此外，实际应用导向的、在面基材上构造的油污自清洗涂层也鲜有报道。制备具备工程应用价值，能同时满足快速响应油污自清洗、耐水、空气中稳定、耐磨、耐腐蚀、耐高温、不改变基材颜色等多项技术指标的表面涂层仍具有较大的挑战性。

3. 该选题所依托的科研项目或研究经费来源情况

本课题来源于国家自然科学基金面上项目《高耐久性和可控润湿性超疏油/超亲水微纳复合结构功能表面的研究》