

•专题•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202003060

www.dxhx.pku.edu.cn

从化学视角浅谈医用口罩的重复利用

葛冬琦¹, 石建英^{2,*}¹ 广东石油化工学院化学工程学院, 广东 茂名 525000² 中山大学化学学院, 广州 510275

摘要: 在认识口罩的分类、防护层组成和结构以及防护原理的基础上, 从口罩核心防护层——聚丙烯熔喷无纺布的物理化学性质出发, 结合新型冠状病毒的生化特点, 浅析一些常用医学消毒与灭菌方法在医用口罩重复利用中应用的可行性。

关键词: 医用口罩; SMS结构; 聚丙烯熔喷布

中图分类号: G64; O6

Remark on Reuse of Medical Masks from Chemical Perspective

Dongqi Ge¹, Jianying Shi^{2,*}

¹ School of Chemical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, Guangdong Province, P. R. China.

² School of Chemistry, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, P. R. China.

Abstract: This paper briefly introduced the classification of disposal face masks, and the composition and structure of key protective layer, in addition to its protection principle. The feasibility of reuse and disinfection of the disposable face masks with several common medical methods is discussed based on the physical structure and chemical composition of meltblown, the main protective layer, in addition to biochemical characteristics of new coronavirus.

Key Words: Medical mask; SMS structure; Polypropylene electret melt blown nonwovens

2020年春节以来, 新型冠状病毒引起的呼吸道感染疾病先后在我国和全球范围内大面积爆发。面对具有强传染性的新型冠状病毒, 居民在提高自身免疫力、养成良好的卫生习惯之外, 佩戴医用口罩成为预防呼吸道传染病, 降低新型冠状病毒感染风险的最有效方式。佩戴口罩可以防止病人喷射飞沫, 降低飞沫量和喷射速度, 还可以阻挡含病毒的飞沫核, 成为个人防疫的必备用品。

随着全球范围内确诊感染人数的不断增加, 医用口罩供给不足的矛盾与日俱增, 全球各地出现“一罩难求”的局面。我国各大企业在疫情期间临危受命, 纷纷转产口罩, 加之原有口罩生产企业复工复产, 有效缓解了国内口罩的供需矛盾。随着我国疫情防控成效的不断显现, 我们的口罩日产量已经能够满足国内需求。然而, 世界范围内其他国家疫情仍在蔓延, 口罩生产的原材料价格不断上涨, 全球口罩的缺口仍然不容小觑。因此, 医用口罩的重复利用成为全民关注的话题^[1,2]。

早在2003年SARS (severe acute respiratory syndrome)期间, 上海市陆志檬教授提到纱布口罩可采用沸水处理、消毒液或肥皂清洗后阳光曝晒等方法, 实现口罩消毒和再利用^[3]。自今年2月份以来, 陈建峰院士团队围绕“可重复使用防护口罩关键技术及产业化”重大需求开展应急科研攻关, 发展

收稿: 2020-03-18; 录用: 2020-05-18; 网络发表: 2020-05-29

*通讯作者, Email: shijying@mail.sysu.edu.cn

了口罩灭毒后再生荷电的处理技术,成功实现了口罩的重复利用,并牵头起草制定了国际首个《可重复使用民用口罩》团体标准。

本文在对医用防护口罩核心层化学组成和物理结构充分认识的基础上,结合新型冠状病毒的生化特点,浅析一些常用医学消毒与灭菌方法在医用口罩重复利用中应用的可行性。

1 病毒传播原理

新型冠状病毒(2019-nCoV, novel coronavirus)通过人类血管紧张素转化酶2 (ACE2)蛋白的识别和结合来感染人体细胞^[4-6],具有很强的传染力。飞沫传播是新型冠状病毒传播的主要途径。人在咳嗽和打喷嚏时,呼吸道、口腔、鼻腔内的液体膜因受到强烈的震动而成为雾滴喷在空气中。依据Bourouiba课题组^[7]的报道,喷嚏中惯性强的几百微米的大液滴由于重力作用会快速沉降,而惯性弱的几微米的小液滴在空气中粘滞减速,并迅速蒸发成微米级的飞沫核。

新型冠状病毒粒径在100 nm左右(见图1),而含新型冠状病毒的飞沫核尺寸在亚微米至微米之间。患者打喷嚏、咳嗽、说话时喷溅出来的飞沫中都含有新型冠状病毒。如果曾经与患者近距离接触,呼吸了带有这种病毒的空气,或者把带有新型冠状病毒的飞沫吸入到口鼻,就可能会被感染,导致患病。佩戴口罩能够有效阻断飞沫传播,避免病毒感染。

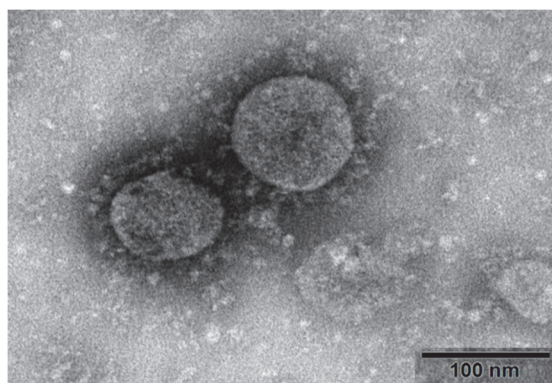


图1 2019-nCoV的电镜图^[8]

2 口罩的分类和组成

依据应用场景的不同,口罩主要分为三大类:医用口罩、自呼过滤式防颗粒物口罩、日常防护型口罩。其中,医用口罩又分为医用防护口罩、医用外科口罩和一次性使用医用口罩。不同类型的口罩对于所过滤的颗粒物粒径有不同的过滤级别(见表1),常用以下参数加以描述:FE(过滤效率, filter efficiency)、BFE(细菌过滤效率, bacterial filtration efficiency, 微粒大小为3 μm , 如花粉和飞沫)、PFE(微粒子过滤效率, particle filtration efficiency, 微粒大小为0.1 μm , 如流感病毒)或VFE(病毒过滤效率, Virus filtration efficiency, 微粒大小为0.1–5 μm)。从表1中可以看出,针对强传染性的新型冠状病毒,医用口罩具有较强的防护能力。

医用口罩基本都有三层无纺布结构(图2),简称SMS结构:内外两层为单层纺粘层(spunbond)无纺布,中间为单层或多层的熔喷层(meltblown)无纺布。无纺布多由定向的或随机的聚丙烯纤维构成,口罩内外两层纺粘无纺布的纤维直径在20 μm 左右,这些粗纤维主要作用是支撑整个无纺布结构,对阻隔并没有太大的作用。最外层无纺布做了防水处理,主要用于隔绝外部患者喷出的液体。最内层为亲水型无纺布,主要用于吸收佩戴者呼出的水汽。中间层熔喷无纺布是口罩防护的核心层,其纤维直径可以达到1–5 μm ,具有更大的比表面积和更高的孔隙率,作为最重要的是阻隔层,用于过滤飞沫、颗粒或细菌。

表 1 口罩的分类和特点

口罩类型	执行标准	特点	应用场景
医用防护口罩	GB19083-2010	能阻隔颗粒物、飞沫、血液、体液、分泌物等。采用“1 级”“2 级”和“3 级”来表示 BFE 等级，1 级 ≥ 95%，2 级 ≥ 99%，3 级 ≥ 99.97%	适合医疗工作环境中使用
医用外科口罩	YY0469-2011	可阻挡病原体微生物、血液、体液、颗粒物等，PFE ≥ 30%，BFE ≥ 95%，流体阻力 120 mmHg	适合于有创操作等过程中使用，可有效地阻挡液体
	YY/T0969-2013	阻挡口腔和鼻腔呼出的污染物，BFE ≥ 95%以上，降低日常交叉感染风险，无法保证对粉尘和血液的过滤性	适用于医院中的常规护理
自呼过滤式防颗粒物口罩	GB2626-2006	能过滤空气中的各类颗粒物，无防透要求。过滤元件级别：1) 非油性颗粒物 FE：KN90 ≥ 90%；KN95 ≥ 95%；KN100 ≥ 99.97%；KP 系列不适用；2) 油性颗粒物 FE：KP95 ≥ 95%；KP90 ≥ 90%；KP100 ≥ 99.97%；KN 系列不适用	适用于过滤颗粒物，阻挡体液效果差，不可用于手术室等高湿环境
日常防护口罩	GB/T 32610-2016	可避免冷空气对呼吸道的刺激，只能过滤大颗粒粉尘，防病毒和细菌效果不佳	适用于日常生活中过滤空气污染颗粒物，不适用于医用及工业防尘等特殊行业

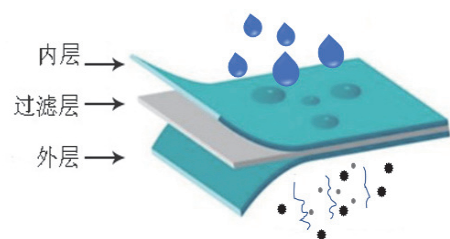


图 2 医用口罩三层结构示意图

3 口罩防护原理

3.1 熔喷布化学组成和物理结构

医用口罩的防护能力主要依靠中间过滤层，即聚丙烯熔喷无纺布过滤层。聚丙烯是由丙烯聚合而成的一种热塑性树脂。依据聚合产物中甲基的排列位置，可以分为等规聚丙烯(isotactic polypropylene, i-PP)，间规聚丙烯(syndiotactic polypropylene)和无规聚丙烯(atactic polypropylene)。等规聚丙烯(甲基排列在主链分子的同一侧，图3a)由于分子链结构规整度高而呈现半结晶状态(X射线衍射谱，图3b) [9]，这一结构特点赋予其良好的抗溶剂和抗热性能，广泛用作过滤材料。

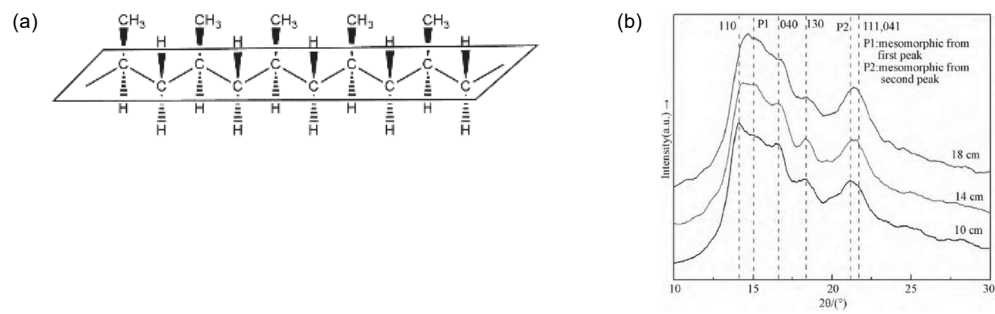


图3 (a) i-PP聚合物结构图；(b) i-PP非织布的XRD谱图[9]

喷融布由大量直径在 $0.5\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ 的聚丙烯纤维纵横交错、随机排列而成(扫描电镜,图4a)^[10],细纤维层叠交替便形成具有弯曲孔道结构的纤维膜(图4b)。正是基于这些大小不一的孔结构,喷融布可以有效地阻挡细菌、PM2.5 (fine particulate matter)和血液等体积较大的颗粒物,同时还能够阻隔载有病毒的直径大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的飞沫和直径大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的飞沫核。聚丙烯纤维的直径、几何结构、孔隙率、表面积、熔喷布的厚度和密度等物理性质是影响过滤层阻隔性能的主要因素^[11]。

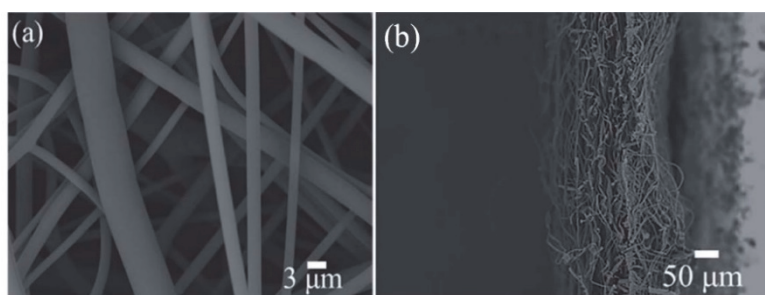


图4 (a) 聚丙烯熔喷布的形貌和孔结构电镜图; (b) 聚丙烯熔喷布横切面的电镜图^[10]

3.2 聚丙烯熔喷布过滤机制

过滤材料对空气中颗粒物的过滤机制主要有以下5种类型^[12] (图5): (1) 惯性碰撞,当颗粒物尺寸较大(半径在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上)时,因惯性太大无法跟随气流绕过纤维,被纤维阻挡后过滤下来;(2) 尺寸拦截,中大型颗粒物(半径在 $0.1\text{--}1.5\text{ }\mu\text{m}$ 之间)在通过纤维层时,因半径太大而被过滤下来;(3) 布朗扩散,小尺寸颗粒物(半径小于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$)受分子热运动影响呈现布朗运动,从而偏离气流方向,被纤维拦截;(4) 静电吸附,当纤维上存有静电荷时,颗粒物会很容易被静电吸附从而过滤下来;(5) 重力作用,较大的颗粒物受到重力作用自行沉降在纤维上。

熔喷无纺布基于自身多孔的物理特性,可以通过惯性碰撞、尺寸拦截、布朗扩散和重力沉降等机制实现病毒的过滤,但总过滤效率约为35%,远达不到医用口罩要求的95%过滤效率。通过简单的降低聚丙烯纤维直径、增加熔喷无纺布密度的方式可以提高该过滤效果,但口罩的透气性会大大降低,影响佩戴的舒适度。

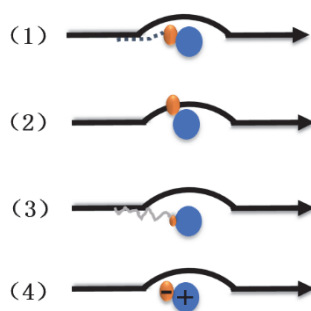


图5 口罩过滤颗粒物的机制图^[12]

(1) 惯性碰撞; (2) 尺寸拦截; (3) 布朗扩散; (4) 静电吸附;
黑色代表气流方向, 蓝色代表纤维的横截面, 橙色代表颗粒物
电子版为彩图

驻极处理是在不改变透气性的前提下,提高熔喷无纺布过滤效率的重要后整理技术^[10,13]。该技术利用带电离子或电子轰击熔喷纤维,使纤维成为长期储存电荷的电介质材料(称为驻极体),电晕驻极所用电压直接影响到纤维表面电势的大小^[13]。聚丙烯具有较高的电阻率,可注入的电荷容量大,

是制造驻极纤维的理想材料,其过滤效率与表面的电荷强度成正比^[14]。经过驻极处理的熔喷过滤材料,超细纤维过滤再叠加静电吸附过滤,使熔喷无纺布成为高效过滤材料的核心,具有过滤效率高、过滤阻力低等优点。除对0.005–1 mm的固体尘粒有较好过滤效果外,对大气中的气溶胶、液滴、香烟烟雾、各种花粉等均有很好的阻截效果。

4 口罩重复利用可行性分析

口罩过滤病毒的主要机制是静电吸附,在使用过程中,口罩荷载的静电因环境潮湿、吸附病毒细菌等逐渐消除,导致防护性能降低。《可重复使用民用口罩》团体标准中明确规定:可重复使用民用口罩应该耐受洗消不少于3次,累计佩戴时长不低于24 h,且24 h后口罩鼻夹不应脱落,口罩无明显变形;过滤效率与KN90级口罩性能指标一致;存储时间应不少于5年等^[15]。在符合该标准的前提下,需发展医用口罩简便易行(家庭用)的重复利用策略。

依据《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第七版)》,新型冠状病毒对紫外线和热比较敏感,56 °C下加热30 min后即可杀死病毒,乙醚、75%乙醇、含氯消毒剂、过氧乙酸和氯仿等溶剂均可有效地灭活病毒。从医学角度讲,各种常用消毒灭菌方法理论上均可以实现医用口罩的灭菌。但从口罩防护角度,如何在灭菌的同时维持口罩核心过滤层化学组成和物理结构不变,并尽可能维持其荷电状态,是口罩能否重复使用的关键。

就核心过滤层的化学组成而言,构成喷融无纺布的聚丙烯是一种性能优良的热塑性合成树脂,耐热、耐腐蚀,制品可用蒸汽消毒是其突出优点。熔点高达165 °C,在155 °C左右软化,使用温度范围为–30 – 140 °C;在80 °C以下能耐酸、碱、盐液及多种有机溶剂的腐蚀;在高温和氧化作用下会分解。就过滤层的物理结构分析,喷融无纺布是聚丙烯纤维按一定方向排列而成的三维多孔结构,与常规的纺织布相比,这些纤维容易从直角方向裂开,强度和耐久性较差。

鉴于喷融无纺布化学成分的分解和物理拉伸性能,医用口罩消毒处理温度不宜超过80 °C。此外,口罩也不宜直接水洗或酒精消毒^[2,16],会破坏熔喷布的荷电状态,过滤效率会降至35% (只能依靠纤维自身物理孔隙率来过滤)。针对病毒的特点,结合口罩核心层的物理化学性质,表2列出了几种适用于口罩重复使用的消毒灭菌处理方法,并分析了每种方法的可行性。

通过表2可以看出,干热消毒法和紫外线消毒法对口罩损伤最小,能够用于口罩的日常消毒以重复利用。值得一提的是,荷电再生法在口罩消毒灭菌之后增加了补充静电荷环节,进一步确保了二次使用口罩的过滤效果。环氧乙烷灭菌法在医疗器械产品灭菌领域应用广泛,但不适用于日常居家消毒。

表 2 口罩消毒方法

口罩重复利用方法	操作方法	特点
干热消毒法	(1) 微波消毒法,拆除口罩中的金属丝,正面向上平铺。若有胶等粘附剂,在 300 W 下加热 4 min,若无,则在 700 W 下加热 2 min。然后,将背面平铺在微波炉中,重复以上操作 ^[17,18] 。(2) 烘箱/烤箱消毒法,在 70 °C 或 75 °C 下对口罩烤 30 min ^[16,19] 。(3) 电吹风消毒法,用保鲜袋包裹口罩,在 70 °C 下吹 30 min ^[2] 。	加热速度快,口罩的里外层可以同时加热,并且消毒温度相对较低,不会生成残留物,不污染环境 ^[20] 。
紫外线消毒法	(1) 将口罩平放在桌面上,用紫外灯(医用紫外灯或洗碗机中的紫外灯均可)照射 30 min,然后将口罩翻过来,对口罩另一面照射 30 min ^[19] 。 (2) 在阳光下暴晒 30 min,具体操作如上 ^[19] 。	紫外线消毒是医院中常用的手段,可灭活各种微生物,具有很好的杀菌效果。但是紫外线的穿透力较弱,空气中的水分、颗粒物均会降低照射强度,从而大大降低杀菌效果。

(待续)

(续表 2)

口罩重复利用方法	操作方法	特点
环氧乙烷消毒法	将口罩放在环氧乙烷中(浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 杀毒后需要静置 7 天解析, 使环氧乙烷的残留量低于要求值 ^[20] 。	环氧乙烷消毒法是工厂中制作医用口罩的最后一道消毒工艺, 环氧乙烷与蛋白质分子上的巯基/氨基/羟基/羧基等发生烷基化反应, 使微生物大分子失去活性, 达到杀菌目的。环氧乙烷对人体有毒, 需要达到相关的国家资质要求后才可进行, 居民在日常生活中不具备可操作性。
荷电再生法	将一次性医用口罩放在 $56 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的热水中泡 30 min, 然后取出并甩掉表面的液滴, 平铺在干燥的绝缘体表面(如木桌子和床单等), 用家用吹风机吹 15 min 左右, 或者用家用点火器对口罩电击 ^[21] 。	低温下加热可以灭活病毒病菌, 并且不会破坏纤维微观结构。然后再通过口罩内部纤维的摩擦或外部放电来补充静电荷量, 从而可以有效地提高口罩的过滤效率。

5 结语

在当前疫情造成的资源极度紧张的情况下, 医用无纺布口罩的重复利用是为应急而采取的措施, 仅适用于较低风险暴露人员重复使用, 并不推荐密切接触患者的人群、医护人员及实验室工作人员使用。本文从化学的视角论述和分析了医用口罩的消毒方法和重复利用, 公众可根据自身情况、所处地区以及家中口罩的存量来考虑是否需要戴口罩进行消毒处理以重复利用。

致谢: 感谢研究生田林媛和苏志芳同学查阅文献, 感谢英国皇家化学学会出版社(RSC) open access 期刊资源。

参 考 文 献

- [1] 何俊美, 魏秋华, 任哲, 苏裕心, 杨华明. 中国消毒学杂志, **2020**, 37 (2), 137.
- [2] 宋武慧, 潘滨, 阚海东, 徐燕意, 易志刚. 微生物与感染, **2020**, 15 (1), 31.
- [3] 钟辑. 中国防伪, **2003**, No. 6, 20.
- [4] Xu, X. T.; Chen, P.; Wang, J. F.; Feng, J. N.; Zhou, H.; Li, X.; Zhong, W.; Hao, P. *Sci. China Life Sci.* **2020**, 63 (3), 457.
- [5] Ziegler, C. G. K.; Allon, S. J.; Nyquist, S. K.; Mbano, I. M.; Miao, V. N.; Tzouanas, C. N.; Cao, Y.; Yousif, A. S.; Bals, J.; Hauser, B. M.; *et al.* *Cell* **2020**, doi: 10.1016/j.cell.2020.04.035
- [6] Sungnak, W.; Huang, N.; Bécavin, C.; Berg, M.; Queen, R.; Litvinukova, M.; Talavera-López, C.; Maatz, H.; Reichart, D.; Sampaziotis, F.; *et al.* *Nat. Med.* **2020**, 26, 681.
- [7] Bourouiba, L.; Dehandschoewerker, E.; Bush, J. W. M. *J. Fluid Mech.* **2014**, 745, 537.
- [8] 国家微生物科学数据中心, 国家病原微生物资源库(中国疾病预防控制中心病毒病预防控制所), NPRC 2020.00002. [2020-05-12]. <http://nmcdc.cn/nCoV>.
- [9] 桂继杨, 陈钢进, 肖春平, 陈曦, 肖慧明. 材料科学与工程学报, **2017**, 35 (1), 32.
- [10] Zhang, H. F.; Liu, J. X.; Zhang, X.; Huang, C.; Jin, X. Y. *RSC Adv.* **2018**, 8, 7932.
- [11] Rengasamy, R. S.; Kothari, V. K.; Bele, V. S.; Khanna, R. *J. Text. Inst.* **2011**, 102 (12), 1019.
- [12] Dunnett, S. Filtration Mechanisms. In *Aerosol Science: Technology and Applications*; Colbeck, I., Lazaridis, M. Eds.; Wiley: Chichester, 2014; pp. 89–117.
- [13] 李鹏程, 周蓉, 陈莹, 唐劲天, 青岛大学学报(工程技术版), **2015**, 30 (2), 52.

- [14] 张虹. 非织造布, **1996**, No. 2, 14.
- [15] 张楠. 本市制定国际首个《可重复使用民用口罩》团体标准. 口罩可清洗消毒次数不少于 3 次. (2020-04-10)[2020-05-18].
<http://yj.beijing.gov.cn/yjj/zwgk20/mtjj16/1787736/index.html>.
- [16] Liao, L.; Xiao, W.; Zhao, M.; Yu, X. Z.; Wang, H. T.; Wang, Q. Q.; Chu, S.; Cui, Y. *ACS Nano* **2020**, doi: 10.1021/acsnano.0c03597
- [17] Wu, Y.; Yao, M. S. *Chin. Sci. Bull.* **2014**, 59 (13), 1438.
- [18] 要茂盛, 钱华. 新冠病毒疫情网络研讨会. [2020-01-27]. <https://cese.pku.edu.cn/kycg/112444.htm>.
- [19] 林清, 黄韵芝, 孙桂萍. 护理管理杂志, **2020**, 20, 1.
- [20] 袁治勋, 中国消毒学杂志, **2010**, 27 (2), 234.
- [21] 刘垠. 今日要闻“让每只口罩发挥最大效能, 荷电再生技术做到了”. 科技日报, 2020-4-29 (01).

欢迎订阅《物理化学学报》

2021 年全国报刊杂志征订工作已经开始, 敬请向贵单位推荐订阅 2021 年《物理化学学报》。

《物理化学学报》是由中国科学技术协会主管, 中国化学会和北京大学共同主办, 北京大学化学与分子工程学院学报编辑部编辑出版的学术刊物。设有“亮点”“当期推荐”“通讯”“展望”“专论”“综述”“论文”“人物专访”等栏目, 报导物理化学学科及交叉学科的基础研究及应用研究的创新成果。

中国科学院院士唐有祺先生担任名誉主编, 中国科学院院士刘忠范先生担任主编; 编委会中有 10 位两院院士, 1 位加拿大科学院院士, 2 位海外学者。2004 年, 获得国内期刊界最高奖——第三届全国期刊奖百种重点期刊奖; 2015 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”。中国科协精品科技期刊工程项目资助出版。读者普遍认为《物理化学学报》具有极高的学术价值和收藏价值。WoS 公布的 2019 年影响因子为 1.379。

《物理化学学报》已被美国《科学引文索引》(SCI)网络版、美国《化学文献》(CA)、日本《科技文献速报》、俄罗斯《文献杂志》(AJ)、中国科协和国家自然科学基金委主办的《中国学术期刊文摘》、中国科学技术部万方数据网络中心的《中国科技论文与引文数据库》(CSTPCD)、中国科学院文献情报中心的《中国科学引文数据库》、中国生物学文献数据中心的《中国生物文摘》等国内外多种著名检索刊物和文献数据库摘引和收录。

《物理化学学报》现为月刊, 大 16 开本, 亚光铜版纸印刷。2021 年订价 50.00 元/册, 全年订价 600.00 元。国内邮发代号 82-163, 欢迎国内读者到当地邮局订阅, 国外读者可通过中国国际图书贸易总公司订阅(Code No 1443-MO)。若通过邮局订阅有困难或错过订阅, 请直接与编辑部联系。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆订阅。

地址: 北京大学化学学院《物理化学学报》编辑部

邮编: 100871

电话: +86-10-62751724

邮箱: whxb@pku.edu.cn

网址: <http://www.whxb.pku.edu.cn>

《物理化学学报》编辑部