

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.06.020

含微孔涂层的红外辐射特性数值计算及低辐射设计

王兴一,张成军,李明俊,朱洪立,于名讯,潘士兵

(山东非金属材料研究所,济南 250031)

摘要:采用微泡为填充物,分散在树脂材料中,并研究此非导电型材料的红外辐射特性。从 Mie 散射和 Kubelka-Munk 二流模型出发,给出涂层红外辐射率理论模型,讨论了涂层中微孔尺寸、树脂折射率、涂层厚度及微孔含量对涂层红外辐射率的影响。结果表明:微孔体积分数增加到 15% 以后,涂层红外辐射率不再降低。厚度到 400 μm 后继续增加不再降低涂层红外辐射率。树脂折射率实部、虚部增加,谐振区向微孔尺寸变小方向发展。控制微孔尺寸分布于较窄范围内,可以得到低红外辐射率。

关键词:微孔涂层;红外辐射;MIE 散射

中图分类号:TQ630.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2020)06-0108-05

Numerical Calculation of Infrared Radiation Properties and Optimization of Low Emittance for Microporous Coatings

Wang Xingyi, Zhang Chengjun, Li Mingjun, Zhu Hongli, Yu Mingxun, Pan Shibing
(Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : Microbubbles were used as fillers and dispersed in resin materials to study the infrared radiation characteristics of such non-conductive materials. Based on the Mie scattering theory and Kubelka-Munk second-rate models, a theoretical model of infrared emissivity of the coating is given. The effects of micropore size, resin refractive index, coating thickness, and micropore content on the infrared emissivity of the coating were discussed. The results are given as follows. After the micropore volume fraction is increased to 15%, the infrared emissivity of the coating no longer decreases. After the thickness is increased to 400 μm , the infrared emissivity of the coating will not be reduced. The real and imaginary parts of the refractive index of the resin increase, the resonance region develops in the direction of reducing the size of the micropores. By controlling the distribution of micropore size in a narrow range, low infrared emissivity can be obtained.

Keywords : microporous coating ; infrared radiation ; MIE scattering

红外探测及制导技术广泛应用于军事领域,开展目标在背景中的热红外辐射特征研究具有越来越重要的意义^[1]。目前,热红外伪装隐身技术^[2]研究方向主要是调整目标表面红外辐射率呈梯度形式,当目标表面温度以表观温度分布在热探测器上时,目标热红外图像呈迷彩形式,降低目标轮廓在背景中的可识别性^[3]。传统的低辐射率导电涂层^[4]会降低雷达吸收性能,特别是毫米波吸收性能,因此,研究非导电型涂层的低辐射特性具有重要意义。笔者采用微泡为填充物,分散在树脂材料中,研究此类

非导电型材料的红外辐射特性^[5],为红外隐身材料的设计提供理论依据。

1 涂层辐射特性的理论依据

在真空中传播的一束平行单色光,若光束中存在一个小粒子,会产生散射现象^[6]。入射波长与粒子尺寸处于同一个数量级时,粒子有很强的散射性,一般称之为谐振现象,谐振区散射有很大的应用潜力^[7]。但谐振区散射的数学处理较为复杂。目前,三维物体的电磁散射麦克斯韦方程组^[8]的解析求解,只局限在旋转椭球坐标系、球坐标系等坐标

通讯作者:于名讯,研究员,主要从事功能材料研究 E-mail: MXYu53@126.com

收稿日期:2020-04-05

引用格式:王兴一,张成军,李明俊,等.含微孔涂层的红外辐射特性数值计算及低辐射设计[J].工程塑料应用,2020,48(6):108-112.

Wang Xingyi, Zhang Chengjun, Li Mingjun, et al. Numerical calculation of infrared radiation properties for microporous coatings and their optimization of low emittance[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):108-112.

系,即标量波动方程解可以分离变量的坐标系。使用 Mie 理论^[9]可求解散射问题在球坐标系下的解。Mie 理论处理的问题为一个独立的任意大小的光学各向同性的球对任意波长入射波的电磁散射问题。

单色平面电磁波入射半径为 a 的球形粒子 (非磁性散射体), 发生散射。将散射波用矢量球谐函数展开, 得到其散射波的展开系数为^[10]:

$$\begin{cases} a_n = \frac{m\varphi_n(mx)\varphi'_n(x) - \varphi_n(x)\varphi'_n(mx)}{m\varphi_n(mx)\xi'_n(x) - \varphi_n(x)\xi'_n(mx)} \\ b_n = \frac{\varphi_n(mx)\varphi'_n(x) - m\varphi_n(x)\varphi'_n(mx)}{\varphi_n(mx)\xi'_n(x) - \xi_n(x)\varphi'_n(mx)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $n=1, 2, 3, \dots$ 为自然数, $x=2\pi N_p a / \lambda$ 为球形粒子尺寸, $m=N_p / N_h$ 为粒子相对折射率, 其中 N_p 为粒子折射率, N_h 为粒子所处环境折射率, λ 为入射波在真空中的波长; 散射系数 a_n 代表 n 阶电模或横磁模对散射电场与磁场展开式的贡献, b_n 代表 n 阶磁模或横电模对散射电场与磁场展开式的贡献。 $\varphi_n(x)$ 和 $\xi'_n(x)$ 是 Riccati-Bessel 函数, 用球 Bessel 函数和第一类 Hankel 函数表示其定义式为: $\varphi_n(x) = x j_n(x)$, $\xi_n(x) = x h_n^{(1)}(x)$ 。式中 $j_n(x)$ 为球 Bessel 函数, $h_n^{(1)}(x)$ 为第一类球 Hankel 函数^[11]。

粒子消光截面与几何截面比值为粒子的消光效率 Q_e ^[7], 粒子散射截面与几何截面比值为粒子的散射效率 Q_s , 表示为:

$$\begin{cases} Q_e = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \\ Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \end{cases} \quad (2)$$

粒子的吸收效率 Q_a 为其消光效率 Q_e 与散射效率 Q_s 之差。在光散射理论中, 描述散射强度角分布的量被称为相函数, 对确定光散射性质具有十分重要的意义。另一个重要物理量为粒子的前向散射率, 它指的是一束平面波的照射下, 散射体散射到粒子前半球方向的强度占前后半球总辐射强度的比例。Chylek 把相函数用散射系数展开后, 得到前向散射率 σ_c 的解析表达式^[7]:

$$\begin{aligned} \sigma_c = & \frac{1}{2} - \frac{2}{x^2 Q_s} \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{nm} \operatorname{Re}[a_m a_n^* + b_m b_n^*] \\ & - \frac{2}{x^2 Q_s} \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} Q_{nm} \operatorname{Re}[a_m b_n^*] \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\sum''$ 为偶数项求和, $\sum'$ 为奇数项求和。 P_{nm} 和 Q_{nm} 分别为自然数 n 与粒子相对折射率 m 的函数。

1931 年, Kubelka 和 Munk 唯象地提出两个二元线性微分方程, 建立了二流模型^[12-13], 用于讨论涂层、胶体等浑浊媒质的光学现象。标准应用条件下, K-M 理论的吸收系数 K 和散射系数 S 的表达式如下^[7]:

$$\begin{cases} K = \frac{3f}{2a} Q_a \\ S = \frac{3f(1 - \sigma_c) Q_s}{2a} \end{cases} \quad (4)$$

其中 f 为微泡的体积分, 定义物理量 R_v 与 γ 为:

$$\begin{cases} R_v = 1 + \frac{K}{S} - \left[\left(\frac{K}{S} \right)^2 + 2 \left(\frac{K}{S} \right) \right]^{1/2} \\ \gamma = (K^2 + 2KS)^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

一般涂层下面有底漆, 底漆覆盖在金属基材上。当光从外侧照向涂层时, 面层和空气之间反射率为 R_e , 面层和底漆之间的反射率为 R_g , 面层内侧的反射率为 R_i 。设涂层相对于入射方向媒质的折射率为 m_1 , 前界面的内外漫反射率的关系为 $R_i = 1 - (1 - R_e)/m_1^2$, 则有:

$$\begin{aligned} R_e = & \frac{1}{2} + \frac{(m_1 - 1)(3m_1 - 1)}{6(m_1 + 1)^2} + \frac{m_1^2(m_1^2 - 1)^2}{(m_1^2 + 1)^3} \ln \frac{(m_1 - 1)}{(m_1 + 1)} \\ & - 2m_1^3 \frac{(m_1^2 + 2m_1 - 1)}{(m_1^2 + 1)(m_1^4 - 1)} + \frac{8m_1^4(m_1^4 + 1)}{(m_1^2 + 1)(m_1^4 - 1)^2} \ln m_1 \end{aligned} \quad (6)$$

根据以上各式, 最终得出涂层辐射率计算公式为:

$$\varepsilon = 1 - R_e - \frac{E - J}{T - W} \quad (7)$$

式中, E, J, T, W 为对反射率做数学运算产生的物理量。 E 为 $(1 - R_e)(1 - R_i)R_v(1 - R_v R_g)$,

J 为 $(1 - R_e)(1 - R_i)(R_v - R_g) \exp(-2\gamma d_1)$,

T 为 $(1 - R_i R_v)(1 - R_v R_g)$,

W 为 $(R_v - R_i)(R_v - R_g) \exp(-2\gamma d_1)$

其中, d_1 为涂层的厚度, R_g 为涂层在红外波段的漫反射率, 一般底漆的辐射率很高, 可认为 $R_g \approx 0.1$ 。从上述公式可知, 影响涂层红外辐射率因素包括涂层厚度、树脂折射率^[14]、微孔尺寸与微孔体积分。

2 模拟计算

当填充物为气泡时, 设气泡直径为 $10 \mu\text{m}$, 入射波长为 $20 \mu\text{m}$ 时, 采用式 (3) 可得到气泡的前向散射率为 0.83。同样条件下, 采用 ANSYS 软件计算了粒子后向散射率 (-90° 至 90° 的能量与全角度能量之比), 结果为 0.18 (如图 1 所示), 即粒子

的前向散射率为 0.82。由 MIE 散射得到的数据与 ANSYS 软件模拟得出的数据极为接近。

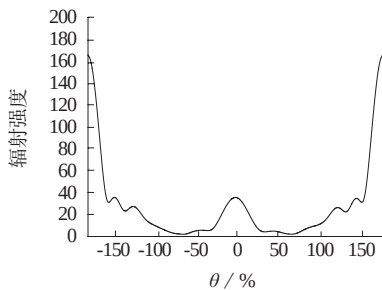


图1 不同散射角度下的红外辐射能量

2.1 涂层厚度对红外辐射率的影响

在红外波段,假设树脂折射率为 $1.6+0.2i$,当微孔体积分数为 0.9,计算了涂层厚度 d_1 对红外辐射率的影响,如图 2 所示。

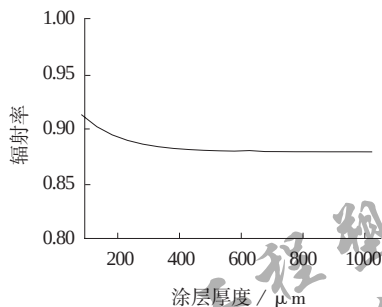
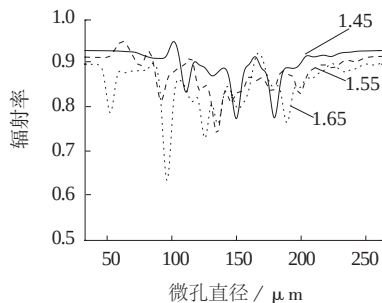


图2 涂层不同厚度时红外辐射率

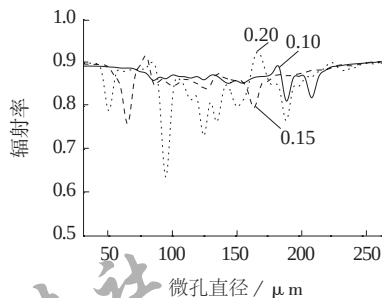
由图 2 可见,当涂层厚度较小时,涂层具有较高的红外辐射率;随着涂层厚度不断增加,涂层的红外辐射率逐渐下降,至涂层厚度达到 $400 \mu\text{m}$ 时,红外辐射率降低至 0.88;此后,涂层厚度继续增加,红外辐射率不再发生变化。即涂层厚度达到 $400 \mu\text{m}$ 或更高时,表现出面层本身的辐射特性。

2.2 微孔尺寸、树脂折射率对涂层红外辐射率影响

当材料折射率 $m=n+ki$ 中, k 为 0.2, $n=1.45, 1.55, 1.65$ 时,计算了微孔尺寸对涂层红外辐射率的影响,结果如图 3a 所示。同样,当 $n=1.6, k=0.10, 0.15, 0.20$ 时,微孔尺寸对涂层红外辐射率的影响结果如图 3b 所示。由图 3a 可以发现,树脂折射率 $1.45+0.2i$ 时,发生 Mie 散射的谐振区的微孔尺寸为 $93 \sim 205 \mu\text{m}$,在此区间,材料的辐射(反射)随颗粒尺寸剧烈波动,是强谐振区,此区间内的平均辐射率为 0.82。分别计算图 3a、图 3b 中不同折射率下,材料谐振区间内的平均辐射率,得表 1。



(a)



(b)

a— $k=0.2, n=1.45, 1.55, 1.65$; b— $n=1.6, k=0.10, 0.15, 0.20$

图3 不同树脂折射率下微孔尺寸不同时涂层辐射率

表1 不同折射率下材料在谐振区间内平均辐射率

折射率实部 (n)	折射率虚部 (k)	谐振区间 (微孔尺寸) / μm	平均辐射率
1.45	0.2i	93 ~ 205	0.82
1.55	0.2i	49 ~ 217	0.87
1.65	0.2i	40 ~ 227	0.84
1.60	0.1i	70 ~ 229	0.87
1.60	0.15i	49 ~ 231	0.86
1.60	0.2i	40 ~ 251	0.84

由表 1 分析可得,当折射率虚部相同时,实部增加,谐振区间向微孔尺寸变小的方向发展,实部由 1.45 增加到 1.65,谐振区间起始微孔尺寸由 $93 \mu\text{m}$ 下降到 $40 \mu\text{m}$ 。当折射率实部相同时,虚部增加,谐振区间亦向微孔尺寸变小的方向发展,虚部由 0.1i 增加到 0.2i,谐振区间起始微孔尺寸由 $70 \mu\text{m}$ 下降到 $40 \mu\text{m}$,同时材料的平均发射率由 0.87 下降到 0.84。表 1 中谐振区间的范围较大,且由图 3a、图 3b 中可以发现,谐振区间内存在一定的微孔尺寸范围,使得材料具有较低的辐射率。缩小谐振区间范围,计算区间内的平均辐射率,寻找低辐射率的谐振区间。计算结果见表 2。由表 2 可以发现,缩小谐振区间范围,即选取合适的微孔尺寸范围,可以得到较低的平均辐射率。树脂折射率 $1.45+0.2i$ 时,微孔尺寸 $140 \sim 188 \mu\text{m}$ 区间材料有最低平均辐射率 0.77;树脂折射率 $1.55+0.2i$ 时,微孔尺寸 $120 \sim$

140 μm 区间材料有最低平均辐射率为 0.76; 树脂折射率 $1.65+0.2i$ 时, 微孔尺寸 85 ~ 100 μm 区间材料有最低平均辐射率为 0.69。当树脂折射率虚部不变时, 实部增加, 谐振最强区间向微孔尺寸变小的方向发展, 且微孔尺寸分布更窄, 平均辐射率可降低至 0.7 以下。

表 2 不同折射率实部下材料在谐振区间内平均辐射率

n	ki	谐振区间 (微孔尺寸) / μm	平均辐射率
1.45	0.2i	93 ~ 205	0.82
1.45	0.2i	104 ~ 188	0.82
1.45	0.2i	140 ~ 188	0.77
1.55	0.2i	49 ~ 217	0.87
1.55	0.2i	84 ~ 140	0.82
1.55	0.2i	122 ~ 140	0.76
1.65	0.2i	40 ~ 227	0.84
1.65	0.2i	86 ~ 137	0.76
1.65	0.2i	86 ~ 102	0.69

表 3 不同折射率虚部下材料在谐振区间内平均辐射率

n	ki	谐振区间 (微孔尺寸) / μm	平均辐射率
1.6	0.1i	70 ~ 229	0.87
1.6	0.1i	182 ~ 220	0.82
1.6	0.15i	49 ~ 231	0.86
1.6	0.15i	49 ~ 173	0.83
1.6	0.15i	49 ~ 70	0.81
1.6	0.2i	40 ~ 251	0.84
1.6	0.2i	85 ~ 139	0.78
1.6	0.2i	89 ~ 100	0.70

由表 3 可以发现, 折射率虚部较小时, 共振强度小, 平均辐射率较高; 虚部增加, 共振强度增加, 平均辐射率下降。控制微孔尺寸分布范围, 使其位于共振增强区间, 可得到更低的红外辐射率。折射率为 $1.6+0.1i$ 时, 微孔尺寸 182 ~ 220 μm 区间材料有最低平均辐射率 0.82; 折射率为 $1.6+0.15i$ 时, 微孔尺寸 49 ~ 70 μm 区间材料有最低平均辐射率 0.81; 折射率为 $1.6+0.2i$ 时, 微孔尺寸 89 ~ 100 μm 区间材料有最低平均辐射率 0.69。虽然虚部为 0.15 时, 最低平均辐射率谐振区间在微孔尺寸更小的位置, 但虚部为 0.2 时, 材料在 89 ~ 100 μm 具有最低平均辐射率。

由表 2、表 3 分析可得, 树脂折射率实部与虚部均确定, 控制微孔尺寸分布范围, 可以得到低辐射率。折射率实部、虚部分别增加时, 控制微孔尺寸分布范围更窄, 可以得到更低的红外辐射率。

2.3 微孔浓度对涂层红外辐射率的影响

根据公式 (4), 红外涂层体积分数 f 与涂层红外辐射率关系如图 4 所示。

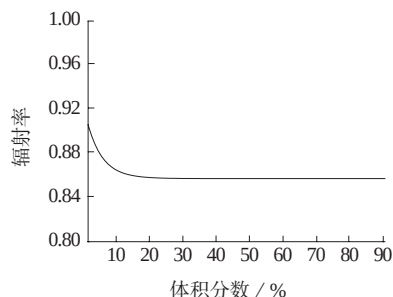


图 4 涂层红外辐射率与微孔体积分数的关系

从图 4 可知, 树脂折射率为 $1.6+0.2i$, 涂层厚度为 2 mm, 当微孔体积分数为零时, 相当于只有树脂材料, 底层材料辐射率高, 同时树脂的高辐射率使得整个涂层的红外辐射率很高。随着微孔体积分数增加, 涂层的红外辐射率逐渐降低。微孔体积分数提高至 15% 时, 涂层红外辐射率降低至 0.86。继续提高微孔体积分数不再对涂层的红外辐射率产生影响。最终, 提高微孔体积分数使得涂层的红外辐射率由 0.906 下降至 0.86。

使用 ANSYS 软件进行模拟。模拟结果显示, 在微孔含量达到 14% 以后, 涂层的红外辐射率保持平稳, 为 0.860。此结果与 MATLAB 计算结果相吻合。

3 结论

采用 Mie 散射和 Kubelka-Munk 二流模型的涂层红外辐射率理论模型, 给出了当填充物为气泡时, 树脂折射率、微孔尺寸、微孔体积分数、涂层厚度对涂层红外辐射率影响的规律。

(1) 树脂折射率的实部与虚部影响涂层的红外辐射率。实部增高, 谐振区明显向微孔尺寸变小的方向发展, 同时谐振增强; 虚部增高, 谐振增强, 平均红外辐射率越低;

(2) 微孔尺寸对于涂层的红外辐射率具有较大影响。精确控制微孔的尺寸分布是得到低辐射率材料的重要途径。

(3) 随着微孔体积分数增加, 涂层的红外辐射率逐渐降低。微孔体积分数增加到 15% 以后, 涂层红外辐射率不再降低。

(4) 随着涂层厚度增加, 涂层的红外辐射率会逐渐降低。当厚度达到 400 μm 后, 涂层厚度的继续增加不会再降低涂层的红外辐射率。

参考文献

- [1] 黄莉, 周方方, 祁鸣, 等. 地面雷达目标红外辐射特性研究 [J]. 航空兵器, 2015(6):63-65+69.

- Huang li, Zhou Fangfang, Qi Ming, et al. Study on infrared radiation characteristics of ground-based radar target[J]. Aero Weaponry, 2015(6):63-65+69.
- [2] 穆武第,程海峰,唐耿平,等. 热红外隐身伪装技术和材料的现状与发展 [J]. 材料导报, 2007(1):114-117.
- Mu Wudi, Cheng Haifeng, Tang Gengping, et al. Present status and development of thermal infrared stealthy camouflage technology and materials[J]. Materials Reports Mater Rep, 2007(1):114-117.
- [3] 乔铁英,蔡立华,李宁,等. 基于红外辐射特性系统实现对面目标测量 [J]. 中国光学, 2018, 11(5):804-811.
- Qiao Tieying, Cai Lihua, Li Ning, et al. Opposite target measurement based on infrared radiation characteristics[J]. Chinese Optics, 2018, 11(5):804-811.
- [4] 张凯,王波,桂泰江,等. 红外隐身涂料的研究与进展 [J]. 现代涂料与涂装, 2019, 22(12):26-30+68.
- Zhang Kai, Wang Bo, Gui Taijiang, et al. Research and progress of infrared stealth coatings[J]. Modern Paint & Finishing, 2019, 22(12):26-30+68.
- [5] 成声月,刘朝辉,邓智平,等. 军用目标红外辐射特征研究进展 [J]. 红外技术, 2014, 36(7):577-581.
- Cheng Shengyue, Liu Chaohui, Deng Zhiping, et al. Research progress on infrared characteristic of military target[J]. Infrared Technology, 2014, 36(7):577-581.
- [6] Zhang Biao, Wang Chen, Song Zhaolong, et al. Determination of particle size distribution based on dynamic light scattering measurements in the near field[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127. DOI:10.1016 / j.optlaseng.2019.105980.
- [7] 刘凌云. 红外与雷达波兼容隐身复合涂层的机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- Liu Lingyun. Study on the mechanism of composite coating with low infrared emittance and low radar reflectance[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [8] 张辉. 以电磁学发展过程看麦克斯韦方程组 [J]. 科技展望, 2015, 25(6):234.
- Zhang Hui. View maxwell's equations from the development process of electromagnetism[J]. Science and Technology, 2015, 25(6):234.
- [9] He Si, Wang Xia, Xia Runqiu, et al. Polarimetric infrared imaging simulation of a synthetic sea surface with Mie scattering[J]. Applied optics, 2018, 57(7):B150-B159.
- [10] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: Wiley, 1983.
- [11] 吴崇试. 数学物理方法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1999.
- Wu Chongshi. Mathematical physics method[M]. Beijing: Peking University Press, 1999.
- [12] Zhao Jun. Analytical solution to the depth-of-origin profile of transmission raman spectroscopy in turbid media based on the kubelka-munk model[J]. 2019, 73(9):1 061-1 073.
- [13] Michael H.Brill. Calibrating low - scattering samples using Kubelka - Munk model[J]. Color Research & Application, 2017, 42(1):123.
- [14] 杨力祥,程海峰,张朝阳,等. 红外隐身涂料粘结剂的研究进展 [J]. 材料保护, 2016, 49(S1):112-116.
- Yang Lixiang, Cheng Haifeng, Zhang Chaoyang, et al. Research progress of infrared stealth coating binder[J]. Material Protection, 2016, 49(S1):112-116.

欢迎订阅 2020 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2020 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志, 订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 2020 年定价 20 元 / 期, 全年 240 元。《化学分析计量》为双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版, 2020 年定价 20 元 / 期, 全年 120 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355