

周振贵¹, 王昕¹, 周军¹, 胡彬¹

¹华中科技大学

Abstract

随着人类日常活动对制冷需求的不断增加，传统散热系统不仅消耗大量的能量，而且产生过多的废热和CO₂的排放。外太空作为温度只有3K的冷源，热量通过大气透明窗口可以产生显著的辐射散热，特别是在白天仍然可以实现零能耗的降温。白天辐射制冷功率 $P_{cool}(Tr)$ 可以写成： $P_{cool}(Tr) = Prad(Tr) - Patm(T_{atm}) - P_{sun} - P_{nonrad}$

$Prad(Tr)$ 是材料辐射的能量， $Patm(T_{atm})$ 是材料吸收大气辐射的能量， P_{sun} 是材料吸收太阳光的能量， P_{nonrad} 是材料与环境通过传导对流交换的能量。

为实现高效的制冷功率，要求辐射制冷材料具有较高的大气窗口(8-13 μm)发射率和较低的太阳光(0.3-2.5 μm)吸收率。根据基尔霍夫定律，物体在不同波长下的发射率等于其吸收率。因此，可利用COMSOL Multiphysics计算材料的吸收光谱，从而计算材料的发射率。具体的，参考案例库中plasmonic_wire_grating模型，采用波动光学模块和电磁波波长域物理场接口，分别计算TE和TM波入射的吸收光谱，最后取均值可得到不同波段下的吸收率。进一步地，通过参数化扫描可以实现材料结构的优化设计，进而获得最佳的发射率。最终，通过优化设计的材料光谱与实际测试光谱非常吻合，获得了低至0.004的太阳光谱吸收率，高达0.93的平均大气窗口发射率，以及92 W/m²的制冷功率，显著优于已有报道结果，这对于节能环保具有重要的意义。

Figures used in the abstract

Figure 1: 图A是基于白天辐射制冷建立的一维稳态能量模型；图B是我们基于模拟和实验得出的最佳白天制冷功率92W/m²，显著高于现有研究。其中Ref.1. Science,2018,362,315. Ref.2. Science,2017,355,1062. Ref.3. Nature,2014,515,540. Ref.4. Nano lett.,2013,13,1457. 图C是Comsol模拟光谱与实验最优测试光谱图的比较。