

路面蜃景: 热空气的把戏?

周怀春^①, 黄志锋^{①②}, 程强^①, 吕伟^①, 邱奎^①, 陈辰^①, HSU PeiFeng^②

① 华中科技大学能源与动力工程学院, 煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074;

② Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL 32901-6975, USA

E-mail: hczhou@mail.hust.edu.cn

2010-09-25 收稿, 2010-11-14 接受

国家自然科学基金重点项目(50636010)、创新研究群体科学基金(50721005)与“111”引智计划(B06019)资助项目

摘要 路面“下蜃景”是日常生活中极易见到的现象. 长期以来, 它被学术界公认为是由于路面空气层温度梯度引起的折射率梯度所形成的一种光的折射现象. 但也有一种不同的观点, 认为蜃景就是在掠入射条件下的一种镜反射现象. 由于缺少合理、定量的证据, 公认的光折射理论并没有受到动摇. 本文展示了几幅从湖北省武汉市喻家山北路的一段路面上实验拍摄到的蜃景图像, 拍摄时间为 2009 年 12 月的冬日. 同时, 采用热电偶测量结果表明, 该路表面及其上空气层并无明显的温度梯度. 这个实验为质疑“下蜃景”由温度梯度引起光线折射而形成的理论提供了直接证据. 此外, 检测发现, 发生蜃景反射的道路平面上的临界掠入射角约 0.2° , 根据瑞利准则, 这个角度不能使粗糙面像光滑表面一样将入射光反射. 所以, 该现象应作为粗糙面散射的一个似镜反射观测效果, 并不能从根本上由光在空气层中发生折射来解释. 本研究结果表明, 这里展示的成像机制和基于观测的分析方法, 为认识在粗糙面的掠入射条件下发生的多种散射现象提供了一种有潜力的方法, 如在结冰湖面上偶然观测到的亮度异常的“上蜃景”以及非镜向反射峰值现象.

关键词

下蜃景
粗糙路面
反射
折射
瑞利准则

你听说过海面上或沙漠中的“海市蜃楼”自然现象吗? 你注意过远离自己的公路上出现的蜃景吗? 相信大多数人的回答是肯定的. 公路及人行道上出现的蜃景频繁被报道^[1-3], 并于 1920 年左右在 *Science* 上被热议^[4-6]. 通常, 蜃景被认为是热路面上空气层温度梯度分布形成的梯度折射率造成的, 至今, 该理论在文献中被广泛认可^[1-13]. 一些已经发表的计算机模拟工作也在试图重建该现象, 结果看起来比较成功^[14].

然而, 在几乎同样长的时间里, 人们对“下蜃景”现象的解释也在不断地提出质疑^[15-18]. Platt^[15]声称人行道蜃景是简单的反射现象, 与大气条件完全无关. Riggs^[16]认为公路上似水现象和汽车及路旁物体的反射像也许是由于路面在掠入射条件下发生正常的反射造成的. Tavassoly 等人^[18]报道说他们选择了几处能够观测到的蜃景, 测量了路面表层空气层温度变化和观

察者与蜃景之间的距离, 结果发现, 并未达到全内反射的要求. 但是, 由于在一定程度上缺少合理、充分的证据, 广泛认可的光折射理论并未受到动摇.

电磁波在物质中的传播及与复杂表面的相互作用的特性受到很多研究者的重视^[19-21]; 对于粗糙表面的电磁波散射, 如果入射角度和散射角度比较大, 并接近低掠入射角时, 根据瑞利准则, 就会发生镜面反射^[22-25]. 但是, 在粗糙路面发生的似镜反射是不是满足瑞利准则的镜反射现象, 这一点还没得到验证. 在随机粗糙表面的研究兴趣有很多方面, 例如, 我们做了很多微观粗糙面在热辐射环境下的研究^[26-28]. 本文的研究致力于使用直接测量证据研究路面蜃景形成的机理.

1 观测结果与分析

1.1 观测的条件和结果

分别出现在夏季和冬季白天的典型的路面蜃景

现象如图 1(a)和(c)所示, 照片拍摄地点是武汉喻家山脚下的喻家山北路的一段(图 1(e)). 这段公路是由一段下坡路和一段上坡路组成, 从观测点 I 开始的下坡段测量得到的坡度大约为-0.02, 上坡部分一直延续到 II. 照片是在观测点 I 拍摄的. 实验使用的照相机是 Canon EOS 500D. 图 1(a)的相关参数如下: 时间为 2009-07-12 的 11:26:15; 曝光时间为 1/400 s; 光圈为 F8; ISO 为 100; 焦距为 187 mm. 图 1(c)的相关参数如下: 时间为 2009-12-19 的 12:08:57; 曝光时间为 1/250 s; 光圈为 F16; ISO 为 400; 焦距为 250 mm. 在夏季和冬季不同季节下公路表面的温度梯度测量结果分别如图 1(b)和(d)所示, 与图 1(a)和(c)相对应. 图 1(b)的测量条件如下: 日期为 2009-07-12; 时间为 13:12~13:41 PM; 天气晴; 最高温度为 35℃; 最低温度为 28℃; 东南风, 风速 2.0~5.0 m/s. 图 1(c)的测量条件如下: 日期为 2009-12-19; 时间为 10:50~11:15 AM; 天气晴; 最高温度为 7℃; 最低温度为 0℃; 西北风, 风速 0.3~3.0 m/s. 观测点 I 位于南边白色实线向路中心偏转 0.6 m 的位置, 相机距离路表面的高度为 0.65 m.

从图 1(a)和(c)中可以清楚地看到, 马路中心的实心双黄线被截断, 并出现类似镜反射影像. 同时, 在有车通过这个区域时在路面可以清晰地看到车的倒影. 即使在夏天的夜晚, 我们也能观察到双黄线的镜反射影像.

现在对出现蜃景区域上方的热空气的影响进行研究. 在图 1(b)和(d)中给出了使用热电偶测量的路面上方的温度分布, 测量误差小于 1%. 图中每个高度的平均温度是从 50 或者更多次测量中获得, 采样频率为 2 Hz, 最大标准偏差小于 1℃. 从图 1(b)中可以看出, 路面温度比距离路面 10 mm 高度的温度高出大约 7℃, 并且在更高的高度空气温度没有出现很大的变化. Ramdas 和 Malurkar^[29]报道过类似的观察结果.

然而, 我们发现在冬季时路面及路面以上并没有明显的温度梯度(图 1(d)). 但在这些天我们依然可以获得清晰的蜃景图像(图 1(c)). 这个结果与以前关于路面海市蜃楼的形成是由温度梯度造成的结论相矛盾.

根据我们的观察, 蜃景现象并不会被路过的车辆所干扰. 路面蜃景现象是一种广泛存在的现象, 可以很容易地通过小角度观察得到. 在距观察点 I 3

km 范围内的华中科技大学校园内, 我们在多处拍摄到了很多蜃景图像. 当时我们躺在垫着草席的地面上, 手持相机高于地面 5~15 cm, 在前方 10~20 m 的路面上也可很容易地拍摄到蜃景图像.

在图 1(e)所示的路面上, 我们也不是在任何时候、任何环境下都能观察到类似蜃景现象. 某个冬天中午 12 点之前我们就没能在该路面上拍摄到蜃景图像, 当时太阳光照射在我们前方, 被路面散射的光的亮度太强, 从而将车和路面标示线的反射光遮住了. 在某个冬天下午 4 点以后, 我们同样没能在这一位置观察到类似现象, 当时投射到路面的阳光被南方的喻家山遮住了. 此时, 在路面散射的光中, 汽车和路面标示线所占部分要小于天空直接散射的部分. 如图 2(a)所示, 蜃景现象是背景光的二次散射现象, 很多情况下容易被来自路面的一次散射光覆盖, 因此蜃景现象只能在合适的光线环境下才能观测到.

我们可以得出如下结论: 在粗糙路面观测到蜃景现象是一种在低掠入射角度下粗糙表面的镜反射观察现象, 而不是由于路面空气折射率梯度引起的, 后者最多只是一种次要因素.

1.2 反射现象的分析

入射角和散射角大的粗糙表面上的电磁波的散射比较复杂^[22~25]. 我们可以进一步判断图 1(a)和(c)所示路面上的反射角度是否满足瑞利判据, 该判据通过因子 g 来判断粗糙面的反射是否为镜反射^[25]:

$$g = \frac{4\pi\sigma_h \cos(\theta_i)}{\lambda}, \quad (1)$$

其中 σ_h 为粗糙度, λ 为波长, θ_i 为入射角. 若 $g \ll 1$, 则反射趋向于镜反射, 而若 $g \gg 1$, 则相应的反射趋向于漫反射.

如图 2(a)所示, 观测点 I 处的掠入射角 α 由图 1(a)和(c)中发生镜反射的局部路面确定. 为达到该目的, 我们分别用一个标志杆立在路上标记反射图像中的远点 IV(图 2(b))和近点 III(图 2(c)), 得到点 I 到 IV 和 III 之间的距离分别为 275 和 92 m. 计算得到的掠入射角 α 如图 2(d)所示, 可以看出, 对点 I 处的观测者来说, 到点 III 和 IV 的掠入射角近似相等, 约为 0.2°, 则反射角 $\theta_r = (90 - 0.2)^\circ = 89.8^\circ$.

在 2009 年 7 月 13 和 14 日我们用一台数字水平仪对路面粗糙度进行了测量. 测量是在距离点 I 为 280 m 处路面上进行的, 接近点 IV. 测量的 4 个表面

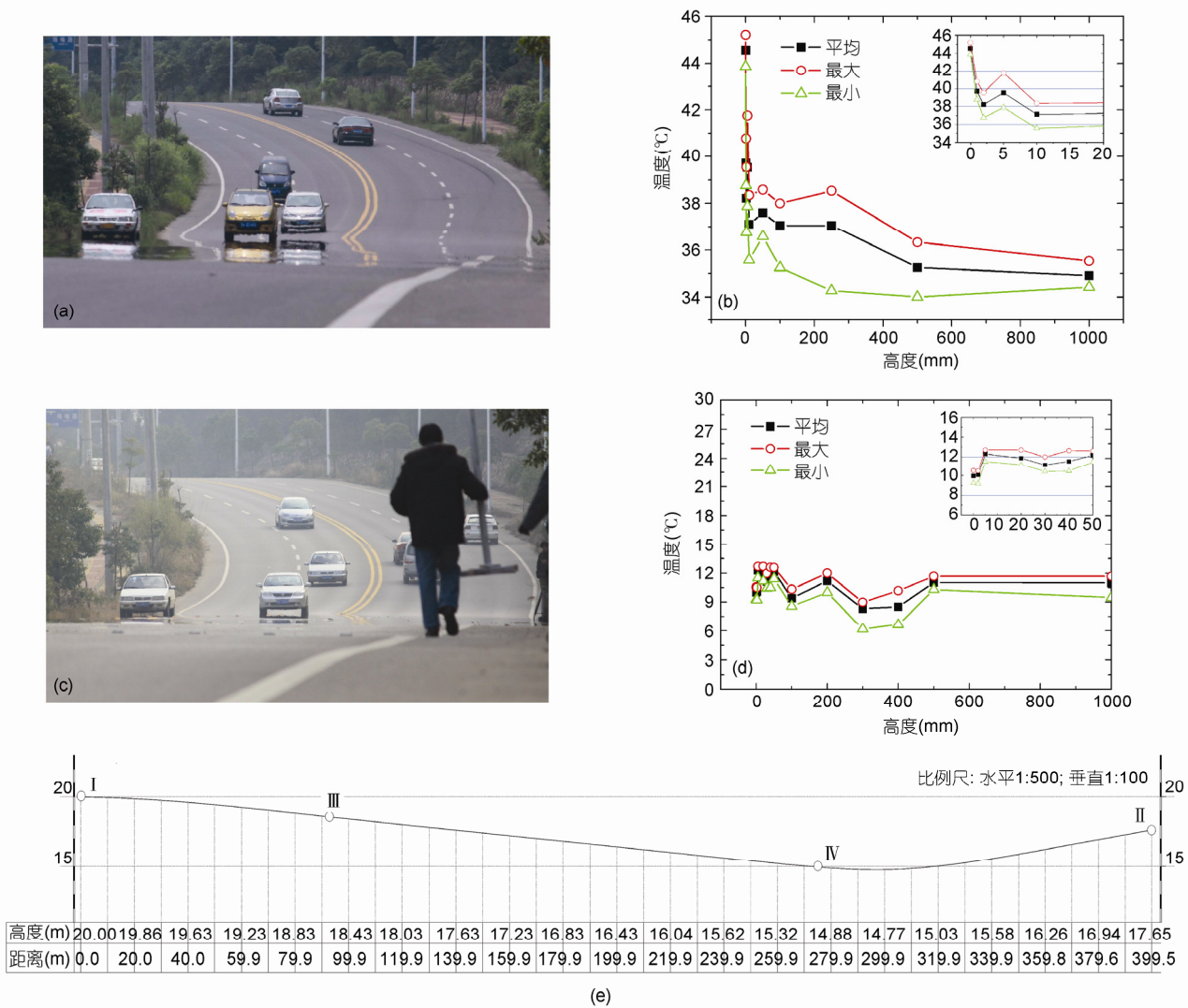


图 1 (a) 夏天镜面反射图像; (b) 夏天路表面温度梯度; (c) 冬天镜面反射图像; (d) 冬天路表面温度梯度; (e) 道路剖面: 点 I (经度: $114^{\circ}25'01''$, 纬度: $30^{\circ}31'33''$) 为观察点, 点 II 为终点, 点 III 和 IV 分别为观测范围之间发生镜反射的近点和远点

正方形为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 每个维度增量为 5 mm , 则每个正方形上的测量点为 $21 \times 21 = 441$. 高度测量不确定度小于 0.1 mm . 对该路面, σ_h 约为 $0.5 \sim 1.0\text{ mm}$, 均值为 0.7015 mm ; 而测量中相邻峰值之间的平均距离 σ_l 约为 1.72 cm . 对波长范围 $400 \sim 800\text{ nm}$ 的可见光波段, 粗糙路表面的参数 g 为

$$27.42 < g < 98.70.$$

从该结果可以看出, 即使表面不是完全的漫反射, 它也远不是镜反射. 很容易得到使其满足瑞利判据下的镜反射条件的临界掠入射角, 该临界角计算结果小于 0.01° , 明显小于我们在该路面观察到镜反

射的临界角 0.2° . 显然, 目前观察到的现象仅出现在远视场情况, 并且取决于观测条件.

2 路面蜃景形成模型

文献[30,31]讨论了用于分析入射光与粗糙表面之间的相互作用的几何光学(GO)光线追踪法的适用条件. 从上述分析可知, 文献[31]中的区间图(regime map)中的参数 σ_h/σ_l 约为 0.04 , $\sigma \cos(\theta_i)/\lambda$ 在可见光波段为 $3.06 \sim 6.12$. 很明显, 几何光学光线追踪法用于分析本文研究的粗糙面光散射是有效且准确的. 相似地, 图像处理技术对分析具有反射/散射的辐射

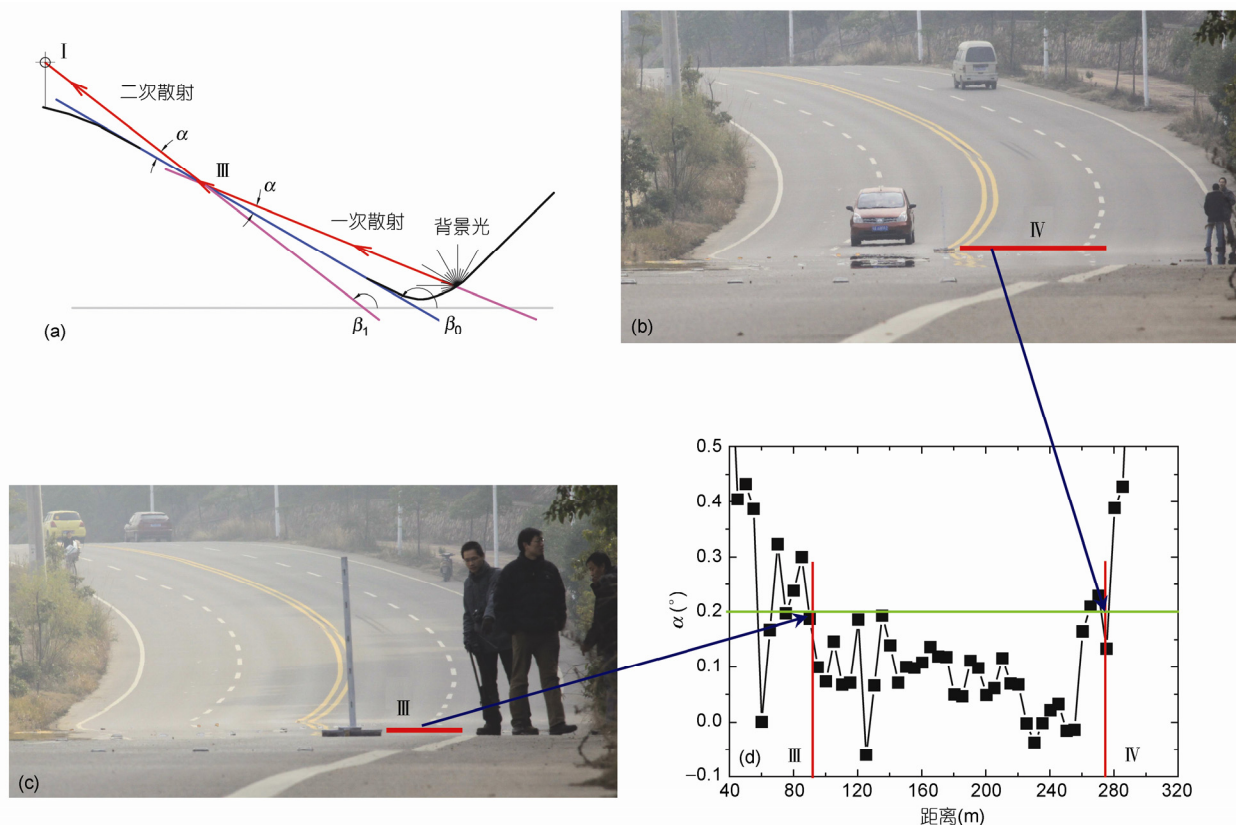


图2 (a) 从局部路面到观测点 I 的掠射角为 $\alpha = \beta_0 - \beta_1$, 其中 β_0 和 β_1 分别为从点 I 到 III (或 IV, 或 III 与 IV 之间的任一点) 的观测线和点 III 处切平面的夹角, 它显示了在点 I 处可以观测到的只是背景光的二次散射光而已; (b) 远点 IV, 距离点 I 处 275 m; (c) 92 m 远处的近点 III, 是地面镜面反射延伸的边界; (d) 掠射角随着观测点 I 距离的变化而变化, 点 III 和 IV 的掠射角近似等于 0.2°

传热过程也是有效的^[32]. 在几何光学光线追踪概念及成像过程的基础上, 图3提出了一种解释粗糙路面镜成像的机理. 在一个相对较低坡度的粗糙表面, 即 $\sigma_l/\sigma_h > 1$, 顶点的局部区域相对较平缓, 特别是对路面尤其如此. 如图3(a)所示, 没有任何温度梯度时, 从多个顶点的镜反射分量可以形成一个“连续的”、被较远处的观察者看见的镜反射影像, 条件如下:

(1) 从至少3个或者更多的顶点反射的任何目标的镜反射分量能同时达到观察者的眼睛;

(2) 反射表面和观察者的距离必须足够远, 使得观察者的眼睛察觉不到相邻顶点的不连续的镜反射;

(3) 在大入射角/反射角条件下, 粗糙表面的前向散射占主要部分;

(4) 在掠入射角下粗糙表面对天空或者太阳的直接散射光, 要弱于来自于目标的一次散射光在相

同掠入射角下从该粗糙面上的二次散射.

如果一个具有温度梯度的稳定空气层存在于路面, 如图3(b)所示, 空气层的折射效果将会产生一个额外的偏转角 $\Delta\alpha$, 导致从路面反射光的整个偏转角增加到 $\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha$. 此种情况下, 观察者可以看到一个更宽的镜反射表面. 这种情况可能发生在夏天无风时的沙漠表面, 此时没有移动物体出现在该表面, 进而破坏其上的稳定空气层. 就我们研究的路面而言, 繁忙的交通将会破坏路面稳定的空气层, 不可能存在任何具有稳定温度梯度的空气层, 正如 Riggs^[16]所述.

更进一步, 这里展示的成像机制和基于观察的分析方法为理解更多的低掠入射角条件下粗糙表面的反射现象提供了有潜力的方法. 例如, 有报道称在一个湖的冰面偶尔可以观察到异常光亮的上现蜃景^[33]. 在这个例子中, 经过计算, 当掠入射角等于或

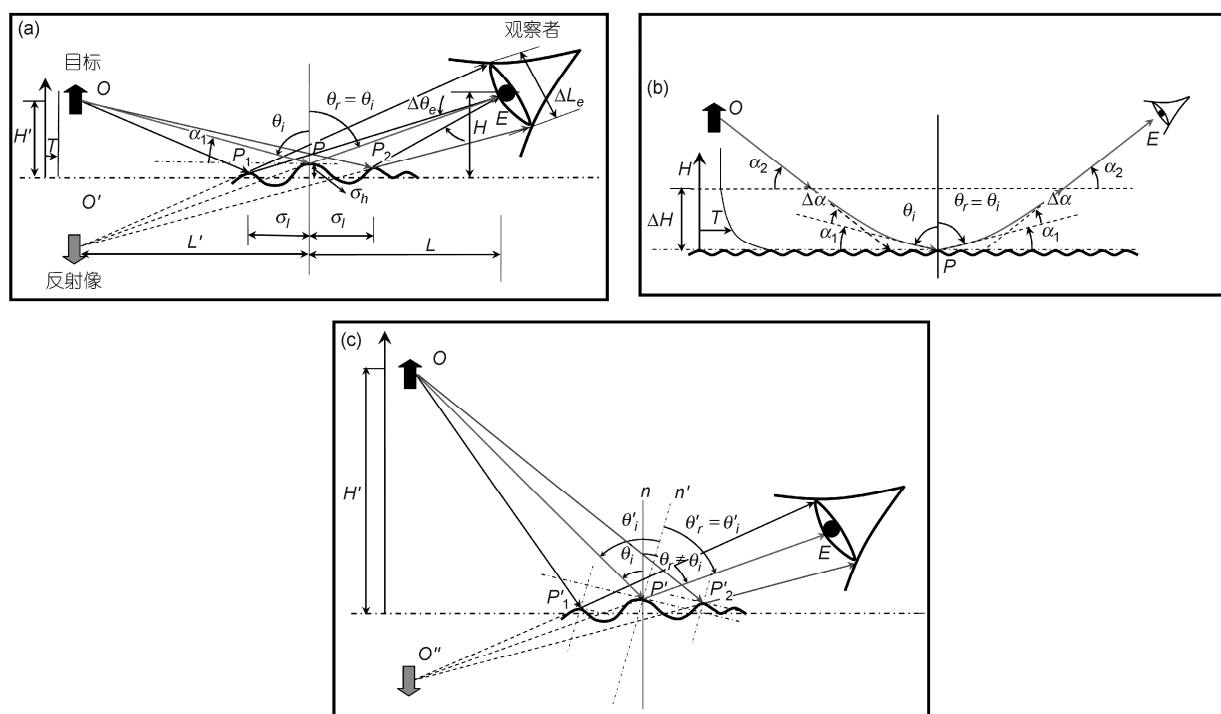


图3 粗糙路面上类似镜面反射的机理

(a) 没有任何的温度梯度; (b) 有温度梯度. 在(a)中, 镜面散射光从邻近的峰 P_1 , P 和 P_2 同时到达眼睛. ΔL_e 为 P_1 和 P_2 到眼睛视线的夹角. $\theta_r = \theta_i = 90 - \alpha_1$ 为粗糙面法线的最小入射/反射角, α_1 为掠入角. 在(b)中, 偏转角 $\Delta\alpha$ 为由于空气层的温度梯度的折射使得总掠入角增加到 $\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha$. (c) 掠入角下的光增强效应. 到法线 n 的反射角 θ_r ($\theta_r \neq \theta_i$ 并且 $\theta_r > \theta_i$) 一般大于 80° . 这里在表面存在一点 P' , 其法线 n' 造成从 O 点到 E 点观察者产生镜面反射. $\theta'_r = \theta'_i$ 和 $\theta'_r + \theta'_i = \theta_r + \theta_i$. 较大的反射角确保在一个普通观测者的分辨极限内, 能接收到路面足够多点的反射信息

者小于 0.046° 时, 图像的亮度比从该表面的漫散射明显要强些. 另一个例子是金属或非金属粗糙表面的非镜向反射峰值现象^[34]. 在这些例子中, 在低掠入射角方向的反射增强效应(即非镜向峰值现象)可以用图 3(c)所示的机理来解释. 考虑相对于法线方向 n 的反射角, θ_r ($\theta_r \neq \theta_i$ 和 $\theta_r > \theta_i$), 通常大于 80° 甚至接近 90° . 在表面上存在一点 P' , 其法线方向 n' 使得光线从 O 到观察点 E 形成了镜反射. 因为 θ_r 接近 90° , 在人眼分辨极限内, 在顶点附近存在许多诸如 P' 的点, 导致了在大反射角下光线增强效应和非镜向峰值现象. 对于异常光亮的上现蜃景的观察^[33], 观察者可以看到的天空背景里不存在特殊的目标, 在光亮蜃景里的反射光是来自天空不同的方向. 就像图 3(c)中所示, 由结冰湖面反射的光将在散射角大于 89° 时聚集, 造成了光亮的蜃景. 它也不是主要由结冰湖面上

方空气的折射率梯度所引起的.

3 结论

在掠入射角下的粗糙面反射机理可以总结如下. 从粗糙道路表面、甚至是沙漠里看到的海市蜃楼现象, 其形成的机理是: 低掠入射角下, 目标的入射光角度与观察者观察到的反射光角度正好相等时, 粗糙表面相对于法线方向产生了镜反射, 或者镜反射分量较强, 形成了可以观察到的反射影像. 在这种情况下, 低掠入射角通常小于 1° . 如果入射光的入射角远远小于 90° , 如 60° , 由低掠入角下反射光线增强效应造成在最大反射角接近 90° 时的反射变得最大, 很可能形成了非镜向峰值现象^[34]. 从结冰湖面上观察到的明亮的上现蜃景可能就是一种非镜向峰值现象, 这些推论需要在将来进行更深入的研究和验证.

参考文献

- 1 Gove P B. Webster's Third New International Dictionary of the English Language Unabridged. Springfield, Massachusetts: G & C Merriam Company, 1964. 1441
- 2 Lemons D S. Perfect Form: Variational Principles, Methods, and Applications in Elementary Physics. New Jersey: Princeton University Press, 1997. 33–37
- 3 Adam J A. A Mathematical Nature Walk. New Jersey: Princeton University Press, 2009. 73–77
- 4 Knowton A A. An unusual mirage. *Science*, 1919, 50: 328
- 5 McNair F W. A sidewalk mirage. *Science*, 1920, 52: 201
- 6 Du Shane C P. The sidewalk mirage. *Science*, 1921, 53: 236
- 7 Odell A F. Sidewalk mirages. *Science*, 1921, 54: 357
- 8 Raman C V, Pancharatnam S. The optics of mirages. *Proc Indian Acad Sci A*, 1959, 49: 251–261
- 9 Woyk E. Ray tracing theory and mirage occurrence conditions. *Appl Optics*, 1978, 17: 2108–2113
- 10 Fabri E, Fiorio G, Lazzeri F, et al. Mirage in the laboratory. *Am J Phys*, 1982, 50: 517–520
- 11 Greenler R G. Laboratory simulation of inferior and superior mirages. *J Opt Soc Am A*, 1987, 4: 589–590
- 12 Vollmer M, Tammer R. Laboratory experiments in atmospheric optics. *Appl Optics*, 1998, 37: 1557–1568
- 13 Kosa T, Palffy-Muhoray P. Mirage mirror on the wall. *Am J Phys*, 2000, 68: 1120–1122
- 14 Gutierrez D, Seron F J, Munoz A, et al. Simulation of atmospheric phenomena. *Comput Graph-UK*, 2006, 30: 994–1010
- 15 Platt H H. Mirages? *Science*, 1920, 52: 290–291
- 16 Riggs C O. Mirage, or regular reflection? *Am J Phys*, 1950, 18: 526
- 17 Fakhruddin H. Specular reflection from a rough surface. *Phys Teach*, 2003, 41: 206–207
- 18 Tavassoly M T, Nahal A, Ebadi Z. Image formation in rough surfaces. *Opt Commun*, 2004, 238: 252–260
- 19 张涛. 光在介质中的折射. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2007, 37: 137–145
- 20 贺奇才, 黄耀熊. 平面电磁波在任意方向运动的理想导体表面的反射. *科学通报*, 2000, 45: 689–693
- 21 王鑫, 孙强, 张训斌, 等. 中国首次岸基 GNSS-R 海洋遥感实验. *科学通报*, 2008, 53: 589–592
- 22 Rayleigh L. On the dynamical theory of gratings. *Proc R Soc London Ser A*, 1907, 79: 399–416
- 23 Beckmann P, Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. New York: Pergamon Press, 1963
- 24 Stover J C. Optical Scattering: Measurements and Analysis. Bellingham, Washington: SPIE Press, 1995
- 25 Watson R M J, Raven P N. Comparison of measured BRDF data with parameterized reflectance models. *Proc SPIE*, 2001, 4370: 159–168
- 26 Fu K, Hsu P F. Modeling the radiative properties of microscale random roughness surfaces. *J Heat Transfer*, 2007, 129: 71–78
- 27 Fu K, Hsu P F. Radiative properties of gold surfaces with one-dimensional microscale Gaussian random roughness. *Int J Thermophys*, 2007, 28: 598–615
- 28 Fu K, Chen Y B, Hsu P F, et al. Device scaling effect on the spectral-directional absorptance of wafer's front side. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51: 4911–4925
- 29 Ramdas L A, Malurkar S L. Surface convection and the distribution of temperature near a heated surface. *Nature*, 1932, 129: 201–202
- 30 Tang K, Buckius R O. The geometric optics approximation for reflection from two-dimensional random rough surfaces. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 2037–2047
- 31 Fu K, Hsu P F. New regime map of the geometric optics approximation for scattering from random rough surfaces. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2008, 109: 180–188
- 32 Zhou H C, Sheng F, Han S D, et al. A fast algorithm for calculation of radiative energy distributions received by pinhole image-formation process from 2D rectangular enclosure. *Numer Heat Transfer A*, 2000, 38: 757–773
- 33 Lehn W H. Bright superior mirages. *Appl Optics*, 2003, 42: 390–393
- 34 Torrance K E, Sparrow E M. Theory of off-specular reflection from roughened surfaces. *J Opt Soc Am*, 1967, 57: 1105–1114