



鸣沙表面结构特征与共鸣机制的模拟实验研究

屈建军^① 孙波^③ 张克存^{①*} 董光荣^① 蒋生祥^②

(^① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; ^② 上海极地研究所, 上海 210000;

^③ 中国科学院兰州化学物理研究所, 兰州 730000)

摘要 鸣沙发声机制是风沙物理学中长期悬而未决的重要问题. 在前人研究的基础上, 通过采自沙漠和海滩哑沙及敦煌鸣沙山鸣沙变哑的哑沙的冲洗实验、玻璃微珠表面化学溶蚀实验、表面覆盖实验及 SEM 的分析. 发现: 鸣沙发声与沙粒表面有无 SiO_2 凝胶无关, 也与其表面的化学组成无关, 而与自然沙粒表面由风蚀、水蚀、化学溶蚀及硅凝胶沉淀等多种因素所形成的多孔(坑)状物理结构所构成的共鸣腔有关. 其共鸣机制与亥姆霍兹共鸣腔相似. 其次, 粉尘或更细的黏粒等杂质侵入沙粒表面的孔洞所产生的阻尼作用, 可导致鸣沙共鸣机制丧失而变为哑沙. 因此, 清除石英颗粒表面各种细小杂质对多孔结构的污染是恢复哑沙发声的有效途径.

关键词 鸣沙 石英颗粒表面结构 形成机制 亥姆霍兹共鸣腔

鸣沙又称为响沙、哨沙或音乐沙, 主要分布在海滩和沙漠中, 尤以沙漠鸣沙最为罕见. 被认为是一种神奇的自然现象, 而成为一种重要的旅游资源. 自 20 世纪初以来, 国外已有十几个国家发现鸣沙资源的报道 [1~5], 但由于人为不合理的过度滑沙, 而今都已久负盛名, 丧失其发声特性. 我国是记载鸣沙最早的国家, 东汉《三秦记》中对敦煌鸣沙已有记述: “人欲登峰, 必步下入穴(指沙井, 即今月牙泉), 即有鼓角之声, 振动人足”. 如宁夏中卫县沙坡头、甘肃敦煌市月牙泉的鸣沙因沉默多年而失去旅游价值. 现存的敦煌鸣沙山和新发现的巴丹吉林鸣沙等, 目前虽然还是世界鸣沙旅游的圣地, 但如果不加以科学保护, 很快会失去鸣声. 而要从技术上解决鸣沙资源的保护、恢复和开发问题, 必须查明鸣沙石英颗粒表面结构特征及其发声机制.

我国对鸣沙真正科学意义上的考察研究是在 20 世纪 80 年代末 90 年代初才开始的, 且多侧重于鸣沙景观描述, 对鸣沙机理也有所推测. 其中马玉明等 [6,7]

推测认为, 高大沙山月牙形背风坡丘间地水的蒸发作用形成的蒸汽墙和冷气墙, 与沙脊线附近日晒形成的热气墙构成一个天然的共鸣箱. 当沙丘被人畜扰动或在风的吹动下发出的响声, 经其鸣箱共振放大而成鸣沙. 对鸣沙的这种奇特性早已引起许多国外学者的浓厚兴趣, 从 20 世纪初以来, 先后对鸣沙发声机理作过多种推测, 提出 6 种主要理论: ① 威尔逊的摩擦理论认为声音是由大量洁净沙粒摩擦产生的; ② 博尔顿的气垫理论认为声音是被弹性气垫隔开而互不接触的沙粒发生振动作用造成的; ③ 库尔哈拉的喷气理论认为声音是沙子快速受压时喷射的空气引起的; ④ 拜格诺的剪切面理论认为声音是由剪切面上过载沙粒的垂直振动引起的; ⑤ Hidaka 等 [8] 的黏结滑动理论认为声音是由黏结滑动摩擦引起的振动造成的. ⑥ 彼得洛夫的压电理论认为, 由于石英晶体具有压电性质, 一旦受挤压便会带电, 而在电的作用下所产生的往复伸缩振动而发声 [9]. 这些推测性理论对鸣沙研究虽有启迪和拓宽思路的积极作用,

收稿日期: 2006-07-14; 接受日期: 2006-09-12

国家自然科学基金(批准号: 49671021, 40501066)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: G1999043505, 20000487)共同资助

* 联系人, E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn

但都缺乏令人信服的证据. 为了研究这个问题, 不少学者转向对鸣沙颗粒表面结构的实验研究. 目前大致出现 3 种观点: ① Lewis^[9], Bagnold^[10], Haff^[11]等认为鸣沙是靠单一光滑表面的石英沙粒的摩擦而发声, Bagnold^[12]曾用极圆的被称之为“冰冻的水珠”的人造玻璃珠进行实验, 但始终未能使其发声, 更不能解释夏威夷考爱岛由珊瑚及贝类微粒构成的鸣沙. ② Shigeo Miwa等^[13]认为鸣沙发声与沙粒表面物理、化学性质有关, 但并未指出是哪种具体的物理、化学性质. ③ Goldsack等^[14]认为鸣沙发声来源于沙粒表面沉积的SiO₂凝胶, 其理由是: 鸣沙不仅有SiO₂凝胶存在, 而且其表面SiO₂凝胶与工业硅胶具有相同的表面化学组成和相同的发声频谱. 实际上任何沙粒表面SiO₂凝胶与工业硅胶都具有相同的化学组成, 但不能解释为什么有的沙粒发声而有的沙粒不发声. 因此, 作者等^[15,16]根据 20 世纪 90 年代中后期的初步实验结果提出影响鸣沙发声的根本原因不在沙粒表面的化学组成而在于沙粒表面多孔的物理结构. 为进一步论证这个问题, 现将最近对不同国家和地区的普通沙漠沙、海滩沙及部分鸣沙和哑沙的冲洗实验及表面覆盖实验结果做一综合报道.

1 实验方法和样品选择

实验采用麦克风、示波器及声学测试系统, 实验中将相同重量(50 g)的样品放入光滑玻璃容器内, 容器下垫有 10 cm厚的聚苯乙烯泡塑料板, 以避免与桌子发生共振, 然后用长度为 8 cm、直径为 1.9 cm的玻璃棒来冲击沙子(平均冲击速度为 10~20 cm/s). 沙子的发声信号由传声器将声压信号转化为电压信号, 经信号调制获得阻抗匹配滤去噪音的放大信号后, 通过 12 位模/数转换成数字信号进入计算机, 再经数字信号处理程序分析后, 由显示器和打印机输出 3 个信号表征参量: 波形、均方根值、能量谱密度. 采用该发声装置的依据在于: 干扰噪音的主频率范围在 1500 Hz以上, 而鸣沙发声信号的主频率在 1000 Hz以内^[15,16]. 因此采用低通滤波技术, 即可消除干扰噪音. 冲洗沙实验选用球磨机, 震荡器以及模拟冲洗作用的冲洗机. 实验样品主要采自日本、澳大利亚、科威特和中国等国家和地区的普通沙漠沙、海滩沙及部分鸣沙区的鸣沙和哑沙. 并利用扫描电镜(SEM)对沙粒表面微结构进行观察分析.

2 鸣沙表面结构与共鸣机制

2.1 冲洗实验

将采自腾格里沙漠、澳大利亚沙地、科威特沙漠的普通沙漠沙, 海南岛海滩沙以及日本海滩的哑沙和敦煌鸣沙山的鸣沙, 置于盐酸(HCL)中浸泡 1 h, 再置于震荡器冲洗 4 h, 每隔 1 h用蒸馏水洗净并烘干, 将冲洗过的样品进行声发射测试, 结果发现, 经冲洗的普通沙均发出与鸣沙相同的频率(400~900 Hz)(图 1).

2.1.1 信号波形

声压信号波形是样品受到玻璃棒冲击激励时, 判断产生声发射的最直观依据. 从图 2 显示的 3 种样品的声压信号波形可以看出, 海滩冲洗沙(以下简称冲洗沙)和敦煌鸣沙都产生了明显的瞬态声压信号, 说明这 3 种样品在一定的外力激励条件下, 能够产生声音效果. 从波形幅值定性判断出这 3 种样品的声压信号强度依次减弱, 而未冲洗的海滩沙(简称海滩沙)产生的声压信号极弱.

2.1.2 信号均方根值(R_{ms})

为定量描述样品声压信号的强弱, 计算出各样品声压信号的均方根值(R_{ms}), 见表 1. 从表 1 中样品声压信号的均方根值可以看出: 冲洗后的海滩沙比未冲洗的海滩沙声压信号强, 敦煌鸣沙比未经风力作用的原生沙声压信号强. 为了增加对声发射机理的理解, 并进而探求样品颗粒表面结构对声发射贡献, 还实验分析了声压信号的能量谱密度, 确定出信号的主频率(图 3)和对应的能量谱密度值(表 2). 从表 2 可以看出, (1) 冲洗后的海滩沙比敦煌鸣沙有着较宽的主频率分布范围, 而敦煌鸣沙的主频率分布却相对集中.

(2) 经过人工冲洗 500 h 的海滩沙不仅有较宽的主频率分布范围, 而且比未冲洗的海滩沙有着较强的声压信号(R_{ms} 冲洗沙=0.125×10², R_{ms} 未冲洗沙=0.760×10). 其原因在于, 一方面, 海滩沙因受风、水两相搬运介质作用, 石英沙表面(图 4(a))具有代表海滩环境的水下撞击的 V 形坑(直径 100~160 μm)和新月形坑. 另一方面, 经冲洗后的海滩沙比未冲洗的海滩沙表面光滑, 无 SiO₂ 沉淀和有人为冲洗作用改造的较密集的 V 形坑. (3) 敦煌鸣沙石英沙颗粒边缘

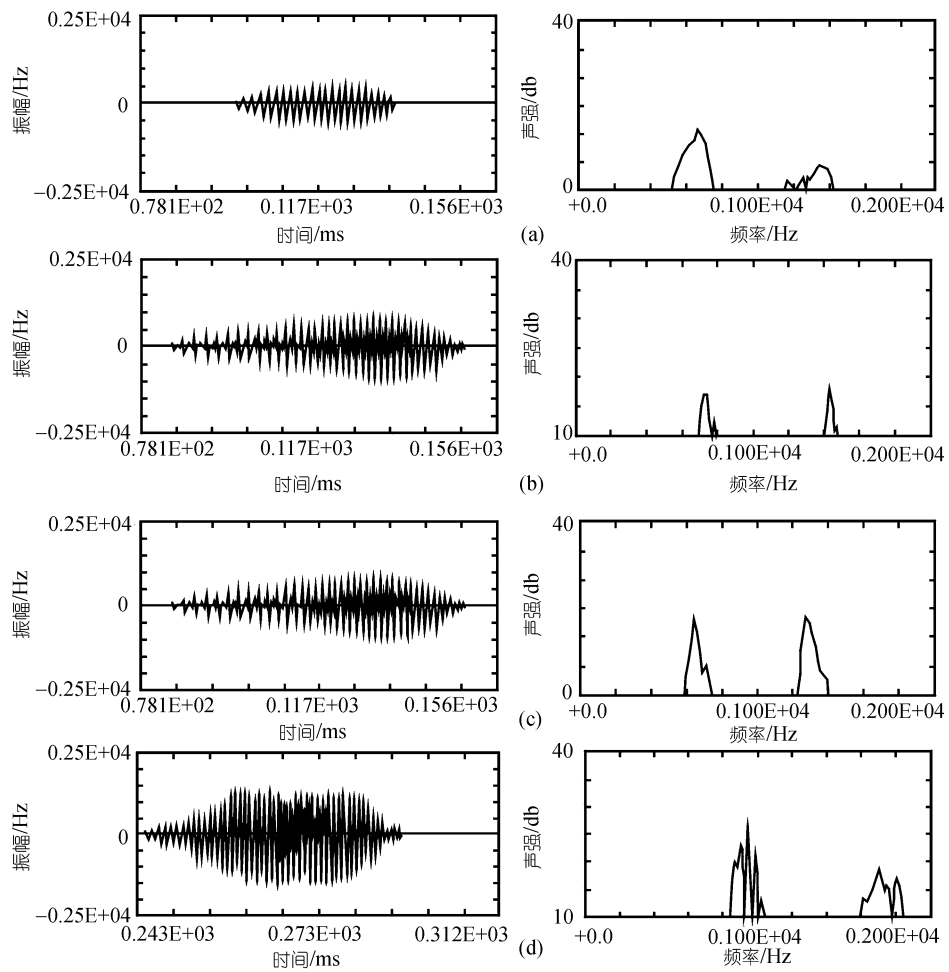


图 1 冲洗沙的声学测试
(a) 腾格里沙漠冲洗沙; (b) 海滩冲洗沙; (c) 科威特冲洗沙; (d) 澳大利亚冲洗沙

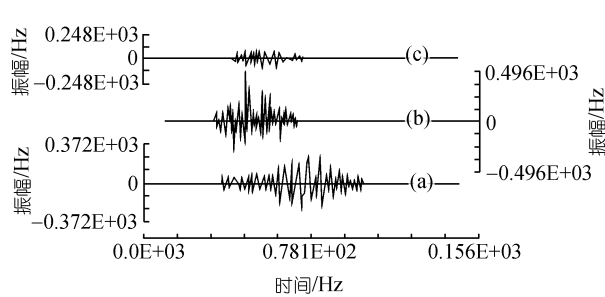


图 2 样品的声压信号分析
(a) 冲洗沙; (b) 敦煌鸣沙; (c) 海滩沙

钝化, 表面有风蚀环境下形成的形态不一的撞击坑, 并有典型的碟形坑(直径为 $52\text{ }\mu\text{m}$), 脊部有小的不规则撞击坑生成(图 4(b)). 也可能由于这种单一的表面结构才使得主频率分布比海滩沙集中, 且随冲洗时间的增长, 声压增强. 腾格里沙漠哑沙复鸣的冲洗实

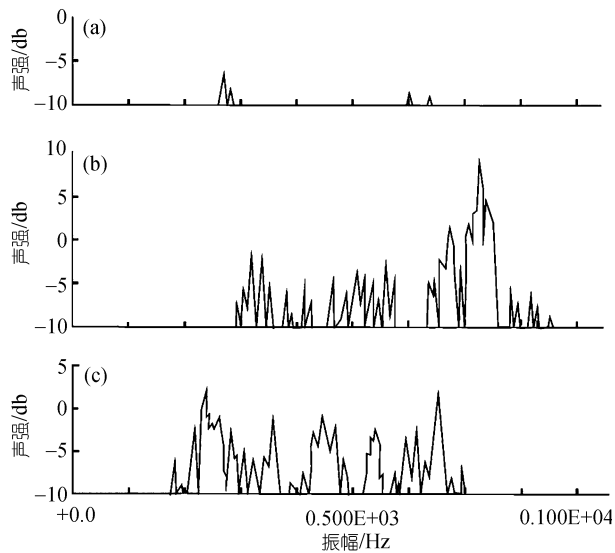


图 3 信号频域特征
(a) 冲洗沙; (b) 敦煌鸣沙; (c) 海滩沙

表 1 样品声压信号均方根(R_{ms}) (单位: Pa)

类型	冲洗沙	敦煌鸣沙	海滩沙	原生沙
均方根值	0.215×10^2	0.159×10^2	0.760×10	0.690×10
信号强弱		强→弱		

表 2 样品声压信号主频率分布

样品类型	主频率/Hz		
冲洗沙	242.50	672.50	462.50
敦煌鸣沙	765.0	712.50	332.50

验也证明了这一点(图 5, 6).

2.1.3 冲洗残留物分析

对冲洗残留物粒度分析结果表明(图 7), 残留物

的粒度主要以粉黏粒组成 ($<0.063\text{ mm}$), 且随着冲洗时间的延长, 细粒含量增多, 表现出典型的负偏态. 冲洗残留物主要由片状矿物组成(图 8). 经X衍射分析, 冲洗残留物主要由伊利石、石英、绿泥石、蒙脱石、方解石及少量长石等矿物组成(图 9). 因此, 这些片状的黏土矿物的阻尼作用是造成鸣沙沙声衰竭的主要因素, 而并非Nori等^[17]认为的轴承效应.

2.2 玻璃微珠表面化学溶蚀实验

选用工业生产的粒径为 $0.08\sim0.1\text{ mm}$ 的玻璃微珠, 首先经氢氟酸(HF)浸泡, 然后用蒸馏水洗净烘干. 在玻璃棒冲击激励下, 这种经处理过的表面无 SiO_2 凝

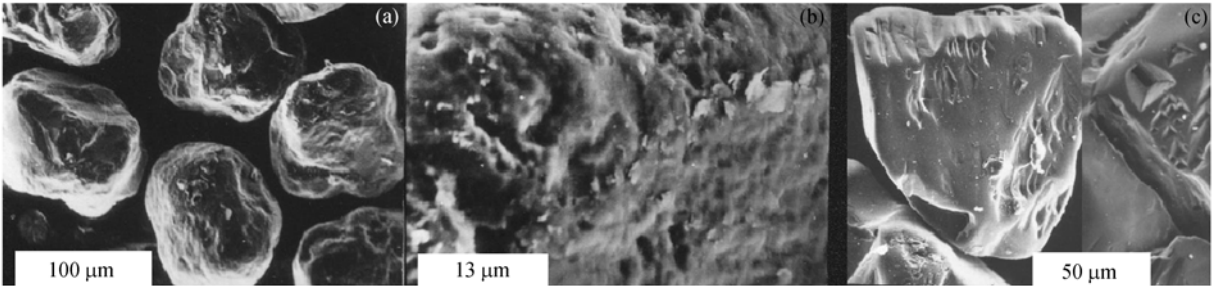


图 4 冲洗沙的 SEM
(a), (b) 敦煌沙漠鸣沙; (c) 冲洗后的海滩鸣沙

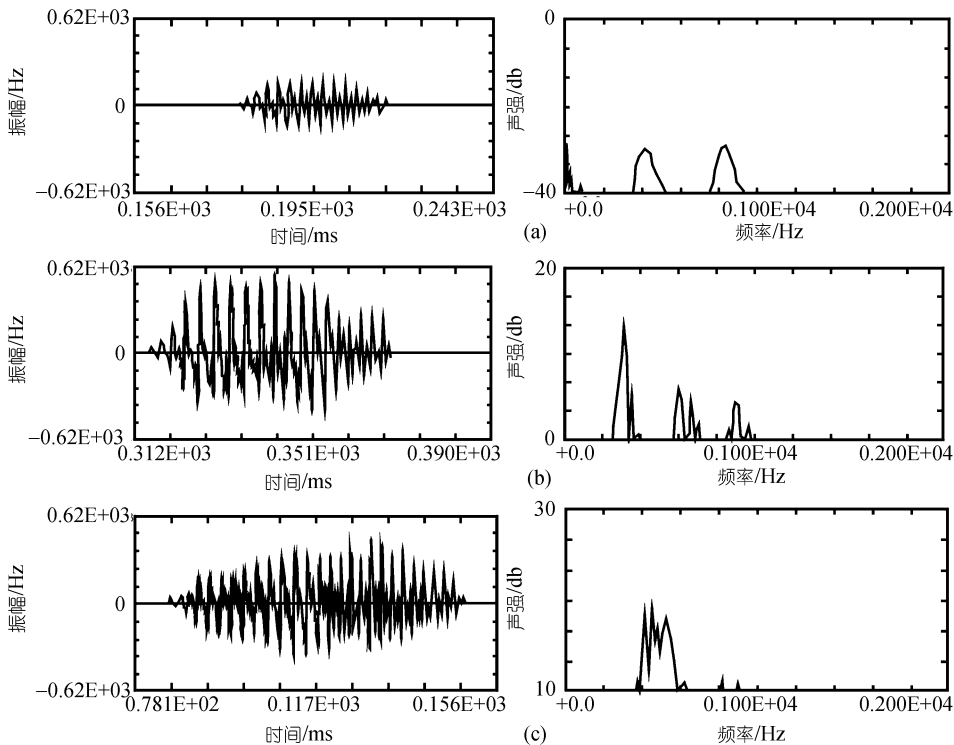


图 5 腾格里沙漠哑沙复鸣冲洗实验
(a) 哑沙冲洗 2 h 后的声频; (b) 哑沙冲洗 4 h 后的声频; (c) 哑沙冲洗 6 h 后的声频

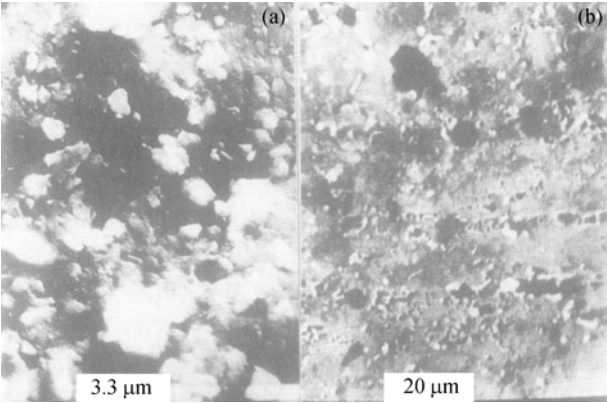


图 6 腾格里沙漠哑沙复鸣的 SEM
(a) 冲洗前; (b) 冲洗后

胶的玻璃微珠, 却发出悦耳的鸣声, 其频谱居然与鸣沙完全一致(图 10), 在 SEM 下, 我们发现经 HF 处理的玻璃微珠表面有较多的孔洞, 而不发声的未经处理的玻璃微珠却缺乏这种表面结构(图 11). 这表明, 玻璃微珠的发声与表面有无 SiO_2 凝胶无关, 只与其表面有较多的孔洞结构有关.

2.3 表面结构覆盖实验

为进一步了解表面结构对鸣沙声发射的贡献, 首先用表面含羟基($-\text{OH}$)的硅凝胶(SiO_2 、粒度 $20\sim 35\ \mu\text{m}$, 含量 35% SiO_2 , PH3)^[18], 浸泡哑沙 2 h, 倒去上部清液, 再在 105°C 下搅拌烘干, 结果哑沙发出鸣沙

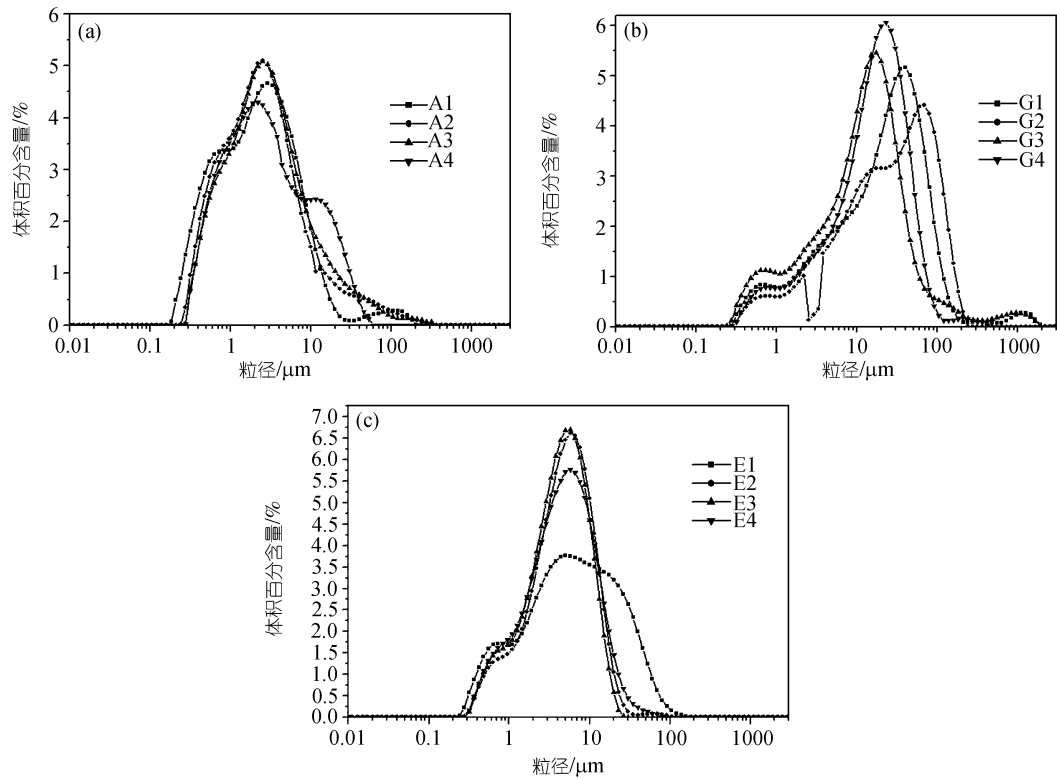


图 7 冲洗 8 h 后复鸣的沙坡头哑沙残留物的粒度组成

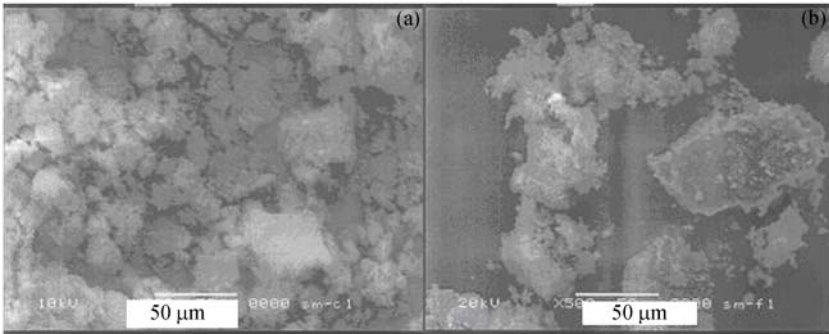


图 8 冲洗 8 h 后复鸣的沙坡头哑沙残留物的 SEM 分析

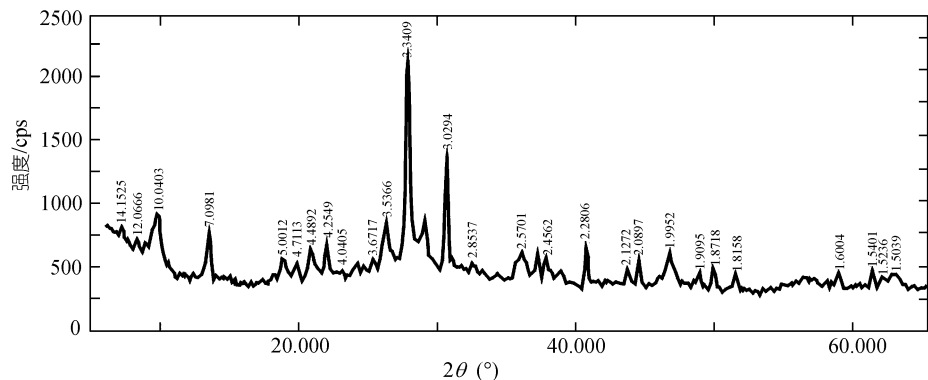


图 9 冲洗 8 h 后复鸣的沙坡头哑沙残留物的 X 衍射

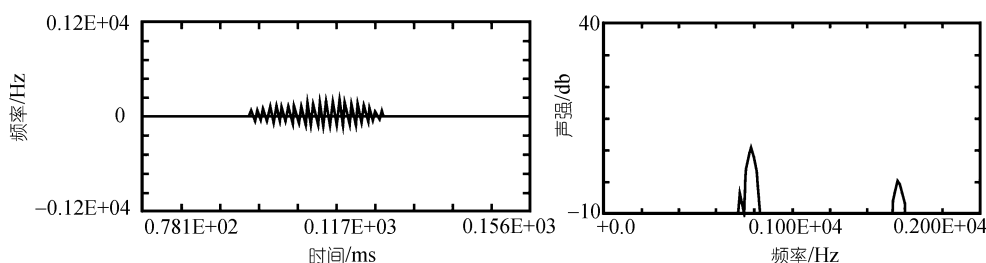


图 10 经 HF 处理的玻璃微珠声频

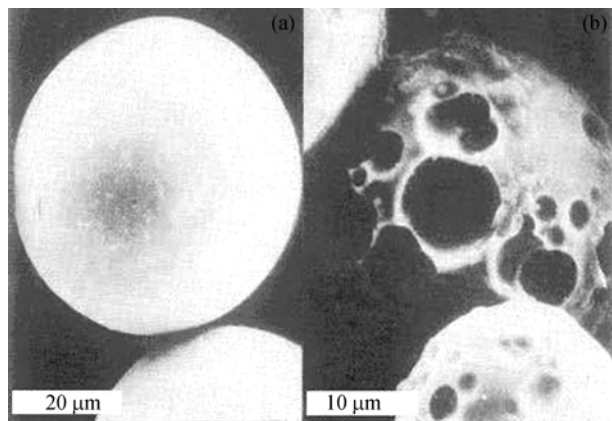


图 11 未经 HF 处理(a)与处理(b)的玻璃微珠 SEM

声音。接着又在鸣沙表面,涂上带有羟基的苯酚($[\text{O}]^{\text{OH}}$),即把苯酚溶解于丙酮中,然后,再来浸泡鸣沙 2 h,倒去上部清液,然后在 105°C 下搅拌烘干,结果鸣沙丧失了响声。最后又用甲醇氯仿丙酮依次洗涂有苯酚的哑沙,再在 105°C 下烘干,哑沙再次发声。由此可见,羟基不是哑沙复鸣主要原因,鸣沙变哑和再复鸣与丙酮挥发,苯酚附着于沙子表面,覆盖了鸣沙表面的坑(孔)状结构有关。从而更进一步证实并非羟基而是沙粒表面孔状结构是鸣沙发声的主要原因。

2.4 苯乙稀二乙稀苯多聚合物和玻璃珠声学实验

道格拉斯认为由于鸣沙与工业硅胶有着相同的

表面化学组成(羟基)和相同的频率^[14],为证明鸣沙发声与羟基无关,特选用表面带与不带羟基的非 SiO_2 有机材料苯乙稀二乙稀苯多孔聚合物($0.125\sim 0.3\text{ mm}$),并把玻璃珠(成份 SiO_2)用硅胶浸泡。在玻璃棒冲击激励下,发现表面带有羟基的苯乙稀二乙稀苯多孔聚合物与表面不带羟基的未经化学处理的苯乙稀二乙稀苯聚合物多孔原料(图 12)及经硅胶浸泡的玻璃珠(图 13),都发出了与鸣沙相同的频谱。从而证明了这 3 种材料的发声与表面化学组成不同无关,只与其表面都具有多孔的物理结构有关(图 14)。英国著名风沙物理学家 Bagnold 曾用极圆的人造玻璃珠进行摩擦实验,而未能使其发声的原因,是由于人造玻璃球缺乏这种表面多孔结构。

3 结论

(i) 鸣沙发声与沙粒表面有无 SiO_2 凝胶无关,也与其表面的化学组成无关,而与其表面多孔(坑)状的物理结构有关。由此看来自然沙粒表面由风蚀、水蚀、化学溶蚀及硅凝胶沉淀等多种因素所形成的多孔(坑)状结构所构成的共鸣腔,才是鸣沙发声的关键所在。其共鸣机制与亥姆霍兹共鸣腔相似^[19]。在外力作用下,无数表面光滑多孔的球状颗粒,在运动过程中因互相摩擦、碰撞而产生极微弱的振动声响,经大

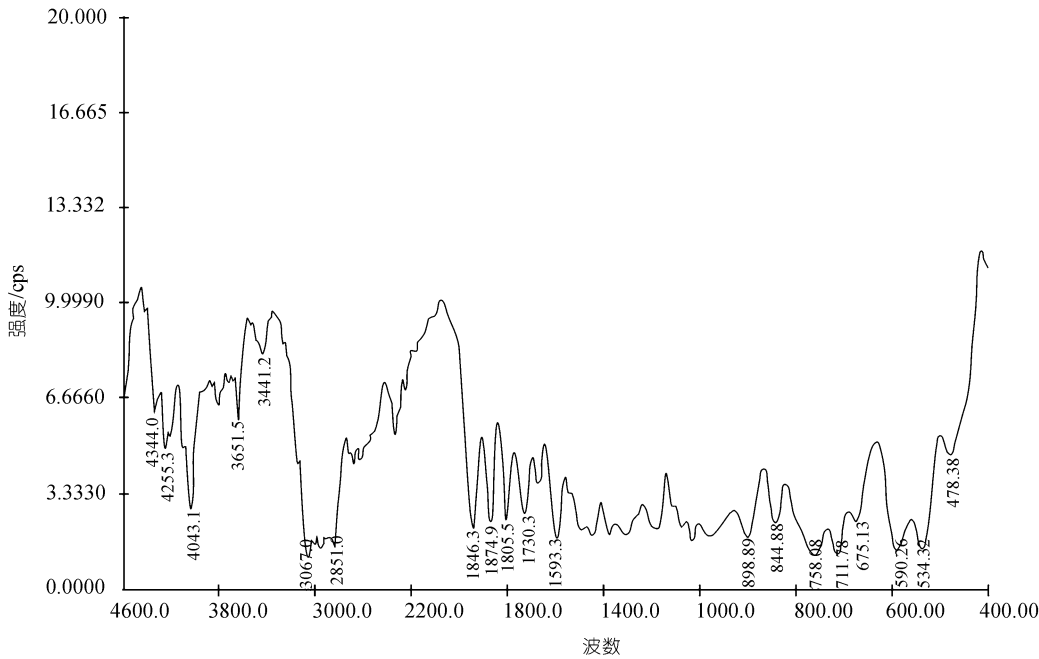


图 12 表面不带羟基的苯乙稀二乙稀苯多聚合物红外分析

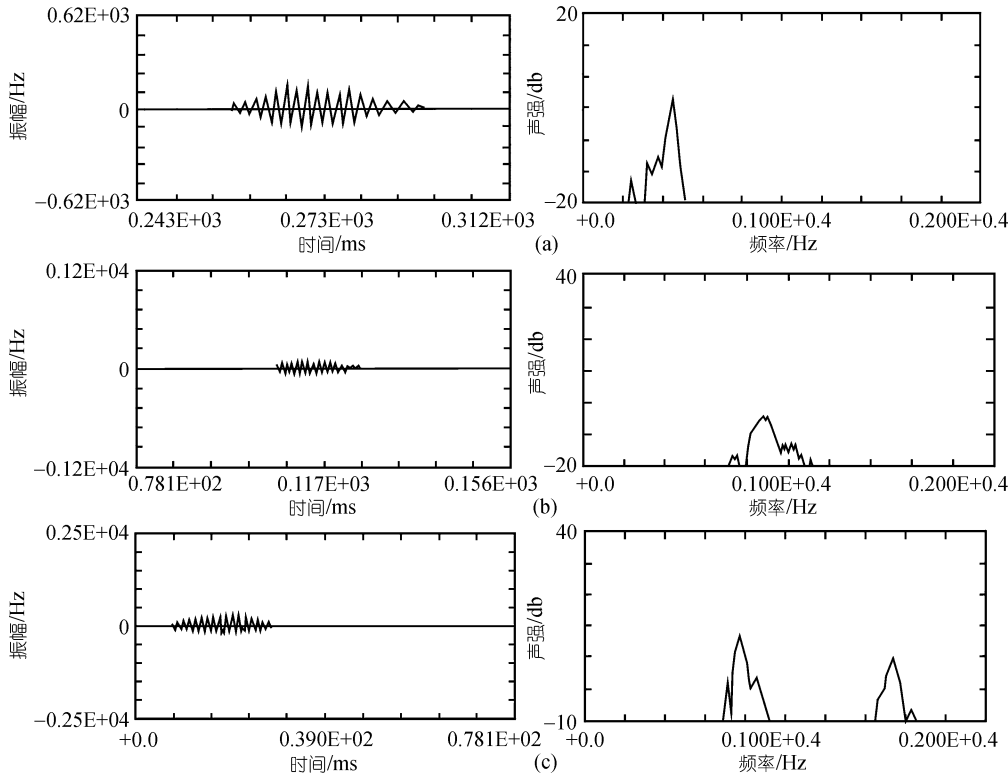


图 13 表面带有羟基的苯乙稀二乙稀苯多孔聚合物、表面不带羟基的未经化学处理的苯乙稀二乙稀苯多孔聚合物及经硅胶浸泡的玻璃球的声学测试

(a) 表面带羟基的苯乙稀二乙稀苯多聚合物; (b) 表面不带羟基的苯乙稀二乙稀苯多聚合物; (c) 经硅胶浸泡的玻璃球

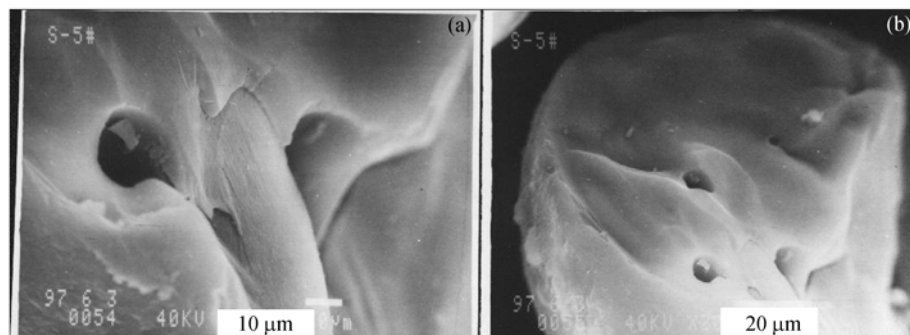


图 14 表面不带羟基的苯乙稀二乙稀苯多孔聚合物 SEM 分析

量的表面空腔共振放大,从而使人耳接收到运动沙粒的发声频谱。

(ii) 粉尘对鸣沙发声具有阻尼作用,如果在自然界中,粉尘或更细的黏粒等杂质侵入沙粒表面的孔洞时,由其所产生的阻尼作用,可导致鸣沙共鸣机制丧失而变为哑沙。

(iii) 自然界中沙漠石英颗粒表面 SiO_2 凝胶及多孔(坑)状结构存在普遍,而鸣沙现象却十分罕见的原因,可能与石英沙粒表面多孔结构被各种细小杂质污染所致,因此,清除石英沙粒表面各种细小的污染杂质是恢复哑沙发声的有效途径。

(iv) 通过野外观测和室内实验,依据亥姆霍兹共鸣腔理论的共振频率分析,今后需进一步开展对鸣沙多孔(坑)状物理结构所构成的共鸣腔的理论推算和模型分析,从而推算出鸣沙的发生频率。进而完善理论推算鸣沙共鸣机制的亥姆霍兹共鸣腔理论。

当然鸣沙之所以能鸣响,除了与其表面的特殊结构直接有关外,还需要一定的外部条件,如沙丘坡度、沙粒均匀度、水分含量、堆积体的空隙率等因素都会影响鸣沙的发声。如沙丘坡度很小,沙子就不能在外力作用下产生滑动撞击发声;沙粒大小不均匀,特别是粉尘和含水量大堵塞沙粒表面孔洞,即使发声也不能产生共鸣放大等等。但鸣沙颗粒表面的“蜂窝”状孔洞结构是其鸣响的最重要的内在因素。也就是说,若沙粒表面没有这种特殊的结构,在任何环境和外力作用下都不会鸣响。因此,限制鸣沙旅游区人为过度活动和清除石英沙粒表面各种细小杂质对多孔结构的污染是鸣沙资源保护和鸣沙旅游开发的有效途径。

致谢 法国国家科学研究中心巴黎物理研究所的 Stephane Douady 博士对本文提出了宝贵的修改意见,

在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 张林源,王乃昂.中国的沙漠和绿洲.兰州:甘肃教育出版社,1994.67—73
- 2 三轮茂雄,等.鸣沙.屈建军,译.世界沙漠研究,1992,3:8—12
- 3 三轮茂雄.鸣沙的幻想(日文).东京:近代文艺出版社,1982.80—90
- 4 三轮茂雄.鸣沙的幻想(日文).东京:近代文艺出版社,1994.43—101
- 5 马瑞俊.我国古籍中有关鸣沙现象的记述.中国沙漠,1994,14(1):93—96
- 6 马玉明.响沙、沙响与共鸣箱之奥秘.内蒙古林业科技,2000,4:10—14
- 7 王进玉.鸣沙奇观的奥妙.科学与文化,1990,1:35
- 8 Kyoshin Nishiyama Senji Mori.鸣沙的发声频率.周纪侠,译.世界沙漠研究,1993,1:48—51
- 9 Lewis A D. Roaring sands of the Kalahari Desert. J Geogr, 1936, 19: 33—49
- 10 Bagnold R A, 著.风沙和荒漠沙丘物理学.钱宁,林秉南,译.北京:科学出版社,1959.238—239
- 11 Haff P K. Booming dunes. Amer Sci, 1986, 74: 377—381
- 12 Bagnold R A. The booming sand of Korizo, Shihara and the squeaking sand of Gower, S. Wales: a composition of the fundamental characteristics of Two musical sands. Sedimentology, 1966, 6: 135—152[DOI]
- 13 Shigeo Miwa, Qu J J, Toshimasa Dzak. Discovery of active booming dunes in Badain-Jaram Desert in China as a model of clean environment. J desert Res, 1996, 16(3): 266—268
- 14 Goldsack D R, Leach M F, Kilkenney C. Natural and artificial singing sands. Nature, 1997, 386: 29[DOI]
- 15 屈建军,孙波,张伟民,等.鸣沙石英颗粒表面结构及其声学意义.科学通报,1995,40(12):1111—1113
- 16 屈建军,孙波,王远平,等.鸣沙石英颗粒表面结构与鸣沙形成机制.科学通报,1997,42(19):2124—2126
- 17 Nori F, Sholtz P, Brets M. Booming sand. Sci Am, 1997, 275: 66—69
- 18 沈钟,王国庭.胶体与表面化学.北京:化学工业出版社,1991.221—252
- 19 陈通.亥姆霍兹共鸣器.中国大百科全书,物理 1.北京:中国大百科全书出版社,1987.523