

仿生镇压辊

佟金¹ 张清珠²

(1 吉林大学 生物与农业工程学院和工程仿生教育部重点实验室 130025;

2 湖州师范学院 工学院 313000)

镇压辊是农业机械中典型的滚动触土部件，用于压实土壤。无论是传统耕作还是保护性耕作，土壤压实作业都是影响作物产量的重要因素之一。播种后镇压可以增加种子带的土壤密度，减少土壤中的大孔隙，加强土壤毛细管作用，适当提高地温，也可对种子在土壤中的深度差异进行微调节，使种子播深趋于一致。研究表明，适当的压实可以提高作物产量。

理想的镇压辊应该在满足压实的前提下，保证转动灵活，不黏土，不壅土，不打滑，镇压力可适当调整，镇压后地表不产生鳞状裂纹，具有较低的滚动阻力。但是传统镇压辊材料多为石材、铸铁或钢材，其触土表面在宏观上是普通光滑的，作业时很容易黏附土壤（图1），增加对土壤的扰动和破坏，使种床土壤失墒严重，影响种子发芽，而且传统镇压辊作业过程中会将一部分土壤推到镇压辊前方，形成波浪状凸起，即“拖堆壅土”现象。这不但使镇压辊达不到镇压的目的，还会使镇压辊多消耗功来推移隆起的土壤，而且会导致种子间距分布不均，进而影响植株田间分布均匀性，造成作物减产。

为了解决传统镇压辊作业过



图1 传统镇压辊作业过程中的黏附现象



图2 雌性臭蜣螂。(a) 俯视图；(b) 侧视图；(c) 前视图

程中的黏土和壅土现象，我们将目光转向自然界寻找启示，探寻大自然中的生物体如何解决类似的问题，并试图在自然界找到具有启发性的答案。研究发现，臭蜣螂（*Copris ochus* Motschulsky），即俗称的屎壳郎，是一种典型的土壤洞穴动物（见图2），它在挖洞、推滚粪球等作业过程中身体表面不黏粪或土，发现臭蜣螂体表的几何结构是其减黏脱土的重要因素之一。臭蜣螂不同部位具有不同的几何结构，在臭蜣螂头和足与土壤挤压、摩擦较严重的部位形成为凹坑型几何结构，在前胸背板等与土壤接触压力较小的身体部位形成凸包型几

何结构，在腹部的纵切面具有脊状型几何结构，在腹侧面具有肋条型几何结构（见图3）。

选择臭蜣螂腹侧面的几何结构作为仿生设计的学习对象，设计出与臭蜣螂腹侧面相似的仿生肋条型几何结构，并结合使用疏水材料超高分子量聚乙烯（UHMWPE），通过螺纹紧固的方式将仿生肋条型几何结构固定在镇压辊的表面，设计出9种仿生肋条型几何结构镇压辊，以期达到防黏减阻、防壅土的效果，设计思路如图4。

穿山甲（*Manis Pentadactyla*）穴居在树林潮湿地带，具有极强的挖洞本领，其体表分布着鳞片形几

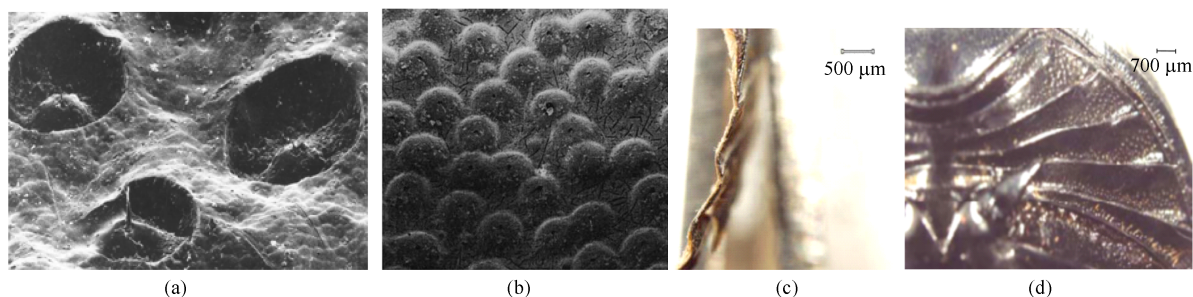


图3 臭蜚螂体表的几何结构。(a)头部的凹坑型结构；(b)前胸背板的凸包型结构；(c)腹部纵切面的脊状型结构；(d)腹侧面的肋条型结构

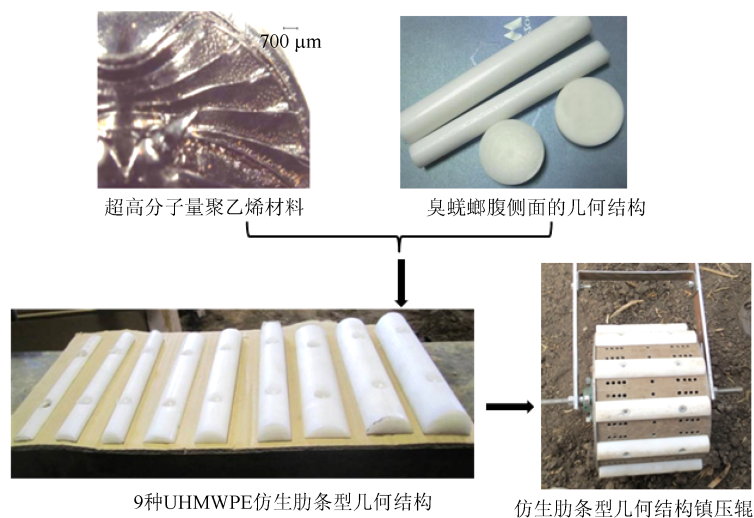


图4 仿生肋条型几何结构镇压辊设计思路

几何结构镇压辊在2种土壤含水量和3种载荷下的作业性能，遴选出仿生几何结构镇压辊参数的最优组合，得到了防黏减阻、防壅土效果最好的仿生几何结构镇压辊，确立镇压辊防黏减阻的仿生表面设计原则。试验结果表明，在所设计的9种仿生肋条型几何结构镇压辊中，仿生肋条型几何结构镇压辊参数组合为：仿生肋条结构的底面宽度为40 mm，高宽比为0.3 mm，载荷为300 N，面积比为50%（即镇压辊表面分布12个仿生肋条结构）时

何结构，见图5。从图中可以看出，穿山甲鳞片裸露部分形状为对称的六边形，单体覆瓦状分布在体表，不同行的鳞片交叉排列。针对传统镇压辊作业时容易出现壅土现象，受穿山甲体表鳞片这种多边形几何结构的启发，改变镇压辊圆柱体的传统形状，将镇压辊柱面设计成正多面体结构，设计出3种仿生多面体型几何结构镇压辊，以期达到防止壅土的效果，设计思路如图5。

在吉林大学工程仿生教育部重点实验室的室内土槽进行试验，以镇压辊黏附土壤量、牵引阻力、种子粒距变化率和土壤容重为指标，对比了传统镇压辊与仿生肋条型几何结构镇压辊和仿生多面体型

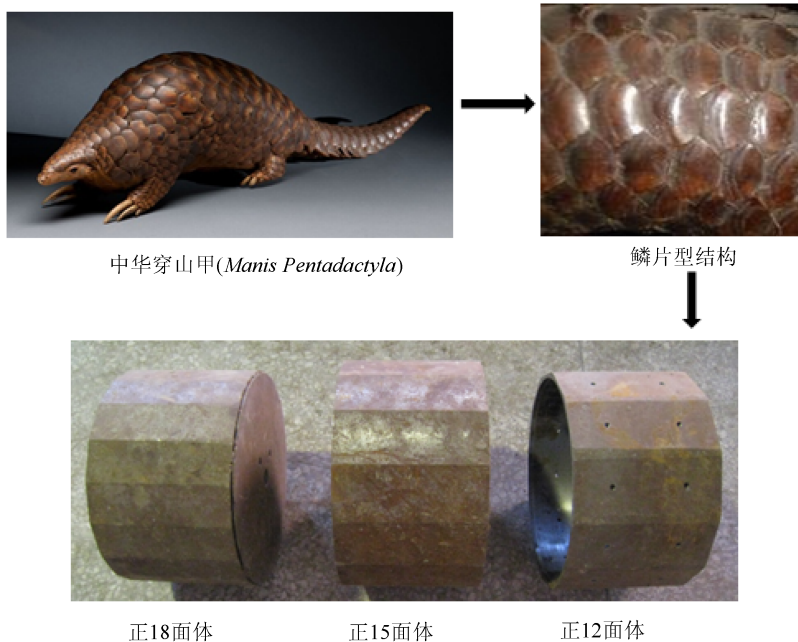


图5 仿生多面体型几何结构镇压辊设计思路

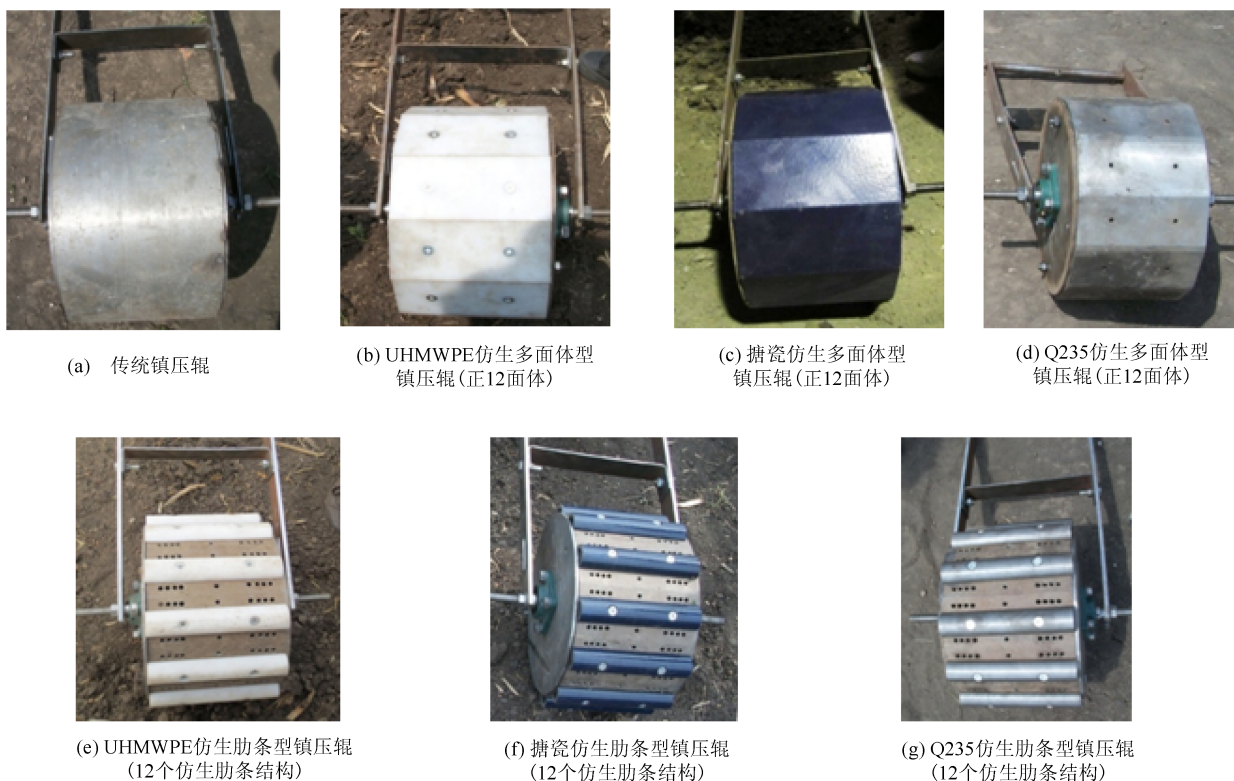


图 6 试验用镇压辊

防黏减阻、防壅土效果最佳；在所设计的 3 种仿生多面体型几何结构镇压辊中正 12 面体仿生几何结构镇压辊的防壅土效果最好，但无法起到防粘减阻的作用。

为实现正 12 面体仿生几何结构镇压辊的防粘减阻效果，将 UHMWPE 材料和搪瓷涂层这 2 种材料应用到正 12 面体仿生几何结构镇压辊（如图 6），同时将土槽试验优化得到的仿生肋条型几何结构镇压辊的肋条结构分别采用普通低碳钢（Q235 钢）和搪瓷涂层材料，并与土槽试验优化得到的采用 UHMWPE 材料的仿生肋条型几何结构镇压辊进行对比，考察材料对仿生几何结构镇压辊防黏减阻的影响。结果表明，将 UHMWPE 材料和搪瓷涂层材料应用到正 12 面

体仿生几何结构镇压辊后，其黏附土壤量和牵引阻力均低于传统镇压辊，且当采用 UHMWPE 材料时减黏效果最好，而当采用搪瓷涂层材料时正 12 面体仿生几何结构镇压辊的牵引阻力最低；对于仿生肋条型几何结构镇压辊来说，无论采用哪种材料，其黏附土壤量和牵引阻力均低于传统镇压辊，且采用 UHMWPE 材料时黏附土壤量最低；采用搪瓷涂层材料时牵引阻力最低，其次是 UHMWPE 材料，最后是 Q235 钢。

为进一步考察仿生几何结构镇压辊能否满足农艺要求，在吉林农业大学试验田进行了田间试验。以牵引阻力、土壤容重、种床土壤含水量的变化趋势、株距变化率和出苗率为试验指标，对比了传统镇

压辊和 6 种仿生几何结构镇压辊在 3 种载荷和 2 种作业速度下的田间作业效果。结果表明：（1）载荷是影响各试验指标最显著的因素，试验中所有镇压辊对应的牵引阻力、土壤容重、株距变化率和出苗率均随载荷的增大而增高，且载荷越大，所有镇压辊压后的种床土壤散失的水分越少。（2）所有镇压辊对应的牵引阻力和土壤容重均随作业速度的增高而减低。除 Q235 仿生多面体型几何结构镇压辊的牵引阻力略大于传统镇压辊外，其余 5 种仿生几何结构镇压辊的牵引阻力均低于传统镇压辊，且仿生肋条型几何结构镇压辊的牵引阻力低于仿生多面体型几何结构镇压辊。（3）传统镇压辊和 6 种仿生几何结构镇压辊均能达到适于玉（下转 50 页）

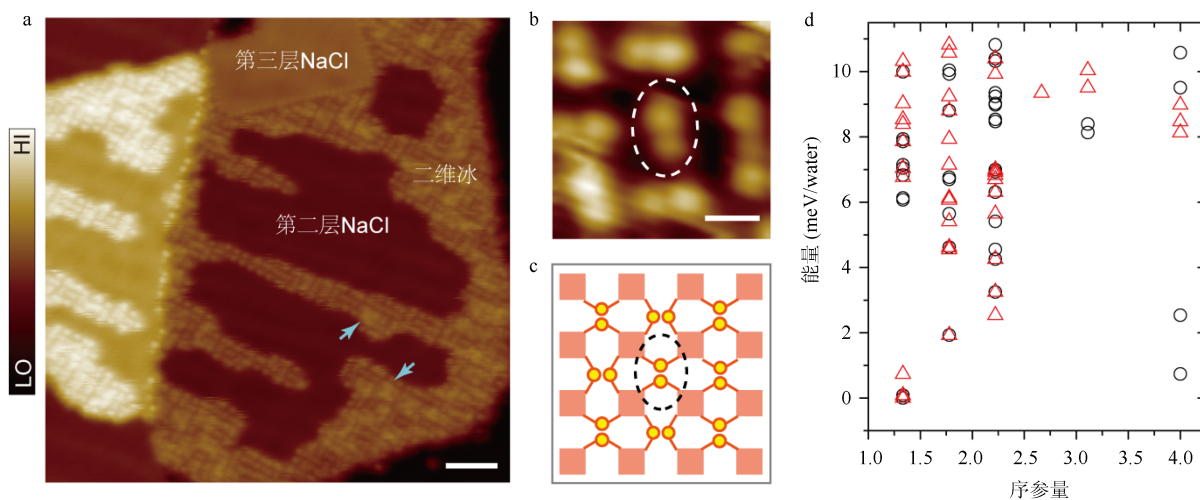


图9 在高覆盖度下形成的二维冰层。(a) NaCl (001) 表面二维冰的 STM 图像。(b) 二维冰结构的高分辨 STM 图像。(c) 二维冰结构的示意图。(d) 二维冰的能量与质子有序度的关系。(图片来自: *Nat. Commun.* 5, 4056 (2014))

4. 结语

利用扫描隧道显微镜研究表面冰的结构非常具有挑战性，最主要的困难来自于如何分辨出水分子间氢键的构型，这不仅需要判定水分子中氧原子的位置，还要求能识别氢原子的位置，也就是要求能在亚分子级水平上探测水分子在空间中的取向。江颖教授课题组在国际上首次实现了水分子的亚分子级分辨成像技术，从而为研究表面冰的微观结构提供了可能，下一步的重点是如何将水分子的亚分子级成像技术推广到其他固体表面，使其具有普适性。通过本文的介绍我们也可以看到，由于表面的复杂性，表面上冰层的结构要比体相的冰结构远远复杂。可以预见，随着高分辨的扫描隧道显微镜技术的推广和应用，人们将发现越来越多的不同于体相冰的冰结构，而这些奇异的表面冰结构又会有什么有趣的特性，等待着我们去探索

和挖掘。

作者简介

江颖，男，1982 年生于四川乐山，北京大学量子材料科学中心研究员、博士生导师，国家首批“万人计划”青年拔尖人才，北京大学仪器创制与关键技术研究学术委员会委员，中科院物理所表面物理国家重点实验室学术委员会委员，*Chemical Physics* 等国际著名期刊编委。在国际著名杂志上发表文章 20 余篇，其中第一作者或通讯作者文章包括: *Science* 1 篇，*Nature* 系列 3 篇，*Phys. Rev.* 系列 5 篇。

① Chen, J. et al. An unconventional bilayer ice structure on a NaCl(001) film. *Nat. Commun.* 5, 4056 (2014).

② Guo, J. et al. Real-space imaging of interfacial water with submolecular resolution. *Nat. Mater.* 13, 184–189 (2014).

(上接 33 页) 米生长的土壤容重，但仿生几何结构镇压辊与土壤的接地压强大，更容易压碎土块，使土壤孔隙度变小，加强土壤毛细管作用，从而利于下层水分向上传导和减缓水分蒸发，继而提高种子的出苗率。(4) 6 种仿生几何结构镇压辊压后的种床土壤含水量均高于传统镇压辊，在试验后的 3 天内，仿生肋条型几何结构镇压辊压后的种床土壤含水量蒸发的速

率低于仿生多面体型几何结构镇压辊。(5) 6 种仿生几何结构镇压辊对应的株距变化率明显小于传统镇压辊，且仿生肋条型几何结构镇压辊的株距变化率低于仿生多面体型几何结构镇压辊。(6) 虽然仿生肋条型和仿生多面体型几何结构镇压辊之间的出苗率无显著差异，但这 2 种仿生几何结构镇压辊对应的出苗率均高于传统镇压辊。