

DOI: 10.16078/j.tribology.2020210

提琴用松香室温摩擦学特性的试验性初探

屈荣^{1,2}, 胡钰沁³, 万翔⁴, 王廷梅², 华敏奇⁵, 王福民³, 姚瑞清¹, 王齐华², 吕晋军^{1,2*}

(1. 西北大学化学与材料科学学院 合成与天然功能分子教育部重点实验室, 陕西 西安 710127;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 陕西学前师范学院 化学化工学院, 陕西 西安 710100;

4. 西安音乐学院 管弦乐系, 陕西 西安 710061;

5. 兰州华汇仪器科技有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 松香是提琴类乐器的琴弓/琴弦间产生黏滑现象并导致琴弦自激振动的物理学基础. 本文作者简要归纳了与松香在提琴类乐器使用中相关的摩擦学内容, 初步讨论了评价松香摩擦学特性的试验方法, 包括摩擦磨损试验用样品及其制备方法, 以及摩擦磨损试验机的选择. 本文中以两种提琴类乐器用松香和一种工业用松香为研究对象, 主要考察了热熔法与溶剂法制备的松香涂层和松香块体试样的表面形貌等特征, 并探讨了这些特征对松香室温摩擦学特性结果的影响. 研究表明: 以溶剂法制备松香涂层为研究对象时, 摩擦磨损试验有较好的试验重复性; 减摩、黏滑现象和粉化磨损现象是松香涂层摩擦学行为的主要特征, 这些特征与制备工艺、涂层厚度以及对偶材料有关.

关键词: 松香; 提琴; 摩擦学特性; 黏滑; 粉化磨损

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)02-0251-09

Experimental Investigation on Tribological Property of Commercially Available Rosins for Violin Instrument at Room Temperature in Air

QU Rong^{1,2}, HU Yuqin³, WAN Xiang⁴, WANG Tingmei², HUA Minqi⁵, WANG Fumin³,
YAO Ruiqing¹, WANG Qihua², LU Jinjun^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Synthetic and Natural Functional Molecule of Ministry of Education, College of Chemistry and Materials Science, Northwest University, Shaanxi Xi'an 710127, China

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China

3. School of Chemistry & Chemical Engineering, Shaanxi Xueqian Normal University, Shaanxi Xi'an 710100, China

4. Department of Orchestra, Xi'an Conservatory of Music, Shaanxi Xi'an 710061, China

5. Lanzhou Huahui Instrument Technology Co, Ltd, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract: It is rosin that provides the physical basis of playing violin instruments, i.e. stick-slip between bow and string and hence the genesis of self-excited vibration of string. The tribological concept concerning rosin in playing violin instrument is briefly summarized in this study. Accordingly, the experimental investigation of rosin tribology on laboratory-based evaluation should include: (1) types of rosin, preparation and validity of samples for tribological tests, (2) choice of types of tribo-meters. Two kinds of commercially available rosins for cello and a kind of rosin for industry

Received 9 October 2020, revised 20 November 2020, accepted 7 December 2020, available online 28 March 2021.

*Corresponding author. E-mail: jjlu@nwu.edu.cn, Tel: +86-18706818687.

The project was supported by the National Science Foundation of China (51775434).

国家自然科学基金项目(51775434)资助.

application were chosen in this study. Two kinds of liquid-solid processes, i.e. melting-solidification and solvent-evaporation, were utilized to fabricate rosin coating and rosin bulk material. The tribological properties of the rosin coatings and rosin bulk material were evaluated on a reciprocating tribo-meter with a ball-on-disk configuration. Findings indicated that the data of the tribological property for rosin coating by solvent-evaporation were good in term of repeatability. The tribological properties of rosin were characterized as friction reduction, stick-slip, and dust wear. These were related to process of coating and bulk material, thickness of rosin coating, and counterpart material.

Key words: rosin; violin; tribological property; stick-slip; dust wear

从微观尺度到宏观尺度,黏滑现象都是摩擦学最基础的研究内容之一,消除黏滑现象与利用黏滑现象均有重要的实际应用价值.就摩擦致发声而言,强化黏滑现象则为提琴类乐器的发声提供了物理基础^[1-2];相反地,抑制或消除黏滑现象可以降低或消除列车轮/轨、汽车制动等导致的摩擦噪音^[3].在提琴类乐器的演奏中,琴弓与琴弦组成了1个摩擦副;理论与实践告诉我们:必须在琴弓上涂抹松香以增加琴弓与琴弦间的摩擦力,产生黏滑现象,方可使得琴弦产生自激振动,并在适当的条件下形成Helmholtz角运动,从而才能发出美妙的乐音^[1-2].迄今为止,就提琴类乐器而言,尚无松香的替代品.

然而,目前人们对松香的摩擦学特性知之甚少,相关文献非常有限.作为物理学家和提琴演奏者,J Woodhouse与其合作者研究了松香的摩擦学特性^[4-6],并期望通过对松香黏/滑特性的建模,从而实现提琴类乐器演奏性的优化^[7].通过有限的试验,J Woodhouse与其合作者先后用熔化模型^[4]、塑性屈服模型^[4]和剪切带模型^[5]讨论了松香的摩擦学行为背后的机理.需要指出的是,J Woodhouse采用的试验是基于弓弦乐器的特殊摩擦学试验架构,其摩擦学数据是常规摩擦磨损试验机所不能够得到^[4-6].文献^[4-6]中所使用的试验架构,仅以原型机的形式存在,其他的摩擦学家也很难复制出这样的试验装置,并使得数据具有对比性.而基于广泛采用的摩擦学评价方式,尚未应用于松香的摩擦学特性研究.正因为如此,由于缺乏摩擦学家的广泛参与,与其他摩擦学领域相比,松香的摩擦学研究进展缓慢.

松香摩擦学研究的意义不仅限于对提琴类乐器的发声原理方面.松香作为一类以枞酸类为主成分的非晶物质,其微结构和流变学特性(如黏温特性等)比较独特,值得做进一步的摩擦学研究,而摩擦学试验用材料的制备、试验方法的建立、对试验现象的观察以及对机理的认识均是大有裨益的.商品摩擦磨损试验机在普及性、通用性、重复性以及数据的可对比性等方面有较大的优势,使得摩擦学家广泛参与松香的

摩擦学研究成为可能.

基于此,本论文中以几种提琴类乐器用松香为研究对象,初步讨论了以常规摩擦磨损试验机评价松香摩擦学特性的方法,采用热熔法和溶剂法制备了松香涂层和松香块体材料,并考察了其在室温下的摩擦学特性,旨在为松香摩擦学特性研究打下试验的基础.

1 提琴类乐器用松香及其摩擦学分析

1.1 提琴类乐器用松香的种类与特点

尽管提琴类乐器用松香的品种众多(Pirastro、Andrea等)、种类众多(小提琴、中提琴、大提琴、低音提琴有各自专用的松香)以及色彩各异(出于美学的考虑),但其摩擦学功能均为擦涂弓毛以及激励弓毛与弓弦间的黏/滑现象.商品提琴类用松香一般为圆块状或者方块状,用细布包裹.提琴演奏家往往以松香的“软硬”、“粉末的粗细”、“黏性”等描述性的语言说明各种松香的差别.

从化学的角度看,提琴类乐器用松香是以枞酸及其异构体为主成分的混合物,其具体成分与原材料产地、制备工艺等密切相关^[8-9];可溶于有机溶剂,对水分(湿度)有一定的敏感性^[10].从材料学的角度看,提琴类乐器用松香是一类非晶材料,没有固定的熔点,其流变学行为非常有趣,如黏度随着温度的升高而急剧下降^[4]等;在室温下,提琴类乐器用松香易碎和发生粉化^[4].

1.2 提琴类乐器用松香使用中的摩擦学过程及其系统分析

1.2.1 提琴类乐器用松香使用中的摩擦学过程

在提琴类乐器用松香的使用过程中,有以下两个涉及摩擦学的过程:(1)给琴弓的弓毛“打松香”,使得松香涂敷于琴弓的弓毛表面.早期曾使用热熔的松香^[11],而目前普遍采用的经验性方法为擦涂法,即将琴弓的弓毛在松香块上反复擦涂数次即可[图1(a)].不“打松香”的琴弓是无法用于演奏的.(2)在演奏时,松香在琴弓与琴弦间摩擦界面主导摩擦并被排出[图1(b)].如前所述,涂有松香的琴弓的弓毛与琴弦间产生黏滑现象,赋予琴弦自激振动,并在适当的条件下(弓压、弓速



Fig. 1 (a) Burnishing rosin on horsehair. (b) Friction between bow and string in playing cello

图1 (a)给提琴弓的弓毛打松香;(b)演奏时提琴弓与琴弦间的摩擦

和弓的位置)形成Helmholtz角运动,并可以用Schelleng图表示出其存在的条件^[4].往复运动是提琴类乐器“打松香”和演奏时的基本运动方式.其他复杂弓法所涉及的运动形式可以暂时不予考虑.

在上述的两种情况下,分析松香存在于摩擦表面(弓毛、琴弦)的状态,是摩擦学研究需要关注的首要内容,即为实验室摩擦学评价确定样品的制备方法.提琴演奏者和相关人员使用“松香层”、“弓毛的毛鳞片挂住松香”等语言描述松香在弓毛上的状态,也清楚弓毛的好坏对松香在弓毛上的状态影响很大.同样地,松香在弓毛表面的状态,对其与琴弦间的摩擦有重要影响:不仅对乐音的产生起主导作用,而且决定了松香的磨损与松香颗粒从摩擦界面上的去除.

目前,弓毛使用的材料有两类:天然材料(马尾毛)和合成材料(如尼龙类^[12]).优质的弓毛是以公马的马尾为原材料,经过一定工艺处理后获得的;弓毛在使用过程中似乎没有明显的摩擦生电的现象.单根马

尾毛存在“顺逆毛”特征,可以通过毛鳞片的的方向做出判断,如图2(a)所示.为了不影响弓法,通常在提琴弓制作时,会刻意消除“顺逆毛”,即一半数量的弓毛与另一半数量的弓毛相反安装.以马尾毛制作的弓毛为例[图2(b)],松香在弓毛表面上的状态不是单一的,有粉末状和类似涂层状[按照图1(a)所示的方法打松香].需要指出的是,本文中给出的图2(b)属于个例,虽不具备统计学意义,但有一定的代表性.

提琴用乐器的琴弦有三类:羊肠弦、尼龙弦和钢弦,每种琴弦有其特定的音乐用途.相比之下,目前人们对松香在琴弦表面上的状态还不清楚.

粗略地分析松香存在于摩擦表面的状态可知,有粉末态[毛上或者弓/弦摩擦时,见图2(b)]熔敷态涂层(弓毛上)和块体状(松香块,用于打松香).粉末态、涂层和块体状样品均可适用于实验室用摩擦磨损试验机的摩擦学特性评价.

1.2.2 基于提琴类乐器演奏的实验室评价方法

基于提琴类乐器弓/弦摩擦副的特殊机械特性^[7],J Woodhouse及其合作者使用了一些特殊的试验装置^[4-6],用于模拟真实提琴弓与琴弦摩擦下松香的摩擦学特性.考虑到琴弦的振动频率等问题^[4-6],而这些特殊试验装置与常规商品摩擦磨损试验机有着很大的不同之处.例如,接触区的滑移速率与法向载荷无法匹配的问题^[4],等等.换言之,常规商品摩擦磨损试验机无法实现文献^[4-6]中的琴弦谐振现象.

通过以上的分析,我们认为:如果假设松香摩擦学特性的本质不以试验评价手段而变化的话,那么,采用成熟的商用往复摩擦磨损试验机探讨松香摩擦学特性的本质,可能不失为一种简单易行的方法.因此,本文作者在这方面做一些探索工作,以商品往

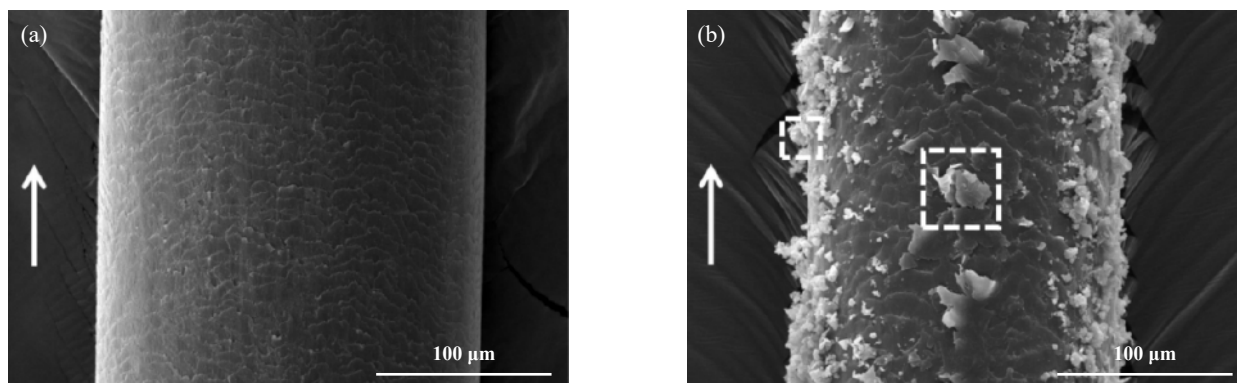


Fig. 2 FESEM micrographs of (a) horsehair without rosin (arrow indicates nap down), (b) horsehair with burnished rosin

图2 (a)无松香的弓毛(箭头所指为“顺毛”方向)、(b)涂有松香的弓毛的扫描电镜照片(小方框内为颗粒状,大方框内为类似涂层状)

复摩擦磨损试验机为评价手段评价松香的室温摩擦学特性. 可以预见的是, 商品往复摩擦磨损试验机为评价手段, 所得到的摩擦学特性等结果仅可作为真正提琴类乐器的参考, 却可能为摩擦学家与真正的乐器演奏间建立起一座桥梁.

2 实验室评价方法的初探

2.1 材料及制备工艺

本论文中主要使用了两种提琴类乐器用松香, 即 Pirastro 大提琴松香(9012)红色松香和 Andrea Piacere 大提琴用松香; 商品工业松香用于对比试验. 其他提琴类乐器用松香的摩擦学特性评价, 留待以后进行.

如1.2.1节所述, 可以粉末、涂层和块体的形式, 在实验室评价松香的摩擦学特性. 文献[5]使用了松香粉末与松香涂层, 用以考察松香的摩擦学特性. 根据以往的经验, 我们认为在往复摩擦磨损试验中, 粉末样品存在“导入性”差的问题, 亦受到粉末颗粒大小等的影响. 我们初步研究结果表明, 细的松香粉末的摩擦学特性与文献[5]的一致[图3(a)], 但粗的松香粉末的摩擦学特性则有所不同[图3(b)]. 文献[5]认为, 使用松香粉末时, 在摩擦的初期, 其摩擦系数大约是松香涂

层的两倍, 但随后二者的摩擦系数没有区别. 考虑到颗粒与颗粒流的摩擦学特性是1个专门的研究内容^[13], 因此, 本文中主要考虑研究涂层和块体的摩擦学特性.

松香涂层和松香块体的制备工艺均为液态-凝固方法, 而获得液态松香的方法有: (1)加热熔化松香; (2)将松香溶于具有挥发性的有机溶剂(如二甲苯、乙醇等). 本文中第一种方法称为热熔法, 第二种方法称为溶剂法. 文献[5]采用了溶剂法, 溶剂为二甲苯. 我们认为, 液态-凝固方法对松香的组成没有影响, 但所制备的松香样品的表面形貌会有所不同. 本文中使用的两种提琴类乐器用松香和商品工业松香均可用以上工艺制备摩擦学试验的样品.

2.1.1 松香涂层的制备

热熔法和溶剂法两种方法均可用于松香涂层的制备, 底材可以是有一定耐热性的材料, 如金属与合金、陶瓷材料等. 在制备松香涂层前, 首先用砂纸将底材打磨至表面粗糙度 R_a 为0.05~0.8 mm, 用乙醇超声清洗后待用.

热熔法制备松香涂层的主要步骤如下: 例如, 将0.073 g松香置于底材(如GCr15钢盘、氧化铝陶瓷盘等)表面, 并将其放入120 °C的烘箱内, 放置25 min后

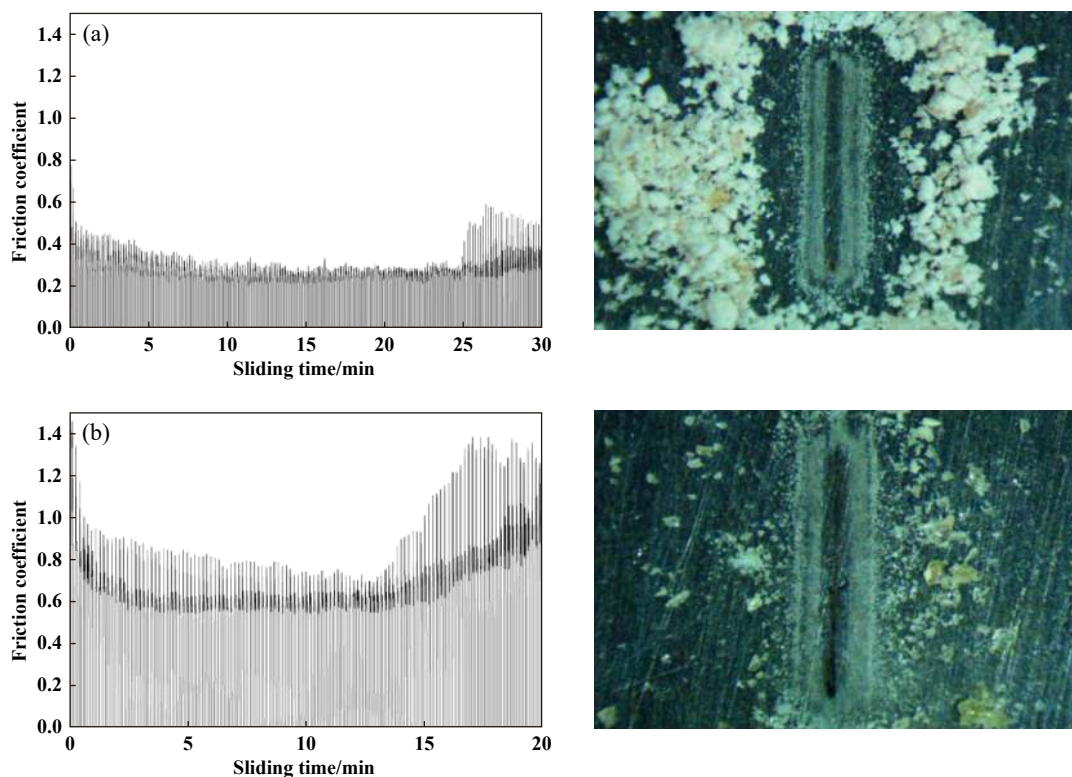


Fig. 3 Frictional traces and OM micrographs worn surfaces using (a) fine rosin powder and (b) coarse rosin powder. The rosin powder is prepared using Pirastro 9012 for cello.

图3 松香颗粒的摩擦系数-时间曲线及磨痕图: (a)细松香颗粒; (b)粗松香颗粒. 松香颗粒为Pirastro大提琴松香(9012)所制

取出,此时松香已经软化至水滴状。将玻璃棒横放快速将松香碾平,此过程中用力要均匀,铺平的松香厚度要适中,速度要快,以避免松香在室温下遇凝固。经计算可知,涂层的厚度约为140~150 μm 。

溶剂法制备松香涂层的主要步骤:例如,取松香0.0345 g放入小烧杯内,加入5 ml无水乙醇(出于蒸发速率和毒性的考虑),用玻璃棒搅拌至松香完全溶解,得到透明溶液。用注射器吸取该溶液,并向GCr15钢盘(氧化铝陶瓷盘)缓慢滴加,直至钢盘(陶瓷盘)表面被溶液全部覆盖。待盘表面的无水乙醇蒸发完全,则铺膜完成。可以通过对松香乙醇溶液的使用量控制松香涂层的厚度,一般为10 μm 以上(用1 ml溶液)。文献[5]仅提到松香涂层的厚度在微米级。

2.1.2 松香块体的制备

松香块体的制备工艺与松香涂层的相同。以热熔法为例,首先将松香加热至130~150 $^{\circ}\text{C}$ (取决于松香的类型),可以将松香倾倒入预先准备好的模具中,待自然冷却后,即可成型。溶剂法则是将溶于有机溶剂的松香倾倒入模具中,待溶剂挥发后,即可成型。相比之下,热熔法更好一些。

松香块体的表面可以用砂纸打磨抛光,供摩擦磨损试验使用。在水中打磨抛光的效果比较好,不建议使用抛光剂。

2.2 摩擦磨损试验机

松香涂层或块体的摩擦学特性可以用商品往复摩擦磨损试验机评价,本文中采用的是MFT-EC4000往复摩擦磨损试验机。上试样钢球或陶瓷球的直径为6 mm,用聚酯制作的夹具装载;下试样为松香涂层或块体。G10级GCr15钢球、G1级氧化铝陶瓷球均为外购获得。上试样保持静止,下试样以一定频率做往复运动。试验条件如下:载荷为1~9 N,往复频率为0.1 Hz,冲程为3.8 mm,滑动时间为1~30 min,环境温度为20~28 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度40%~60%。本文中采用的滑动速率较低,目的在于更好地观察黏/滑现象,并尽可能地降低摩擦热的影响。商品二硫化钼粉末用于松香的对照组。

2.3 分析与表征

在松香的摩擦学研究中,对其表面、磨损表面和磨屑的形貌观察非常重要。光学显微镜可以方便地对松香的表面、磨损表面进行观察,暗场像对划痕、裂纹的观察较为理想。扫描电子显微镜的制样也较简单,喷金后的样品所获得的照片质量很高;用FIB可获得高质量的断面。接触式表面轮廓仪对磨损表面的形貌

测量准确度较高,白光与激光三维轮廓仪对磨损表面的形貌测量准确度不明确。松香的蒸汽压较低,不需特殊处理,即可使用XPS进行表征;但是要注意控制松香的量,以免破坏系统真空。

综上所述,对松香的表征是比较容易的。

3 结果与讨论

3.1 用于摩擦学试验的松香涂层与松香块体

3.1.1 制备工艺的影响

对于以球/盘方式接触的往复摩擦磨损试验机而言,盘试样需在形位尺寸、表面形貌等方面达到一定的要求,如摩擦表面的平行度,表面波纹度与表面粗糙度等。本文中所制备的松香涂层与松香块体材料的某些表面形貌等特征(表面波纹度与表面粗糙度)对摩擦磨损试验的结果有干扰作用;因此,通过初步的试验,筛选出满足摩擦磨损试验的样品非常重要。

由于在提琴类乐器的琴弓/琴弦摩擦过程中,松香起到强化黏/滑现象的作用。因此,需要考虑松香涂层和松香块体是否满足试验的要求。当黏/滑现象发生时,在1个滑动周期内的摩擦系数呈现如图3(a~b)与图4(a~b)所示的结果。但是,如果仅观察到图3(a~b)与图4(a~b)所示的试验结果,并不能说明发生了黏/滑现象。很多种情况会导致“伪黏/滑现象”。例如,当松香涂层或者松香块体表面的波纹度足够大时,钢球在松香表面发生“上坡”和“下坡”运动,分别产生假的“静摩擦”和假的“动摩擦”。又例如,由于钢球等几乎没有磨损,当松香因磨损量很大而产生了“坑状”磨损,也会产生假象。平行度高、表面波纹度小的松香表面,在松香磨损量较小时,才能观察到真正的黏/滑现象。由此可知,法向载荷的选择亦非常重要,这是因为法向载荷过大(例如9 N)会使得松香涂层和松香块体的磨损过大。

溶剂法制备的松香涂层,其波纹度较小,经过短暂的磨合期后,迅速进入稳态磨损阶段;若涂层厚度较小的,则没有明显的磨合期,直接进入稳态磨损阶段,如图4(a)所示。热熔法制备的松香涂层,其波纹度较大,经过一定时间的磨合期(摩擦系数起伏较大)后,进入稳态磨损阶段,如图4(b)所示。因此,溶剂法制备的松香涂层更适合作为实验室摩擦学评价的试样。但热熔法制备的松香涂层,尽管其波纹度较大,但更贴合打松香过程,摩擦系数的起伏为打松香者提供了手部的反馈。今后,可以考虑匀胶机等设备与工艺制备松香涂层,有望获得具有较好表面质量的松香涂层。

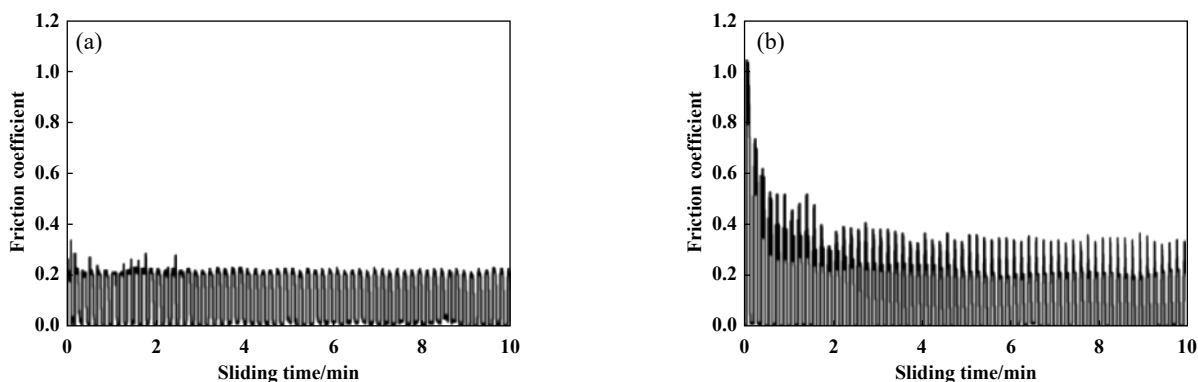


Fig. 4 Frictional traces of rosin coating by (a) solvent-evaporation and (b) melting-solidification in sliding against a GCr15 ball
图4 典型的摩擦系数-时间曲线:(a)溶剂法制备的松香涂层;(b)热熔法制备的松香涂层

热熔法制备的松香块体,其波纹度受到模具表面的影响;气泡的完全消除也是极难做到的.今后,可以考虑3D打印等工艺制备松香块体.由于压入导致样品产生裂纹是1个概率事件,因此,本文中暂不推荐松香块体的试验.

3.1.2 溶剂法制备松香涂层的表面“云图”形貌

对于溶剂法制备的松香涂层,其表面有“云图”状形貌,并且“云图”状的形貌完全不可控,如图5所示.“云图”状形貌的形成,与松香/乙醇液体在乙醇挥发过程中的流动有关,而乙醇较快的挥发速率加剧了松香/乙醇液体的对流.如果涂层越薄,底材表面形貌对对流传质的影响就越显著.

“云图”状形貌对波纹度和表面粗糙度均有较大的贡献,如图6所示.然而,在涂层厚度一定的情况下,“云图”的形貌对松香涂层的摩擦学特性没有影响,如图6所示.

根据我们的大量试验结果,溶剂法制备的松香涂层,在往复摩擦磨损试验机上的数据重复性较好.空

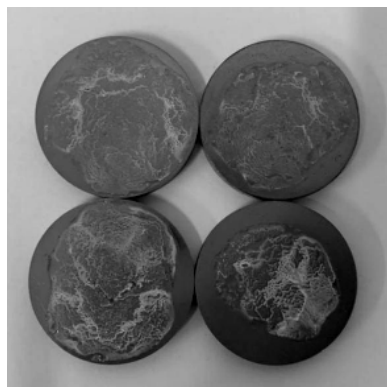


Fig. 5 Surface morphology of cloud pattern on rosin coatings by solvent-evaporation

图5 溶剂法制备松香涂层表面的“云图”

气的相对湿度对试验结果有一定的影响,这也是今后的主要研究内容.

3.2 松香的室温摩擦学特性

根据我们的试验结果,松香涂层的室温摩擦学特性有三个显著的特点:(1)稳态下的减摩作用;(2)黏滑现象;(3)粉化现象,以上3个特点与松香的种类无关.本文中逐一讨论.

3.2.1 减摩作用

与无润滑条件下的自配副钢、自配副氧化铝等相比,当处于稳态摩擦阶段时,松香涂层无疑具有明显的减摩作用,表现为稳态摩擦系数(0.3~0.4)远低于无润滑条件下的0.8,且与摩擦对偶材料关系不大.但松香涂层的稳态摩擦系数比二硫化钼粉末的大,后者在润滑自配副钢时的摩擦系数低于0.1.松香涂层不仅对钢球和陶瓷球的磨损较小,也对底材起到免于磨损的作用.

3.2.2 黏滑现象

与无润滑条件下的自配副钢和自配副氧化铝等相比,尽管溶剂法制备的松香涂层具有减摩作用,但是黏滑现象也得到了显著的加强,如图7所示.

当松香涂层即将磨穿时,如图7所示,出现了明显的黏/滑现象.从GCr15钢盘的磨痕表面上可以观察到红褐色的氧化铁生成.目前,我们还没有确定这一摩擦化学反应的反应物到底是空气中的水蒸气还是松香中的枞酸.

我们也希望今后在其他型号的往复摩擦磨损试验机上,对松香存在下的黏滑现象给予充分的研究.

3.3 松香涂层的磨损表面与粉化

在本文中,粉化是松香涂层室温下最为典型的宏观摩擦学特征,如图8所示.值得再次提及的是,实践告诉我们:给提琴弓毛打松香、琴弓与琴弦间的摩擦,

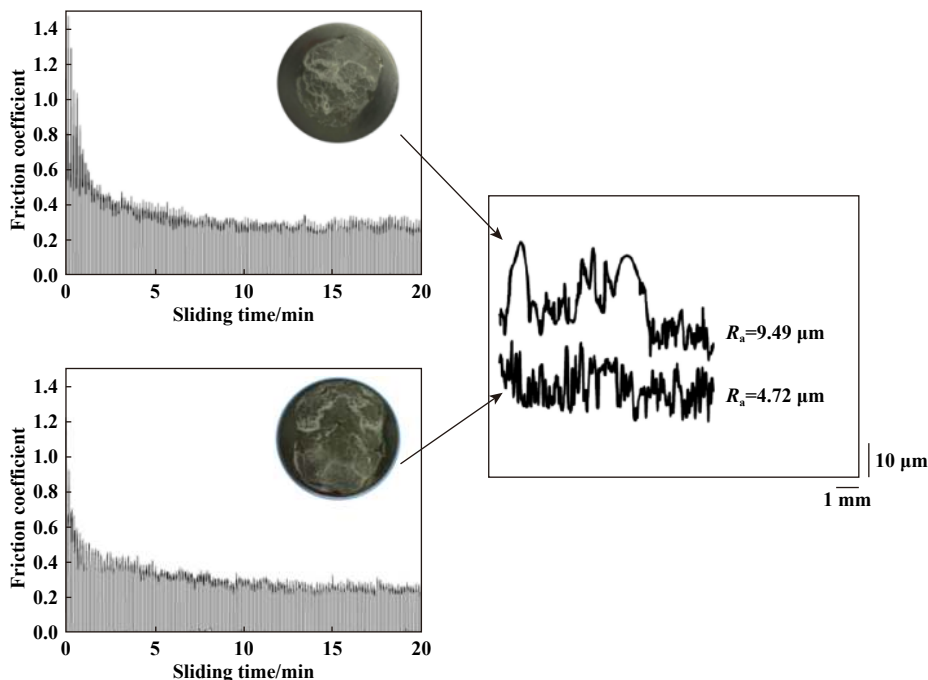


Fig. 6 Waviness, surface roughness and frictional traces of rosin coatings with distinct surface morphology

图 6 不同“云图”的波纹度和表面粗糙度、摩擦系数-时间曲线.

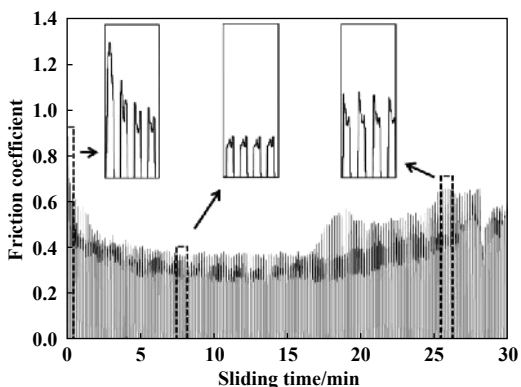


Fig. 7 Frictional trace of rosin coating in sliding against a GCr15 ball in a lifetime cycle

图 7 松香涂层与GCr15钢球对摩时的黏滑现象

均有明显的松香粉化现象.

3.3.1 磨痕的宏观特征

由图8(a)可知, 溶剂法制备的松香涂层的磨损表面分为3个区域: A区为内磨痕区, 其特征为致密的松香薄层; B区为外磨痕区, 为粉化松香覆盖的松香层; C区为粉化松香覆盖的非磨损区. 与之对应, 图8(b)中钢球的磨损表面为“眼球”状, “瞳孔”部分对应钢盘的内磨痕A区, “瞳仁”部分对应钢盘的外磨痕B区. 同样地, 热熔法制备的松香涂层的磨损表面特征(未给出)与溶剂法制备的松香涂层的磨损表面[图8(a)]相似, 热熔法制备的松香涂层在C区外发生较大面积的

脆性断裂, 可观察到发生脆性断裂后的松香小碎片面积明显比溶剂法制备的松香涂层的大. 图8(d)为图8(c)中的粉化颗粒的SEM照片, 粉化颗粒的棱角分明, 大小不一.

与钢自配副下松香涂层的磨损表面相比, 氧化铝陶瓷表面的松香涂层的磨损表面分为两个区域: A区为内磨痕区, 其特征为致密的松香薄层; B区为外磨痕区, 为粉化松香覆盖的松香层; C区在氧化铝陶瓷磨损表面几乎看不到. 与氧化铝陶瓷球对摩时, 溶剂法制备的松香涂层的粉化现象非常不显著, 而热熔法制备的松香涂层的粉化现象则非常显著, 这可能与热熔法松香涂层的厚度较大有关.

3.3.2 粉化现象和已知的粉化机理模型

如图8(c~d)所示, 松香涂层与对偶球的磨痕上可以观察到明显的松香粉化现象. 碳刷、C/C复合材料在一定条件下发生粉化^[14], 而这些粉化现象对其应用是明显不利的.

J Woodhouse讨论了熔化致粉化机理. 他首先假设: 在摩擦热的作用下, 松香发生熔化, 随后因快速冷却后变脆、破碎, 从而产生粉化^[4]. J Woodhouse认为熔化致粉化不能解释粉化中的所有现象, 他认为摩擦热可能不足以使松香熔化, 即仅仅使得松香软化, 此时可以用塑性屈服解释. 后来, 他与合作者认为应该能观察到剪切带, 但未见其试验证据. 事实上, 在磨损表

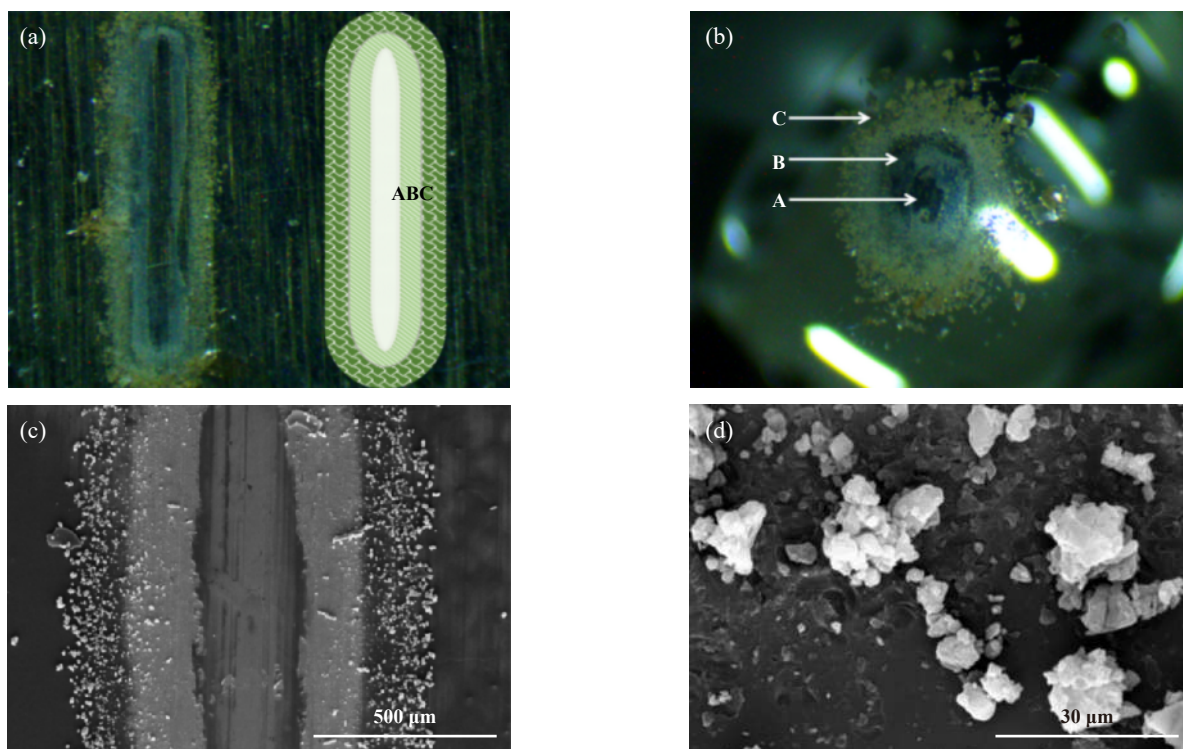


Fig. 8 OM micrographs of worn surfaces of (a) rosin coating, (b) a GCr15 ball, and FESEM micrographs of worn surface of (c) rosin coating and (d) dust in Fig. 8(c)

图8 光学显微镜照片(a)与GCr15钢球对摩时溶剂法制备松香涂层的磨痕;(b)GCr15钢球的磨痕;场发射电子显微镜照片(c)与GCr15钢球对摩时溶剂法制备松香涂层的磨痕;(d)图8(c)中松香涂层产生的粉化颗粒.(c)为图8(a)的场发射电子显微镜照片

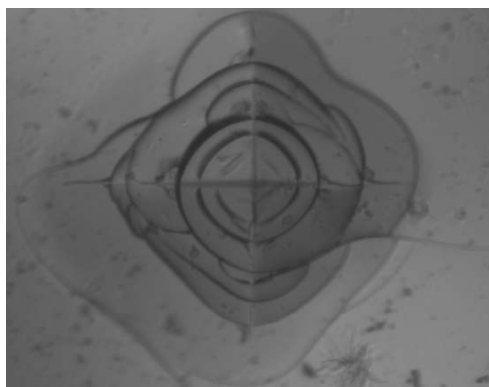


Fig. 9 OM micrograph of shear band on indentation mark on rosin coating at a load of 0.1 N

图9 松香涂层表面的维氏压痕上的剪切带(载荷0.1 N)

面直接观察到剪切带是非常困难的. 我们提供了1个间接证据, 即以0.1 N的力对松香表面做维氏压入时, 可以观察到剪切带, 如图9所示.

3.4 黏滑与粉化背后的摩擦学机制

迄今为止, J Woodhouse及其合作者提出的塑性屈服+剪切带模型无疑是最好的摩擦学机制, 最大程度上对黏滑与粉化做出了合理的解释. 不过, 尚有众

多的问题留待进一步研究. 例如, 松香的温度特性至关重要. 这是因为文献[5]观察到, 当温度升高到一定温度时, 黏滑现象消失. 我们需要重复这样的试验. 此外, 在试验上, 无论基于弓弦乐器架构的试验装置, 还是基于本文的往复摩擦磨损试验机, 均未能在磨损表面上直接观察到剪切带. 本文图9则在试验上初步证实了压入条件下松香压痕上剪切带的存在. 我们的试验结果表明, 松香的摩擦化学, 特别是与环境中水蒸气的摩擦化学反应, 对黏滑与粉化有重要的影响, 这将留待进一步的研究.

4 结论

a. 对于两种提琴类乐器用松香和商品工业松香而言, 热熔法和溶剂法均可用于松香涂层与松香块体的制备, 溶剂法制备的松香涂层可以直接用于摩擦学评价. 松香粉末的摩擦学特性与粉末的粒度有关.

b. 减摩作用、黏滑现象和粉化现象是三种松香涂层的典型摩擦学特性.

c. 松香的摩擦学性能可以用往复摩擦磨损试验机评价, 其摩擦磨损数据可作为基于弓弦乐器的试验

装置的补充与参考.

参考文献

- [1] Hu Yuanzhong. The principle of friction in the sound of violin[J]. *Mechanics and Practice*, 2008, (5): 110–111 (in Chinese) [胡元中. 提琴声中的摩擦原理[J]. *力学与实践*, 2008, (5): 110–111].
- [2] Wu Jike. Popular mechanics series: Science in music[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012-06-01(in Chinese) [武际可. 大众力学丛书: 音乐中的科学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012-06-01].
- [3] Chen Guangxiong, Zhou Zhongrong, Xie Youbai. The status and progress of research on friction noise[J]. *Tribology*, 2000, 30(6): 478–481 (in Chinese) [陈光雄, 周仲荣, 谢友柏. 摩擦噪声研究的现状和进展[J]. *摩擦学学报*, 2000, 30(6): 478–481].
- [4] J H Smith, J Woodhouse. The tribology of rosin[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48(8): 1633–1681. doi: [10.1016/S0022-5096\(99\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(99)00067-8).
- [5] R T Schumacher, S Garoff, J Woodhouse. Probing the physics of slip–stick friction using a bowed string[J]. *The Journal of Adhesion*, 2005, 81(7-8): 723–750. doi: [10.1080/00218460500187715](https://doi.org/10.1080/00218460500187715).
- [6] Linda D. Analyzing the tribology of sound[J]. *Tribology and Lubrication Technology*, An STLE Publication, 2007: 28–29.
- [7] Zhang Chengzhong. Research on vibration mechanism and acoustic quality of violin[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014(in Chinese) [张承忠. 小提琴振动机理及声学品质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014].
- [8] Tan Jiayong, Ling Xin, Li Guizhen, et al. The chemical composition characteristics of Indonesian rosin[J]. *Applied Chemical Industry*, 2014, (S2): 300–302 (in Chinese) [谭家勇, 凌鑫, 李桂珍, 等. 印尼松香的化学组成特征[J]. *应用化工*, 2014, (S2): 300–302].
- [9] Beijing musical instrument research institute. Experimental report of rosin for musical instruments[J]. *Musical Instrument Technology Briefing*, 1976, (3): 13–17 (in Chinese) [北京乐器研究所. 乐器松香试验报告[J]. *乐器科技简讯*, 1976, (3): 13–17].
- [10] Ren Tianrui, Li Yonghong. Rosin chemistry and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 43-57(in Chinese) [任天瑞, 李永红. 松香化学及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 43-57].
- [11] Cao Shukun, Hong Feng. The wonderful world of violin-100 questions about violin knowledge[J]. *Guangdong Musical Instrument World*, 2011-2013 serial(in Chinese) [曹树堃, 洪风. 奇妙的提琴世界-提琴知识100问[J]. *广东乐器世界*, 2011-2013连载].
- [12] Beijing musical instrument research institute. Violin bow[J]. *Information of Musical Instrument Technology*, 1974, (2): 25–31 (in Chinese) [北京乐器研究所. 提琴弓子[J]. *乐器科技简讯*, 1974, (2): 25–31].
- [13] Wang Wei. Friction interface of granular medium and its lubrication effect[M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2016-07-01(in Chinese) [王伟. 颗粒介质摩擦界面及其润滑效应[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2016-07-01].
- [14] Zou Linhua, Huang Boyun, Huang Qizhong, et al. Research status of tribology of C/C composites abroad[J]. *Tribology*, 2001, 21(2): 157–160 (in Chinese) [邹林华, 黄伯云, 黄启忠, 等. 国外C/C复合材料摩擦学的研究现状[J]. *摩擦学学报*, 2001, 21(2): 157–160]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2001.02.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2001.02.020).