



回收木材与铁磁性夹杂物风险：为何再利用木材、谷仓木材及工业回收木材在磁学上不适合作为音频支撑材料



回收木材与铁磁性夹杂物风险：为何再利用木材、谷仓木材及工业回收木材在磁学上不适合作为音频支撑材料

A. Bosque, M. Ferro, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

摘要

回收木材凭借来历获得营销溢价：经受一个世纪风雨的谷仓橡木、从拆除的仓库取出的脂松、从退役扫雷舰或废弃实验室工作台回收的柚木。这份浪漫真实存在，可持续性的论据也并非无稽之谈。然而，选择支撑材料要看它对置于其上的线缆做了什么，而不是看它的传记；回收木材携带一种并非来历仅仅允许、而是来历主动保证的缺陷：嵌入的铁磁性金属。方钉、螺钉、订书钉、围栏钉、螺栓、铁丝网碎片、嵌入的铅弹与钢丸，以及带锯和圆锯铁屑，都是任何经历过实用寿命之木材的日常陈设。这不是罕见的污染事件；正因如此，锯木厂才会在主锯前运行工业铁磁检测器，回收木材场也才会特意宣传存货已经「金属检测」。

我们报告一项针对96块回收坯料的筛查研究，涵盖四类来历——谷仓橡木、工业仓库松木与冷杉、来自海事和实验室来源的回收柚木，以及葡萄酒桶橡木。所有坯料先通过磁通门梯度计；凡呈阳性者，再以X射线计算机断层扫描绘制夹杂物图。96块坯料中有71块（74%）检测到铁磁性夹杂物，其中谷仓橡木20块有19块不合格。一枚嵌入的钢钉就是永久的高磁导率夹杂物：低碳钢的 μ_r 从数百到低千不等，它会成为距导体仅数毫米的局部场不连续；周围木材再干净的介电特性也无法抵消。我们还表征了腐蚀——嵌入铁质物在数十年间渗入橡木的弥散顺磁性单宁酸铁污渍，其污染体积比金属本身大若干数量级——并说明为何即使已经「金属检测」的木料，也只通过粗略的工业阈值，而达不到Bosque、Ferro、Park与Tanaka（2026）定义的亚毫克级音频等级。Equatorial Elevation Blocks只用初次加工的人工林木料铣制，绝不采用回收木材；对于回收利用的可持续性论据，我们改以受管理的赤道人造林完整作答。

1. 引言

本刊配套研究（Bosque、Ferro、Park与Tanaka，2026）为结构木材确立了N级中性标度，以残余顺磁性含量及其产生的体积磁化率定义，并证明赤道人造林柚木在交付状态达到5N。该研究分级的是洁净的初次加工木材，对回收木材只顺带一提——称这一类别「通常」无法通过铁磁性夹杂物扫描——随后继续讨论其他内容。本文将那句顺带提及展开为完整而足以取消资格的细节，因为对买家来说，回收木材问题绝非脚注。它是我们收到的最常见质疑：如果受管理的赤道柚木稀少而昂贵，谷仓和旧仓库中又充满美观、致密、尺寸稳定，本来只能被烧掉的老龄木材，为何不用它们加工支撑物？

答案属于冶金学，而且两者差距悬殊。回收木材的定义就是经历过先前的结构服役，而结构服役意味着紧固件。谷仓横梁被钉过、用大钉固定过、用螺栓连接过、用订书钉装订过；仓库地板托梁穿过螺栓，也打过方头木螺钉；船材用铁制漂钉和铁销固定的木钉连接；实验室工作台曾戴着钢支架与方钉包边一个世纪。回收时，大多数金属会被拔出。有些不会：它可能折断在表面以下，可能被敲得过深而沉头，可能锈蚀成无法辨别的团块，也可能从一开始就在外部完全不可见。回收者去掉看得见的金属；梯度计找出他看不见的金属。

我们不把嵌入的紧固件视为可以填补和遮掩的外观瑕疵，而按其电磁本质处理：一个永久的高磁导率夹杂物，受线缆支撑物几何结构所限，距信号导体只有数毫米。支撑材料的存在，是为了在受控的近场环境中承托分级线缆。带有钢钉的支撑材料，则是一个碰巧托着线缆的磁性缺陷。

2. 单钉论证

考虑可以想象到最不惊人的污染：一枚方钉在表面齐平处折断，肉眼不可见，埋在一块除此之外毫无瑕疵的回收橡木坯料中。这个案例值得完整推演，因为如果连最不惊人的情况都足以取消资格，后续调查统计便只剩记账意义。

洁净干燥木材的 χ_v 接近 -6×10^{-6} (SI) ——微弱、均匀的抗磁性。对于要置于静态场中而不扰动该场的材料，这是理想状态。低碳钢钉的 μ_r 从数百到低千不等。因此，从木材到钢材边界两侧的磁导率之比不是几个百分点，而是相差三至六个数量级。该边界就是场不连续：原本平顺穿过抗磁性木材的静态与准静态磁通线，会被夹杂物汇集、集中并重新辐射，在其正上方表面产生数十至数百nT的局部场梯度——而在线缆支撑物上，那里恰好就是托槽与线缆所在的位置。

此外，与均匀分布于整体中的顺磁性痕量金属负载不同，这个夹杂物是一个具有结构的点源。它带有剩磁：在地球磁场中放置数十年的钢制紧固件会获得永久磁矩，因此该夹杂物不只是被动的磁导率扰动，而是一块拥有固定偶极轴的小型永磁体，对装置其余部分努力实现的赤道对准毫不在意。周围木材的任何属性——无论是7N磁化率、创纪录的低 ϵ_{eff} ，还是完美的端面木纹垂直铣削——都无法抵消位于载荷路径中的永久偶极子。坯料按最差点而非平均值分级，而最差点就是那枚钉子。

3. 调查：来历类别与命中率

我们从北美与欧洲成熟的回收木材场取得96块坯料，覆盖四类来历，每类20至28块；所有木料均以已拔除紧固件出售，其中三类还宣称已经「金属检测」。每块坯料都在以20 mm/s运行的电动床台上通过三轴磁通门梯度计（Bartington Grad-13，1 nT分辨率）——仪器与方案均与配套研究的生产柚木筛查相同。凡相对其抗磁背景返回超过5 nT离散异常的坯料，均被标记并送去进行X射线计算机断层扫描（225 kV/微焦点源，90 μm 体素），以定位并识别夹杂物。



总命中率为96块中的71块（74%）。分类来看：谷仓橡木表现最差，20块中19块不合格，夹杂物以方钉、钢丝钉和围栏钉为主，每块不合格坯料的离散夹杂物中位数为3个。工业仓库松木与冷杉28块中有22块不合格，包含方头木螺钉杆、机械螺栓，以及4块坯料中来源于某段我们未作调查之过往生活的嵌入铅弹与钢丸。海事与实验室来源的回收柚木25块中有21块不合格：船材携带铁制漂钉碎片与舵销残段，实验室工作台柚木带有沉头钢木螺钉，另有两块含黄铜；黄铜通过梯度计，却因其他理由不合格。葡萄酒桶橡木为四类中最佳，但23块中仍有9块不合格，主要来自桶箍铆钉碎片和拆卸桶箍留下的订丝。

CT图中有两项发现需要强调。第一，多数检出的夹杂物位于表面以下，从成品表面完全不可见——正是视觉拔钉后仍会留下的那类。第二，若用回收场级手持检测器，若干本可通过的坯料却显示多个小夹杂物（先前带锯再锯留下的铁屑轨迹、订书钉钉冠）；每个都低于粗略检测阈值，合在一起却形成分布式铁质负载。工业检测器回答的是「这里有没有大到足以毁掉锯片的钉子」，而不是「这块坯料在磁学上是否洁净」；它从来就不是为回答后一个问题制造的。

4. 腐蚀晕

嵌入木材的铁质物体不是稳定、自我封闭的夹杂物。它会腐蚀，把腐蚀产物输出到周围组织；在橡木中，这个过程遵循一种热力学上积极、已有数百年历史的化学反应。

橡木心材富含可水解单宁。Fe与潮湿橡木接触后氧化，生成的亚铁与铁离子沿水分梯度迁入木材，并与单宁络合形成单宁酸铁——即铁胆墨水中的蓝黑色化合物，也正是留在橡木中的任何钢制紧固件周围会变黑的反应。因此，在谷仓或地窖中经过数十年后，嵌入的钉子不再只是钉子大小的问题。它把弥散的单宁酸铁腐蚀晕渗入一片木材体积；CT和ICP-MS均显示，该体积比物体本身大一至两个数量级。金属核心具有铁磁性，周围腐蚀晕具有顺磁性；腐蚀晕体积大、形状不规则，并穿入面向线缆的表面，在某些方面反而是更糟的污染物，因为它无法用钳子拔出，也完全不会向金属检测器显露自身。

我们在四块谷仓橡木坯料的已知夹杂物周围切片，并沿径向剖面用ICP-MS绘制Fe分布。铁浓度从金属边界处的百分比量级，下降到距物体15至40 mm之腐蚀晕内60至240 ppm的顺磁性平台——这片污斑在足以吞没整个线缆托槽的体积内，远远超过4N的100 ppm上限。单个历史紧固件正是通过这一机制污染一个区域，而非一个点；它尤其发生在回收木材营销最珍视的那些单宁活跃硬木中，以橡木为首。赋予谷仓橡木浪漫来历的那段历史——在潮湿结构服役中与铁相伴一个世纪——正是保证腐蚀晕形成的同一段历史。

5. 为何「金属检测」不是等级

宣传木料已经「金属检测」的回收木材场，确实在如实描述一项真实工序。值得明确说明该工序能交付什么、又不能交付什么，因为这个词组经常被误读成一张它并非代表的清白证明。

工业木材金属检测用于保护机械。再锯线上的铁磁检测器被调校为遇到足以崩坏硬质合金锯齿或震碎带锯条的物体时触发——例如钉子、螺钉或螺栓。其阈值有意设得很高：如果生产线遇到每一处亚毫克级铁痕量都停机，就永远锯不了一块板。它是生产安全连锁，以刀具损伤为计量尺度；依照设计，它恰好会放过那些使坯料不适合音频用途的对象：亚毫米铁屑、订丝碎片、弹丸，尤其是溶解的顺磁性腐蚀晕——那里根本没有可供检测器寻找的离散物体。一块坯料可以干净地通过工业检测器，同时在面向线缆的表面贯穿一片200 ppm铁污斑。

音频中性等级则是回答另一个问题的另一种测量。它不由刀具风险决定，而由Bosque、Ferro、Park与Tanaka（2026）定义的100 ppm（4N）、10 ppm（5N）和1 ppm（6N）Fe + Mn边界决定；离散夹杂物以磁通门梯度计验证，整体与腐蚀晕磁化率则以VSM加ICP-MS验证。两个阈值相差若干数量级。「金属检测」意指「没有大到足以弄坏锯子的物体」；「5N中性」意指「每一处的Fe + Mn，无论离散或溶解，均不超过10 ppm」。回收商可以诚实地交付前者，却根本无法交付后者，因为后者要求对每块坯料进行磁强测量与痕量金属分析；没有回收场会执行这些项目，而且仅凭历史，无论处理多么仔细，多数回收坯料仍会不合格。

6. 可持续性问题的另一种回答

支持回收木材最有力的论据不是声学，而是环境。重新使用百年木材，可以避免新一轮采伐，让完好材料免于进入焚烧堆，并尊重原始生长中凝结的劳动。我们认真对待这一论据；我们的回答不是反驳，而是提供一种既无铁质风险，也不承担相应环境代价的供应方式。

Equatorial Elevation Blocks采用受管理人工林的柚木铣制；这些柚木种植于地磁赤道5 deg范围内的租赁认证林地，并执行采一补一制度。相关的可持续性比较并非回收木材对老龄林采伐——那是假选择——而是回收木材对受管理的人工林；后者的树木专为采伐而种植，在生长期固碳，并按固定轮伐周期补种。受管理赤道人造林带来回收利用所受推崇的环境收益（无老龄林压力、可再生循环），同时提供回收木材在结构上永远无法提供的一项条件：全新的紧固件历史。初次加工人工林木材从未承托钉子，从未渗出单宁酸铁腐蚀晕，也从未通过会播撒铁屑的再锯。它带着干净的磁学底子抵达；只有从这种起始条件出发，5N才有可能达到。

最后，不存在把回收坯料修复到合格等级的路径。离散夹杂物有时可以挖除，但挖掘会留下空洞，也无法触及溶解的腐蚀晕；要去除腐蚀晕，只能切掉染污体积，而对重度染污的谷仓横梁而言，这意味着切掉大部分可用木材。经济学与物理学指向同一个方向：从生长时就很洁净的木材开始，比追逐那些在生长以及此后服役期间都变脏之木材中的铁，更便宜、更干净，也更符合计量学。

7. 结论

回收、再利用、谷仓与工业回收木材不适合作为音频支撑材料，并非出于审美偏好，也不是因为木材本身有任何弱点，而是因为其紧固件历史。结构服役意味着嵌入的Fe；嵌入的Fe意味着线缆载荷路径中存在永久高磁导率夹杂物；在单宁活跃硬木中，它还意味着



体积比生成它的金属大一个数量级的弥散顺磁性腐蚀晕。我们的筛查调查在四类来历的回收坯料中发现74%带有铁磁性夹杂物；其中最受浪漫化的谷仓橡木，20块中有19块不合格。单钉论证表明，哪怕只有一个这种夹杂物，也足以单独取消资格；因此，调查比例是低估而非夸大问题。

回收木材营销所提供的「金属检测」保证，是一个为保护机械而设、比音频中性等级粗略若干数量级的阈值；依照设计，它恰好会放过Bosque、Ferro、Park与Tanaka（2026）的等级意图捕获的亚毫克及溶解污染。它是真实且有用的测量，只是回答的并非音频问题。因此，Equatorial Elevation Blocks只用初次加工的人工林木料铣制，绝不采用任何来历的回收木材。回收利用的环境论据确实成立，而专为采伐与补种而生长的受管理赤道人造林已完整回应这一论据——木材拥有可持续性的好处，却不带Fe，并且像每块分级坯料所必须的那样，从干净的磁学底子开始。

参考文献

- [1] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). 结构木材的磁中性分级：音频支撑材料的N级纯度分类。Journal of Equatorial Audio Science, 7(3), 88-121.
- [2] Selwyn, L. S., Sirois, P. J., Argyropoulos, V. (1999). 出土考古铁器的腐蚀：渗液与 β -FeOOH细节。Studies in Conservation, 44(4), 217-232.
- [3] Almkvist, G., Persson, I. (2008). 木材降解过程中的Fe与硫分布及其形态。New Journal of Chemistry, 32(12), 2208-2216.
- [4] Emery, J. A., Schroeder, H. A. (1974). Fe催化的木材碳水化合物氧化。Wood Science and Technology, 8(2), 123-137.
- [5] Reclaimed Wood Council (2019). 再利用结构木材中铁磁与非铁磁金属检测最佳实践指南。RWC Technical Bulletin TB-07, London.
- [6] Flux, R., Bosque, A. (2026). 用于木材坯料铁磁性夹杂物筛查的磁通门梯度测量与计算机断层扫描。Journal of Equatorial Audio Science, 7(3), 122-140.