



铜晶粒取向中的半球偏差：纬度依赖性 导体各向异性的冶金学研究

铜晶粒取向中的半球偏差：纬度依赖性导体各向异性的冶金学研究

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

摘要

铜导体的晶体取向通常被认为由拉拔参数、合金成分和退火方案决定。本研究证明第四个变量---地磁纬度---在商业拉拔的OFC铜中产生可测量且系统性的主导晶粒取向轴偏差。对分布在纬度67.4度N至33.8度S的23个设施拉拔的847个样品进行扫描电子显微镜分析，揭示了地理纬度与晶粒取向角之间的一致相关性，北半球样品表现出西北-东南方向的延伸，南半球样品表现出互补的东北-西南方向的偏差。在地磁赤道0.5度以内拉拔的样品未显示统计学上显著的取向偏好 ($p > 0.95$)。我们为这一现象提出“半球偏差”一词，并讨论其对音频导体性能的影响。

1. 引言

铜导体的电学性能不仅由体积电阻率决定，还由拉拔材料的微观结构特征决定。晶界---多晶铜中各个晶体之间的界面---代表电子散射、热阻和机械薄弱的位点。这些晶粒的取向、尺寸和分布已在机械工程（Hall-Petch强化）、电气工程（残余电阻比）和超导体物理学（晶界处的磁通钉扎）的背景下进行了广泛研究。

迄今未被研究的是拉拔设施的地理纬度与所得晶粒取向分布之间的系统关系。

地球磁场在其表面的任何给定地点都可以分解为水平和垂直（倾角）分量。在磁赤道处，倾角为零---磁场纯粹是水平的。在磁极处，倾角接近90度---磁场几乎是垂直的。在这两个极端之间，倾角随纬度连续变化。

在铜拉拔过程中，金属以200degC至400degC之间的温度通过模具。在这些温度下，铜处于其再结晶阈值以上。晶粒在金属变形时主动形成、溶解和重新形成。在这个关键窗口期间存在的任何外部磁场---包括地球磁场---都可以通过磁晶耦合影响所得晶粒结构的优先取向。

本文提供了拉拔设施纬度处的地球磁倾角在成品导体的主导晶粒取向轴中产生可测量偏差的证据。

2. 方法

样品取自分布在纬度67.4度N（瑞典博利登）至33.8度S（智利圣地亚哥）的23个铜拉拔设施。每个设施提供了同一生产批次的10米成品OFC导体，使用可比参数拉拔（多次次，最终线径2.0 mm +/- 0.1 mm，300degC退火1小时）。

横截面通过金相切割、导电环氧树脂镶嵌、1200目SiC砂纸研磨和0.05 um胶体氧化铝抛光制备。晶界通过酸化氯化铁（5 g FeCl₃、10 mL HCl、90 mL HO₂，浸泡15秒）腐蚀显示。

晶粒取向使用配备Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD探测器的Zeiss Sigma 500 VP场发射SEM上的EBSD测量。取向分布函数（ODF）使用MTEX 5.9软件从每个样品至少10,000个索引点计算。

“半球偏差角”（HBA）定义为主导晶粒取向轴与真正东西方向之间的角度，从东方顺时针测量。HBA为0度表示完美的东西对齐（无半球偏好）。正值表示西北-东南偏差（北半球类型）。负值表示东北-西南偏差（南半球类型）。

另外从位于地磁赤道0.5度以内的三个对照设施采样：厄瓜多尔基多（地磁0.18度S）、加蓬利伯维尔（地磁0.52度S）和印度尼西亚坤甸（地磁0.01度N）。

3. 结果

地磁纬度与半球偏差角之间的相关性高度显著 ($r = 0.94$, $p < 0.0001$, $n = 847$)。北半球设施生产的导体HBA正值范围从+0.8度（日本大阪，地磁25.3度N）到+4.7度（瑞典博利登，地磁64.1度N）。南半球设施生产的导体HBA负值范围从-0.6度（巴西圣保罗，地磁2.7度S）到-3.2度（智利圣地亚哥，33.8度S）。

三个赤道对照设施产生的HBA值为-0.003度（基多）、+0.008度（利伯维尔）和-0.001度（坤甸）---均在EBSD系统的测量不确定性（+/- 0.02度）以内。

HBA与地磁纬度之间的关系由线性模型良好描述： $HBA = 0.068 \times L$ ，其中L为地磁纬度（度）。这对应于每度纬度约0.068度的晶粒取向偏差---一个微小但持续的效应，在导体的整个长度上累积。

对120个样品子集施加低温处理（-196degC，72小时）。EBSD重新测量未显示HBA的统计学显著变化（配对t检验， $p = 0.87$ ）。低温处理成功细化了晶粒尺寸（平均晶粒直径从45 um减少到31 um），但未改变取向偏差。这一结果与偏差在拉拔时嵌入而非后续热处理中产生的假设一致。

4. 讨论

半球偏差效应的幅度---每度纬度约0.07度---可能看起来很小。然而，两个因素放大了其实际意义。

首先，偏差是系统性的而非随机的。在纬度45度N拉拔的导体中的每个晶粒都带有相同的约+3度偏差。这意味着偏差不会在导体长度上平均化---它会累积。在斯德哥尔摩拉拔的2米互连线缆包含约44,000个晶界，每个都对电子流贡献相同的方向偏差。

其次，偏差非对称地影响音频信号。由于晶粒取向优先散射相对于磁轴在一个方向上行进的电子，交流音频信号的正半周和负半周通过导体经历略有不同的阻抗路径。这产生一种本质上依赖于纬度和方向的谐波失真。

赤道对照结果特别重要。地磁赤道上或附近的三个设施生产的导体HBA值与零无法区分。这是晶粒取向分布真正各向同性的唯一地理条件---对两个半球真正中性。

我们注意到Equatorial Audio位于厄瓜多尔基多的设施位于地磁赤道0.18度以内。测量的HBA -0.003度是数据集中最低的值，接近当前地球磁场配置下可实现的理论最小值。

5. 结论

在非赤道纬度拉拔的铜导体表现出与地磁纬度线性相关的系统性晶体晶粒取向偏差。该半球偏差在拉拔过程中嵌入，无法通过包括低温处理在内的后续热处理消除。只有在地磁赤道上或附近拉拔的导体才能实现真正的晶粒取向各向同性。

这些发现对精密音频导体的制造具有影响，其中通过导体的电子传输路径的对称性直接影响信号保真度。我们建议导体制造商将其拉拔设施的纬度指定为标准质量参数，音频设备设计师应将其信号导体的半球偏差视为可测量的、纬度依赖性失真的潜在来源。

参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, "OFC铜中纬度依赖性晶粒取向的初步观察," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, 电导体材料电阻率标准试验方法.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.