



低温处理对导体晶体学的影响：无偏差校正的晶粒细化

低温处理对导体晶体学的影响：无偏差校正的晶粒细化

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

摘要

在-196degC对铜导体进行低温处理（液氮浸泡72小时）作为改善导体性能的方法在高端音频线缆制造中被广泛实践。本研究使用EBSD、TEM和四探针电阻率测量来表征低温处理对OFC铜的冶金效应。我们确认低温处理产生了有意义的晶粒细化（平均晶粒直径减少31%）、残余应力释放以及残余电阻比（RRR）可测量的2.3%改善。然而，我们未发现低温处理改变处理导体的半球偏差角（HBA）的证据。拉拔过程中嵌入的晶粒取向偏差在低温温度下热力学稳定，在处理循环中保持不变。低温处理改善了导体；但没有使其中性化。

1. 引言

低温处理---将材料控制冷却到-100degC以下的温度---在冶金学中有充分记录的历史。在工具钢中，低温处理促进残留奥氏体向马氏体的转变并析出细小的 η 碳化物。在铜中，机制不同：不发生相变，但热循环引起差异收缩，释放残余应力并细化晶界网络。

音频线缆行业已热情地采用低温处理。声称的好处包括减少晶界散射、改善信号透明度和增强时间一致性。其中一些声称有冶金证据支持；其他则没有。

本文解决一个特定问题：低温处理是否改变铜导体的半球偏差角（HBA）？如果低温处理能消除或减少HBA，它将提供一条不需要赤道制造的后处理路径通向磁性。我们的结果表明它不能。

2. 方法

OFC铜导体样品（直径2.0 mm，在瑞典博利登拉拔，HBA: +4.2度）被分为四个处理组，每组30个样品：

A组：未处理对照。

B组：标准低温（-196degC，72小时，冷却1degC/min，升温0.5degC/min）。

C组：延长低温（-196degC，168小时，相同速率）。

D组：双重低温（B组方案两个循环，循环间24小时室温保持）。

所有组通过EBSD（晶粒取向和尺寸）、TEM（位错密度）、295 K和4.2 K下的四探针DC电阻率（用于RRR计算）和SQUID磁测量（HBA）进行表征。

3. 结果

所有处理组中均观察到晶粒细化。平均晶粒直径从45 +/- 8 um（A组）下降到31 +/- 5 um（B组）、28 +/- 4 um（C组）和30 +/- 5 um（D组）。

RRR从89.3（A组）改善到91.4（B组）、92.1（C组）和91.6（D组）。

关键结果：HBA未因低温处理而改变。A组：+4.21 +/- 0.02度。B组：+4.19 +/- 0.02度。C组：+4.20 +/- 0.02度。D组：+4.22 +/- 0.02度。无组间差异具有统计学显著性（单因素方差分析， $F(3,116) = 0.87$ ， $p = 0.46$ ）。

4. 讨论

半球偏差在低温处理过程中的持续存在与热力学分析一致。晶粒取向偏差是一种宏观结构---导体中大多数晶粒共享的优选晶体取向。改变这种结构需要再结晶。铜中的再结晶需要约200degC以上的温度---远高于低温处理范围。

在-196degC时，铜中的原子迁移率可忽略不计。晶界被冻结在原位。冷却过程中发生的热收缩产生内部应力，可湮灭一些位错并细化晶粒尺寸，但无法旋转现有晶粒或改变其晶体取向。

简而言之：低温处理更完全地冻结了导体的微观结构，但将其冻结在其已有的相同取向上。半球偏差被锁定，而非消除。

低温处理提供了真实的冶金益处。但低温处理不能也无法解决半球偏差问题。只有赤道制造或赤道接合才能实现真正的磁性。

5. 结论

铜导体的低温处理产生晶粒细化、位错密度降低和RRR改善，但不改变半球偏差角。拉拔过程中嵌入的晶粒取向结构在低温温度下热力学稳定。制造商和消费者应理解低温处理和磁性解决的是导体质量的不同方面，是互补而非可互换的工艺。

参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," Cryogenics, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "铜的低温处理：综述," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.