

# 静磁场复合电流下时效对 Cu-Cr-Zr 合金组织及性能的影响\*

饶显君 钟云波<sup>†</sup> 张增光 王志强 邓康 任忠鸣 徐匡迪

(上海大学现代冶金重点实验室, 上海 200072)

(2012 年 4 月 21 日收到; 2012 年 6 月 5 日收到修改稿)

本文在经过固溶和冷变形处理 Cu-Cr-Zr 合金的等温时效过程中同时施加电流密度为  $100 \text{ A/cm}^2$  的直流电流和不同磁感应强度的静磁场, 发现电磁复合场能显著影响 Cu-Cr-Zr 合金的组织及性能. 和无磁场下时效后合金性能相比, 施加磁场后的合金电导率和显微硬度值均有一定程度的升高, 其中在  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ T}$  磁场下效果最明显, 分别升高了  $22.1\%$  IACS 和  $25.3 \text{ HV}$ . 利用透射电镜观察显微组织观察发现, 施加磁场后合金组织中位错密度有所降低, 同时出现了大量细小弥散的析出物, 表明电磁复合场能进一步促进铜合金的时效过程, 在低温时效时尤其明显. 分析认为, 电磁复合场对 Cu-Cr-Zr 合金时效过程的促进作用机理是磁场增强了电流的“电子风”效应.

**关键词:** 电磁复合场, 铜铬锆合金, 时效析出, 显微硬度

**PACS:** 13.40.Gp, 81.40.Cd, 81.40.Rs, 81.05.Bx

## 1 引言

Cu-Cr-Zr 合金以其优良的导电性能、力学性能和较高的抗高温软化等性能被广泛应用在引线框架材料和高速铁路接触线等方面<sup>[1-3]</sup>. 其优异的性能来自于析出和弥散分布的固溶原子 Cr 和 Zr, 它们在 Cu 基体中的溶解度非常小, 使得合金拥有较高的电导率, 此外 Cr 和 Zr 的析出物能有效阻碍变形组织的回复和再结晶<sup>[4,5]</sup>. 作为一种典型的时效强化型铜合金, 它的强化效应主要来自于时效过程中形成的 Cr 和  $\text{Cu}_5\text{Zr}$  析出相的贡献, 对此 Watanabe 等做了深入的研究<sup>[6]</sup>, 认为 Cr 析出相和  $\text{Cu}_5\text{Zr}$  相在位错上的形核长大增加了合金应力松弛阻力是导致合金强化的原因. 近年来随着高速铁路的飞速发展, 对铜合金提出了更高的要求, 需要更进一步的提高铜合金的电导率和强度, 更重要的是两者的良好匹配. 众所周知, 合金电导率和强度是一对顽固的矛盾, 常规的热处理无法更进一步

改善这对矛盾, 由此许多学者将目光转向了新型制备工艺的研究, 希望能得到突破, 电磁场便是其中的亮点之一.

随着超强磁场这种极端物理场在材料研究领域的广泛应用, 强磁场对金属材料固态相变的影响也引起了材料工作者的注意. 目前, 相关的研究主要集中在铁磁性物质方面<sup>[7,8]</sup>, 对于无扩散型相变——马氏体相变的研究较为成熟; 但在磁场对扩散型相变以及回复再结晶的影响方面的研究相对较少<sup>[9]</sup>, 1964 年 Youdelis 等<sup>[10]</sup>研究了  $3 \text{ T}$  强磁场对 Cu 在 Al 中扩散的影响, 发现在垂直于磁场方向 Cu 原子的扩散系数降低  $25\%$ . 随后 Nakajima 等<sup>[11]</sup>研究认为  $4 \text{ T}$  强磁场对 Ni 在 Ti 中扩散无任何显著影响. 而刘万忱<sup>[12]</sup>研究发现在 Al-4%Cu 合金时效析出过程中, 强磁场增加了原子的扩散速率, 明显促进了合金析出相的析出, 从而提高合金硬度. 可见强磁场对不同的扩散体系的具体作用机理并不相同. 然而, 现有的实验研究数据还不足以获得强磁场影响元素扩散的普适规律.

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2009AA03Z109)、上海市教育委员会重点项目 (批准号: 09zz98)、上海市政府科学技术委员会重点项目 (批准号: 09dz1206401, 09dz1206402) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20093108110012) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yunboz@staff.shu.edu.cn

电流对金属材料固态相变影响的研究已经持续了几十年. Koppenaal 和 Simcoe<sup>[13]</sup> 报道了在 Al-4 wt%Cu 合金的时效过程中施加 100 A/cm<sup>2</sup> 直流电流能促进合金的析出速率. Zhou 等<sup>[14]</sup> 研究了直流电流对镁合金 AZ91D 半固态等温热处理显微组织演化的影响, 他发现直流电流明显的加快了该合金的半固态等温热处理过程, 并且提高了晶粒的球化效应. Conrad 等<sup>[15]</sup> 报道了在冷变形后铜的低温等温时效过程中, 同时施加 800 A/mm<sup>2</sup> 持续时间为 90  $\mu$ s 的交流电流能加速铜的回复再结晶过程, 并且改善其再结晶晶粒尺寸. 作为该领域的集大成者, 他做了广泛的研究, 提出<sup>[16]</sup> 电流对金属固态相变的影响存在多样性, 对于析出、电流促进或阻碍析出速率取决于合金本身、施加电流的密度及其频率. Conrad 提出电迁移效应、电子风和空位流等缺陷的相互作用是电流对固态相变的作用机理, 是目前最合理的解释机理. 我们近期的研究工作中<sup>[17,18]</sup>, 在经过固溶处理和冷变形处理后的 Cu-Cr-Zr 合金的等温时效过程中, 同时施加直流电流 (电流密度为 100—300 A/cm<sup>2</sup>) 能提高合金的电导率; 同时促进过饱和固溶体的分解形成析出相, 在一定程度上提高合金硬度或使硬度无明显降低, 从而改善了合金的综合性能.

楼磊, 钟云波等<sup>[19]</sup> 对复合强静磁场下 BiMn 合金凝固过程中电迁移的研究发现: 静磁场能显著增强液态或半固态熔体中相颗粒的电迁移效率, 作者认为这是由于静磁场增加了大量电子对相颗粒的碰撞次数, 从而增加了电流效率造成的. 这是一个有趣的现象, 但是对于强磁场复合电流对金属材料固态相变的影响却还未见相关的报道. 这对磁场和电流的相互作用及其对合金固态相变的影响都有着重要的意义, 由此本文设计实验, 考察了强磁

场复合直流电流 (电流密度为 100 A/cm<sup>2</sup>) 对 Cu-Cr-Zr 合金 (经过固溶和冷变形处理) 等温时效处理后组织和性能的影响. 希望在电流对 Cu-Cr-Zr 合金时效过程的影响的基础之上<sup>[17,18]</sup>, 以 Cu-Cr-Zr 合金为载体研究磁场复合电流对合金固态相变的影响, 并初步探讨磁场与电流的相互作用机理. 此外, 它对 Cu-Cr-Zr 合金组织性能的影响也是我们关注的重点.

## 2 实验材料及方法

本实验用铜铬锆合金由江阴创益金属有限公司提供. 合金的制备经过了以下工序: (a) 在 Ar 气保护下熔炼并制成 50 mm×50 mm 的铸锭; (b) 970 °C 固溶处理 1 h 后水淬; (c) 经过多道次冷轧 + 中间退火加工成厚 6 mm 的板材, 再次固溶处理; (d) 最终冷轧成厚度为 2 mm 的板材. 合金样品分别经过 AAS 和 ICP-AES 检测, 其具体化学成分为 0.41 wt%Cr, 0.21 wt%Zr, 余下为 Cu. 最后, 合金经过线切割加工成为 120 mm×15 mm×2 mm 的片状样品.

实验时效装置图如图 1 所示, 样品在管式电阻炉恒温区加热时效, 整个时效过程在炉中通入高纯氩气保护. 热电偶固定在样品中部实时监控样品温度并通过控温仪对时效温度进行精确控制. 两个不锈钢电极与样品相连, 起着固定样品和施加电流的作用. 样品升温时间为 1 h, 温度到达预定温度后立即施加直流电流, 并持续整个保温过程, 保温过程结束立即关闭电源, 立即水淬. 等温时效过程工艺参数如下, 时效保温 350 °C, 450 °C, 50 °C; 保温时间 3 h; 施加直流电流密度 30 A (电流密度 100 A/cm<sup>2</sup>).

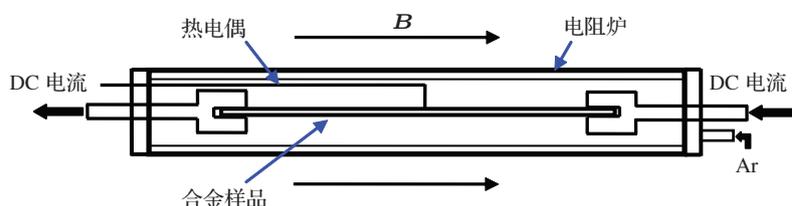


图 1 时效装置示意图

实验过程中整个时效装置放置在超导强磁体的室温孔中, 并确保样品位于强磁体的中心稳恒区域. 超导强磁体为英国牛津仪器公司生产的液氮液氦冷却型超导磁体, 室温口径为 98 mm, 磁感应强

度可在 0—12 T 区间任意设置. 实验过程中炉体为竖直方向放置, 保持磁场方向和电流方向相反, 即磁场方向和电子运动方向相同.

样品电导率通过四探针电阻法测量, 测量仪器

为 Keithley2180A 纳伏仪和 2400 数字源表, 测量温度为 20 °C, 电导率值用 %IACS(即国际退火铜标准) 表征. 显微硬度用 Ever one MH-3 显微硬度仪测量, 载荷为 100 g, 加载时间为 5 s, 显微硬度测试样品经过抛光处理, 保持样品表面平整, 每个样品至少取 5 个值取其平均值. 透射电子显微镜仪器型号为 JEM-2010F, 加速电压为 200 kV. 透射电镜样品的制备经过机械减薄和电解双喷减薄处理, 双喷电解液为 50% $\text{HNO}_3$  + 50%  $\text{CH}_3\text{OH}$ , 温度为 -40 °C.

### 3 实验结果

图 2 和图 3 是 Cu-Cr-Zr 合金在强磁场复合电流(施加直流电流密度为 100 A/cm<sup>2</sup>) 下时效后性能随着磁场强度的变化关系图. 从图 2 中首先可以看出, 时效温度仍是该合金时效过程的最大影响因素. 随着时效温度的升高, 合金中原子由于热激活作用使得原子扩散能力加强, 促进了合金中固溶原子大量析出, 从而导致合金的电导率随温度大幅升高. 其次, 在相同时效温度下, 磁场的影响规律开始显现, 随着磁场强度的增加, 合金电导率持续升高. 然而, 不同时效温度下, 合金电导率随磁场强度变化规律有所不同. 在低温时效(350 °C) 时, 随着磁场强度增大, 合金电导率随之持续升高. 与无磁场下相比, 2 T 和 6 T 磁场下时效后合金电导率只有小幅升高, 增幅分别为 0.8%IACS 和 1.9%IACS; 而当磁场强度进一步增加到 10 T 时, 合金电导率大幅提高到 75.8%IACS, 比无磁场下提高了 22.1%IACS, 甚至高于 450 °C 无磁场时的 71.6%IACS. 而在常规条件(无磁场和电流的施加) 下该合金在 350 °C 时效后的电导率仅为 48%IACS. 可见, 10 T 强磁场复合 100 A/cm<sup>2</sup> 直流电流对该合金电导率的提高十分显著. 在中、高温(450 °C 和 550 °C) 时效时, 合金电导率随磁场强度变化的趋势非常类似, 并且与低温(350 °C) 时效时有所差异: 随着磁场强度升高, 合金电导率也随之升高, 但上升趋势随着磁场强度的增加而逐渐放缓; 在磁场强度为 2 T 时, 电导率上升趋势最为明显, 与无磁场下合金电导率相比 450 °C 和 550 °C 分别增加了 8.8%IACS 和 6.8%IACS. 最后, 从不同温度下电导率随磁场强度升高的最大值(从低温到高温分别为 22.1%IACS, 12%IACS, 9.8%IACS) 可以看出, 强磁场复合电流对 Cu-Cr-Zr 合金电导率的促进作用在低温下更明显. 这是由于在低温下时效, 相比于较低的热激活能, 强磁场复

合电流的作用更突出.

对于合金的另一个重要性能——显微硬度随磁场强度的变化, 从图 3 可以看出, 温度也是合金显微硬度的最大影响因素, 总体看来 450 °C 时效后合金显微硬度最高, 其次为 350 °C, 550 °C 时最低. 低温(350 °C) 和中、高温(450, 550 °C) 时效下合金显微硬度随磁场强度的变化趋势明显不同. 在低温(350 °C) 时效时, 合金的显微硬度随磁场强度增加而升高, 这和电导率的变化规律类似, 显微硬度在 10 T 时达到最高值 182(HV), 仅次于 450 °C, 2 T 时的显微硬度 186(HV); 比无磁场时 156.7(HV) 提高了 25.3(HV). 而中、高温(450, 550 °C) 时效时合金显微硬度随磁场强度的增加先升高后减小, 2 T 时达到峰值. 而且 10 T 磁场下时效后的合金显微硬度和无磁场时相当.

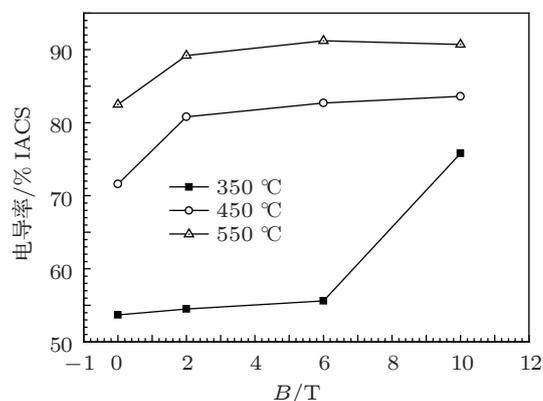


图 2 磁场复合电流下时效后铜铬锆合金电导率的随磁场强度的变化图 ( $t = 3 \text{ h}$ ,  $I = 100 \text{ A/cm}^2$ )

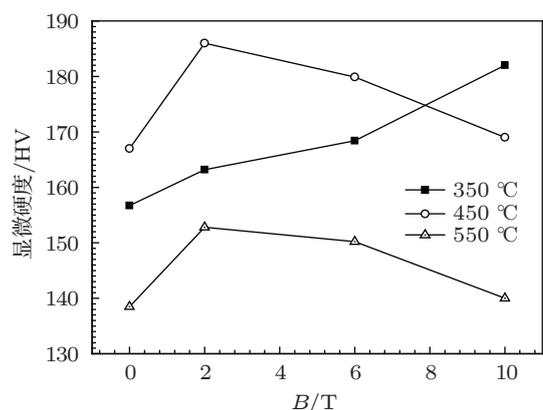


图 3 磁场复合电流下时效后铜铬锆合金显微硬度随磁场强度的变化图 ( $t = 3 \text{ h}$ ,  $I = 100 \text{ A/cm}^2$ )

综上所述, 在 Cu-Cr-Zr 合金时效过程中强磁场复合直流电流(100 A/cm<sup>2</sup>) 能显著影响合金时效后的性能. 合金综合性能较好的实验条件为 350 °C,

10 T (75.8%IACS, 182HV); 450°C, 2 T (80.8%IACS, 186HV).

## 4 分析讨论

### 4.1 显微组织及分析

为了观察与合金性能变化相对应的组织变化情况, 对不同实验条件下合金作 TEM 显微组织分析. Cu-Cr-Zr 合金在 350 °C, 不同磁场条件下时效后的透射电镜图如图 4 所示. 其中图 4(a) 为无磁场下合金组织图, 可以看到, 无磁场时合金基体中存在呈带状分布的大面积高密度位错组织, 这是冷变形过程中形成的变形织构的残留. 我们知道在冷变

形合金的时效过程中, 合金变形组织在变形储能的驱动下发生回复. 在大量位错移动过程中异号位错互相接触湮没, 使得位错大量减少; 同时, 同号位错互相缠结进而形成位错墙和胞状组织, 甚至亚晶界. 图 4(a) 中的带状组织在回复的作用下变得模糊且松散, 在高密度位错带之间可以观察到大小不均匀的亚晶粒, 这是典型的冷变形合金的回复组织. 而且, 从集体组织中残留的变形织构和较多的位错可以判断, 此时合金还没有发生再结晶. 此外, 在该合金组织中没有观察到明显的第二相析出物, 这是由于在低温 (350 °C) 时效过程中, 热激活能较低, 原子扩散能力较弱, 过饱和固溶体中溶质原子脱溶驱动力不足, 所以基体中没有明显的析出相产生或者由于析出相尺寸太小无法观测到.

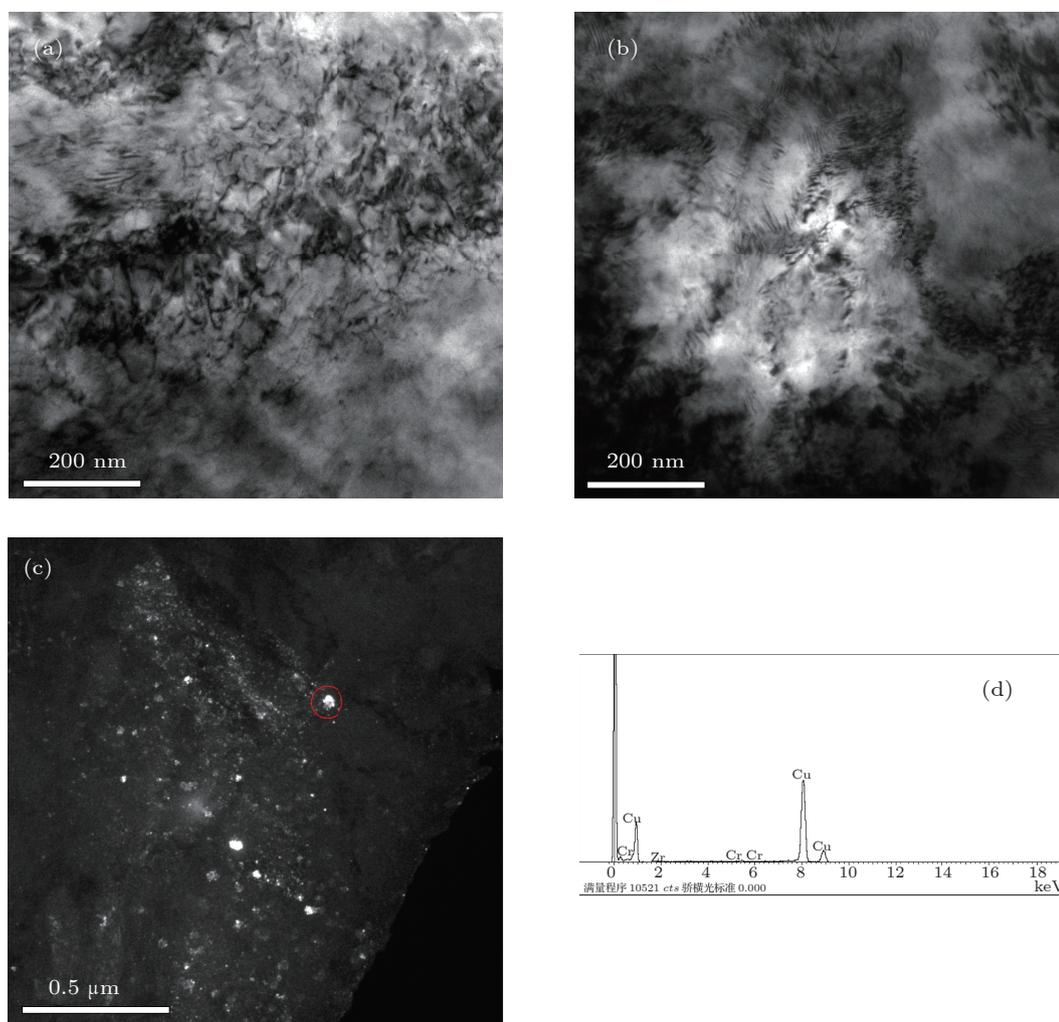


图4 铜铬锆合金 350 °C 时效透射电镜图 (a) 为无磁场; (b) 和 (c) 为 10 T 磁场 ( $t = 3 \text{ h}$ ,  $I = 100 \text{ A/cm}^2$ ); (d) 为 (c) 中圆圈处试样的 EDS 谱图

10 T 磁场下时效的合金显微组织如图 4(b) 所示, 从图中可以看出合金基体中没有了明显的冷变形织构及其残留组织, 取而代之的是一些低位错密度组织, 但总体看来基体中还是保留了不少位错; 同时, 基体中能观察到明显的亚晶粒, 该亚晶粒是由大量平行规则排布的位错墙构成. 这是由于在合金时效过程中随着回复的进一步发展造成的. 与无磁场下合金显微组织相比, 10 T 下出现了更大尺寸的胞状组织和亚晶粒, 以及更少的位错. 由此判断, 10 T 磁场下合金的回复过程进行得更加彻底. 此外, 从图 4(c) 可以观察到基体中存在少量且不均匀的 Cr 相富集物, 而在无磁场下没有观察到类似组织. Suzuki 等<sup>[20]</sup> 研究认为铜铬锆合金的时效

析出大约温度在 440 °C. 所以, 一般认为在 350 °C 的低温时效时不会出现明显的第二相析出物. 然而, 本实验中却在 350 °C, 施加 10 T, 100 A/cm<sup>2</sup> 条件下有较为明显的 Cr 富集相的出现, 这充分说明电磁复合场有效的促进了 Cu-Cr-Zr 合金过饱和固溶体的分解形成析出相. 另一方面, 这样的组织差异也很好的解释了两种条件下合金时效性能的显著差异.

图 5 是 Cu-Cr-Zr 合金在 450 °C 不同磁场强度下时效后的透射电镜图片. 从图 5(a) 中可以看到, 无磁场下时效合金的基体组织明显不均匀, 仍然有变形织构的残留组织, 说明在 450 °C 无磁场时效过程中, 合金的回复在结晶过程中并没有进行完全.

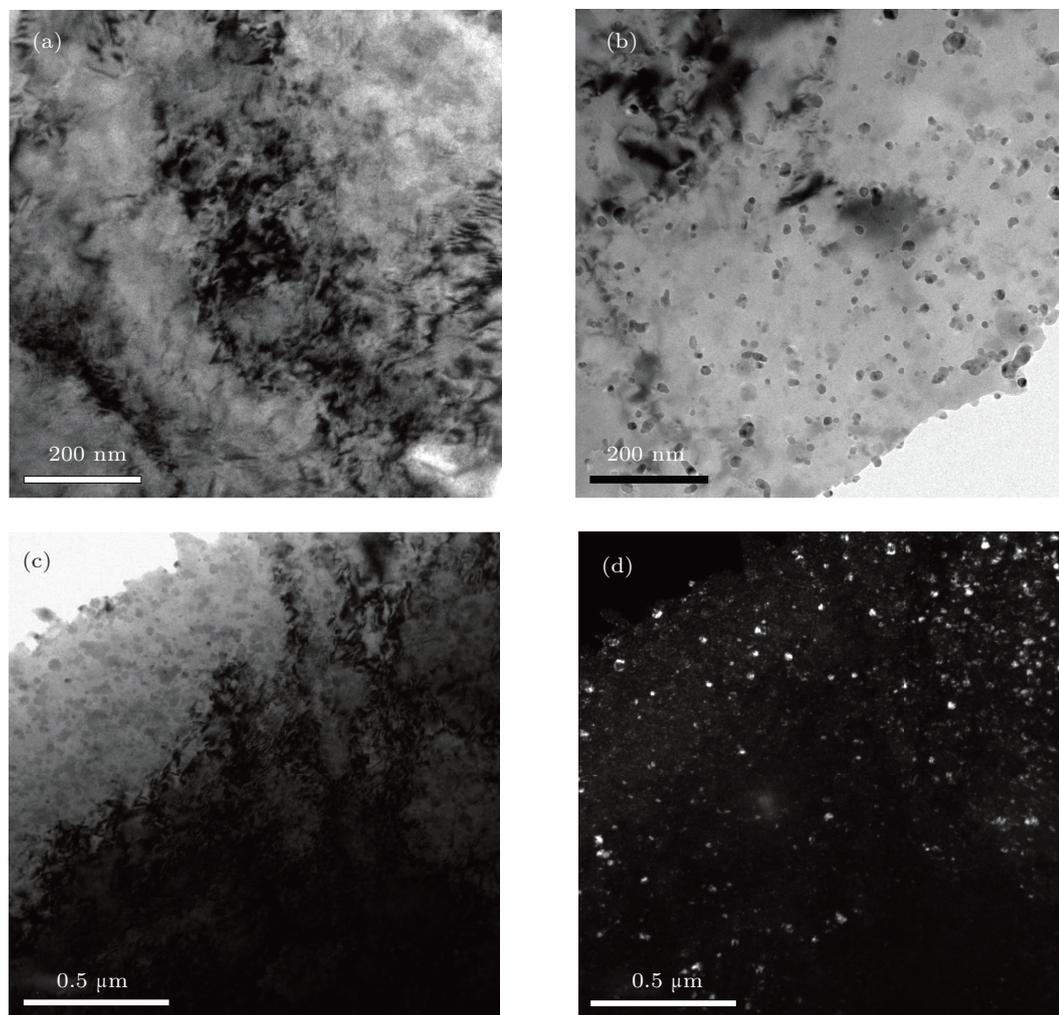


图 5 铜铬锆合金 450 °C 时效透射电镜图片 (a) 无磁场; (b) 10 T 磁场; (c), (d) 2 T 磁场下同一视场下的明暗场图片 ( $t = 3 \text{ h}$ ,  $I = 100 \text{ A/cm}^2$ )

10 T 磁场时效的合金显微组织如图 5(b) 所示, 从图中看出此时基体中没有明显的位错密集区, 同时基体中弥散分布着大量的尺寸为 10—30 nm

的 Cr 析出相, 但需要注意的是其中尺寸较大的析出相可能是没有完全固溶进基体中的 Cr 相颗粒. 可见, 磁场促进了大量固溶原子的析出, 使得铜基

体中晶格畸变减小,从而减弱了它对电子传导的散射,提高了合金电导率.此外,虽然 Cu-Cr-Zr 合金是一种典型的时效强化型铜合金,但是本实验中合金的溶质原子浓度很低,导致析出强化的效果并不是决定性的.所以,我们认为该合金的显微硬度是由冷变形强化和时效析出强化共同决定的.但是,通常情况下两者此消彼长,这是造成合金电导率和强度鱼与熊掌不可兼得的主要原因.从图 5 中显微组织可以看到,对于无磁场(图 5(a))和 10 T(见图 5(b))条件下时效合金,前者基体中保留了不少冷变形强化,但析出相很少;后者析出相强化明显,但冷变形强化消失殆尽,最终使得两者显微硬度相当(见图 3).

2 T 磁场时效后合金的显微组织如图 5(c) 所示,和无磁场下时效合金组织相比,2 T 时出现了更多的且分布均匀的位错.这是由于大量析出 Cr 富集相通过奥罗万机理钉扎住位错,阻碍了它的运动而保留下来的.在图 5(d) 中观察到基体中出现了大量的 Cr 富集相,这就是很好的证明.同时也解释了 450 °C, 2 T 下时效合金同时拥有较高电导率和显微硬度原因.造成这种特殊组织是由于在 450 °C 下较高的热激活能和强磁场提供的驱动力促进了过饱和固溶体的分解并形成 Cr 的富集相,而同时 2 T 磁场还不足以驱使位错挣脱析出相的钉扎作用,从而使得 2 T 时合金保留了大量的位错,最终得到了较高电导率和显微硬度的良好匹配.

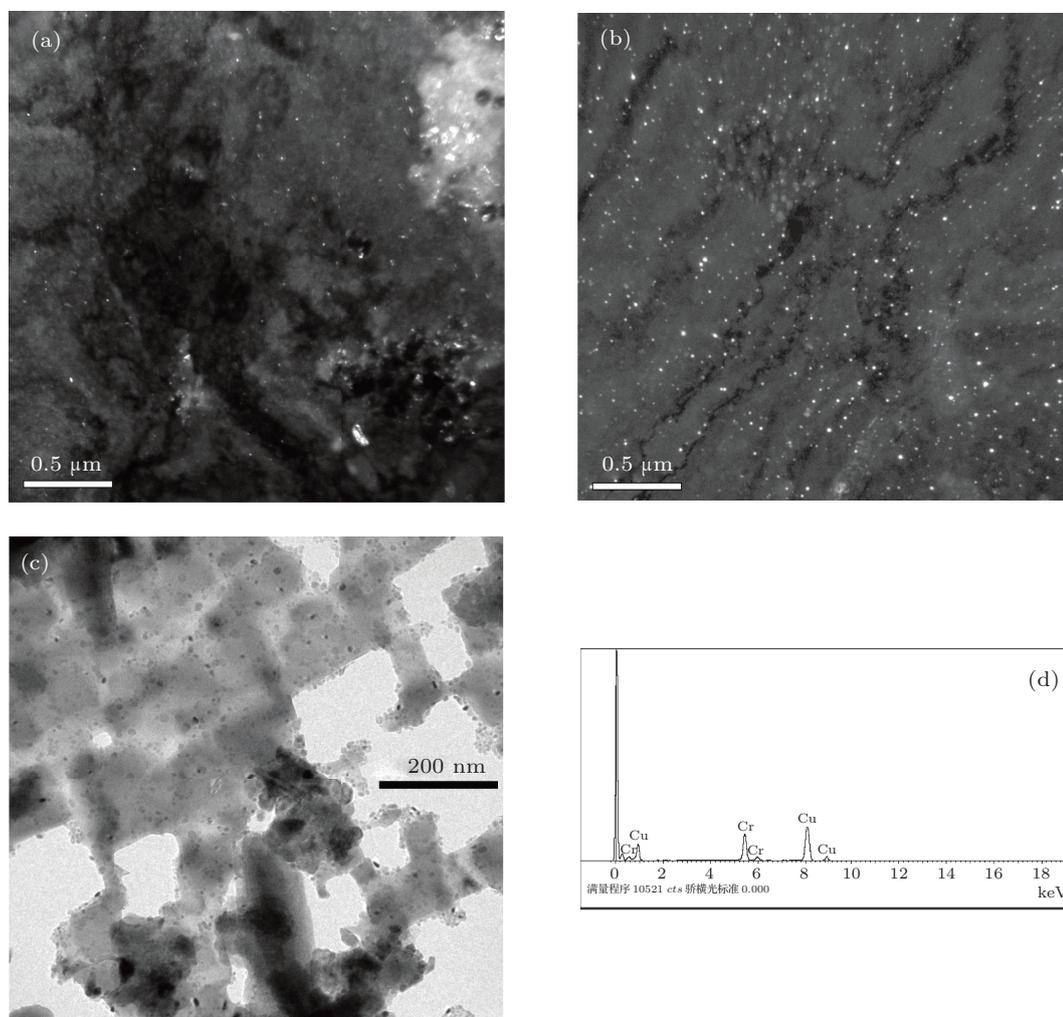


图 6 铜铬锆合金 550 °C 时效透射电镜图 (a) 和 (b) 分别为无磁场和 10 T 磁场下暗场相图; (c) 为 10 T 磁场下明场相图 ( $t = 3 \text{ h}$ ,  $I = 100 \text{ A/cm}^2$ ); (d) 为 (b) 中圆圈处试样的 EDS 谱图

从图 6 可以看出, 550 °C 时效时, 由于高温下原子的扩散能力大幅增强, 有无磁场下在合金基体中都出现了细小弥散的 Cr 相析出物. 无磁场时, 从

图 6(a) 中可以观察到零星的 Cr 相析出物在基体中均匀的分布; 同样的现象在 10 T 磁场下更加明显(见图 6(b)), 只是 10 T 下数量更多分布更均匀.

在图 6(b) 中选取一个亮色区域 (红圈) 进行 SAD 衍射分析, 结果表明此区域为 Cu 相, 沿  $\langle 111 \rangle$  晶向轴发生了衍射, 由此说明该相为 Cr 的富集相. 以上结果表明, 磁场的施加在高温下也同样促进合金过饱和和固溶体中 Cr 原子的析出. 只是由于在高温时效时合金中固溶原子析出都很充分, 所以在性能的提高方面没有低温下明显.

此外, 从图 6(d) 10 T 磁场下合金基体明场相图中可以看到, “残缺”的基体中能观察到几乎完整的晶粒, 完全没有织构和明显的位错; 而且还能看到大量细小的 Cr 析出物. 由此, 我们认为此时 Cu-Cr-Zr 合金已经完成了充分的再结晶过程, 而且固溶体中溶质原子的析出也非常彻底. 此时合金中由于冷变形带来的变形强化效应随着再结晶的完成而完全消失, 从而造成该条件下合金拥有高的电导率和非常低的显微硬度.

综上所述, 强磁场复合直流电流 ( $100\text{A}/\text{cm}^2$ ) 促进了位错的移动从而加快了回复和再结晶过程, 同时也促进了过饱和固溶体的分解形成析出相, 冷变形组织的回复再结晶过程和过饱和固溶体的分解这两个过程的相互作用决定了合金的组织及性能.

## 4.2 机理分析

以 Conrad 等对于电流对金属固态相变的影响做了大量的研究, 主要集中在电流对金属再结晶过程、电致塑性等方面的研究<sup>[15,16]</sup>. 无论是电流对晶粒大小的影响还是提高了金属的塑性, 都被认为是电流促进了位错的移动能力. 进一步解释为, 由于大量移动的电子和空位、位错等晶体缺陷的交互作用促进了缺陷的移动, 这就是“电子风力”的作用机理. 在我们前期的工作中, Wang 等<sup>[17,18]</sup>对电流对 Cu-0.41Cr-0.21Zr 合金时效后组织和性能影响的研究结果也进一步支持了“电子风力”的观点.

前文提到, 由楼磊、钟云波等<sup>[20]</sup>的研究认为在液态或半固态下磁场增加了电子与 BiMn 相颗粒的碰撞次数, 增加了电流的有效密度. 该结论引起了本实验的兴趣, 同时也提供了启发.

从实验结果我们发现同电流时效相比强磁场复合电流 ( $100\text{A}/\text{cm}^2$ ), 更明显地促进了过饱和固溶体的分解, 并且加快了合金的回复再结晶过程. 显然强磁场和直流电流的相互作用是导致变化的原因, 我们认为静磁场促进了直流电流的作用效果, 从而进一步的促进了 Cu-Cr-Zr 合金的时效过程. 静磁场对电流的作用机理如图 7 所示.

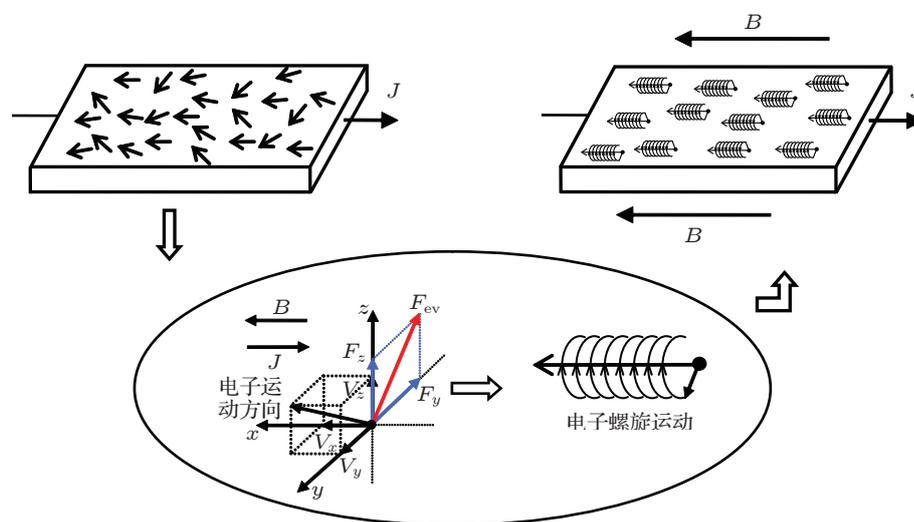


图 7 静磁场对样品中电流作用示意图

众所周知, 电子在金属导体中传导时由于晶格畸变会发生散射. 在本实验中由于 Cu-Cr-Zr 合金是经过固溶和冷变形处理的, 所以合金基体中存在大量固溶原子和晶格缺陷, 使得晶格畸变异常严重, 可以断定在该合金中的散射会更加剧烈, 而原始试样的电导率仅为  $38\% \text{IACS}$  也很好的证实了这一点.

实验过程中, 电流施加到 Cu-Cr-Zr 合金上, 基体对电子的散射作用如图 7 中左图所示. 电子在合金中传导, 经过散射后会偏离电子原来的运动方向, 随机的散射导致大量的电子的运动方向杂乱无章. 但由于电场的作用, 使得电子总的运动方向朝着电源正极. 然而施加磁场后, 发生散射的电子的运动方

向与磁场方向呈一定角度,因而会受到洛伦兹力的作用,进而影响到电子的运动轨迹.如图7所示,随机取一个散射电子并作受力分析,该电子在垂直于磁场的方向运动的分量使得它受到一个垂直于该运动方向的洛伦兹力  $F_{ev}$ ,导致该电子产生螺旋运动,抑制了电子在垂直于磁场方向的运动,使得电子迅速的又朝平行于磁场方向(电源正极)运动.

无磁场时,大量的自由电子的定向漂移形成的“电子风”效应,和空位、位错等晶体缺陷相互作用,并且促进了缺陷的运动能力,从而促进了 Cu-Cr-Zr 合金的时效过程.当电场和磁场同时施加时,由以上的分析可知,磁场减弱了电子由于散射造成的杂乱运动,大量的自由电子的上述螺旋形定向漂移将形成特殊的“电子风”效应,而使得电子更加一致的朝着正极移动,螺旋形“电子风”也增加了电子与强化原子的碰撞概率,此时我们认为“电子风”作用被加强了,从而导致电磁复合场更进一步促进了 Cu-Cr-Zr 合金的时效过程.

综上所述,我们认为在施加直流电流密度为  $100 \text{ A/cm}^2$  的条件下,磁场复合电流促进 Cu-0.41Cr-0.21Zr 合金时效过程并改变其性能和显微组织的机理在于:在电流作用的基础上,磁场的施加强化了“电子风”,形成螺旋“电子风”效应,即磁场进一步强化了电流的作用.此外,对于施加直流电流密度为  $100 \text{ A/cm}^2$  的条件下,我们认为“电

迁移效应”的影响也是不能完全忽略的,所以,磁场“电迁移效应”的强化也可能是促进过饱和固溶体的分解的原因之一.对于电磁复合场对合金固态相变的影响是一个较为复杂的体系,要获得定量的解释还需要更深入的研究.

## 5 结论

1. 电磁复合场下时效相对于电流下时效后 Cu-Cr-Zr 合金的电导率和显微硬度均有显著提高,其中在  $350^\circ$ ,  $10 \text{ T}$  磁场下效果最明显,分别升高了 22.1%IACS 和 25.3HV.

2. 电磁复合场促进了合金的回复再结晶过程和过饱和固溶体的分解,导致时效后合金基体中位错密度的降低和第二相析出物的增加;而过饱和固溶体分解形成 Cr 的富集相对位错和晶界运动的阻碍导致了合金在电磁复合场下时效后有更高的显微硬度.

3. 在施加直流电流密度为  $100 \text{ A/cm}^2$  条件下,磁场复合电流促进 Cu-0.41Cr-0.21Zr 合金时效过程并改变其性能和显微组织的机理在于:在电流作用的基础上,磁场的施加强化了“电子风”,形成螺旋“电子风”效应,即磁场强化了电流的作用,从而更加显著地促进了 Cu-0.41Cr-0.21Zr 合金的时效过程.

- [1] Qiang L, Xiang Z, Yan G 2006 *Metall. Mater. Trans. A* **37** 3233
- [2] Liu P, Kang B X, Cao G 1999 *Mater. Sci. Eng. A* **265** 262
- [3] Vinogradov A, Patlan V, Suzuki Y 2003 *Acta Mater.* **50** 1639
- [4] Henmi Z, Nagai T 1969 *Trans. Jpn. Inst. Metals.* **10** 305
- [5] Tsuchiya K, Kawamura H 1996 *J. Nucl. Mater.* **233-237** 913
- [6] Watanabe C, Monzen R, Tazaki K 2008 *J. Mater. Sci.* **43** 813
- [7] Shimotomai M, Maruta K, Mine K, Matsui M 2003 *Acta Mater.* **51** 2921
- [8] Peters C T, Miodownik A P 1973 *Scripta Metall.* **7** 955
- [9] Martikainen H O, Lindroos V K, 1981 *Scand. J. Metall.* **10** 3
- [10] Youdelis W V, Colton D R 1964 *J. Canadian Journal of Physics* **42** 2217
- [11] Nakajima H, Maekawa S 1985 *Japan Inst. Metals.* **26** 1
- [12] Liu W C 2006 *Ma. D. Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [刘万忱 2007 硕士学位论文(大连:大连理工大学)]
- [13] Koppelaar T J, Simcoe C R 1963 *Trans. Met. Soc. AIME.* **227** 615
- [14] Zhou Q, Yang Y, Tang J, Hu Z 2006 *Acta Metall. Sin.* **42** 28
- [15] Conrd H, Karam N, Mannan S 1983 *Scripta Mater.* **17** 411
- [16] Conrd H 2000 *Mater. Sci. Eng. A* **287** 227
- [17] Wang Z Q, Zhong Y B, Lei Z S, Ren W L, Ren Z M, Deng K 2009 *J. Alloy Compd.* **471** 172
- [18] Wang Z Q, Zhong Y B, Cao G H, Wang C, Wang J, Ren W L, Ren Z M. 2009 *J. Alloy Compd.* **479** 303
- [19] Lou L, Zhong Y B, Ren Z M 2006 *Chin J Nonferrous Met.* **16** 728 (in Chinese) [楼磊, 钟云波, 任忠鸣 2006 中国有色金属学报 **16** 728]
- [20] Suzuki H, Kanno M J 1972 *Japan Inst. Metals.* **36** 363

# Electrical and mechanical properties of a Cu-Cr-Zr alloy aged under an imposed DC current and static magnetic field\*

Rao Xian-Jun Zhong Yun-Bo<sup>†</sup> Zhang Zeng-Guang Wang Zhi-Qiang  
Deng Kang Ren Zhong-Ming Xu Kuang-Di

(Key Laboratory of Modern Metallurgy and Materials Processing, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 21 April 2012; revised manuscript received 5 June 2012)

## Abstract

In this paper, Cu-0.41wt.%Cr-0.21wt.%Zr alloy is subjected to an isochronal aging treatment with a DC electric current (100A/cm<sup>2</sup>) and a static magnetic field simultaneously imposed. The alloy in the form of plate with a thickness of 2 mm is solid-solution-treated and cold deformed with a total area reduction of more than 98% before aging.

The results indicate that the conductivity and micro hardness of the sample are significantly improved by the imposed electric-magnetic field. The conductivity of the sample increases with magnetic flux density (MFD) improving, especially at a lower aging temperature (350 °C), and a maximum improvement of 22.1% IACS in conductivity could be obtained with a 10 T magnetic field. For the property of micro hardness, it increases with MFD increasing at a lower aging temperature (350 °C), while at a higher aging temperature, it first increases and then decreases with MFD increasing. The effects of the DC current and magnetic field on the microstructure of the alloy are investigated by transmission electron microscopy. A lower dislocation density and more Cr precipitation are observed under electric-magnetic couple field than under the DC current only. It indicates that the electric and magnetic fields enhance the aging process of Cu-Cr-Zr alloy distinctly.

According to the experimental results, we believe that the main mechanism of the influence of electric and magnetic fields on the Cu-Cr-Zr alloy is that the magnetic field enhances the interaction between solute atoms, vacancies, dislocations and electron wind force, thereby intensifying the effect of the dc current.

**Keywords:** static magnetic and electric field, Cu-Cr-Zr alloy, electric conductivity, micro hardness

**PACS:** 13.40.Gp, 81.40.Cd, 81.40.Rs, 81.05.Bx

\* Project supported by the National High-tech R&D Program of China (Grant No. 2009AA03Z109), the Key Research and Innovation Program from Shanghai Municipal Education Commission (Grant No. 09zz98), the Key Project from Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (Grant Nos. 09dz1206401, 09dz1206402), and the Doctoral Program Foundation of Institutions of Higher Education of China (Grant No. 20093108110012).

<sup>†</sup> E-mail: yunboz@staff.shu.edu.cn