

线路是国家电网贯彻落实国家西电东送战略，以及大气污染防治计划的重点工程，对于解决准东煤电基地开发和满足用电负荷增长需求，有着重要意义。在上海市重点攻关及平台建设项目、金冠-国家电网重大专项等支持下，平台围绕特高压输电线路避雷器关键技术及应用开展产学研协同攻关，实现多项创新突破：（1）提出多组分、多尺度金属氧化物复杂体系组分及结构精细调控、超细分散、烧结控制等创新技术，有效提高氧化锌压敏电阻通流能力、电位梯度及耐老化等性能；（2）提出多组分氧化物共沉淀均匀控制、纳米颗粒高效分散及有机聚合物均匀复合、无机高阻层/有机聚合物绝缘涂层协同增强等创新技术，有效提高氧化锌电阻片抗闪络侧面绝缘能力；（3）形成了完整技术参数和技术规范，填补了行业空白；优化避雷器系统结构，提升机械强度和抗风摆能力；独创自动化生产系统，实现特高压交直流输电线路稳定、可靠、规模化应用。

本案例成果已实现高性能氧化锌压敏电阻及特高压输电线路避雷器产品工业化稳定生产，相关产品在多个重大工程竞标中与国际知名企业同台竞争并处于优势地位，应用的重大输电线路工程包括：三峡工程、向家坝-上海 $\pm 800$  kV 特高压直流工程、榆横-潍坊 1000 kV 特高压交流输变电工程等。金冠电气已成为全国特高压输电线路工程配套避雷器四家企业之一，避雷器产品在国家电网公司中标份额连续三年排名第一，其中特高压避雷器产品市场保有率第一。金冠电气收获了“避雷器制造业单项冠军产品”、“中国驰名商标”等一系列殊荣。本案例成果实施极大提升了高性能氧化锌压敏电阻核心材料及避雷器产品品质，促进我国特高压输电线路建设快速稳定发展。该成果荣获 2021 年河南省科技进步二等奖。

### 铸态 Mg-Sm-Gd-Zn-Zr 合金微观组织与力学性能研究

秦成，车朝杰，程丽任，邓瑞平，张洪杰

中国科学院长春应用化学研究所中国-白俄罗斯先进材料与制造“一带一路”  
联合实验室

lrcheng@ciac.ac.cn, hongjie@ciac.ac.cn

**Аннотация.** В данной работе исследованы микроструктура и механические свойства литых сплавов Mg-xSm-yGd-Zn-Zr ( $x = 3, y = 5; x = 4, y = 4; x = 5, y = 3$  wt.%). Среди них сплав Mg-4Sm-4Gd-Zn-Zr имеет лучшее измельчение зерна и лучшие механические свойства при комнатной температуре, с пределом текучести, прочностью на разрыв и удлинением 133 МПа, 198 МПа и 9,2 % соответственно, что лучше, чем коммерческий жаропрочный магниевый сплав WE43 в соответствующем состоянии.

**摘要。**本工作研究了铸态 Mg-xSm-yGd-Zn-Zr ( $x = 3, y = 5; x = 4, y = 4; x = 5, y = 3$  wt.%) 合金的微观组织和力学性能。其中 Mg-4Sm-4Gd-Zn-Zr 晶粒细化效果最好，室温力学性能最佳，屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 133MPa、198MPa 和 9.2%，优于相应状态的 WE43 商用耐热镁合金。

镁合金作为实际应用中最轻的金属结构材料，密度小，比强度和比刚度高，切削加工性好资源丰富，容易回收。WE 系列 (Mg-Y-Nd-Zr) 稀土镁合金中同时包含铈族和钇族稀土元素，而不同族的稀土元素可以降低彼此在镁基体中的固溶度，促进析出相析出，提高析出相在合金中的体积分数，进一步强化镁合金。因此该系合金具有良好的强度和耐热性能，在航天航空领域已得到广泛应用。但由于 Nd 元素的价格昂贵，使得该系合金的成本过高。Sm 元素与 Nd 元素同属铈族稀土元素，与 Nd 元素相比，Sm 在镁基体中具有更高的固溶度 (5.8wt. %)，且市场价格仅为 Nd 的 20 %。因此，开展在镁合金中利用 Sm 来替代或部分替代 Nd 的研究具有十分重要的意义。

### 1. 铸态合金微观组织分析

图 1 是 A、B、C 铸态合金的光学显微组织和扫描电镜照片。从图 1a、b、c 金相组织中可以看到，三种合金的微观组织主要由先凝固的  $\alpha$ -Mg 和后凝固于晶界处的共晶相组成。利用截线法，对合金进行晶粒尺寸统计，A、B、C 合金的晶粒尺寸分别为  $46.4 \pm 3.0 \mu\text{m}$ 、 $37.7 \pm 2.0 \mu\text{m}$ 、 $49.8 \pm 3.0 \mu\text{m}$ ，其中 B 合金的晶粒最细，在合金快速凝固过程中，稀土元素聚集在固液界面前沿，影响局部区域的成分过冷度。

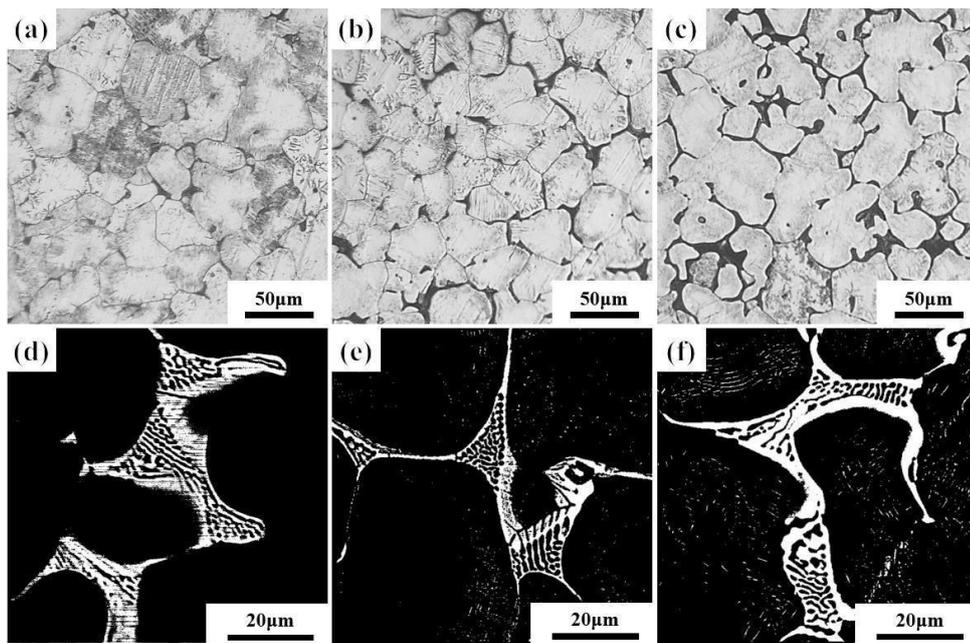


图 1 – 铸态 Mg-xSm-yGd-Zn-Zr(wt.%)合金光学显微组织和扫描电镜照片，(a, d) x = 3, y = 5; (b, e) x = 4, y = 4; (c, f) x = 5, y = 3

### 2. 拉伸性能分析

图 2(a)为 A、B 和 C 铸态合金在室温的力学性能。结果显示，随着 Sm/Gd 质量比增大，屈服强度 (YS) 和抗拉强度 (UTS) 呈现先增大后减小的趋势，而延伸率反之。对 A 合金而言，元素大多以固溶形式存在，因此固溶强化效果显著。随着 Sm 元素的增加，化合物数量增加，C 合金中化合物对位错运动的

钉扎作用最强，但合金总体力学性能的变化规律与晶粒尺寸变化规律一致，因此，晶粒尺寸是影响三种合金的力学性能的决定性因素。图 2(b)为 A、B 和 C 铸态合金在 150°C 的力学性能柱状图。结果表明，当温度升高至 150°C 时，合金力学性能下降不明显，延伸率提高有限，B 合金性能表现最佳，YS、UTS 以及延伸率分别为 127MPa、183MPa 和 13.7 %。图 2(c)表明，当温度升高至 250°C 时，合金力学性能下降依然不明显，B 合金性能表现最佳，YS、UTS 以及延伸率分别为 126MPa、179MPa 和 17.0%。合金在高温时性能下降不明显的原因主要在于当拉伸温度升高，晶界处存在的(Mg,Zn)<sub>3</sub>(Sm,Gd)共晶相能够在一定程度上有效钉扎高温晶界滑移，使合金并未发生明显软化，导致温度升高依然保持良好的耐热性能。

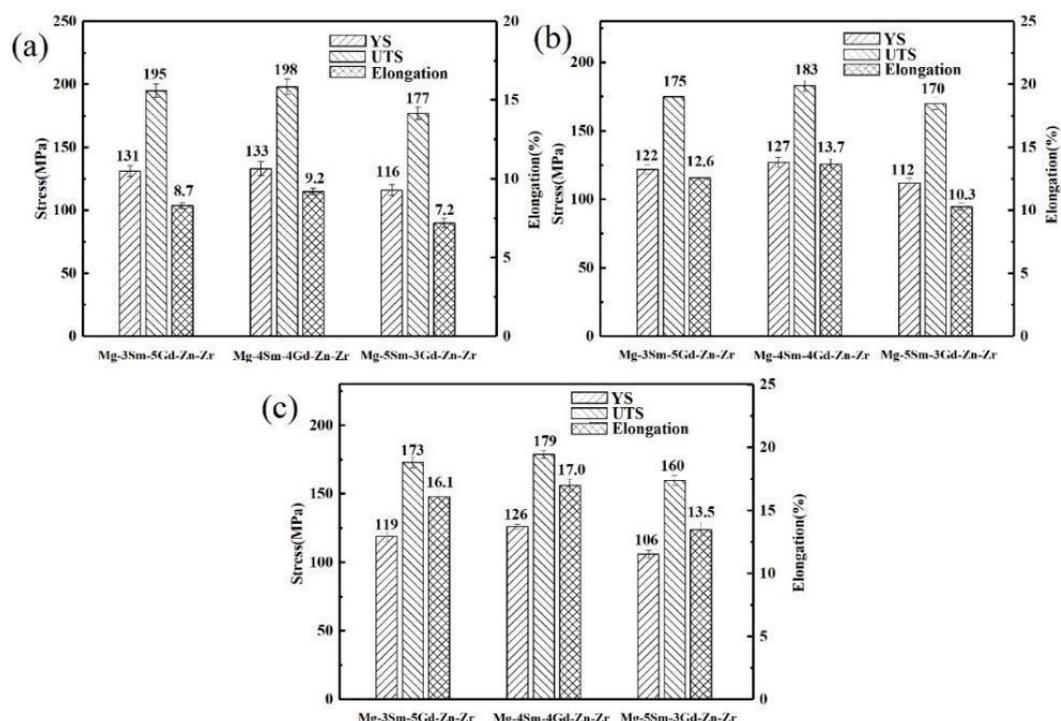


图 2 – 铸态 Mg-xSm-yGd-Zn-Zr (x = 3, y = 5; x = 4, y = 4; x = 5, y = 3 wt.%) 合金在(a) 室温, (b) 150 °C 以及(c) 250 °C 时拉伸性能

### 3 结论

采用轻重稀土混合添加的思路，通过 OM、XRD、SEM、TEM、拉伸试验机等手段研究了铸态 Mg-xSm-yGd-Zn-Zr (x = 3, y = 5; x = 4, y = 4; x = 5, y = 3 wt.%) 合金的微观组织和力学性能。得出如下结论：铸态合金中存在面心立方结构的(Mg,Zn)<sub>3</sub>(Sm,Gd)相，a = 0.726 nm。三种铸态合金的平均晶粒尺寸分别为 46.4±3.0 μm、37.7±2.0 μm 和 49.8±3.0 μm，表明快冷条件下 Mg-4Sm-4Gd-Zn-Zr 合金的晶粒细化效果最好，室温力学性能最佳，屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 133 MPa、198 MPa 和 9.2 %，全面优于相应状态的 WE43 商用耐热镁合金，达到了在降低合金成本的同时保持优异力学性能的预期目标。