

聚变用钒基合金与弥散强化铜合金的研究进展

李增德¹, 李卿¹, 解浩峰¹, 彭丽军¹

¹有研工程技术研究院有限公司有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 101407

Email: 18500318956@163.com

摘要:核聚变能是绿色的, 安全的, 经济性好的电力能源。然而核聚变能的实现, 在很大程度上取决于成功地开发核部件的高性能材料。包层和偏滤器均为核聚变装置的重要部件。其中, 包层是实现能量转换, 氚自持及辐照屏蔽的主要部件; 偏滤器是实现排除杂质, 排除热量和反应产物氦灰的主要部件。满足包层和偏滤器苛刻应用环境要求的结构材料的开发及性能检测成为目前国内外研究的热点。

钒基合金具有低活化特性、良好高温强度和高温蠕变、低温韧性、抗中子辐照肿胀以及耐液态金属腐蚀等特性, 是聚变堆的重要候选结构材料, 广泛应用于聚变反应堆的第一壁、包层等结构材料中。有研工程技术研究院有限公司(原北京有色金属研究总院)采用真空熔炼制备百公斤级 V-5Cr-5Ti 合金铸锭, 并开展了均匀化退火、热锻开坯、冷轧变形和热处理等试验研究, 对 V-5Cr-5Ti 合金样品进行了显微组织观察、析出相表征, 室温/高温拉伸性能检测等。铸态 V-5Cr-5Ti 合金存在以片层状析出相为特征的树枝状析出相, 断裂机制为脆性的解理断裂。合金均匀化退火后析出相由片层状转化为针状, 由树枝状转化成团聚状, 断裂机制转变为沿晶断裂和准解理断裂共存的混合型断裂。由于晶粒及析出相形态的变化, 合金塑性得到大幅改善。变形加工后合金断裂机制为韧性的微孔型断裂^[1-5]。80%冷变形+1000℃×1h退火后合金由球状析出相强化产生的屈服应力增量约为50.2MPa。相对于氧含量较高(约0.038wt%)的V-5Cr-5Ti合金而言, 低氧含量(0.018-0.022wt%)合金在高温拉伸变形下的抗拉强度稍有下降(图1), 但塑性提升显著^[6]。

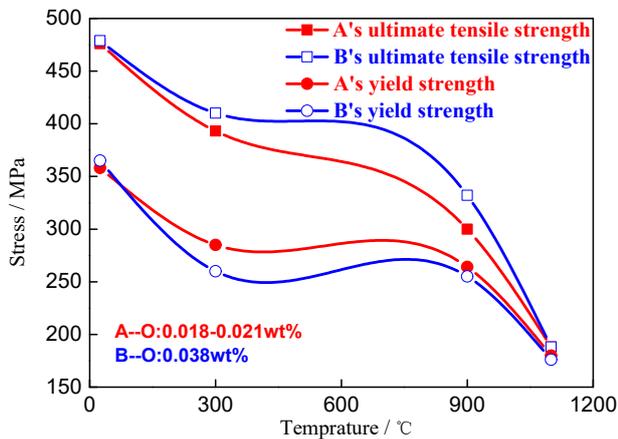


图1 不同氧含量 V-5Cr-5Ti 合金的高温拉伸强度

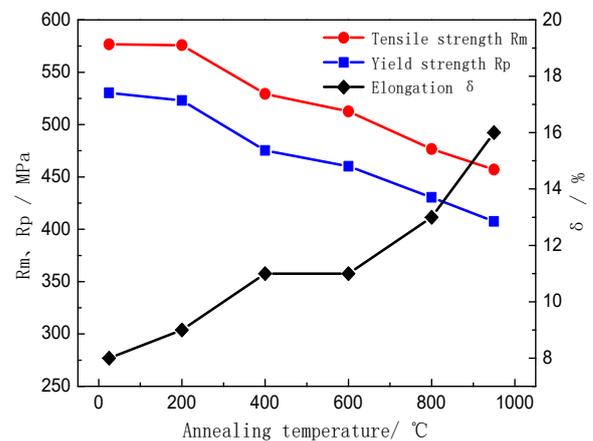


图2 退火温度对 Al₂O₃ 弥散强化铜合金合金拉伸性能的影响 (95%冷拉拔态合金)

弥散强化铜合金具有高强度、高导热、抗高温软化、抗辐照损伤等特性, 可用于热核实验反应堆托卡马克装置偏滤器垂直靶散热片、核聚变动力发电机、冷却管等部件^[7]。有研工研院采用原位反应合成法制备 Al₂O₃ 弥散强化铜合金, 并对合金显微组织 (OM、SEM、TEM) 及其性能 (硬度、电导率、拉伸性能) 进行分析。铜基体内部均匀、弥散分布着粒径 10nm 的 γ -Al₂O₃ 纳米颗粒, 纳米颗粒与基体间界面清洁, 且存在如下的晶体学位向关

系： $(002)_\alpha // (\bar{1}\bar{1}\bar{3})_\beta$ ， $[110]_\alpha // [011]_\beta$ ，两者之间的界面为完全共格界面。该工艺制备的合金性能优异，室温抗拉强度和屈服强度可达 570MPa 和 533MPa，抗软化温度高于 900℃，900℃退火后合金的抗拉强度和屈服强度可达 457MPa 和 407MPa，见图 2。同时，合金的导电率和洛氏硬度值分别为 85%IACS 和 86HRB^[8-9]。

关键词：聚变堆；磁约束；钒基合金；弥散强化铜合金；显微组织；力学性能；加工技术
参考文献

- [1] Z.D. Li, Q. Li, Y. Li, T.D. Ma. Microstructure and properties of V-5Cr-5Ti alloy after hot forging[J], Fusion Engineering and Design, 2018, 127:83-90.
 - [2] Z.D. Li, Q. Li, Y. Li, C.G. Lin, S. Cui, T.D. Ma. Mechanical properties and precipitation evolution behavior of V-5Cr-5Ti alloy after cold rolling[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 114:76-83.
 - [3] 李增德, 林晨光, 崔舜. V-5Cr-5Ti 合金铸态组织中的第二相行为研究[J]. 稀有金属科学与工程, 2017, 46(1):104-119.
 - [4] 李增德, 林晨光, 崔舜. 铸态 V-5Cr-5Ti 合金在退火过程中的第二相行为研究[J]. 稀有金属科学与工程, 2017, 46(2):375-781.
 - [5] 李增德, 李卿, 林晨光, 崔舜. 不同状态 V-5Cr-5Ti 合金的拉伸性能及其强化机理研究[J]. 稀有金属, 2019, 网络出版.
 - [6] 李卿, 李增德, 谢兴铖. 低氧含量 V-5Cr-5Ti 合金的高温拉伸性能研究[J]. 稀有金属, 2019, 网络出版.
 - [7] R.R. Solomon, J.D. Troxell, A.V. Nadkarni, F. Wolfe. GLIDCOP AL-25 first wall plates-IG1 grade compared to IGO grade[C]. IEEE, 1998, 2:853-856.
 - [8] 张雪辉. 氧化铝弥散强化铜原位反应合成及其组织性能研究[D], 北京有色金属研究总院, 2014.
 - [9] 燕鹏. 高硬度、高强度弥散强化铜合金制备及其组织性能研究[D], 北京有色金属研究总院, 2012.
- 基金项目：**国家自然科学基金项目 (NO. U1532262)