

中国科学院核用材料与安全评价重点实验室

CAS Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment


[当前栏目：科研进展](#)
[回到首页](#)

高温下耐铅腐蚀焊缝金属组织演变与性能研究

 2023-02-13 | [【大中小】](#) [【打印】](#) [【关闭】](#)

铅铋快堆以其固有安全性、闭式燃料循环和功率密度高等显著优势，成为第四代核能系统的推荐堆型之一。焊接是铅铋快堆制造过程的重要热加工工艺，可靠的焊接材料是保证铅铋快堆的安全运行与设计寿命的关键因素。其中，奥氏体不锈钢与9Cr F/M钢的异种金属焊接是铅铋快堆配套焊材研制的难点之一，国内外核电标准中尚无相关推荐焊材，也缺乏相关研究的文献报道。超级奥氏体不锈钢力学性能介于异种钢之间，有潜力发展为铅铋快堆异种金属焊接材料。此外，铅铋快堆运行周期长达数十年，对焊缝金属组织和性能稳定性也提出了苛刻要求。因此，有必要通过合理的选材和元素调控来研究焊缝金属在高温下的组织与性能演变规律，以期为铅铋快堆异种金属焊接材料的研制提供基础数据支撑。

通过调控焊材中的Si元素来制备不同Si含量（0-2 wt.%）的焊缝金属，探索其对焊缝金属组织和力学性能稳定性及耐铅铋腐蚀性能的影响。结果表明，焊态下不同Si含量焊缝金属析出相种类均为 M_6C 和 $M_{23}C_6$ ，且 M_6C 的尺寸和数量随着Si含量升高而增加。 M_6C 尺寸为微米级，分布于枝晶间，而 $M_{23}C_6$ 以不连续状态分布于晶界。 M_6C 作为一种硬脆相，在拉伸载荷作用下难以与基体发生协调变形，使得焊缝金属的塑性随Si含量升高而呈单调下降趋势。同时，高Si焊缝金属 M_6C 的大量析出导致其在冲击载荷作用下因裂纹源增加而发生过早断裂，塑性变形机制由低Si焊缝金属的位错滑移和孪生变形转变为单一的位错滑移，严重恶化焊缝金属的冲击功。在静态控氧铅铋腐蚀试验中，随着Si含量的提高，焊缝金属表面形成由不连续到连续的富Si、Cr氧化膜，溶解腐蚀和铅铋渗透现象得到缓解，提升了耐铅铋腐蚀性能。分析了优化Si含量的焊缝金属焊后热处理及时效处理下的微观组织和力学性能演变。实验发现焊缝金属在焊后热处理及时效处理过程中析出相类型和分布不变，均为 $M_{12}C$ 和 $M_{23}C_6$ ，表明焊缝金属具备优异的组织稳定性。其中，晶界 $M_{23}C_6$ 呈连续分布，枝晶间一次 M_6C 转变为 $M_{12}C$ ，但保持原有形态和分布。同时，焊缝金属枝晶间析出大量纳米级二次 $M_{12}C$ 和 $M_{23}C_6$ 。焊缝金属在焊后热处理及时效处理过程中的强度保持稳定，塑性和冲击功发生缓慢下降，室温拉伸延伸率由21.3%降低到18.7%，550°C高温拉伸延伸率由26.5%降低到20%，而室温冲击功在时效500h-3000h内由38J降低为34J。在断口形貌和断口解剖观察中发现不同时效时间焊缝金属的断裂模式与焊后热处理态相一致，说明焊缝金属优异的组织稳定性，保证了力学性能的稳定性。相关工作作为铅铋快堆异种金属焊接材料的研制和工程化选材积累了丰富数据。实验结果在Materials Science and Engineering: A852 (2022) 143727, Journal of Materials Research and Technology 22 (2023) 461-472, International Journal of Pressure Vessels and Piping197 (2022) 104637期刊发表。

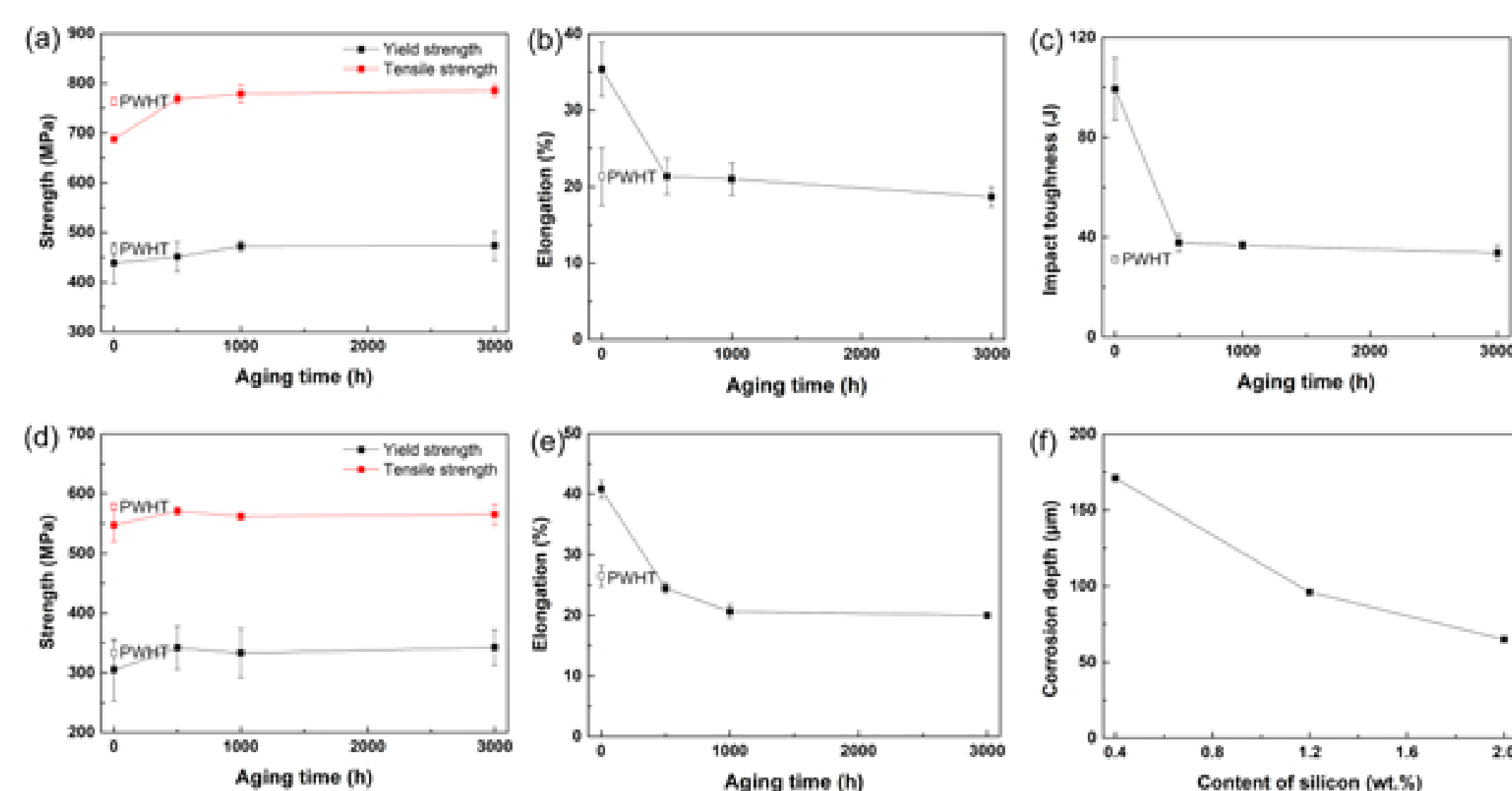


图1 Si含量对焊缝金属力学性能和耐铅铋腐蚀性能的影响：(a) 室温拉伸强度，(b) 室温拉伸延伸率，(c) 室温冲击性能，(d) 550°C高温拉伸强度，(e) 550°C高温拉伸延伸率，(f) 550°C静态控氧铅铋腐蚀层厚度

(核用焊接材料与焊接工艺研究组 供稿)