

科学家报道可耐3600 °C的抗氧化高熵碳化物材料

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33749.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

科学家报道可耐3600 °C的抗氧化高熵碳化物材料。

2025年6月5日，华南理工大学材料学院褚衍辉团队在Advanced

Materials期刊上发表一篇题为Exceptional Oxidation Resistance of High-Entropy Carbides up to 3600 °C的研究成果。

该成果报道了通过高熵多组元成分设计，同时结合开发的激光氧化测试平台，成功开发出可耐3600 °C抗氧化高熵碳化物(Hf, Ta, Zr, W)C材料。该材料在3600 °C激光氧化考核（热流密度达30MW · m⁻²）过程中的氧化速率仅2.7 μm · s⁻¹，显著低于已报道其他超高温材料。该优异抗高温氧化特性主要源于(Hf, Ta, Zr, W)C高熵碳化物陶瓷中不同元素的氧吸附倾向性差异（W最难吸附氧），导致生成了以弥散分布的超高熔点W为骨架的高粘度氧化物层，有效阻碍了氧气向基体的进一步扩散渗入。

论文的通讯作者是庄磊副教授、褚衍辉研究员；第一作者是博士研究生文子豪、刘译文。

超高声速飞行器、往返式轨道飞行器等先进装备的开发迫切需要具有卓越耐高温性能的先进材料。纵观所有已知材料，可在2000 °C以上稳定服役的材料屈指可数，仅部分难熔合金、碳基复合材料以及超高温陶瓷可满足服役需求。但2000 °C已逼近难熔合金的耐温极限；碳基复合材料具有更优异的耐温性（如C/C复合材料最高可耐3000 °C），但碳材料在370 °C有氧环境中便会发生氧化，导致力学性能的显著下降。超高温陶瓷是一类熔点大于3000 °C的先进陶瓷材料，是目前最有希望在超高温有氧环境中稳定服役的超高温材料。然而，目前超高温陶瓷的抗氧化温度始终未能突破3000 °C，严重制约了新一代先进空天飞行器热防护系统的开发。

1.激光测试平台搭建及高熵碳化物的组分筛选

高熵碳化物陶瓷组分是影响其抗氧化性能的关键。为开发可耐超高温的高熵碳化物陶瓷，研究团队首先自主搭建了超高温激光氧化测试平台，如图1所示。随后，以Hf, Ta, Zr元素为基础设计了不同组分的高熵碳化物陶瓷，并测试了其在2400-3000 °C下的抗氧化性能。结果表明，(Hf, Ta, Zr, W)C在全温域下具有最低的氧化深度（D），且其氧化动力学在2400-3000 °C温度段内均遵循抛物线规律，证明其具有优异的宽温域抗氧化性能。

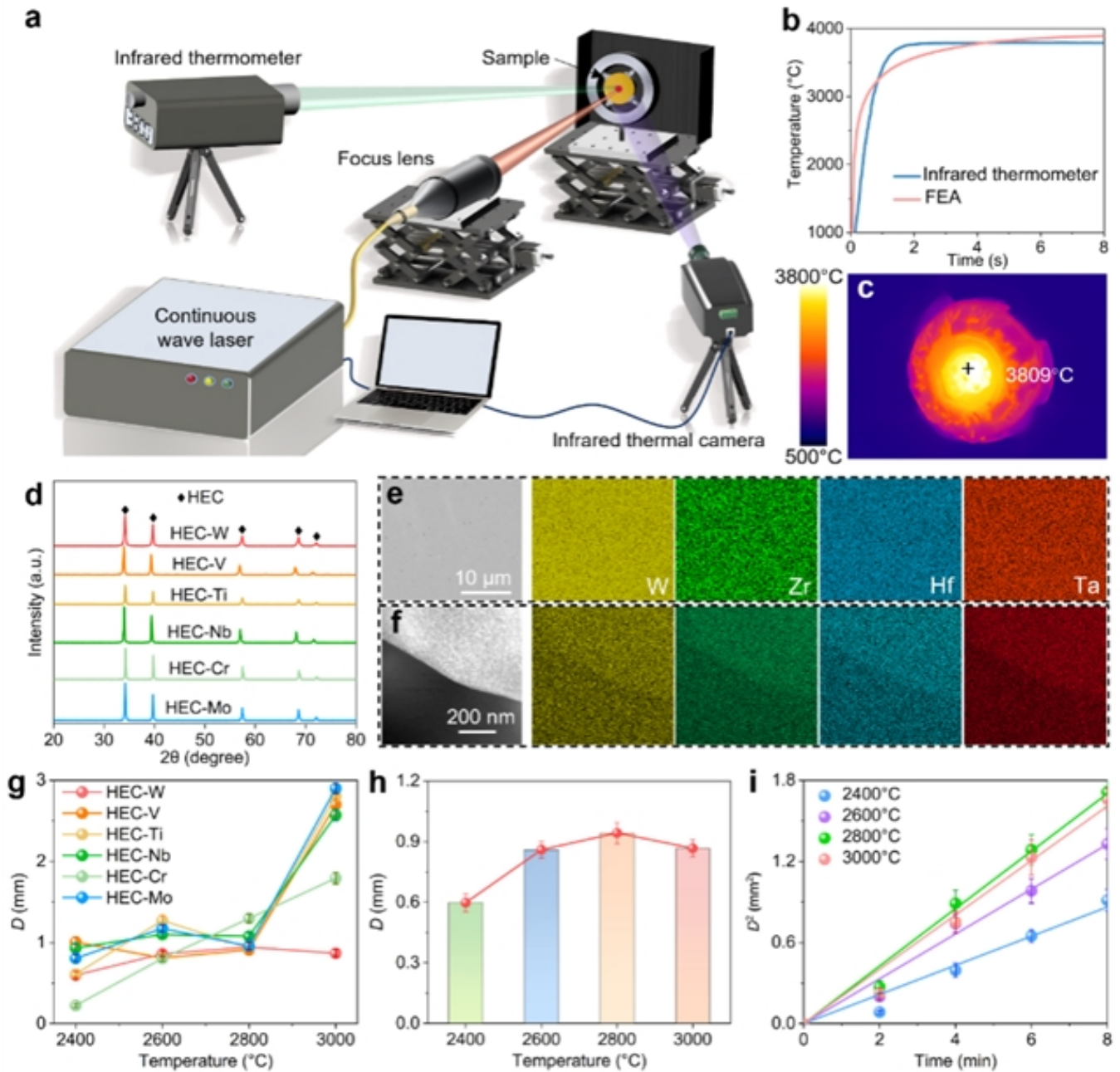


图1：高熵碳化物样品的激光氧化测试。(a) 开发的激光氧化平台。(b) 激光温度验证。(c) 激光温度热红外成像。(d) XRD图谱。(e) SEM-EDS分析。(f) TEM-EDS分析。(g) 不同温度下不同样品氧化深度D。(h) (Hf, Ta, Zr, W)C样品的氧化深度D。(i) 氧化深度样品在不同温度下的氧化动力学。

2.高熵碳化物氧化产物的形貌表征

如图2所示，随着氧化温度的提高，(Hf, Ta, Zr, W)C样品的氧化表面逐渐致密。而从截面上看，随着氧化温度的提高，氧化层内部逐渐出现了亮白色微米颗粒，并呈现出弥散分布特点。结合EDS能谱分析可以看出，该颗粒主要以W元素为主。

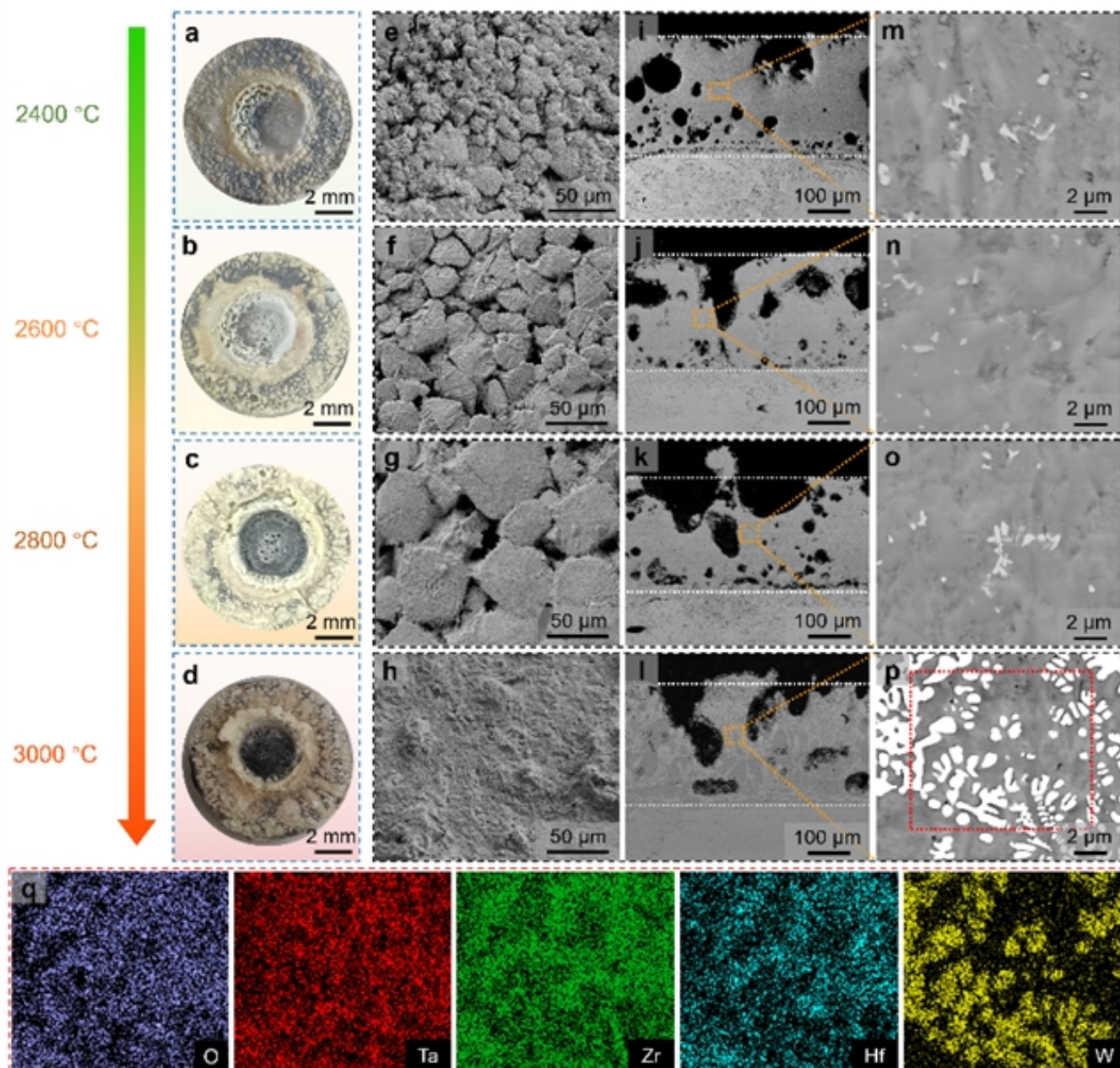


图2：2400-3000 °C激光氧化后(Hf, Ta, Zr, W)C样品的形貌和元素分布。(a-d) 宏观图像。(e-h) 中心氧化区域的表面SEM图像。(i-l) 中心氧化区域的横截面SEM图像。(m-p) 放大图。(q) EDS图。

3.高熵碳化物氧化产物的结构表征

通过对氧化产物进行球差HAADF-STEM表征，可以发现其主要包含3种结构物相，如图3所示。结合EDS能谱分析可知，其中最主要的深色相为重金属单质W（其中可能固溶了少量其他元素），且具有大量的结构缺陷，说明其是在氧化过程中原位动态生成的。其他氧化产物还包括以HfO₂和Hf₆Ta₂O₁₇为基础结构的固溶物，包裹于W单质颗粒外表面。

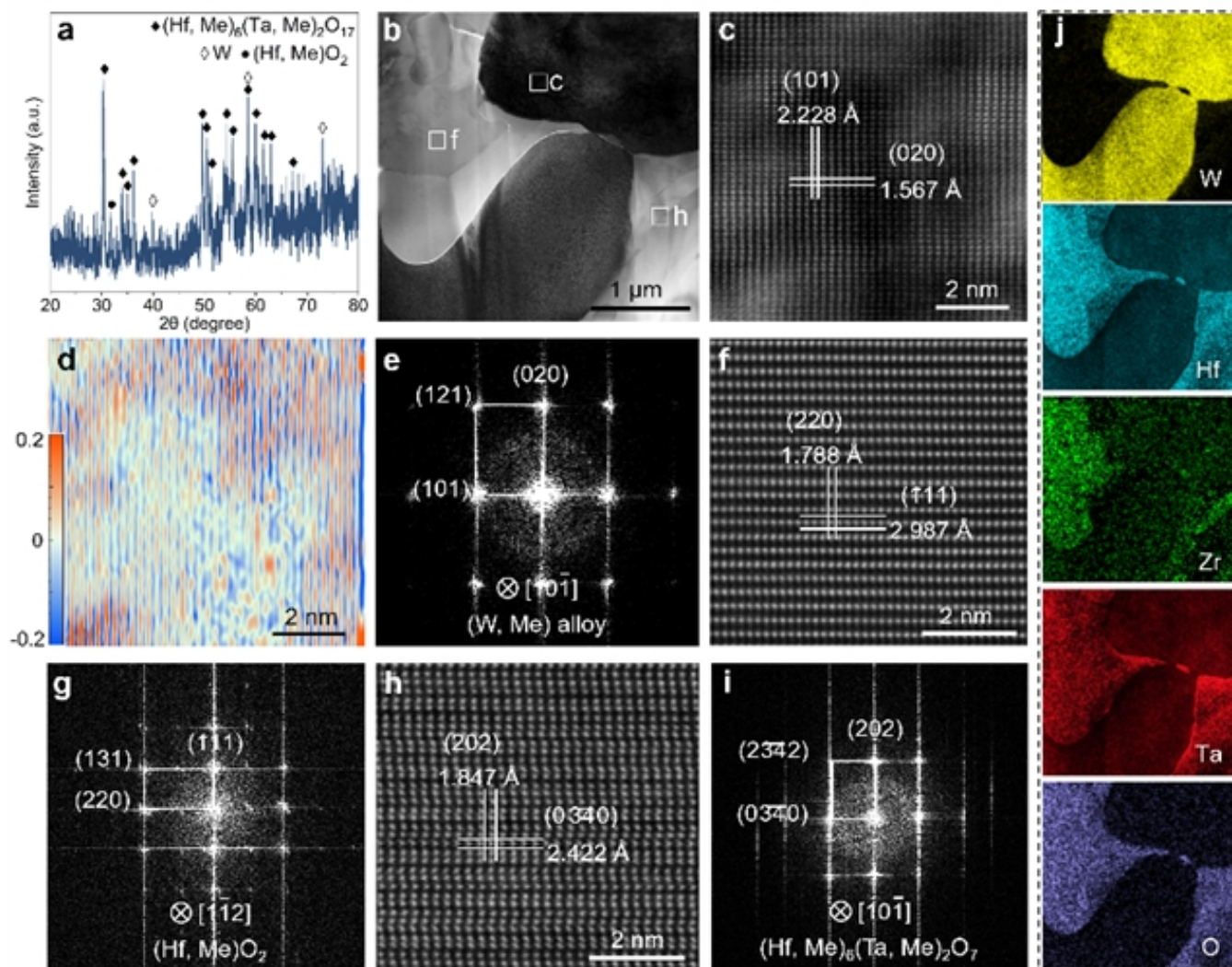


图3：(Hf, Ta, Zr, W)C样品的3000 ° C氧化产物。(a) XRD图谱。(b) 低倍HAADF-STEM图像。(c) 原子级HAADF-STEM图像。(d)原子弹性应变分布。(e) W相的FFT图样。(f-g) (Hf, Me)O₂的原子HAADF-STEM图像及相应的FFT图样。(h-i) (Hf, Me)₆(Ta, Me)₂O₇的原子HAADF-STEM图像及FFT图样。(j) EDS图。

4.氧化产物生成机理及3600 ° C激光氧化性能测试

如图4所示，DFT计算结果表明不同金属元素的氧吸附能存在显著差异，其中W元素的吸附能最高，说明氧原子最难吸附于其表面生成W基氧化物。因此，除W以外的其余元素便会优先氧化并包裹于W原子表面，进一步阻碍W的氧化。最后利用激光考核平台测试了(Hf, Ta, Zr, W)C在更高温度下的氧化性能，验证了其可在最高3600 ° C温度下展现出出色的抗氧化性能，显著优于已报道其他超高温材料。（来源：科学网）

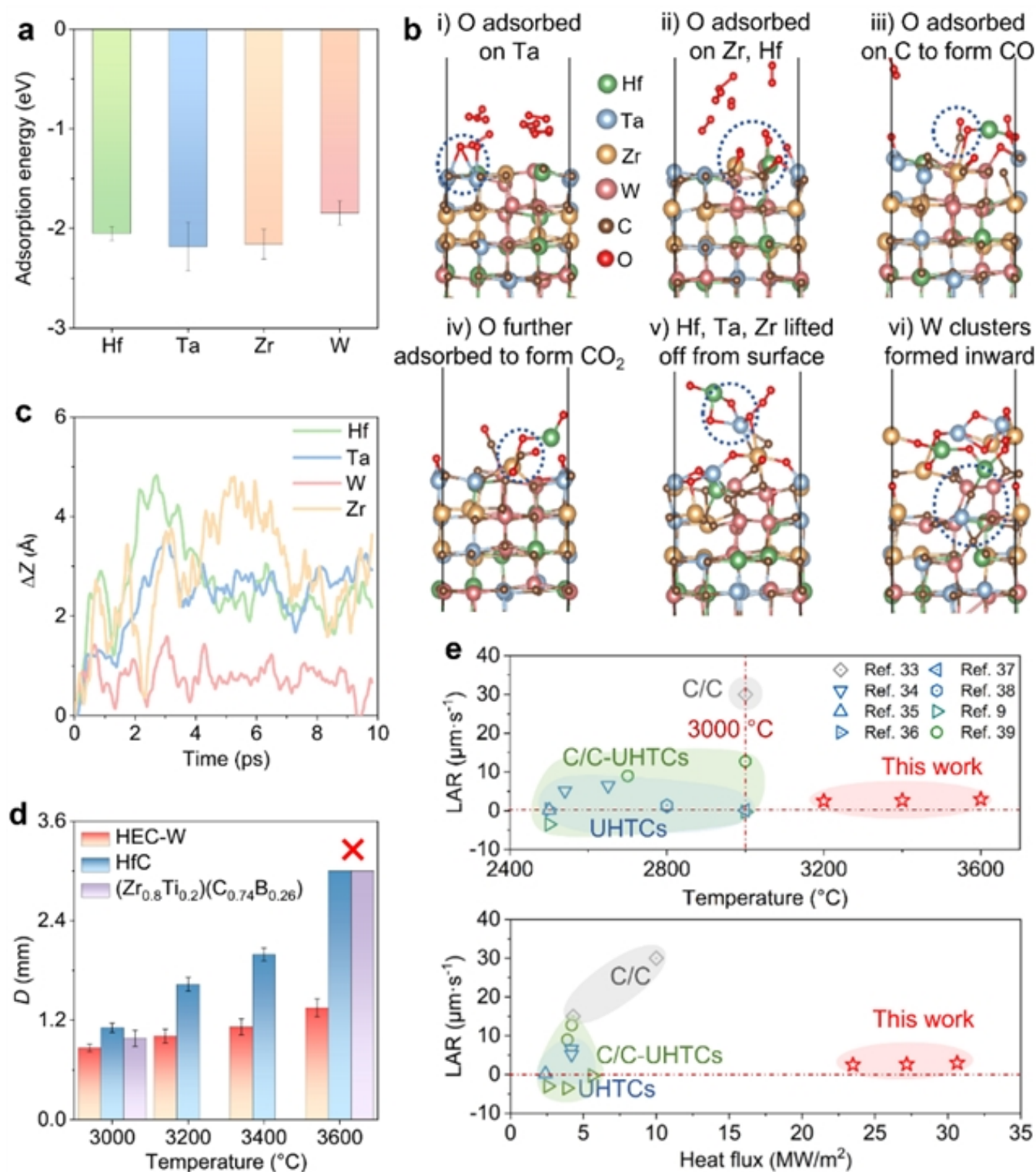


图4. (Hf, Ta, Zr, W)C的氧化机制和抗氧化性能。(a) DFT计算的(001)面的不同金属位点上氧的吸附能。(b) 在3273K下AIMD分子动力学模拟原子演变。(c) 不同时间帧的统计。(d) 在3000-3600 °C氧化后的氧化深度D对比。(e) (Hf, Ta, Zr, W)C的氧化性能与其他超高温材料比较。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1002/adma.202507254>

作者：褚衍辉等 来源：《先进材料》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发