

## 化学气相沉积钨（CVD-W）技术及其在核聚变中的应用展望

于洋, 宋久鹏, 颜彬游, 蒋香草, 代少伟

国家钨材料工程技术研究中心, 厦门 361026

Email: [yu.yang@mail.cxtc.com](mailto:yu.yang@mail.cxtc.com)

### 摘要:

化学气相沉积 (Chemical Vapour deposition, CVD) 是一种常用的涂层制备技术, 钨的化学气相沉积技术采用  $WF_6$  和  $H_2$  为原料, 在远低于钨熔点的温度下, 在特定的基体表面生长纯钨涂层, 可不受基体表面形状限制, 具有绕度性好、高纯、高致密、柱状晶等特性。此外, 化学气相沉积工艺还有近净成形的特性, 主要通过以下方式来实现: 在涂层沉积过程中, 采用特定形状的工装, 以及合适的沉积工艺, 选择性在基体表面制备钨涂层, 通过对沉积后的涂层表面采取进一步机加工, 再去除工装或基材后, 可以得到近净成形的钨涂层或者钨异型件。

核聚变装置中第一壁是聚变堆中直接面向等离子的部件, 第一壁材料需要在严酷的辐照、热、化学和应力工况下保持机械完整性和尺寸稳定性。常用的第一壁材料钨的制备工艺有等离子喷涂、物理气相沉积、钨板焊接等。等离子喷涂得到的钨涂层, 氧含量高、致密度低是最主要的问题; 物理气相沉积钨则无法制备几百微米甚至毫米级别的厚涂层; 钨板焊接的方法可解决钨材料纯度与致密度低的问题, 但对于大尺寸、不规则的表面, 焊接的难度非常大。将钨的化学气相沉积技术引入到核聚变装置难熔金属涂层与部件的生产制造上来, 可以一次性较好地解决钨材料难成形、致密度低、纯度低以及钨材料与基体连接性能不好的问题, 在核聚变领域上具有广阔的应用前景。

厦门钨业股份有限公司研究了在铜、铜合金、低活化钢、石墨等不同基体上制备化学气相沉积钨 (CVD-W) 涂层的工艺, 分析涂层材料性能如化学成分、密度、热学性能与微观组织等, 并探讨了涂层材料在核聚变装置部件中应用的可能性。CVD-W 具有超高纯度 (>99.9999%)、高致密度 (>98%)、柱状晶结构、高热导率 (高于锻造态纯钨, 与理论钨材料相当)、与基体结合强度高 (>50 MPa) 等特性。厦门钨业在铜、铜合金或石墨等基体表面制备的薄钨涂层, 经实验测试: 涂层经受  $11.7 MW/m^2$ , 15s on/15s off, 1000 次循环热疲劳测试后完好, 在第一壁低热负荷区域具有非常高的应用潜力; 采用合适的过渡层, 可实现在大面积的低活化钢表面制备具有良好结合强度的 CVD-W 涂层, 涂层厚度与表面质量可控, 是未来包层表面防护的候选解决方案之一。

此外, 在未来聚变堆中, 偏滤器靶板的面向等离子体部件 (高热负荷部件) 将会面临通量极高的热负荷作用, 因此对偏滤器材料提出了更高的要求。有限元模拟和高热负荷实验都表明,  $20 MW/m^2$  高热负荷将导致作为偏滤器部件的 W(锻造纯钨)/CuCrZr 产生严重损伤, 从而影响等离子体的杂质控制和装置的安全运行。因此,  $20 MW/m^2$  稳态运行要求钨

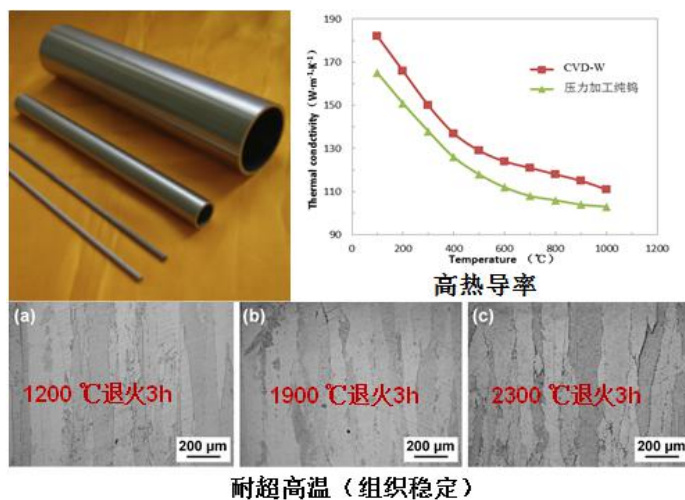


图 1 厦门钨业制备的常规 CVD-W 及性能

基材料具备高热导、高温强韧性和极高温的组织稳定性。研究表明，微量碳掺杂 CVD-W 中均匀分布的纳米碳化钨相，可提高钨材料的高温力学性能和组织稳定性。厦门钨业利用在化学气相沉积中原位生成纳米碳化钨的方式，制备微量碳掺杂 CVD-W 涂层，涂层具有与基体较好的结合强度，涂层微观组织稳定性高，涂层的再结晶温度高达 1900℃，涂层更多的性能测试还在进一步测试中。