

文章编号:1673-9981(2008)03-0191-04

低压等离子喷涂钨涂层性能的研究

邝子奇^{1,2}, 刘 敏², 邓畅光², 周克崧², 罗广南³

(1. 中南大学, 湖南 长沙 410083; 2. 广州有色金属研究院, 广东 广州 510650;
3. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要:用低压等离子喷涂技术在铜基体上制备出厚度大于1 mm的铜钨梯度钨涂层,对钨涂层性能研究表明,采用铜钨梯度方法可以使热膨胀系数不匹配的影响降低,梯度涂层呈层状结构,不易形成贯穿的裂纹;梯度涂层具有良好的导热性和耐热冲击性能,能承受9.6 MW/m²和200 s的脉冲,而铜基体温度低于200 ℃.真空等离子喷涂梯度涂层是制备核聚变面对等离子体材料的一种有效方法.

关键词:钨涂层;梯度涂层;低压等离子喷涂;高能电子束轰击

中图分类号: TG174.442; TG146.4⁺11

文献标识码: A

钨具有熔点高、良好的化学稳定性及抗腐蚀性,在高温下具有多种用途,如作为保护材料保护暴露于等离子体中的偏转器;钨涂层可以减少等离子体的冲蚀速率,从而降低等离子体的污染^[1-2]等.铜及其合金具有良好的热导性能,但是其熔点低,无法在聚变反应堆的高温下使用,而在铜基体上喷涂一层纯钨是一个很好的选择.由于钨和铜膨胀系数的差别很大,导致在高温工作过程中产生较大的应力而使涂层与基体分开.如果在铜基体上有一层铜钨梯度涂层作为过渡,那么可以降低界面间的应力影响.本文将研究真空等离子喷涂(VPS)的铜钨梯度涂层的性能及电子束照射后涂层组织性能的变化.

1 实验部分

1.1 涂层制备

基体材料为厚15 mm的铜板,铜钨梯度涂层用铜粉粒度为-45 μm,钨粉粒度为-25 μm和-45 μm.实验设备为DYDP-1型真空等离子喷涂设备,它是在预抽真空后充有保护性气体下进行工作,喷涂工艺参数为电流600~800 A、电压65~75 V、气压10~16 KPa、气体流量Ar 40~60 L/min、H₂ 5~

7 L/min,喷距200~300 mm.为提高涂层与基体间的结合强度,喷涂前先采用反向转移弧对基体进行预热.通过不同的送粉率改变铜钨两种粉末的含量来实现铜钨梯度过渡,过渡层厚度约为0.2~0.3 mm,铜钨梯度钨涂层总厚度大于1 mm.

1.2 涂层性能测试

用日本JSM-5910扫描电镜测试涂层的表面形貌;用紫色激光彩色光学显微镜观察涂层表面的立体形貌;用LEICA DMIRM金相显微镜测定钨涂层的孔隙率;用力可TC-600氧氮分析仪测定钨涂层氧含量;用电子束轰击钨涂层以测试其耐热冲击性能,测试时样品测试台采用间接水冷和直接水冷方式,每次加载时间持续200 s.

2 实验结果和讨论

2.1 涂层结合强度

将基体预热后,在铜基体上直接喷涂钨涂层,实验结果列于表1.由表1可知,随着预热温度的升高,涂层的结合强度提高;预热温度为800 ℃时,其结合强度达到50 MPa.在喷涂前采用转移弧对铜基体预热,不仅可消除铜表面的水分和湿气,

收稿日期:2008-07-11

作者简介:邝子奇(1975—),男,江西寻乌人,工程师,本科.

表1 预热温度对结合强度的影响

Table 1 The bonding strength between the tungsten coating and substrate after pre-heating at different temperatures

预热温度/℃	100	300	500	800
结合强度/MPa	20	25	35	50

清洁基体表面,而且还可提高喷涂粒子与工件接触时的界面温度,减少因钨与铜热膨胀系数($\alpha_w = 4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\alpha_{cu} = 18 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)和杨氏模量的差异引发的应力而使涂层开裂,从而有利于涂层与基体结合强度的提高.实验发现采用铜梯度方法喷涂的钨涂层,其结合强度只有30 MPa.其原因可能是直接喷涂钨涂层时由于钨颗粒的质量较大,在较高温度预热的情况下,基体接近塑性变形,且

喷涂过程中粒子的能量较大容易产生镶嵌,从而提高了其机械结合强度.采用梯度过渡时,由于与基体结合的涂层成分主要为铜,故其机械结合强度不如直接喷涂钨涂层.但在抗热冲击性能测试中,直接喷涂钨涂层的耐热冲击性能比采用梯度过渡喷涂钨涂层的差.

2.2 涂层表面、涂层组织和界面

图2是用紫色激光彩色光学显微镜拍的涂层的3D照片.由图2可知,W粉粒度为 $-45\ \mu\text{m}$ (图1(a))时,涂层表面有较高的表面突起,涂层组织孔隙和未熔颗粒较多;W粉粒度为 $-25\ \mu\text{m}$ (图1(b))时,涂层表面较平整,表面凹凸小于 $8\ \mu\text{m}$,呈现出小丘陵状.这说明大颗粒W粉的熔化和凝固效果比小颗粒W粉差.因此,选择合适的粉末很重要,本实验选择 $-25\ \mu\text{m}$ 钨粉进行喷涂.

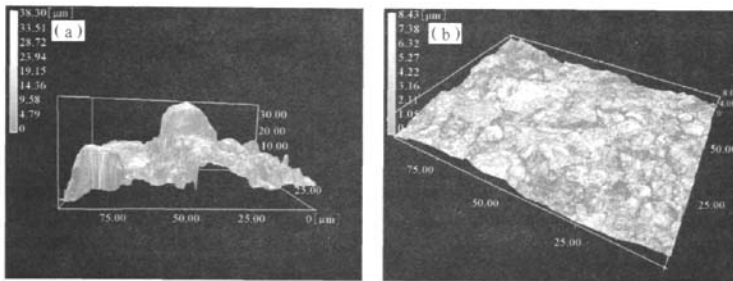


图1 钨涂层3D照片

(a) $-40\ \mu\text{m}$ 涂层; (b) $-25\ \mu\text{m}$ 涂层

Fig. 1 3D images of the coatings photographed by violet-laser color optical microscope
(a) coating sprayed with $-40\ \mu\text{m}$ powder (b) coating sprayed with $-15\ \mu\text{m}$ powder

图2是铜钨梯度过渡涂层组织的SEM照片.由图2可知,真空等离子喷涂的涂层呈层状结构,同时在涂层的单层中存在垂直于表面的柱状晶结构^[3],而层状结构不易形成贯穿的裂纹.梯度过渡层的一个重要特性是晶界断裂形成的裂纹往往局限在涂层的表面,并不向涂层内部扩展,这一点与非梯度过渡层材料有很大的差异.梯度过渡层的重要功能是能有效消除材料界面的性能突变,有效降低因热膨胀系数的差异而造成的应力影响,从而避免在热负荷

的作用下由于热膨胀系数的不匹配导致涂层和界面的开裂和失效.有研究表明,梯度涂层能够承受更多次的循环热负荷^[4].VPS涂层的晶界强度和喷涂间的颗粒强度较差,但涂层相对较低的密度有利于应力的释放,形成所谓的裂纹俘获机制^[5].

涂层的密度较低,易导致在使用过程中放气而影响使用.因此控制涂层的孔隙率相当重要.用金相法测定的钨涂层孔隙率小于10%,用氧氮分析仪测定钨涂层氧含量(质量分数)小于0.4%.

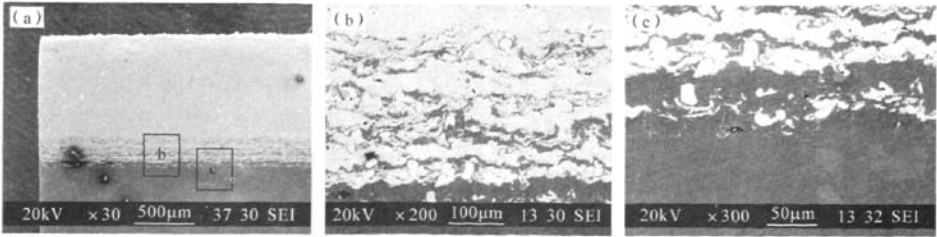


图 2 铜钨梯度过渡涂层组织的 SEM
(a)涂层;(b)过渡层;(c)界面
Fig.2 SEM micrographs of the transition layer
(a) coating;(b) transition layer;(c) interfac

2.3 电子束轰击测试结果

用电子束轰击涂层表面时,样品测试台采用间接水冷方式,热载荷从 0.6 MW/m² 逐步加到 3.6 MW/m²,当加载到 3.6 MW/m² 时,在距钨涂层表面 3 mm 处用热电偶测得温度超过 800 ℃,持续 200

s 停止轰击,发现涂层表面约 1 cm² 面积呈现暗红色. 由于样品平台为导热率低的不锈钢材料,如果继续增加热载荷,可能导致铜基体熔化,因此停止加载. 采用直接水冷方式对涂层进行耐热冲击性能测试,加载方式和间接水冷时相同,当热载荷加到 9.6

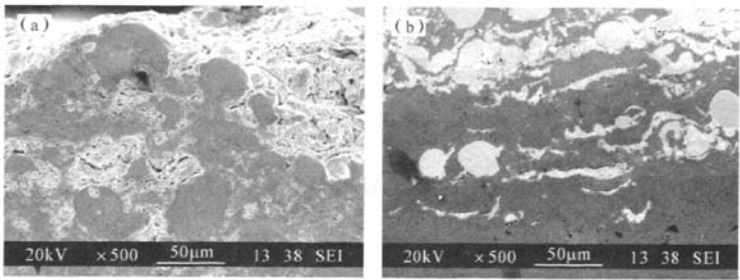


图 3 远离电子束照射的钨涂层 SEM
(a)近表面情况;(b)界面情况
Fig.3 SEM images of parts away from electron beam irradiation
(a)section of near-surface;(b)interfaces

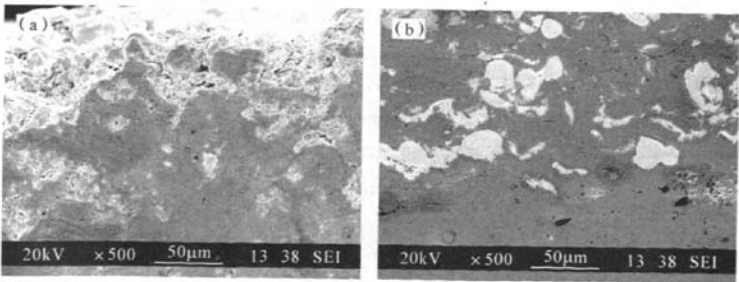


图 4 经电子束照射的钨涂层 SEM
(a)近表面断面情况;(b)界面情况
Fig.4 SEM images of parts under the electron beam irradiation
(a)section of near-surface;(b)interfaces

MW/m² 时,在距钨涂层表面 3 mm 处用热电偶测得温度不超过 150 ℃,显示出涂层良好的导热性。

图 3 为远离电子束照射面积的钨涂层表面的 SEM 图,图 4 为电子束照射后呈暗红色钨涂层的 SEM 图。由图 3 和图 4 可见:钨涂层受电子束轰击后的组织与未受轰击的组织无明显差别,其界面未见明显开裂,表层未见明显裂纹。这表明梯度过渡钨涂层具有良好的导热性和耐热冲击性能。

3 结 论

采用真空等离子喷涂技术在铜基体上成功制备出厚度大于 1 mm 的铜钨梯度钨涂层,该钨涂层与铜基体的结合强度较高;梯度涂层呈层状结构,不易形成贯穿的裂纹;具有良好的导热性和耐热冲击性能,能承受 9.6 MW/m² 和 200 s 的脉冲,而铜基体温度低于 200 ℃;在较低热通量下显示出更优越的性能,样品无任何损伤痕迹。真空等离子喷涂梯度涂层是制备核聚变面对等离子体材料的一种有效方法。

参考文献:

- [1] MALLENER W, RAUWALD K H, DUWE R. Coating for plasma-facing components of nuclear fusion devices [C]//Proceeding of 15th International Thermal Spray Conference. Nice, France; The ASM Thermal Spray Society, 1998:939-943.
- [2] CAVASIN A, BRZEZINSKI T, GRENIER S, et al. W and B4C coatings for nuclear fusion reactions[C]// Proceeding of 15th International Thermal Spray Conference. Nice, France; The ASM Thermal Spray Society, 1998:957-961.
- [3] 邝子奇,代明江,熊国刚,等. 钼基体上真空等离子喷涂钨涂层的研究[J]. 真空科学与技术, 2005, 5(25): 381-384.
- [4] 刘翔,谌继明,许增裕,等. W/Cu 梯度功能材料的高热负荷性能研究[J]. 2002, 22(4), 203-208.
- [5] GARCIA R C, DESCHKA S, HOHENAUER W, et al. High-heat-flux loading of tungsten coatings on graphite deposited by plasma spray and physical vapor deposition [J]. Fusion Technology, 1997, 32:263-265.

Study of tungsten coating sprayed by LPPS

KUANG Zi-qi^{1,2}, LIU Min², DENG Chang-guang², ZHOU Ke-song², LUO Guang-nan³

(1. Central South University, Changsha 410083, China; 2. Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650, China; 3. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (ASIPP), Hefei 230031, China)

Abstract: W/Cu gradient coating with 1 mm in thickness was deposited on copper substrate by low pressure plasma spraying (LPPS) process. The coating was characterized by SEM and thermal loading test. The results showed that the gradient coating was characterized by layered structure and the effect of unmatched thermal expansion coefficients was reduced so that coating cracks couldn't easily be formed across the thickness. The gradient coating had excellent thermal conductivity and thermal load resistance and could withstand the heat load 200 s at 9.6 MW/m² with the copper substrate temperature lower than 200 ℃. The results showed that the gradient W/Cu coating prepared by LPPS was a good solution to plasma facing materials (PFM) in fusion experiment devices.

Key words: tungsten coatings; gradient coatings; LPPS; high power electron beam bombardment