

喷丸对面对等离子体材料钨表面强化研究

种法力¹, 廖凯², 陈家伟²

(1. 徐州工程学院, 江苏 徐州 221000)

(2. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004)

摘要: 利用机械喷丸技术对核聚变面对等离子体材料钨进行表面强化研究。结合喷丸前后钨性能改善进行强化效果分析及喷丸参数的优化, 强化效果分析主要包括微观形貌、晶粒细化、表面粗糙度、表面硬化和表面残余压应力等表征参数。其结果显示, 对脆而硬的材料钨而言, 在 100% 覆盖率情况下, 0.3 MPa 喷丸压力、0.4 mm 陶瓷丸直径、100 mm 垂直喷丸距离是比较合适的喷丸参数, 材料表面性能提高显著。表面硬度提高达 53.3%, 残余压应力提高 8.3 倍, 表面晶粒细化现象明显, 而且对表面粗糙度影响不大, 最高 1.5 μm 左右。

关键词: 钨; 喷丸; 面对等离子体材料; 表面强化

中图分类号: TG146.4⁺11

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)10-3714-06

核聚变等离子体放电过程中会有大量的高能热流和粒子流被沉积到聚变装置内壁上, 即沉积到面对等离子体材料上, 因此, 面对等离子体材料寿命长短、性能优劣成为聚变事业研究的关键技术之一。钨 (W) 具有高熔点、低溅射率等优点而被认为是最有前景的面对等离子体材料^[1,2], 对钨进行系列研究发现, 其在热负荷下表面熔化、熔区扩展、熔区蒸发溅射, 以及出现裂纹是材料失效的主要原因^[3]。对面对等离子体材料钨研究更多的是在材料制造工艺及技术改进研发方面^[4-6], 而对于材料性能增强方面的研究较少, 特别是对用于面对等离子体材料钨的喷丸强化鲜有报道。喷丸强化具有适用范围广、实用性强、操作方便、成本低等优点而被广泛应用于机械材料的表面强化中, 能够显著改善材料表面性能, 减少制造时的残余应力, 增强材料力学性能^[7,8]。各国学者对不同标号的钢材、铝材进行了研究, 其结果显示对硬度、残余应力、晶粒度、疲劳性能均有较好的改善效果^[9-12]。本研究利用喷丸技术对面对等离子体材料钨进行表面强化, 分析不同喷丸参数对微观形貌、硬度、粗糙度、残余应力影响, 为第一材料钨进一步改性研究提供数据。

1 实验

本研究采用的原材料是纯钨 (96 mm×35 mm×9 mm), 其化学成分如表 1 所示。首先对试样进行粗抛, 再进行无水乙醇清洗, 然后采用 ST-1960 吸入式喷丸机进行喷丸处理。喷丸机喷嘴直径 5 mm, 喷砂压力 0.3~0.6 MPa, 陶瓷丸直径 0.3~0.5 mm, 垂直喷射距离 50~150 mm, 喷丸覆盖率 100%, 具体喷丸参数如表 2 所示。采用 HV-1000 显微硬度仪进行硬度测量, 结果为 3 个测量点的平均值; 采用 Mitutoyo SJ-201P 表面粗糙度仪对喷丸前后材料表面粗糙度进行分析, 结果为 3 次测量的平均值; 采用 Proto-iXRD X 射线衍射仪对试样表面残余应力进行测试分析; 采用 Sigma300 SEM 扫描电镜对喷丸试样表面和横截面进行组织形貌分析, 主要包括形貌图像和晶粒大小对比。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌

未喷丸处理的试样表面均匀, 无明显差异, 无损伤, 无光泽感; 喷丸处理后表面出现凹坑且表面比较

表 1 钨试样化学成分

Table 1 Chemical composition of tungsten ($\omega/\%$)

Si	Sb	Mo	Fe	Mg	Ni	Ca	C	O	P	W
0.001	0.001	0.001	0.0005	0.0003	0.0005	0.0004	0.0002	0.0002	0.001	Bal.

收稿日期: 2020-10-23

基金项目: 国家自然科学基金 (11875230)

作者简介: 种法力, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 徐州工程学院, 江苏 徐州 221000, 电话: 0516-83105225, E-mail: flchong2008@163.com

表 2 钨喷丸工艺参数

Table 2 Tungsten shot peening process parameters

Process number	Air pressure/MPa	Pellet diameter/mm	Pellet distance/mm	Coverage/%
1#	0.3	0.3	100	100
2#	0.3	0.4	100	100
3#	0.3	0.5	100	100
4#	0.45	0.3	50	100
5#	0.45	0.3	150	100
6#	0.45	0.4	100	100
7#	0.45	0.5	50	100
8#	0.45	0.5	150	100
9#	0.6	0.4	100	100
10#	0.6	0.4	50	100
11#	0.6	0.4	150	100
12#	0.6	0.5	100	100

有光泽感，如图 1 所示。图中凹坑是陶瓷丸撞击钨表面形成的弹坑，其形状大致呈圆形，尺寸 20 μm 左右，部分不规则形状则是弹坑边缘重叠所致，或者破碎丸料所致。表面无弹丸撞击裂纹等损伤出现，这说明实验设计喷丸压力(0.3 MPa)符合钨表面强化要求。从图中还可以看出，相比 1#和 3#试样而言，2#试样表面弹坑均匀性要高一些。

凹坑是弹丸击打后在材料表面塑性形变形成，凹坑分布特征直接影响表面粗糙度。凹坑的密集程度和尺度与喷丸压力、弹丸大小和覆盖率有密切关系。一般而言，丸料直径是凹坑尺寸的决定性因素，喷丸压力则是凹坑深度的主要影响因素。喷丸强化表面处理工艺并非是选择大直径、大压力下的工艺，对不同的金属材料选择合适的弹丸、配以合适的压力才会出现最佳的强化效果。大直径弹丸、大喷丸压力有时会造成材料表面缺陷集聚，导致宏观损伤，比如表面疏松，

甚至裂纹等；小直径弹丸、小喷丸压力的结果则是塑性变形小，硬化层浅，喷丸时间长，经济性不高。因此对不同的喷丸强化材料，需要分析其喷丸参数，达到合适的强化效果。

为了验证喷丸压力和丸料大小对脆性材料钨的强化不利影响，进行了 0.6 MPa 喷丸压力、0.5 mm 陶瓷丸的喷丸实验(12#试样)，其丸料处理后的 SEM 像如图 2 所示。表面局部疏松层出现，截面横向、纵向微裂纹也被发现，该损伤的存在会降低材料力学性能。这与常晓东^[13]和 Tekeli^[14]的研究结果相一致：较高的喷丸强度会在材料表面形成裂纹，破坏表面完整性，降低材料力学性能。因此判定，该喷丸参数对钨而言是不合适的，对钨这种脆性大、韧性低的材料，应该降低压力并采用小的丸料。

2.2 晶粒尺度

剧烈塑性形变是细化晶粒的一种途径，且喷丸又

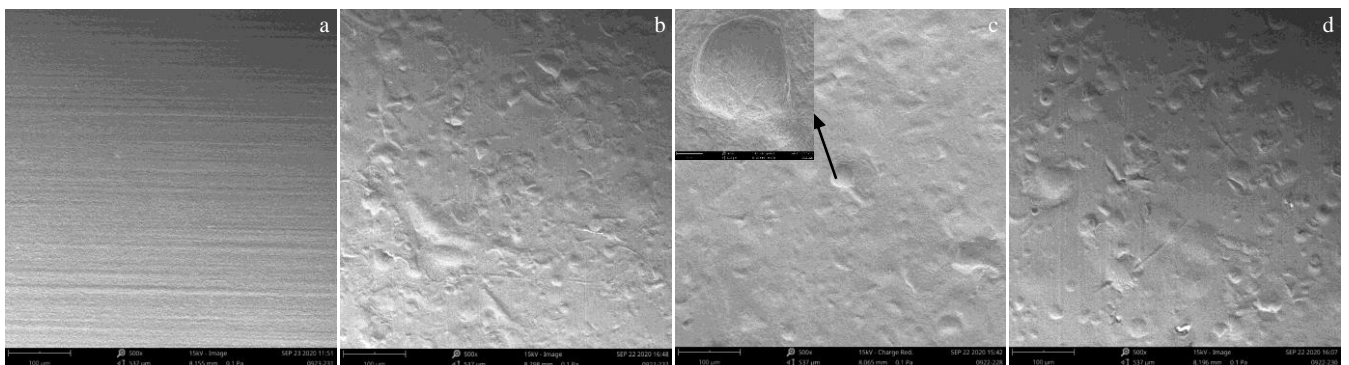


图 1 喷丸强化前后钨表面 SEM 形貌

Fig.1 SEM images of surface of tungsten before and after shot peening: (a) original tungsten, (b) sample 1#, (c) sample 2#, and (d) sample 3#

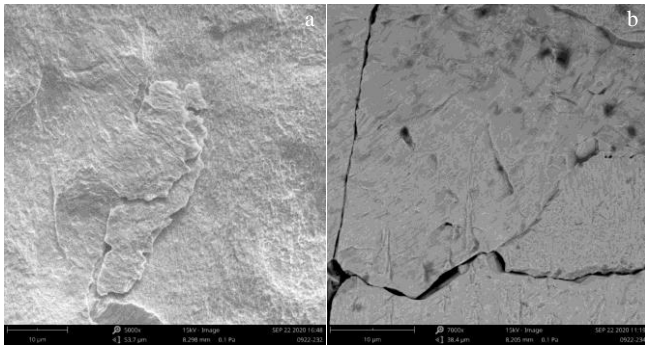


图 2 喷丸强化后钨的 SEM 像

Fig.2 SEM images of tungsten after shot peening: (a) surface and (b) cross section

是依靠丸料撞击金属表面形成塑性变形的一种冷加工工艺，通过丸料重复性、长时间地与钨碰撞，每次碰撞都会在钨表面产生一个微小形变，多次积累则会形成较大的形变量，从而使工件表面的晶粒得到细化，材料表面性能得到增强，但是材料组分和相态没有发生改变。钨喷丸前后表面晶粒大小如图 3 所示。喷丸前钨晶粒较大，约为 100 μm，喷丸处理后晶粒细化，大晶粒明显减小，特别是 2# 试样，晶粒约为 50 μm，而 1#、3# 试样晶粒变化较小。陶瓷丸撞击力主要是撞击时的动量转化，即 $mV = Ft$ ，式中 m 为陶瓷丸质量， V 为陶瓷丸撞击时速度， t 为撞击作用时间， F 则为撞击力。由于喷丸介质相同，均为陶瓷丸，喷丸压力又相同，所以陶瓷丸对每个试样（1#~3#）的撞击时间 t 相同。撞击速度 V 则受到丸料大小和喷丸压力影响，大丸料（ m 大）的 V 相对要小，而小丸料的 V 相对要大，但是撞击力 F 大小由 m 和 V 的乘积决定。在 0.3 MPa 喷丸压力下，0.3 mm 陶瓷丸（1# 试样）撞击时速度最大，但质量最小；0.5 mm 陶瓷丸（3# 试样）虽然质量

大，但是撞击速度最小；而 0.4 mm 陶瓷丸（2# 试样）质量和撞击速度虽然介于两者之间，但是撞击力却是最大，所以晶粒细化效果相比较而言也是较好的。

2.3 表面粗糙度

弹坑的出现会使钨表面粗糙度增大，可能引起等离子体热载荷集中沉积^[15]，同时表面粗糙度“凸起”点也会出现局部应力集中^[16,17]，这些因素都对面对等离子体材料应用产生不利的影响。因此，核聚变第一材料希望在强化表面的同时，表面粗糙度增大幅度越小越好，特别是不要出现局部凸起“尖端”。喷丸前后钨表面粗糙度如图 4 所示。未喷丸钨表面粗糙度为 0.1 μm，喷丸处理后表面粗糙度都有所增大，但是粗糙度最大为 1.5 μm，对核聚变面对等离子体材料而言没有形成宏观“尖端”，不会造成热载荷集中沉积。表面粗糙度随着丸料直径增大而增大，从 0.3 mm 直径丸料的 0.78 μm 增大到 0.5 mm 直径丸料的 1.41 μm，如图 4a 所示；在 0.3 MPa 喷丸压力和 0.6 MPa 喷丸压力下钨表面粗糙度变化不明显，如图 4b 所示；喷丸距离对表面粗糙度影响关系和表面硬度基本一致，相同压力下粗糙度变化不明显，如图 4c 所示。因此，丸料大小是钨表面粗糙度主要影响因素。

2.4 表面硬度

钨试样喷丸参数对表面硬度影响如图 4a 和 4b 所示。从图中可以看出，无论是何种喷丸压力、丸料直径和喷丸距离，钨材料表面维氏硬度均有较大提高，最高值为 5550 MPa（试样 2#），较原试样硬度（3620 MPa）提高 53.3%，最小值为 4604 MPa（试样 9#），提高 27.2%。这主要是由于位错运动受阻所致，形成所谓的“硬化层”。一是喷丸作用下，钨表层发生反复循环塑性形变，表层位错滑移受阻；二是喷丸处理使钨表层晶粒细化，晶界增多，同样位错运动受阻。

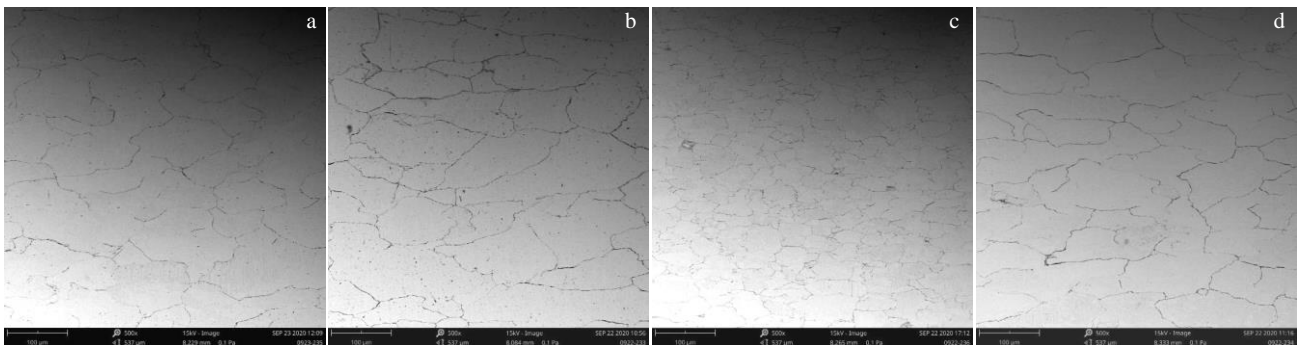


图 3 喷丸前后钨表面晶粒大小

Fig.3 Tungsten surface grain size before and after shot peening: (a) original tungsten, (b) sample 1#, (c) sample 2#, and (d) sample 3#

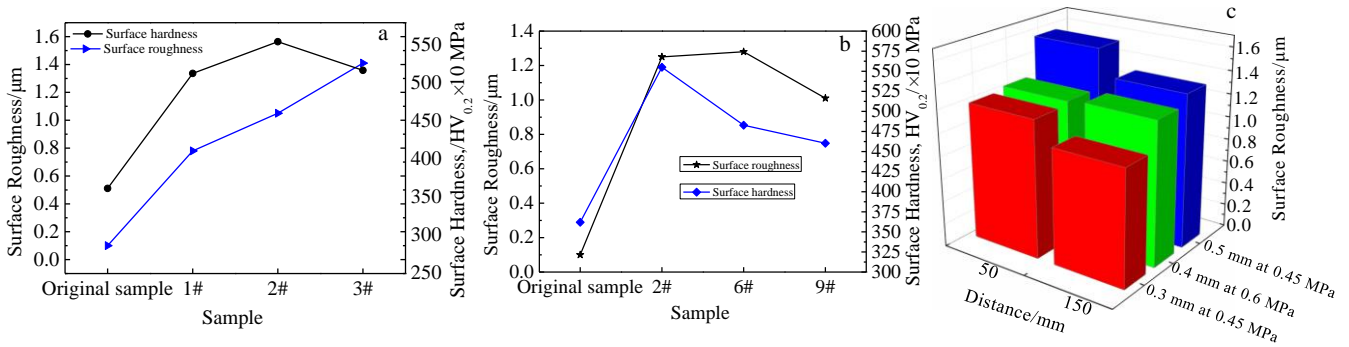


图 4 不同喷丸参数下的表面粗糙度和表面硬度

Fig.4 Surface roughness and hardness under different shot peening parameters: (a) 0.3 MPa air pressure and 100 mm pellet distance; (b) 0.4 mm diameter and 100 mm distance; (c) distance of 50 mm and 150 mm

陶瓷丸料为 0.4 mm (试样 2#) 时表面硬度高达 5550 MPa, 而其他直径丸料喷丸试样表面硬度要低些。其原因可能是丸料小 (≤ 0.3 mm), 钨表面撞击力不够, 塑性变形能力差, 但是丸料小对表面造成的损伤小, 在喷丸时间的积累下可能会产生比较好的效果; 丸料大 (≥ 0.5 mm) 则与之相反, 撞击力大, 理论上塑性变形明显, 但对钨这种硬性、脆性材料, 损伤几率增大, 硬度增强效果却不是最佳的。因此, 对钨而言, 0.4 mm 直径陶瓷丸料是比较合适的。

在相同的丸料 (0.4 mm) 和喷丸距离 (100 mm) 下, 钨表面的硬度随着喷丸压力增大反而是降低的。在 0.3 MPa 压力下显微硬度最大 (试样 2#), 而 0.6 MPa 时显微硬度反而最小 (试样 9#)。这说明喷丸对钨表面硬度的影响不是喷丸压力越大越好, 主要是因为钨本身硬度较大, 而且与其他材料 (铝、镁、不锈钢等) 相比较脆, 韧性差, 在较大喷丸压力下钨塑变效果并不理想, 而且甚至会使表面层出现微裂纹、表层疏松等。

在相同喷丸压力和喷丸丸料直径的情况下, 喷丸距离对表面硬度影响如图 5 所示。从图中可以看出, 无论是 0.45 MPa 压力下 0.3 mm 直径丸料 (4#, 5#), 或者 0.5 mm 直径丸料 (7#, 8#), 还是 0.6 MPa 压力下 0.4 mm 直径丸料 (10#, 11#), 在 150 mm 喷丸距离情况下硬度值都比 50 mm 要高, 但是硬度相差不是很大, 最大值为 0.45 MPa 下 0.3 mm 丸料 (4#, 5#) 的 41.4 MPa, 最小仅为 0.6 MPa 下 0.4 mm 丸料 (10#, 11#) 的 2.7 MPa。这主要是因为丸料撞击后反向弹射遇到正向丸料, 两者相撞改变了撞击方向、减少了撞击粒子量, 减弱了撞击力。适当的喷丸距离下, 反向弹射动量较小, 与正向丸料撞击时对正向丸料动量削弱小。相反, 过大的喷丸距离则会造成飞行中空气阻力作用时间长, 对试样撞击力不够, 强化效果不佳。对钨而言, 选择 50~150 mm 的

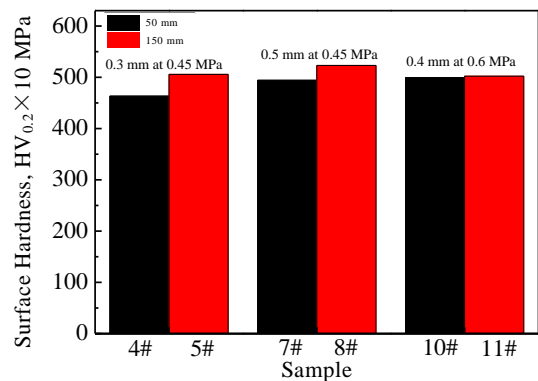


图 5 相同喷丸压力和丸料直径情况下喷丸距离与钨表面硬度关系

Fig.5 Tungsten surface hardness vs pellet distance under the same air pressure and pellet diameter

喷丸距离, 对硬度强化影响相差不大。

2.5 表面残余应力

图 6 为喷丸前后表面残余应力分析图。从图中可以看出, 未喷丸处理的试样表面残余压应力为 -136.5 MPa, 喷丸处理后表面残余压应力有较大增加, 其中 2# 试样压应力高达 -1273 MPa, 提高 8.3 倍, 3# 试样压应力最小也达到 -926.6 MPa, 提高 5.8 倍。通过比较 1#~3# 试样残余压应力发现, 丸料直径在 0.4 mm 时表面残余压应力最大, 该数据与硬度数据分析具有很好的一致性。11# 试样在 0.6 MPa 压力下, 表面残余压应力不是最大的, 相比 2# 试样应力值相差 278.8 MPa。这也说明并非喷丸压力越大越好, 在更大的压力下, 对钨而言可能会造成近表面损伤。未喷丸处理试样残余应力主要是在抛光、切削等工艺中引入的^[18]。而经喷丸处理后, 试样表层硬化, 而内层弹性变形要恢复, 从而对表面产生一向内的应力 (拉应力), 硬化层则阻碍内

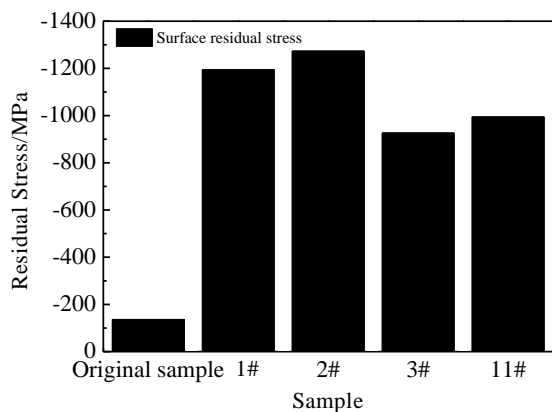


图 6 喷丸前后钨试样表面残余应力

Fig.6 Surface residual stress of tungsten before and after shot peening

层弹性恢复从而产生一向外的压应力,即残余压应力。该压应力能在一定程度上削弱外加载荷的拉应力,特别是对循环载荷,能有效提高材料疲劳强度,这对于核聚变材料应用有较大意义。因为目前无论是欧美的现有装置 JET、ASDEX-U、TEXTOR,还是中国全超导 EAST,或者在建的实验堆 ITER,其脉冲时间设定均不超过 1000 s,也就是说在一个实验运行周期内会反复有热载荷作用到钨表面,很多学者把 10 000 周次作为面对等离子体材料抗疲劳性能研究目标^[19,20]。

3 结 论

1) 喷丸工艺对面对等离子体材料钨表面具有较好的强化效果,而且对其表面粗糙度影响不明显。

2) 在 100%喷丸覆盖率条件下,0.3 MPa 喷丸压力、0.4 mm 陶瓷丸直径、100 mm 垂直喷丸距离是较为合适的喷丸参数,钨表面强化效果明显:有效减小表面晶粒,表面硬度提高达 53.3%,表面残余压应力增大 8.3 倍。

3) 表面强化效果受喷丸压力、丸料大小、喷丸距离和方式的影响。丸料大小是影响弹坑尺寸的主要因素,喷丸压力则是弹坑深度影响主要参数,喷丸距离的影响相对较弱。

参考文献 References

[1] Chong Fali(种法力), Chen Yong(陈勇), Yu Fuwen(于福文) et al. *Journal of Materials Science and Engineering*(材料科学

与工程学报)[J], 2019, 37(6): 986

[2] Chong Fali(种法力), Chen Junling(陈俊凌), Zheng Xuebin(郑学斌). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2017, 37(3): 313

[3] Chong Fali(种法力), Chen Junling(陈俊凌), Zheng Xuebin(郑学斌). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(7): 1765

[4] Zhu Dahuan, Chen Junling. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2015, 455: 185

[5] Lian Y Y, Liu X, Wang J B et al. *Applied Surface Science*[J], 2016, 390: 167

[6] Chong Fali. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2013, 22: 57

[7] Zhu Jidong(朱继东), Yu Dan(于丹), Wei Xiwu(韦习武) et al. *Heat Treatment Technology and Equipment*(热处理技术与装备)[J], 2018, 39(4): 6

[8] Hensel J, Eslami H, Nitschke T et al. *Metals*[J], 2019, 9(7): 744

[9] Qin Haidi(秦海迪), Zhang Yalong(张亚龙), Liu Haipeng(刘海鹏) et al. *Surface Technology*(表面技术)[J], 2020, 49(5): 222

[10] Qian Ang(钱昂), Jin Ping(金平), Tan Xiaoming(谭晓明) et al. *Surface Technology*(表面技术)[J], 2019, 48(9): 158

[11] Chen Jiawei(陈家伟), Liao Kai(廖凯), Li Lijun(李立君) et al. *Surface Technology*(表面技术)[J], 2019, 48(9): 121

[12] Wang Ruikun(王锐坤), Zheng Zhijun(郑志军), Gao Yan(高岩). *Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报, 自然科学版)[J], 2017, 48(4): 903

[13] Chang Xiaodong(常晓东), Liu Daoxin(刘道新), Cui Tengfei(崔腾飞) et al. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*(机械科学与技术)[J], 2013, 32(11): 1584

[14] Tekeli S. *Materials Letters*[J], 2002, 57(3): 604

[15] Chong Fali, Chen Junling, Li Jiangang et al. *Plasma Science and Technology*[J], 2007, 9(3): 261

[16] Suárez A, Veiga F, Lópezdelacalle N et al. *Journal of Materials Engineering & Performance*[J], 2016, 25(11): 5076

[17] Choi Y. *International Journal of Fatigue*[J], 2017, 94: 81

[18] Gao Y K, Wu X R. *Acta Materialia*[J], 2011, 59: 3737

[19] Matejcek J, Koza J, Weinzettl Y V. *Fusion Engineering and Design*[J], 2005, 75-79: 395

[20] Choy K L. *Progress in Materials Science*[J], 2003, 48: 57

Study on Surface Strengthening of Plasma Facing Material Tungsten by Shot Peening

Chong Fali¹, Liao Kai², Chen Jiawei²

(1. Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221000, China)

(2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The mechanical shot peening technology was applied to study the surface strengthening of plasma facing materials tungsten for fusion device. Combining the performance of tungsten before and after shot peening, the strengthening effect analysis and the optimization of shot peening parameters were carried out, which mainly included micro morphology, grain refinement, surface roughness, surface hardness and surface residual compressive stress. The results indicate that air pressure of 0.3 MPa, ceramic pellet with the diameter of 0.4 mm and pellet distance of 100 mm are the optimum shot peening parameters for the brittle and hard tungsten, which induces the performance enhancement of plasma facing material tungsten. The surface hardness increasement of about 53.5% is obtained, and the residual compressive stress increases by 8.3 times. The surface grain refinement phenomenon is obvious, and the influence of shot peening technology on surface roughness is not obvious. The maximum roughness is about 1.5 μm .

Key words: tungsten; shot peening; plasma facing material; surface strengthening

Corresponding author: Chong Fali, Ph. D., Professor, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221000, P. R. China, Tel: 0086-516-83105225, E-mail: flchong2008@163.com