

电爆喷涂粒子的约束调控机制及对沉积行为的影响

韩 峰, 朱 亮, 刘宗瀚, 龚 练

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 采用对喷涂粒子进行槽内约束的电爆喷涂方法, 研究了喷涂粒子在垂直槽中的约束调控机制及其沉积行为。结果表明: 约束深度达 20 mm 时, 即喷涂距离为丝径的 100 倍时, 仍可获得连续、均匀的涂层。约束宽度从 6 mm 减小至 2 mm, 涂层表面呈现出由粗糙的“丘壑状”形貌向均匀的“薄饼状”形貌逐渐过渡的演变趋势, 且涂层厚度显著提高; 能量密度从 57 J/mm^3 提高至 152 J/mm^3 , 同样可提高涂层厚度并改善涂层均匀性。对喷涂粒子进行收集, 发现减小约束宽度和提高能量密度均可有效细化喷涂粒子并使喷涂粒子粒径分布更加均匀。分析认为, 由焦耳加热导致的“热膨胀效应”和击穿电弧伴生的“压力效应”共同决定电爆冲击波和喷涂粒子的形成, 并随能量密度和约束参数的变化, 对喷涂粒子表现出不同的约束调控作用, 使其沉积行为产生显著差异。

关键词: 电爆喷涂; 约束调控; 涂层形貌; 喷涂粒子

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)04-1409-06

电爆喷涂是一种正在研究的新型热喷涂技术, 利用高电压对喷涂材料脉冲放电, 瞬时大电流将其加热并发生爆炸, 产生的高温高速喷涂粒子伴随冲击波与基体碰撞形成涂层^[1]。早期的电爆喷涂通常是将金属丝置于管(孔)的中心线, 利用金属丝爆炸后的径向飞散原理, 多用于管(孔)内壁涂层的制备^[2,3]。但由于喷涂粒子速度随喷射半径的增加而剧烈衰减, 该技术仅限于在小直径管(孔)内壁制备涂层。

定向电爆喷涂方法的采用是该领域研究的重要进展。它是将喷涂材料置于开有喷射窗口的绝缘腔室内, 电爆后喷涂粒子沿同一方向集中喷射到基体表面形成涂层。其中, 最早是将压制的粉末置于侧壁开有窗口的管式喷腔内, 对金属陶瓷粉末进行喷涂^[4,5]; 还有是将喷涂材料放入一端开口一端封闭的爆炸室内, 也可实现喷涂粒子的定向喷射, 并在此基础上制备了多种耐磨、抗腐蚀涂层, 还发现此方法用于提高火炮管寿命具有独特优势^[6-8]。然而, 以上的研究虽已验证了定向电爆喷涂方法在大尺寸管(孔)内壁及工件外表面制备涂层的可行性。但该技术目前还处于实验室研究阶段。主要问题在于每喷涂一次须更换一次喷涂材料, 喷涂效率低成为其走向实际工程应用的瓶颈。针对此问题, 笔者所在团队开发了气体放电导入电流的电爆方法^[9], 使喷涂材料在电爆发生时不接触电极,

便于电爆过程中喷涂材料的连续送进, 为提高电爆喷涂效率提供了可行的途径。并选择具有消融效应的耐冲击绝缘材料制作电爆喷腔, 初步发现如果将喷涂材料限制在足够小的喷腔空间内电爆, 更易获得结合强度高的涂层^[10,11]。由此可知, 电爆喷腔不仅具有集中喷涂粒子使其定向喷射的效果, 更为重要的是, 还对喷涂粒子具有显著的约束调控作用。

本研究采用槽内约束的方式实现对喷涂粒子的约束调控。通过改变约束槽的约束参数(约束深度和约束宽度), 进行不同能量密度下的系列电爆喷涂实验, 通过对涂层进行观察分析, 并收集了相应参数下的喷涂粒子, 对喷涂粒子的约束调控机制及其沉积行为的影响进行了详细的阐述。

1 实 验

图 1 为自主设计的槽约束电爆喷涂装置^[12]。该装置主体结构由电极、喷枪、载料杆以及传送装置组成。电极固定于喷枪内并与储能电容器相连, 载料杆开有垂直约束槽, 喷涂前将喷涂材料粘接于槽底备用。实验时高压发生器 H.V. 对储能电容充电, 两电极间首先建立起高压电场, 传送装置将装有喷涂材料的载料杆连续送入喷枪内, 待位于两电极正下方时, 在高压电场的作用下, 电极通过气体放电将大电流导入喷涂材

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(51765038)

作者简介: 韩 峰, 男, 1986 年生, 博士生, 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050, E-mail: hanfeng07@aliyun.com

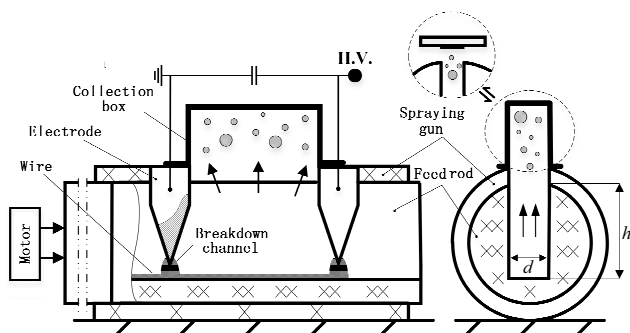


图 1 槽约束电爆喷涂装置

Fig.1 Schematic diagram of grooved constrained electro-explosive spraying device^[12]

料使其发生电爆, 所产生的高压气体和喷涂粒子在载料杆的凹槽中受约束作用汇聚成高速射流, 伴随冲击波喷射到基材表面形成涂层。由于该装置实现了喷涂材料的自动送进、连续起爆, 只需保证装置与基材发生相对匀速运动, 即可获得大面积涂层。

载料杆的材料为聚乙烯。定义载料杆槽深 h 与槽宽 d 分别为约束深度和约束宽度, 实验中所选用的约束深度范围为 5~20 mm, 约束宽度在 2~6 mm 之间变化; 选取直径为 0.3 mm 的钨丝作为喷涂原料; 储能电容器的电容量为 8.88 μF ; 喷涂材料的能量密度 E 在 57~152 J/mm^3 间变化; 喷口距基材约为 10 mm; 两电极间距为 70 mm; 基材选用 304 不锈钢薄片, 实验前对其进行喷砂处理。

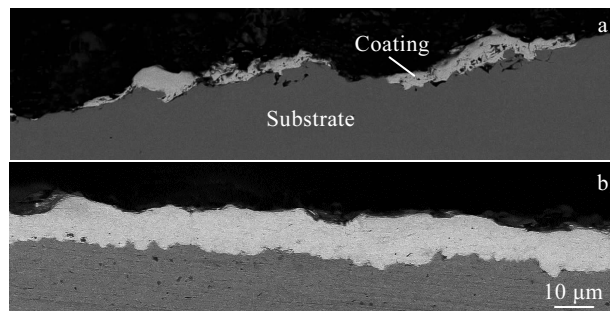
同时, 将专门设计的喷涂粒子收集箱密封安装于喷枪的喷射窗口处对喷涂粒子进行收集。为保证收集结果的真实准确, 在各参数下均连续电爆 20 次, 待喷涂粒子沉降后, 对其进行取样。采用 SEM (Quanta 450 FEG) 对涂层及喷涂粒子形貌进行观察, 并利用图像软件 nano measurer 对喷涂粒子的粒径进行统计分析。

2 实验结果

2.1 涂层形貌特征

改变能量密度和约束参数进行系列喷涂实验, 结合对涂层表面及截面形貌的观察分析, 发现约束深度 h 、约束宽度 d 和能量密度 E 均会对喷涂粒子的沉积行为产生影响, 导致涂层形貌出现明显差异。

约束深度的变化一方面影响喷涂粒子的约束程度, 另一方面直接改变了喷涂材料与基材间的相对距离即喷涂距离。实验发现, 当约束深度较小时 (5~10 mm), 涂层分布较发散且连续性差, 典型形貌如图 2a 所示。这是由于约束深度较小, 对喷涂粒子的约束程

图 2 152 J/mm^3 不同约束深度涂层截面形貌Fig.2 Cross-section SEM images of coatings under 152 J/mm^3 with different constraint depths: (a) 10 mm and (b) 20 mm

度有限, 电爆发生后, 喷涂粒子四散喷射, 大部分粒子仅是擦过基材或与基材发生小角度碰撞, 无法形成粒子的集中扁平化堆积。随约束深度逐渐增加, 涂层连续性不断改善。相比而言, 在无约束的自由式电爆喷涂中, 如果喷涂距离大于喷涂丝径的 20 倍, 喷涂粒子则无法在基材表面扁平堆积^[13]。在本次实验中, 当喷涂距离提高至丝径的 100 倍时 (即约束深度为 20 mm 时), 仍可获得连续、均匀的涂层, 其典型形貌如图 2b 所示。

约束宽度和能量密度对涂层形貌有着最为直接的影响。选定约束深度为 20 mm, 对不同约束宽度及能量密度下的涂层微观形貌分析, 发现当能量密度较低时 (57 J/mm^3), 在 6 mm 约束宽度下, 如图 3a 所示, 涂层表面粗糙, 大量喷涂粒子集中扁平堆积, 形成扁平粒子垛, 随机分布于基材表面, 并贯穿相连形成堆积丘, 其内部存在较多孔隙及未充分扁平的喷涂粒子, 呈现明显的“丘壑状”形貌特点。随约束宽度逐渐缩小, 涂层表面的丘壑趋于平缓, 孔隙明显减少, 典型形貌如图 3c 所示。当约束宽度继续减小, 涂层更为均匀、致密, 可观察到喷涂粒子呈现出如图 3e 所示的“薄饼状”扁平粒子堆积的形貌特征, 扁平粒子分布均匀, 没有出现集中堆积的现象, 且扁平粒子间存在明显边界。当能量密度逐渐提高, 约束宽度不断缩小后, 虽仍可观察到涂层表面形貌呈现出由“丘壑状”向“薄饼状”逐渐过渡的演变趋势, 但相对于低能量密度时, 涂层孔隙数量均显著减少, 表面更加平整、致密, 其典型特征如图 3b、3d、3f 所示。

对相同参数下的截面形貌分析发现, 减小约束宽度和提高能量密度均可提高涂层厚度, 并可改善涂层沿截面分布的均匀性。从图 4 中可以看出, 在能量密度为 57 J/mm^3 时, 约束宽度为 6 mm 时 (图 4a), 涂

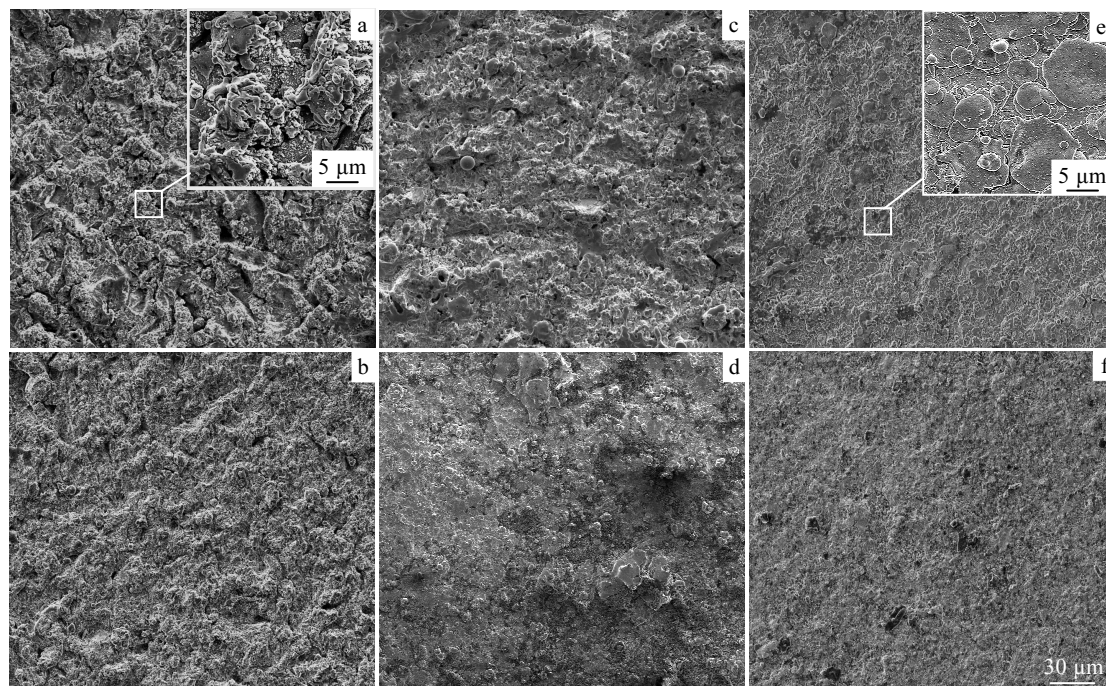


图3 不同能量密度和约束深度下涂层表面形貌

Fig.3 SEM images of coatings surface: (a) $d=6$ mm, $E=57$ J/mm³; (b) $d=6$ mm, $E=152$ J/mm³; (c) $d=4$ mm, $E=57$ J/mm³; (d) $d=4$ mm, $E=152$ J/mm³; (e) $d=2$ mm, $E=57$ J/mm³; (f) $d=2$ mm, $E=152$ J/mm³

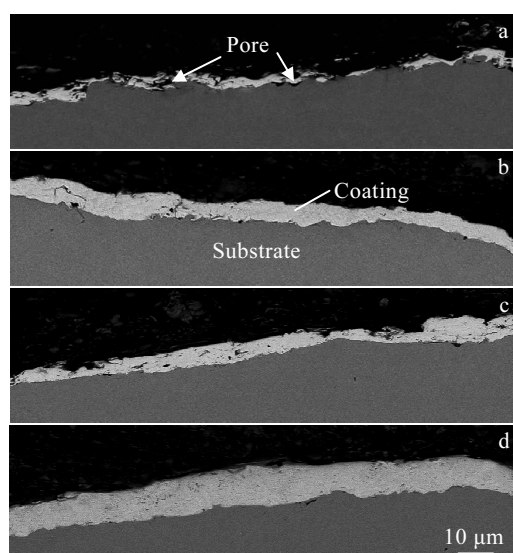


图4 不同能量密度和约束深度下涂层截面形貌

Fig.4 Cross-section SEM images of coatings: (a) $d=6$ mm, $E=57$ J/mm³; (b) $d=2$ mm, $E=57$ J/mm³; (c) $d=6$ mm, $E=152$ J/mm³; (d) $d=2$ mm, $E=152$ J/mm³

层平均厚度不超过 $5\ \mu\text{m}$, 且均匀性较差, 其内部及与基体界面处存在大量孔隙, 当约束宽度缩小至 $2\ \text{mm}$

时 (图 4b), 涂层的均匀性有所改善, 平均厚度约为 $7\ \mu\text{m}$ 。随着能量密度提高至 $152\ \text{J/mm}^3$, 从图 4c、4d 中可以看出, 涂层厚度相对于低能量密度时均明显提升, 且在 $2\ \text{mm}$ 约束宽度下 (图 4d), 涂层的平均厚度达到约 $12\ \mu\text{m}$, 其均匀性也得到进一步改善。

根据以上对涂层形貌的观察分析可知, 能量密度和约束程度均对喷涂粒子特性具有显著的调控作用, 导致其具有不同的沉积行为。为深入认识其调控机制, 实验进一步对相应参数下的喷涂粒子进行收集分析。

2.2 喷涂粒子收集

由于在约束深度小于 $10\ \text{mm}$ 的条件下, 喷涂粒子受约束腔的约束调控作用较弱, 故实验主要对约束深度为 $20\ \text{mm}$ 时, 不同约束宽度及能量密度下的喷涂粒子进行收集。通过对喷涂粒子进行收集, 不仅可以对其凝固后的形貌特征进行较为清晰的观察, 而且还可对其尺寸特征进行准确统计。

从形貌上来看, 喷涂粒子以球形颗粒为主, 其典型形貌如图 5 所示。当能量密度为 $57\ \text{J/mm}^3$ 时, 单个粒子表面粗糙, 随机分布着大量孔洞 (图 5a), 随能量密度不断升高至 $152\ \text{J/mm}^3$, 粒子表面逐渐平滑、圆润 (图 5b)。这说明, 由于过热的熔融喷涂粒子内部存在大量蒸气, 能量密度较低时, 蒸气完全从粒子内部

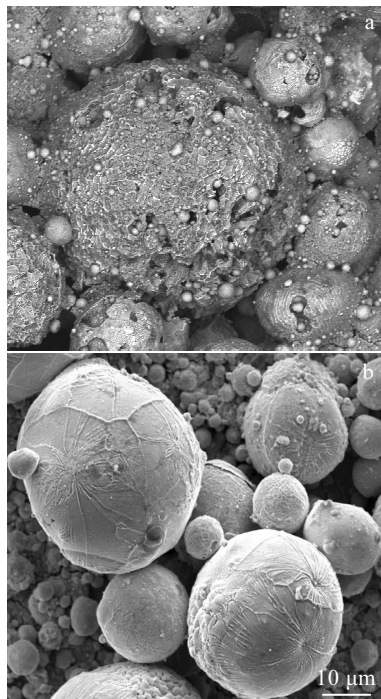


图 5 约束深度为 6 mm 时不同能量密度下喷涂粒子形貌

Fig.5 SEM images of spraying particles with $d=6$ mm under different energy densities: (a) $E=57$ J/mm³ and (b) $E=152$ J/mm³

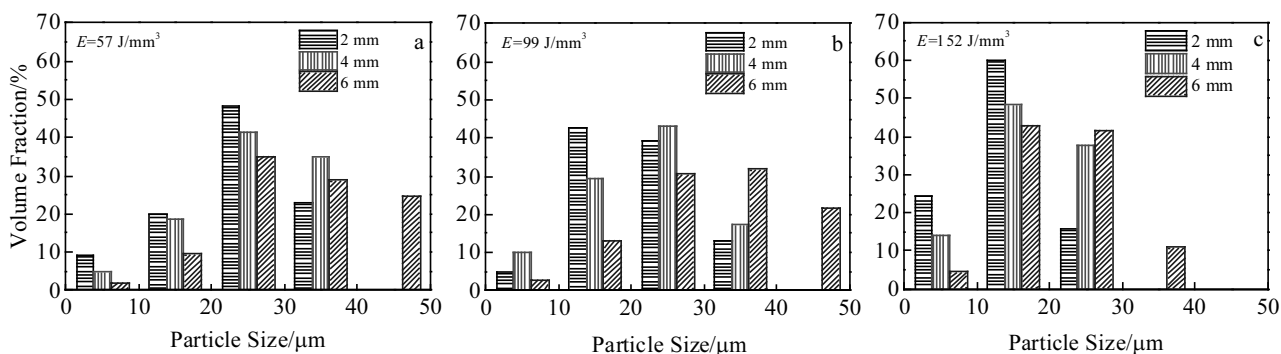


图 6 不同能量密度下喷涂粒子粒径分布

Fig.6 Particle diameter distribution under different energy densities: (a) 57 J/mm³, (b) 99 J/mm³, and (c) 152 J/mm³

表 1 不同约束宽度及能量密度下粒径分布标准偏差

Table 1 Standard deviation of particle size distribution under different constraint widths and energy densities

Energy density/J·mm ⁻³	Constraint width/mm		
	2	4	6
57	6.2	7.7	8.3
99	5.5	5.5	6.3
152	3.9	5.6	5.7

排出前, 粒子表面已凝固形成一层固态壳层, 蒸气在排出过程中冲破壳层造成粒子表面破碎或形成孔洞。随能量密度逐渐提高, 蒸气快速排出后, 粒子才逐渐开始凝固, 则表面较为光滑。可以推断出, 高能量密度下, 喷涂粒子的高温存在时间较长, 且喷涂材料在电爆发生时应具有相对高的温度。

从尺度上来看, 如图 6 所示, 提高能量密度和减小约束宽度均可细化喷涂粒子。特别是当能量密度升高至 152 J/mm³, 约束宽度缩小至 2 mm 时 (图 6c), 喷涂粒子中小于 20 μm 的粒子比例明显增加, 其中 10~20 μm 的粒子约占 60%, 而小于 10 μm 的粒子比例则超过 20%。表 1 为不同约束宽度及能量密度下的粒径分布标准偏差, 不难发现, 随能量密度的提高和约束宽度的缩小, 喷涂粒子的粒径分布标准偏差也逐渐减小。而粒径分布标准偏差越小表明粒径分布越集中, 这说明当能量密度提高或约束宽度减小后, 粒径分布宽度逐渐变小, 喷涂粒子的粒径分布更为均匀。

3 分析与讨论

在槽式约束腔内进行电爆喷涂时, 提高能量密度和增强约束程度均有利于获得均匀、致密及与基体结合紧密的高质量涂层。对喷涂粒子进行收集, 发现减小约束宽度和提高能量密度均可有效细化喷涂粒子并

使喷涂粒子粒径分布更加均匀。结合以上实验结果, 围绕喷涂粒子的形成、特性及沉积行为, 对电爆喷涂粒子的约束调控机制进行如下阐述。

当脉冲大电流导入喷涂材料后, 焦耳加热过程开始, 材料发生熔化、部分气化, 最终形成内部为高密度丝核, 外层为低密度冕等离子体的“核冕结构”。电流迅速从喷涂材料内部转移至冕层中形成等离子体击穿电弧, 喷涂材料的焦耳加热阶段结束。此时储能电

容器内部剩余的能量将全部用于维持击穿电弧。由于电弧内部具有相当高的温度, 其对周围空气介质快速加热, 使空气受热急剧膨胀升压, 产生超音速冲击波向四周扩散, 即发生由电弧膨胀诱导冲击波导致的“电弧爆炸”, 并直接对受热膨胀的喷涂材料施加瞬态高压, 导致喷涂材料发生失稳爆炸, 形成的喷涂粒子在约束腔内汇聚成高速射流喷射而出。可见, 电爆冲击波和喷涂粒子的形成其实是由前期焦耳加热导致的“热膨胀效应”和击穿电弧伴生的“压力效应”所共同决定的。

基于以上对电爆冲击波及喷涂粒子形成机制的认识, 可以推断出, 当能量密度较高时, 在发生失稳爆炸前熔融的喷涂材料具有相对高的温度, 其粘度较小, 具有较高的雷诺数, 当喷涂材料受热膨胀时, 其膨胀动能相对于粘性力足够大, 有利于形成尺寸较小的喷涂粒子。并且随能量密度的提升, 电流上升率的增加导致电流的变化梯度增大, 进而使电弧膨胀产生的冲击波压力变大^[14,15], 当其对喷涂材料施加作用时, 更容易细化喷涂粒子。这些小尺寸粒子在与基体碰撞扁平化后形成的涂层相对均匀, 而且由于喷涂粒子的温度较高, 扁平化过程中粒子间相互熔合, 涂层较为致密。

约束参数对喷涂粒子的调控作用则主要发生在喷涂粒子喷射飞行时。在约束槽内, 喷涂材料热膨胀产生的冲击波和击穿电弧诱导的冲击波相互叠加, 以扰动波的形式经约束腔两侧壁反射后, 对飞行的母液滴施加冲击, 使母液滴发生变形破碎。根据文献^[16,17]的研究, 液滴的破碎特性与射流速度、母液滴的粒径密切相关, 并指出随射流速度增大, 母液滴的粒径越大越容易发生子液滴数量大于3个的多元破碎。结合约束腔中爆炸的聚能效应理论可知, 约束宽度越小, 爆炸后形成的聚能射流速度就越大^[18]。

显然, 当约束宽度为2 mm时的射流速度更大, 其大尺寸母液滴经冲击波作用后发生多元破碎的概率也相对较高。而破碎后子液滴中的大尺寸液滴在飞行过程中又会发生破碎, 直至与基体发生碰撞形成涂层。破碎过程即喷涂粒子尺寸的均匀化过程, 母液滴破碎的数量及次数越多, 子液滴的尺寸分布就越均匀。因此, 约束宽度越小粒子的尺寸分布越均匀, 其飞行轨迹就越统一, 加之约束腔的定向作用, 喷涂粒子多以垂直角度撞击基体, 发生较为规则的粒子堆积行为, 所得到的扁平粒子多为“薄饼状”且形成的涂层均匀、致密。而约束宽度较大时, 粒径分布的不均匀性使得不同尺寸的粒子因其具有不同的斯托克斯数^[19], 造成飞行轨迹出现显著差异。喷涂粒子以不同角度与基体发生碰撞, 则形成均匀性较差的“丘壑状”涂层形貌。

当约束深度增大时, 扰动波的壁面反射次数增加, 能量逐渐耗散, 虽无法使母液滴发生破碎, 但会施于液滴动能使其飞行速度提高。因此, 随约束深度增加, 其喷射速度显著提高, 有利于涂层的均匀、致密化。

4 结 论

1) 当喷涂距离为丝径的100倍时(即约束深度为20 mm时), 仍可获得连续、均匀的涂层。因受实验装置的结构限制, 故本次实验采用的最大约束深度为20 mm, 而继续增加约束深度后, 涂层形貌特征及粒径分布的变化有待进一步研究分析。

2) 减小约束宽度和提高能量密度均可改善涂层的均匀性及致密性, 并可有效提高涂层厚度。

3) 减小约束宽度和提高能量密度均可有效细化喷涂粒子并使喷涂粒子粒径分布更加均匀。

4) 电爆冲击波和喷涂粒子的形成是由焦耳加热导致的“热膨胀效应”和击穿电弧伴生的“压力效应”所共同决定的, 并随能量密度和约束参数的变化, 对喷涂粒子表现出不同的约束调控作用, 使其沉积行为出现显著差异。

参考文献 References

- [1] Suhara T, Kitajima K, Fukuda S *et al. Journal of Vacuum Science & Technology*[J], 1974, 11(4): 787
- [2] Grabatin H, Schlett V, Stuke H *et al. Journal of Vacuum Science & Technology*[J], 1985, 3(6): 2545
- [3] Fan Xinmin(樊新民), Liu Jiajian(刘加健). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 792
- [4] Tamura H, Itaya M. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2000, 9(3): 389
- [5] Tamura H, Wei F G, Kodama T. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2002, 11(1): 100
- [6] Liu Jingjing, Liu Zongde. *Material Letters*[J], 2010, 64(6): 684
- [7] Wei Shicheng, Xu Binshi, Wang Haidou *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2007, 201(15): 6768
- [8] Jiang Xiaolin, Wang Yanni, Lu Xin. *Advanced Materials Research*[J], 2012, 429: 19
- [9] Zhu Liang(朱 亮), Bi Xuesong(毕学松). *China Patent*, 2011100547927[P], 2011
- [10] Zhu Liang(朱 亮), Qiao Hetao(乔河涛), Zhang Pengfei(张鹏飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(7): 1488
- [11] Zhu Liang(朱 亮), Shi Maohu(石茂虎), Wang Yong(王 永)

- et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(4): 968
- [12] Zhu Liang(朱亮), Han Feng(韩峰). *China Patent*, 2015106480098[P], 2015
- [13] Liu Zongde(刘宗德), Dong Shiyun(董世运), Bai Shulin(白树林). *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2013, 30(1): 1
- [14] Babrauskas V. *Fire Safety Journal*[J], 2017, 89: 7
- [15] Xiong Jiaming(熊佳明), Li Li(李黎), Dai Hongyu(戴宏宇) *et al. Proceedings of the CSEE*(中国机电工程学报)[J], 2018, 38(22): 6746
- [16] Rao Li(饶莉), Zhang Pengju(张鹏举), Cai Ziqi(蔡子琦) *et al. Journal of Beijing University of Chemical Technology*(北京化工大学学报)[J], 2016, 43(3): 20
- [17] Vananroye A, Van Puyvelde P, Moldenaers P. *Journal of Rheology*[J], 2007, 51(1): 139
- [18] Yun Shourong(恽寿榕), Zhao Hengyang(赵衡阳). *Explosion Mechanics*(爆炸力学)[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2005: 171
- [19] Tabbara H, Gu S, McCartney D G *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2011, 20(3): 608

Regulation Mechanism and Effect on Deposition Behavior of Constraint Electro-explosive Spraying Particles

Han Feng, Zhu Liang, Liu Zonghan, Gong Lian

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The regulation mechanism and deposition behavior of sprayed particles in vertical groove were studied by groove constrained electro-explosive spraying. The results show that when the constraint depth reaches 20 mm, i.e. the spraying distance is 100 times of the wire diameter, the continuous and uniform coatings can still be obtained. With the constraint width decreasing from 6 mm to 2 mm, the morphology of coating surface changes from “hill-like” to “pancake-like”, and the coating thickness increases significantly; increasing energy density from 57 J/mm³ to 152 J/mm³ can also improve coating thickness and uniformity. By analyzing the collected spraying particles, it is found that reducing the constraint width and increasing the energy density can effectively refine the spraying particles and make the particle size distribution more uniform. It is concluded that the “thermal expansion effect” caused by Joule heating and the “pressure effect” associated with breakdown arc can work together to regulate the sprayed particles with the change of energy density and constraint parameters, which will result in different deposition behaviors.

Key words: electro-explosive spraying; constraint and regulation; coating microstructure; sprayed particles

Corresponding author: Zhu Liang, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: zhul@lut.cn