

电爆喷涂方法的研究进展

闫维亮¹, 王旭东¹, 周辉^{1,2}, 朱亮^{1,2}

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

(2. 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: 电爆喷涂是一种新兴的热喷涂方法, 它是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, 产生高温粒子伴随冲击波喷射到基体表面形成涂层。其特点是喷射粒子速度高, 设备尺寸小, 适用于孔腔内壁喷涂。本文综述了电爆喷涂方法的发展现状, 其经历了自由、定向和约束电爆喷涂。自由喷涂的电极直接接触, 烧损严重, 并对管径有限制, 仅用于小直径管/孔内壁; 定向喷涂的约束腔常用陶瓷材料, 在爆炸冲击时易破裂或烧蚀; 约束喷涂采用消融材料制作约束腔, 气体放电导入电流, 使这些问题得以解决。其次, 阐述了该方法制备的涂层特性, 即涂层与基体呈冶金结合, 形成了超细晶、纳米晶结构的致密涂层, 且具有良好的耐磨和抗腐蚀性及较高的硬度; 给出了过程参数与涂层的关系, 能量密度和喷涂距离是影响涂层性能的主要因素。最后分析了将来需要研究的问题, 展望了电爆喷涂方法的发展趋势。

关键词: 电爆喷射; 喷射成形; 涂层; 冶金结合; 热喷涂

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-3020-11

近年来, 电爆技术在材料加工领域得到了广泛应用, 尤其是表面高速喷涂和纳米粉末的制备, 还应用于等离子体聚爆、脉冲强光源、模拟核爆炸等^[1]。利用电爆技术进行表面高速喷涂, 是一种新兴的表面改性处理方法。其原理是喷涂材料在瞬时的高压脉冲放电过程中发生爆炸, 爆炸产物由于冲击波的作用将会以极高的速度与基体发生碰撞, 使得爆炸产生的气相粒子和金属液滴沉积在基体上, 从而形成涂层^[2]。该涂层是在其基体材料原有特性不变的基础上, 赋予其基体表面耐高温、耐腐蚀、耐磨等特殊性能, 从而达到表面改性的目的, 获得更好的使用价值及经济效益^[3]。与传统的热喷涂方法相比, 电爆喷涂方法具有独特的优势。

在电爆喷涂方法中, 喷射粒子在冲击波的作用下获得的速度很高^[4], 可达 2000~5000 m/s, 其结合强度相比于其他方法高出数倍^[5,6], 涂层孔隙率小。该方法制备的涂层不仅与基体间呈冶金结合, 而且涂层间也属冶金结合, 可以通过多次叠层喷涂控制涂层的厚度, 形成较厚的沉积层, 结合掩模或底模技术, 并通过优化系统配置, 合理调控过程参数, 该技术也可成为一种新型的喷射成型方法^[4]。

电爆喷涂方法的装置尺寸小, 可用于管内壁及小尺寸工件孔腔的内表面喷涂^[7,8]。在实际应用中, 对这种内表面进行改性处理的需求较多, 如火炮身管内膛喷涂

抗烧蚀性的材料^[9]、汽缸内壁上制备耐磨涂层、喷嘴内壁喷涂耐高温高压材料^[10]及输送介质的管内壁喷涂防腐或耐磨损材料等。其他方法喷涂过程中的沉积粒子是在高温焰流中加热和加速, 需要比较大的喷涂距离, 无法在孔腔内壁制备涂层。

喷涂材料本身既是热源, 又是喷涂过程中动力的来源。喷涂材料的热能是由电能通过欧姆加热的形式直接转化而来, 其能量利用率较高 (>50%), 对环境的污染小, 属于低能耗、低污染的生产方式^[11]。电爆喷涂粒子的动力来自喷涂材料爆炸后产生的爆炸冲击波, 无需专门的粒子加速系统, 其成本较传统热喷涂方法低。

电爆喷涂方法采用瞬间高功率脉冲电能加热方式, 适用于大部分导电材料, 尤其适合其他喷涂方法难以喷涂的高熔点材料, 如钨、钨、铌等^[12], 还可用于金属陶瓷材料, 如碳化钨、二硼化锆等^[13]。另外, 电爆喷涂过程时间极短, 仅需 10 μ s 左右, 对基体的热影响很小, 爆炸过程的能量易于控制, 适于在熔点较低的基体表面制备涂层, 如玻璃、聚合物等^[14]。

电爆沉积过程可在真空条件下进行, 可以避免易氧化材料在喷涂过程发生氧化, 致使涂层中掺入其他杂质。基体在喷涂前无需进行复杂的预处理, 简化工艺过程^[15]。其缺点是电爆喷涂时会产生噪音, 需要将喷涂设备置于隔音室内进行, 且喷涂材料需导电。

收稿日期: 2020-09-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51765038)

作者简介: 闫维亮, 男, 1996 年生, 硕士生, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: 2547094108@qq.com

本文综述了电爆喷涂方法的发展现状，其经历了自由、定向和约束电爆喷涂，重点介绍槽及管约束喷涂方法；其次阐述了利用该方法制备的涂层具有的特殊性能及应用，并给出工艺过程参数与涂层的关系，进一步分析将来需要研究的问题，最后展望了电爆喷涂方法的发展趋势。

1 电爆喷涂方法

电爆喷涂方法由于其独特的优势，在热喷涂领域有望成为一种不可或缺的新方法。其发展经历了自由电爆喷涂、定向电爆喷涂及约束电爆喷涂，约束电爆喷涂又分为管约束和槽约束 2 种。目前，其自动化、高效率的电爆喷涂装置是实现该方法价值的重要途径，而装置的研发是一个瓶颈，很多研究者在该方面做了很多工作。

1.1 自由电爆喷涂(EEFS)方法

20 世纪 60 年代末，电爆喷涂技术的研究在国外就已经开始了，当时的试验方法非常简单，将金属丝固定在管两端的电极上，储能电容器将电能通过高压开关施加在金属丝上使其发生爆炸，喷涂粒子在自由状态下沉积在管内壁，从而形成涂层^[16]。基于此原理，研发了自由式电爆喷涂装置，其通常由喷涂材料、电极、储能电容器、开关及高压发生器(H.V.)等组成，装置的设计思路主要是实现电爆不同形式的喷涂材料，如丝、粉及箔等。

就丝材和粉材而言，其装置原理如图 1 所示^[12]，使用喷涂材料与电极同轴固定的方式实现电爆。利用同轴装配的方式，不仅其固有电感小，能量利用率高，同时由于喷涂粒子径向分布较对称，形成的涂层相对均匀。一般情况下，将粉材压制成柱体，放在绝缘管中与电极相连，实现电爆过程；而丝材多被焊接或者绑缚在两电极上。

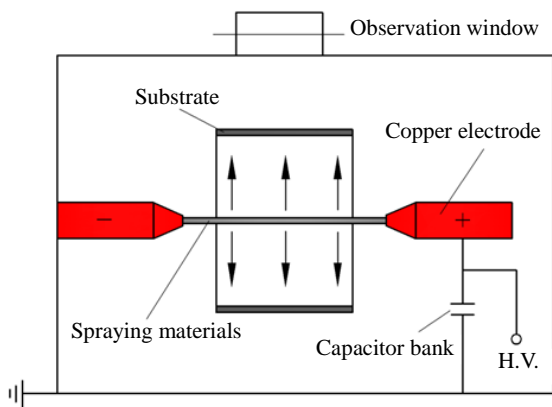


图 1 丝材和粉材电爆喷涂装置

Fig.1 Electric explosive spraying device for wire and powder^[12]

对于箔材，O. Demokan 等^[17]设计研发的金属箔管内壁电爆喷涂装置，是电爆箔材的代表性装置，其原理如图 2 所示，把铝箔材料缠绕在绝缘管的外壁，两铜卡箍作为电极，它把绝缘管和箔材两端固定，电流形成回路，根据异向电流相斥，产生的磁场对喷涂粒子作用一动能，使其喷涂在管内壁。在此处使用卡箍电极，不仅对箔材有很好的固定作用，且使得装置体积较小，可喷涂小口径管/孔内壁。

以上 2 种电爆装置，其电极和喷涂材料都是直接接触，使电极严重烧损，且无法连续送丝。丝段式电爆装置避免了电极烧损，实现了连续送丝，其原理是金属丝通过上电极小孔，竖直送入两电极之间，并在两电极间留有间隙，通过气体放电的方式将电能施加在金属丝上，避免了电极烧损，并且可以很方便地连续电爆，如图 3 所示^[18,19]。该装置只适用于内径比较小的管状基体，无法进行长距离的喷涂，并且不适用于平面基体。

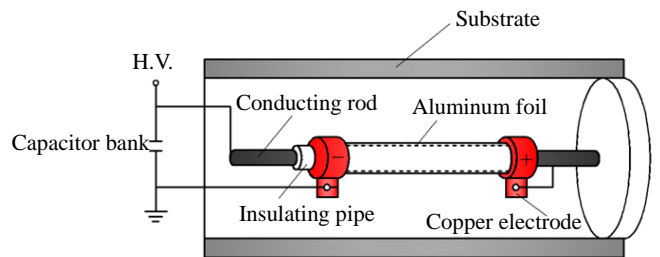


图 2 金属箔管内壁电爆喷涂装置

Fig.2 Electric explosion spraying device for inner wall of metal foil tube^[17]

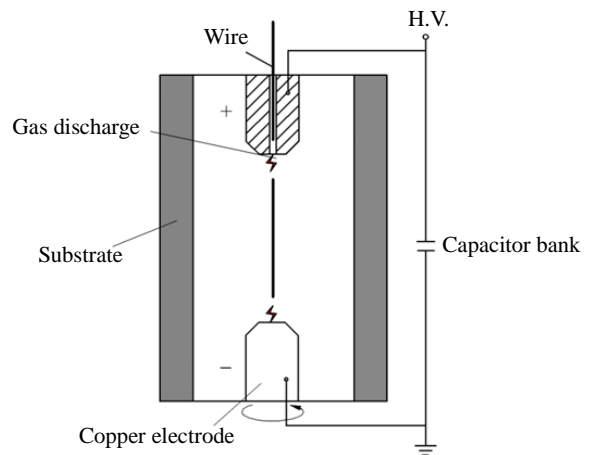


图 3 丝段式电爆喷涂装置

Fig.3 Wire section type electric explosion spraying device^[18,19]

1.2 定向电爆喷涂(EEDS)方法

定向电爆喷涂方法是该领域的重要进展，推动了其在工业中的应用。图 4 所示为定向电爆喷涂原理示意图^[20]，喷涂材料处于绝缘材料约束腔的底部，电爆后，其产物在约束壁的约束作用下沿同一方向喷射沉积到基体表面。其优点是喷射粒子在约束腔的作用下都能与基体发生碰撞，提高了沉积效率。经很多学者的研究，验证了借助约束腔的约束作用，可以控制喷射沉积过程中喷射粒子的方向，提高沉积层的均匀性^[21]。

定向电爆喷涂的研究仍处于实验室阶段，存在 2 个主要问题：其一，约束腔一般使用陶瓷材料制作，在爆炸冲击时易破裂或烧蚀；其二，每喷涂一次需更换一次喷涂材料，效率低下，限制了它在实际工程中的应用。

1.3 约束电爆喷涂(E ECS)方法

针对上述问题，有学者^[2]提出了 2 项关键技术，首先采用具有消融效应的耐冲击绝缘材料制作电爆约束腔，经过筛选，最终选定为一种聚合物，如聚乙烯材料；其次开发了气体放电导入电流的电爆方法，避免了电极直接接触发生烧蚀，污染喷涂材料。

1.3.1 管约束电爆喷涂方法

管约束电爆喷涂方法，其约束腔选用聚乙烯材料^[22]。为了提高喷涂效率和爆炸后沉积材料受约束的程度，开发了图 5 所示的连续送丝管内约束电爆喷涂实验装置，该装置将金属丝通过平带送丝的方式输送到喷枪内，当金属丝传送到两电极之间的正上方时，在气体放电的条件下将脉冲大电流导入金属丝，发生电爆，其爆炸产物在聚乙烯喷枪的约束作用下从端口喷出，以极高的速度撞击在基体表面，形成沉积层^[23]。

在金属丝管内约束电爆喷涂的基础上，设计了一套连续送粉管内约束电爆喷涂装置，实现了将粉末形式的沉积材料均匀连续精确地定向沉积在基体上，如图 6 所

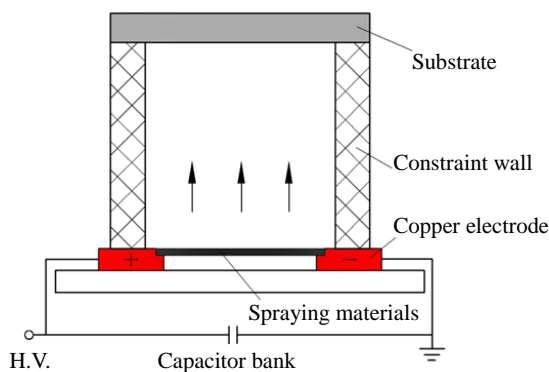


图 4 定向电爆喷涂原理

Fig.4 Principle of directional electric explosion spraying^[20]

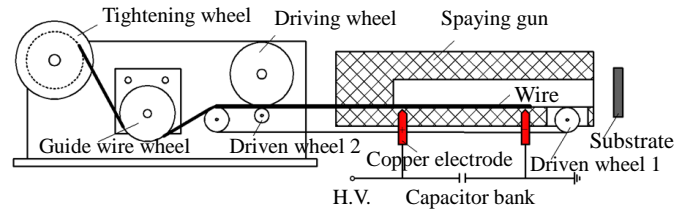


图 5 连续送丝管内约束电爆涂装置

Fig.5 Electric explosive coating device by continuous wire feeder in constraining tube^[23]

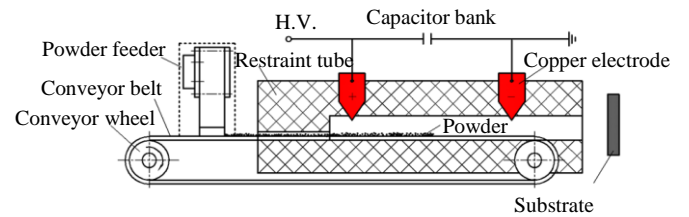


图 6 连续送粉管内约束电爆喷涂原理

Fig.6 Principle of electric explosive spraying by continuous powder feeder in constraining pipe^[24,25]

示，储能电容器 C 得到高压发生器 H.V.的电，在两电极之间形成高压电场。送粉装置将沉积粉末定量均匀地输送在传送带上，传送带将其载入约束管内，当沉积粉末置于两电极之间时，尖端结构的电极通过尖端放电把大电流导入沉积粉末内，发生电爆，由于约束管的约束作用，其产物从喷口处喷出，从而在基体上形成沉积层。传送带将沉积粉末连续送入，实现了连续电爆喷涂^[24,25]。

文献[26,27]提出了胶粘式送粉管内约束电爆喷涂方法并研发了其装置，它可以实现连续自动电爆喷涂，并且其增加了材料的选择范围，如图 7 所示。主动轮开始转动后，在它的带动下，送粉带表面均匀附着上压敏胶进入储粉器，在压粉轮的挤压和压敏胶的粘接作用下，

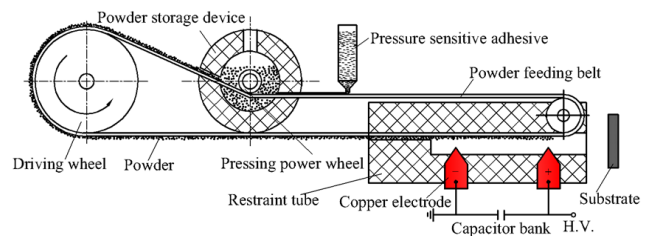


图 7 胶粘式送粉管内约束电爆喷涂原理

Fig.7 Principle of electric explosive spraying by an adhesive way continuous powder feeder in constraining tube^[26,27]

其粉末均匀铺展粘接在送粉带上，随后进入爆炸管，当到达两电极之间时产生气体放电，粉末内被导入大电流发生爆炸，其产物从喷口处喷射到基体表面，形成沉积层。

1.3.2 槽约束电爆喷涂方法

在使用电爆喷涂方法喷射孔件内表面时，采用预先将沉积材料置于工件的中轴线上，然后进行喷射沉积，其沉积材料不能自动更换，效率低下，并且由于沉积材料膨胀距离和能量密度的影响，大孔径工件和长孔件的沉积层制备在现有的电爆设备下很难实现，研发出了喷涂距离可调节的孔内壁连续丝电爆喷涂装置^[28,29]。在此基础上，文献[30,31]采用连续送丝的方式设计了管内壁连续丝电爆喷涂的设备，如图 8 所示。导丝轮上的金属丝通过传送带送入，点胶笔间隔进行涂胶，使金属丝粘贴在传送带表面，经压轮压实处理后，在传送带的带动下进入约束槽中，当金属丝到达两电极之间后，通过气体放电，金属丝上导入脉冲大电流连续发生爆炸，爆炸产物在约束槽的约束作用下定向沉积在管内壁表面，形成沉积层。

在大气环境下进行丝电爆喷射沉积，对沉积层的制备不能进行有效的保护，并且爆炸过程可能产生的粉尘会污染环境，故开发了一套保护气氛中丝电爆喷射沉积

装置，如图 9 所示。通过载丝机构将金属丝缠绕在载丝毂的每层丝槽内，金属丝通过压丝机构与载丝毂完全接触，并使其拉紧。传动机构在电机的带动下使载丝毂进行转动，当位于载丝毂上金属丝转动到两电极之间时，通过气体放电的形式将脉冲大电流导入金属丝中，在焦耳热的作用下发生爆炸，其产物通过载丝毂的约束口高速喷射到基体上，在基体表面冷凝形成沉积层。在往复丝杠的作用下，载丝毂同时进行上下移动，使得电极在每层中自由上下移动，从而每层中的金属丝发生爆炸^[32]。

在管内壁电爆喷涂制备沉积层的过程中，目前使用的沉积材料是丝材和箔材，很多高熔点材料以粉末形式存在，设计了用于管内壁的粉末电爆喷涂装置，实现了以粉末形式作为沉积材料的管内壁的喷射沉积^[33]。文献[34,35]对其进行改进，提出了一种自动化连续送料管内壁电爆喷涂设备，其原理如图 10 所示，其沉积材料可使用丝、箔及粉末，尤其是粉末，增加了沉积材料的使用范围，还实现了连续定向起爆、沉积材料的自动送给及管旋转控制运动。图 11 为管内壁连续爆炸沉积示意图。随载料杆一起送入电爆喷射沉积枪中，当粉末到达两电极之间后，脉冲大电流通过气体放电的形式导入沉积材料中，使其发生爆炸，爆炸产物在冲击波的作用下

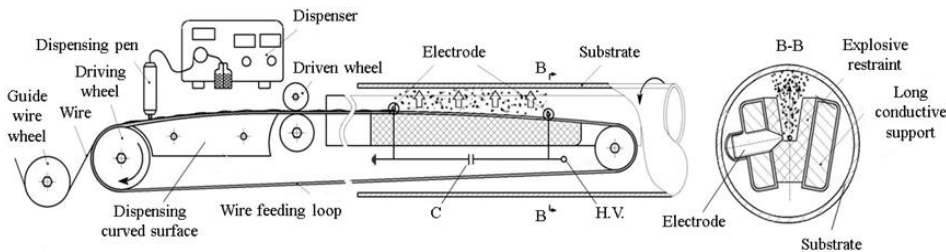


图 8 管内壁连续送丝电爆喷涂设备结构图

Fig.8 Structure diagram of electric explosion spraying equipment by continuous wire feeder in inner wall of pipe^[30,31]

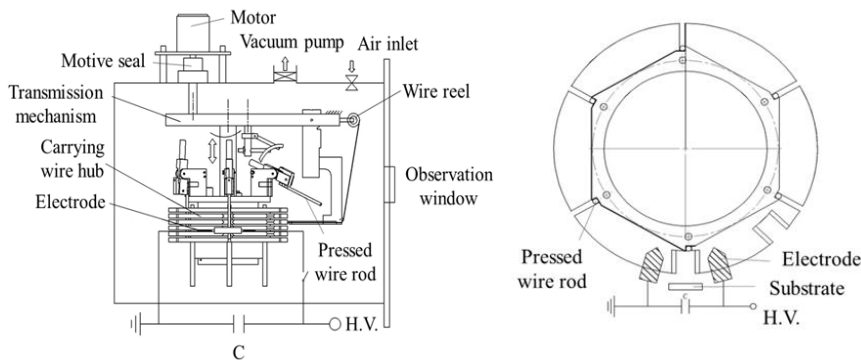


图 9 保护气氛中丝电爆喷射沉积装置

Fig.9 Wire exploding spray deposition device in protective atmosphere^[32]

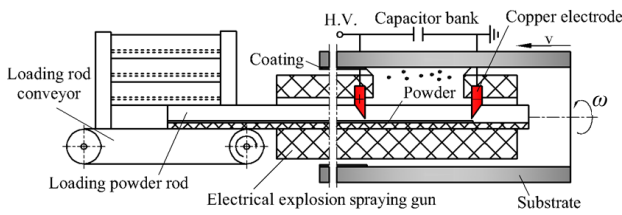


图 10 管内壁连续喷涂原理

Fig.10 Principle of continuous electric explosion spraying on inner wall of pipe^[34]

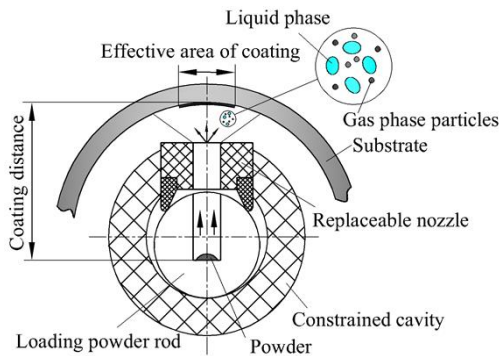


图 11 管内壁连续爆炸沉积示意图

Fig.11 Schematic diagram of continuous explosive deposition on inner wall of pipe^[34]

高速喷射到管内壁表面，形成沉积层。管状工件在控制器的精准控制下，实现轴向及周向运动，完成沉积层的搭接。

2 喷涂层特性及工艺过程

2.1 喷涂层特性

电爆喷涂方法使用的喷涂材料相对于其它喷涂方法而言，具有多样性的特点，通常有金属丝、导电的非金属丝、金属箔及粉末。最常用的是金属丝，尤其是高熔点金属丝，这是由于该方法能在很短的时间内使高熔点金属熔化，并快速喷射到基体表面形成涂层。近年来，电爆喷涂金属箔及粉末也得到了快速发展^[36]。电爆喷涂技术可以实现高熔点难熔金属（例如钨和钼等）、陶瓷材料及多种金属复合喷涂，同时因电爆喷涂过程时间短，可实现在玻璃、塑料等材料表面喷涂^[30]。如表 1 所示为采用不同电爆喷涂方法在不同的基体上制备的各种材料的典型涂层及其性能。

根据研究者的研究结果，电爆喷涂制备的涂层有如下特性。从结合界面来看，在电爆喷涂过程中，喷涂粒子

不仅以极高的速度撞击基体表面，发生强烈的机械咬合，还在咬合过程中以很高的热能与基体发生相互熔合，也就是与基体形成“抛锚结合”的同时，还出现互熔现象^[37-56]。例如，图 12 以不锈钢为基体，在其表面电爆 Mo 丝涂层，其横截面及 EDS 分析表明基体和涂层既形成了抛锚结合，又出现了界面间的元素互扩散，为典型的冶金结合界面^[16]。

从微观结构来看，电爆喷涂粒子在冲击波的作用下以极高的速度与基体发生碰撞，撞击后在基体表面迅速冷凝，涂层形成超细晶、纳米晶结构，且其孔隙率低、致密度高，具有良好的自润滑性^[57-59]。例如，图 13 是在 45# 钢基体表面电爆钼丝获得的涂层的表面形貌及横截面照片，可以看到，涂层致密度高，孔隙率低^[60]。

从涂层性能来看，电爆喷涂方法制备的涂层具有超细晶、纳米晶的微观结构，使其具有良好的耐磨、抗腐蚀性以及较高的硬度。Romanov^[45]在 5CrNiMo 模具钢表面电爆炸喷涂 TiC-Ti-Al 或 TiB₂-Ti-Al 涂层，使其 5CrNiMo 模具钢耐磨性提高 5 倍以上。德国学者 H. Grabatin 等^[61]在直径为 20 mm 的火箭发动机喷口内壁喷涂耐高温腐蚀材料钽和铌，其钽涂层表现出更优异的耐高温腐蚀性能。E. A. Budovskikh 等^[62]利用电爆技术制备了 Mo-Cu 复合涂层，发现该涂层具有良好的抗电化学腐蚀性能。E. G. Grigoryev 等^[42]利用电热接触爆炸技术制备了 nano-W-WC 硬化涂层，获得的涂层厚度约为 17 μm，碳化钨层的显微硬度很高。Padgurskas 等^[63]利用该方法在管状试样内沉积了铜合金，获得的涂层具有良好的自润滑性。O. Demokan^[64]以铝为沉积材料，将其喷涂在钽管内壁，发现单次沉积能获得 8 μm 的均匀涂层，且其与基体结合良好。E. N. Goncharova 等^[65,66]在 Hardox-450 钢表层电爆喷涂 TiB₂-Ni 和 TiC-Ni 复合涂层，并用电子束处理其涂层，发现在熔融条件下对电爆炸涂层进行电子束处理可形成均匀（结构和浓度）的表面层。Klopotov 等^[67]发现利用电爆法制备的涂层具有良好的磨粒磨损性能和较高的硬度。还有学者用电爆合金化提高钛合金的耐磨性和耐热性^[68,69]。

在国内，华北电力大学使用自主设计的定向喷涂装置，电爆金属粉芯丝或箔，制备了 WC-Co、ZrO₂-Ni 陶瓷与金属组成的复合涂层，用于制造耐高温磨损热电偶保护管、耐高温磨损模具等^[14]。机械科学研究总院制备了抗烧蚀磨损涂层，验证了用于提高火炮身管寿命的可行性^[41]；哈尔滨工程大学对 WC/Co 金属陶瓷涂层和 3Cr13 不锈钢涂层的耐磨性进行了研究，发现定向电爆涂层因其细晶强化效应、充分的冶金结合以及“硬质耐磨相+软质基体相”特征决定了其具有优良的耐磨性能^[70]。Hou 等^[39]采用电热爆炸超高速喷涂技术，在 Ni 基

表 1 不同基体上各种涂层的特性

Table 1 Characteristics of various coatings on different substrates

Coating	Spraying materials	Substrate	Method	Coating features	Ref.
FeAl-based coating	FeAl, FeCrAl and FeCrAlRE foil	AISI 1045 steel	EEFS	The coating has nanostructure and microstructure. The high temperature corrosion-resistance capability of FeCrAlRE is 2.20 times as much as that of FeCrAl in average, and 3.83 times as much as that of FeAl.	[37]
TiC-10Ni coating	Ti-Ni-C cored foils	Copper	EEDS	The coating consists of TiC and the solid solution of Ni, as well as the residual C. TiC-10Ni coating has no pores and cracks, and its structure is compact.	[38]
NiAl-TiB ₂ coating	Boron powders, Ni, Al or Ti foil	Ni-based superalloy	EEDS	The coatings consist of submicron grains. The average micro-hardness of NiAl-TiB ₂ composite coatings with 0%, 10wt% and 20wt% TiB ₂ are 5620, 9940 and 105 70 MPa, respectively.	[39]
Fe79Si10B11 coating	Amorphous Fe79Si10B11 ribbons foil	Al thin plate	EEDS	The coating consists of the amorphous matrix and nano-crystal phases (α -Fe), no laminar phenomenon is observed. The average hardness of coatings is 8 times larger than that of the Al substrate.	[40]
7Cr13+B and FeCrBSi coating	7Cr13+B and FeCrBSi wire	Artillery barrel	EEDS	The surface roughness of the coating prepared by EEDS is higher than that of the chrome coating, and the hardness, binding force, wear resistance and ablation resistance are better than those of the chrome coating, with fewer defects and more dense coating.	[41]
Nano-W-WC coating	WC-Co electrode wire	High-speed steel	EEFS	The hardening layers of tungsten carbide and pure nano-crystalline tungsten have been formed upon the surface of high-speed steel as a result of electric exploding. Crystalline grains of tungsten have an almost spherical form and their characteristic size less than 400 nm.	[42]
ZnO-Ag coating	Ag foil	Copper electrical contacts	EEFS	The wear resistance of the coating is improved by about 1.3 times that of annealed copper, and the micro-hardness is about 3.8 times of annealed copper. This coating increases the service life of copper electrical contacts by 2 times.	[43]
Ta10W and Ni60A coating	Ta10W and Ni60A wire	304 stainless steel plates	EECS	When the energy density increases from 22.4 J/mm ³ to 151.6 J/mm ³ , the deposition efficiency increases first and then decreases. The maximum deposition efficiency of Ta10W and Ni60A are 53% and 47%, respectively.	[44]
TiC-Ti-Al and TiB ₂ -Ti-Al coating	TiC and TiB ₂ powder	5CrNiMo die steel	EEDS	The wear resistance of 5CrNiMo die steel is increased more than 5 times. The coating has good comprehensive properties.	[45]
The composite coatings of the Ag-W system	Ag foil and W powder	Cu substrate (KPV-604 contacts)	EEDS	The average micro-hardness of the coating is 3.8 times that of the copper substrate. The average roughness value of the coating is greater than the average roughness values of the substrate and the layer with the altered state by 50.015 nm and 22.849 nm, respectively.	[46]
Ti-Zr coating	Zr foil	The titanium dental implant surface (alloy VT6)	EEDS	The Ti-Zr coating is accompanied by a slight (18%) decrease in the wear parameter (increase in the wear resistance) of the surface layer, a 1.5-fold increase in the friction coefficient, a slight (3%) increase in hardness, and a decrease in Young's modulus by 14%.	[47]
Ti-B coating	Ti foil and B powder	Stainless steel Cr ₁₈ Ni ₁₀ Ti	EEDS	The surface layer of steel formed by electric explosion alloying has a multiphase submicron crystal structure, and its hardness can be increased by 18 times compared with that before electric explosion alloying.	[48]
Y ₂ O ₃ coating	Y ₂ O ₃ powder	Hypoeutectic silumin AK10M2N	EEDS	The multiple increase in the wear resistance of the modified layer caused by the formation of multi-phase submicro-nanodimensional state has been revealed.	[49]
The coatings of the CdO-Ag system	Ag foil and CdO powder	The copper contacts of contactor KPV-604	EEDS	The sub microcrystalline structure of the coating indicates that the high-speed crystallization and dynamic recrystallization have taken place. The formation of nano phase has dispersion hardening effect on copper near the coating.	[50]
Ti-Nb coating	Nb foil	A dental implant made of VT6 titanium alloy	EEDS	The wear resistance of the coating is improved, the friction coefficient is increased by 1.5 times, and the hardness (1.5 times) and Young's modulus (1.3 times) are significantly increased.	[51]
CuO-Ag coating	Ag foil	Cu substrate (KPV-604 contacts)	EEFS	The formed coating is a homogeneous composite material consisting of a silver matrix and CuO inclusions located in it. The corrosion resistance of copper electrical contact of KPV-604 contactor increases.	[52]
TiB ₂ -Cu, W-Cu and Mo-Cu coatings	TiB ₂ , W and Mo powder	Cu substrate	EEDS	The structure of all copper-base composite coatings is dispersely strengthened one. The least thermal effect on the substrate is in formation of Cu-Mo coating while the maximum one-in the formation of Cu-W coating.	[53]
Ti coating	Ti foil	VK ₁₀ KS hard alloy	EEDS	The surface of the VK ₁₀ KS hard alloy is hardened to 25 GPa. Intense hardening is inherent in alloys after electro-explosive alloying with titanium due to the formation of TiC and (Ti, W)C carbides in the surface layer.	[54]
Mo-Cu and W-Cu coatings	Mo and W powder	Cu substrate	EEDS	Molybdenum and tungsten nano-inclusions are generated in Mo-Cu and W-Cu coatings. The wear resistance of the coating increases with the decrease of the wear coefficient.	[55]
TiC-Mo, TiC-Ni, TiB-Mo, TiB-Ni coatings	TiC and TiB powder	Hardox 450 steel	EEDS	The coatings have excellent operational properties: nano- and micro-hardness, elastic modulus of the first kind, and wear resistance in dry slipping friction.	[56]

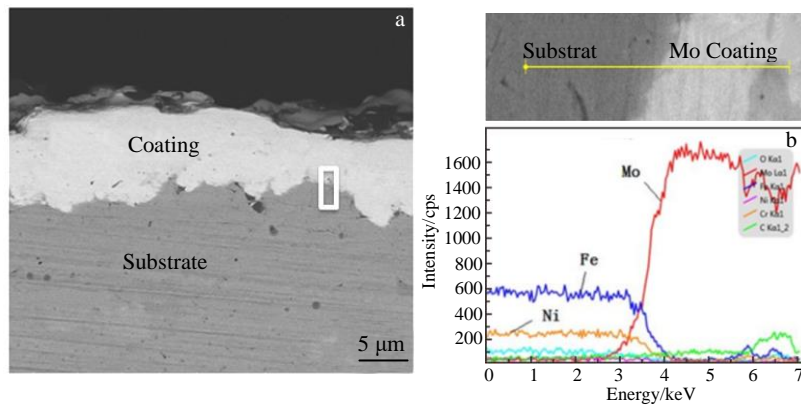


图 12 涂层截面形貌及 EDS 分析

Fig.12 Cross section morphology (a) and EDS analysis of coating (b)^[16]

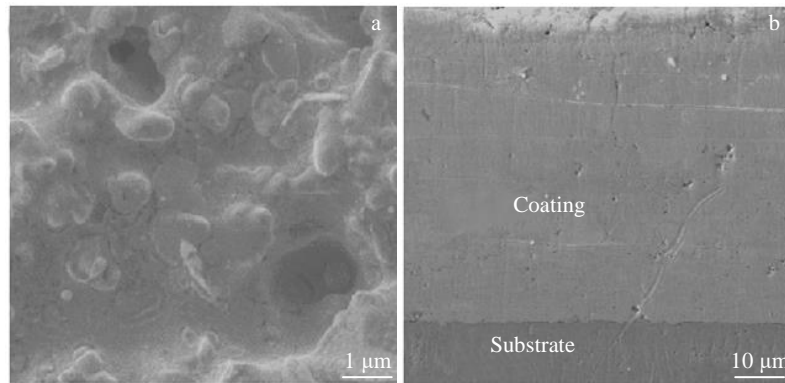


图 13 涂层表面形貌及横截面照片

Fig.13 SEM images of surface morphology (a) and cross section (b) of coating^[60]

高温合金基体上制备了 TiB_2 质量分数分别为 0%、10% 和 20% 的 $NiAl-TiB_2$ 复合涂层, 发现 $NiAl$ 涂层中 TiB_2 的加入使 $NiAl$ 的硬度增加, 抗氧化性降低。Liu 等^[71] 研究了 $TiC-xNi$ 涂层在镍基合金上的腐蚀行为和晶粒磨损性能, 发现其性能从 80% 增至 95%。

从应用领域来看, 电爆喷涂技术应用在切削和冲压金属加工工具(钻头、刀具、冲头、模具等)的硬化、铜电触点的表面保护、汽车汽缸内壁的耐磨涂层、传感器上的非晶薄膜等绝缘材料表面的导电涂层以及要求耐高温高压的工件内表面等各个方面^[72]。D. A. Romanov 等^[45] 首次在 CJ20 电磁启动器的电触头表面采用电爆方法制备了 $ZnO-Ag$ 系耐电蚀涂层, 电爆喷涂后, 改性层的耐磨性比退火铜提高了约 1.3 倍, 涂层的显微硬度约为退火铜的 3.8 倍, 使铜电触点的使用寿命增加了 2 倍。他们团队^[73,74] 还在 KPV-605 接触器的铜触点表面用电爆炸法制备了 SnO_2-Ag 系耐电蚀涂层, 其耐磨性提高。E. V. Protopopov 等^[75] 提出了电爆法制备的 $W-Cu$, $Mo-Cu$,

$W-C-Cu$, $Mo-C-Cu$, $Ti-B-Cu$, TiB_2-Cu 复合涂层在电触点打开时的电火花烧蚀破坏的数学模型。Snitka 等^[76,77] 将 Zn 丝置于氧气中电爆, 在玻璃、石英及单晶硅基体表面制备 ZnO 纳米发光涂层, 通过减小喷涂距离或多次累加喷涂的方式提高涂层致密度, 认为利用电爆喷涂技术制备发光材料涂层、量子点是一种行之有效的方法。文献[30]首先将喷涂材料制作成合金丝材, 再利用电爆喷涂的方法电爆金属丝制备出了非晶涂层。

国内 Wang 等^[40] 采用高速电热爆炸喷涂法在铝薄板上制备了厚度可控的铁基非晶复合涂层, 涂层的平均硬度是铝基体的 8 倍, 铝薄板上的铁基复合涂层作为航空工业中有前途的轻质耐磨结构材料, 具有巨大的应用潜力。Jiang 等^[41] 利用该技术制备了 $7Cr13+B$ 涂层和 $FeCrBSi$ 涂层, 发现用电爆炸喷涂技术制成的涂层的表面粗糙度高于铬涂层, 且硬度、结合力、耐磨性及抗烧蚀性方面均优于铬涂层, 缺陷较少, 涂层更为致密。所以在未来延长火炮筒耐烧蚀寿命的研究中, 利用电爆技

术制备高质量涂层是一种有效的方法。马忠云等^[78]针对锅炉服役过程中容易受损的零件，使用电爆喷涂的方法作了耐磨处理，取得了很好的效果。钽和铌具有很好的耐腐蚀性和耐高温高压性能，但钽和铌都是高熔点金属，使用常规喷涂方法在火箭高压喷射嘴内腔很难得到完全熔融后结合在基体上的涂层，而使用电爆喷涂的方法成功获得了钽和铌涂层^[61]，增强了高压喷射嘴内腔耐高温高压的性能，提高了喷嘴的寿命。

2.2 工艺过程与涂层的关系

随着对电爆过程中的影响因素及其原理的深入研究，发现其工艺参数对涂层质量有较大影响。其中，能量密度和喷涂距离是其主要因素。

能量密度决定着产物的冲击速度、形态及温度，从而影响涂层的性能^[79]。随着能量密度的增加，其产物中液相粒子减少，气相粒子增多^[80]，当能量密度为气化能的 2~3 倍时，其液相成分的比例约为 5%~10%^[81]。并且随着它的增大，依次可获得液相堆积层，与基体结合紧密的液相喷涂层和表面平整喷涂层^[82]，涂层中孔隙率明显减小，致密度升高^[83]。如在不锈钢管内电爆喷涂钼涂层，当能量密度小于 130 J/mm³ 时，得到液相堆积层，与基体结合强度低，不具应用价值；能量密度在 130~350 J/mm³ 时，转变为结合紧密的液相喷涂层；当能量密度大于 350 J/mm³ 时，可获得表面平整喷涂层，与基体结合强度高，且结合处发生元素相互扩散，涂层性质与能量密度的关系如图 14 所示^[84]。

当喷涂距离在一定范围内时，颗粒以熔融状态形成液相沉积层，该涂层致密度高，结合强度好；随喷涂距离的增大，其涂层中出现固相颗粒，这种涂层致密度下降，结合强度低^[4,80,84]。研究者以钼丝为喷涂材料进行电爆试验，图 15 为不同电压下，涂层结合强度与喷涂距离的关系，在初始充电电压 12 kV 时，获得 HF-1~HF-3 级结合强度的涂层的最大喷涂距离只有 3 mm，初始充电

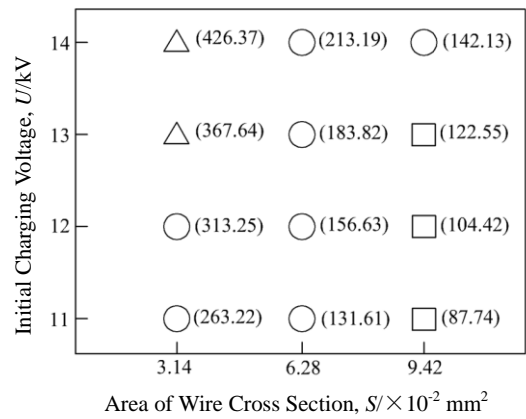


图 14 涂层性质与能量密度的关系

Fig.14 Correlation between coating properties and energy density (□-liquid accumulation coating, ○-liquid spray coating, △-smooth surface spray coating; the number in brackets is the energy density, J mm^{-3})^[82]

电压 10 kV 时，该距离为 8 mm，到 8 kV 时增加到 12 mm。可看到，喷涂距离不超过某值时，可获得 HF-1~HF-3 级结合强度的涂层；随初始充电电压减小，获得该等级涂层的喷涂距离增大。在工程中，HF-1~HF-3 级的涂层被认为具有足够的结合强度^[60,85]。

粉末涂敷量和初始电压也会影响涂层的质量，它们是通过影响爆炸产物粒径大小分布来实现的。随着涂敷量的增加，其爆炸产物的粒径总体上增大；随着初始电压的升高，其爆炸产物粒径总体上先减小后增大^[86]，并且获得液相涂层和含有固相颗粒涂层的喷涂范围增大^[4,60]。还有学者发现当喷涂能量密度一定时，采用高电压小电容组合制备的 Mo 涂层性能相对较好^[87]。Wang^[88]利用有限元分析软件仿真分析了电爆炸定向喷射沉积冷凝温度场，表明在制备涂层的过程中，应尽量采用电爆喷涂设备

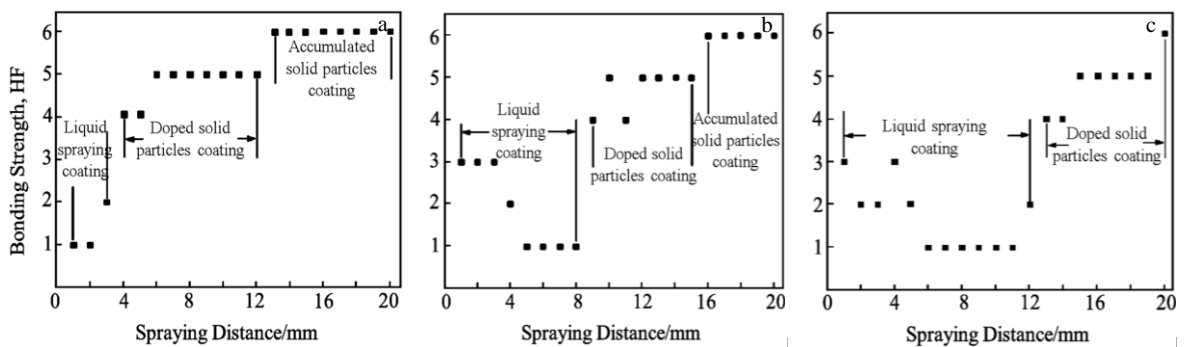


图 15 涂层结合强度与喷涂距离的关系

Fig.15 Correlation between coating bonding strength and spraying distance at different voltages: (a) 12 kV, (b) 10 kV, and (c) 8 kV^[60,85]

的峰值电压, 其电路的自感应尽可能低。

3 结语及展望

电爆喷涂方法是一种新兴的热喷涂技术, 其发展经历了自由、定向和约束喷涂, 自由喷涂的电极直接接触, 烧损严重, 并对管径有限制, 仅用于小直径管/孔内壁; 定向喷涂的约束腔常用陶瓷材料, 在爆炸冲击时易破裂或烧蚀; 约束电爆喷涂采用消融材料制作约束腔, 气体放电导入电流, 解决了前 2 种方法的不足, 是该领域研究的重要进展, 推进了电爆喷涂方法在工程中的应用。其自动化、高效率的电爆喷涂装置是实现该方法价值的重要途径, 从目前的研究来看, 其喷涂效率无法满足实际生产要求, 开发出可以电爆丝材、箔材及粉材一体化且能够产业化生产的设备是急需解决的问题。

利用电爆喷涂方法制备的涂层, 具有独特的优点, 如涂层与基体呈冶金结合, 结合强度高, 并且涂层形成超细晶、纳米晶结构, 且其孔隙率低、致密度高, 具有良好的自润滑性。电爆喷涂技术可以实现高熔点难熔金属、陶瓷材料及多种金属复合喷涂, 赋予基体耐磨、耐腐蚀等特殊性能, 应用在切削和冲压金属加工工具(钻头、刀具、冲头、模具等)的硬化、铜电触点的表面保护、汽车汽缸内壁的耐磨涂层、传感器上的非晶薄膜等绝缘材料表面的导电涂层以及要求耐高温高压的工件内表面, 并且在未来延长火炮筒耐烧蚀寿命以及在航空工业中制备轻质耐磨的铁基非晶复合涂层方面, 具有巨大的应用潜力。

随着对电爆过程中的影响因素及其原理的深入研究, 发现其工艺参数对涂层质量有较大影响, 能量密度和喷涂距离是其主要因素。随着能量密度的增大, 依次可获得液相堆积层, 与基体结合紧密的液相喷涂层和表面平整喷涂层, 涂层中孔隙率明显减小, 致密度升高。当喷涂距离在一定范围内时, 颗粒以熔融状态形成液相沉积层, 该涂层致密度高, 结合强度高。尽管如此, 工艺参数对沉积层及电爆过程的影响的研究还不够系统, 并且喷涂过程中的热力学与动力学系统的研究还不完善, 比如沉积过程中的临界能、沉积速率及物相转变的限度等。进一步提高电爆喷涂装置的产业化水平, 发掘更多的潜在应用, 将使电爆喷涂技术在材料表面改性方面具有广阔的应用前景。

参考文献 References

[1] Zhu Liang(朱亮), Zhang Zhouwu(张周伍). *Materials Reports(材料导报)*[J], 2005, 19(12): 76
 [2] Zhu Liang(朱亮), Zhang Youguo(张有国), Bi Xuesong(毕学松). *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2012,

33(2): 77

- [3] Li Jun(李君). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Changchun: Jilin University, 2015
 [4] Zhu Liang(朱亮), Zhang Pengfei(张鹏飞), Qiao Hetao(乔河涛) *et al. High Voltage Engineering(高压电技术)*[J], 2012, 38(5): 1039
 [5] Sidky P S, Hocking M G. *British Corrosion Journal*[J], 1999, 34(3): 171
 [6] Takaki K, Mikami Y, Itagaki M *et al. IEEE International Pulsed Power Conference*[C]. Dallas, TX, USA: IEEE, 2003: 1021
 [7] Armelle Vardelle, Christian Moreau, Themelis Nickolas J *et al. Plasma Chemistry and Plasma Processing*[J], 2015, 35(3): 491
 [8] Qian Qiang(钱强), Yu Shaohua(俞韶华), Xu Lingang(徐林刚). *Welding Technology(焊接技术)*[J], 2001, 30(2): 6
 [9] Jiang Xiaolin, Wang Yanni, Lu Xin. *Advanced Materials Research*[J], 2012, 1493(858): 19
 [10] Wei Shicheng(魏世丞), Xu Binshi(徐滨士), Wang Haidou(王海斗) *et al. China Surface Engineering(中国表面工程)*[J], 2006, 19(S1): 146
 [11] Wei Shicheng(魏世丞), Xu Binshi(徐滨士), Wang Haidou(王海斗) *et al. Heat Treatment of Metals(金属热处理)*[J], 2006, 31(1): 53
 [12] Pu Zelin(蒲泽林), Liu Zongde(刘宗德), Lu Xin(陆辛) *et al. Heat Treatment of Metals(金属热处理)*[J], 2004, 29(10): 36
 [13] Yang Jiazhi(杨家志), Liu Zhongyang(刘钟阳), Xu Dongwei(许东卫). *High Voltage Engineering(高压电技术)*[J], 2007, 33(2): 199
 [14] Liu Zongde(刘宗德), Yang Kun(杨昆), Duan Peng(段鹏) *et al. Explosion and Shock Waves(爆炸与冲击)*[J], 2003, 23(2): 116
 [15] Qiu Fuxing(邱复兴), Gao Yang(高阳). *Internal Combustion Engine Part(内燃机配件)*[J], 2003(1): 7
 [16] Han Feng(韩峰). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019
 [17] Demokan O. *Transactions on Plasma Science*[J], 2000, 28(5): 1720
 [18] Yang Qi(杨奇). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009
 [19] Zhu Jin(朱锦). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010
 [20] Hou S X, Liu Z D, Zhao L P *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2008, 202(13): 2917
 [21] Liu Jingjing, Liu Zongde. *Materials Letters*[J], 2010, 64(6): 684
 [22] Zhang Youguo(张有国). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011
 [23] Qiao Hetao(乔河涛). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012
 [24] Zhang Pengfei(张鹏飞). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012
 [25] Zhu Liang(朱亮), Zhang Pengfei(张鹏飞), Bi Xuesong(毕学松)

- et al. China Patent*, CN102628152A[P], 2012
- [26] Shi Maohu(石茂虎). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013
- [27] Zhu Liang(朱亮), Shi Maohu(石茂虎), Zhang Pengfei(张鹏飞). *China Patent*, CN103305785A[P], 2013
- [28] Zhao Jinfeng(赵进峰). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013
- [29] Zhu Liang(朱亮), Zhao Jinfeng(赵进峰). *China Patent*: CN102864433A[P], 2013
- [30] Fan Yifei(范一飞). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015
- [31] Zhu Liang(朱亮), Han Feng(韩峰), Zhang Aihua(张爱华) *et al. China Patent*, CN104404439A[P], 2015
- [32] Bai Xuehu(白雪虎). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019
- [33] Fan Honglin(范宏林). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017
- [34] Ma Li(马丽). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018
- [35] Zhu Liang(朱亮), Han Feng(韩峰), Fan Honglin(范宏林). *China Patent*, 201510648009.8[P], 2015
- [36] Yang Jiazhi(杨家志), Liu Zhongyang(刘钟阳). *Materials Reports*(材料导报)[J], 2008, 22(2): 82
- [37] Wang Haidou, Wei Shicheng, Xu Binshi *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2007, 201(9-11): 5294
- [38] Liu Jingjing, Liu Zongde. *Advanced Materials Research*[J], 2014, 2864(1684): 326
- [39] Hou Shixiang, Liu Zongde, Liu Dongyu. *Surface & Coatings Technology*[J], 2011, 205(19): 4562
- [40] Wang Yongtian, Hu Weiqiang, Liu Zongde. *Materials Science Forum*[J], 2011, 688: 389
- [41] Jiang Xiaolin, Wang Yanni, Lu Xin. *Advanced Materials Research*[J], 2012, 1493(858): 19
- [42] Grigoryev E G, Smirnov K L, Strizhakov E L *et al. Journal of Physics Conference Series*[J], 2019, 1393: 012 084
- [43] Denis Romanov, Stanislav Moskovskii, Sergey Kononov *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(6): 5515
- [44] Han Feng, Zhu Liang, Liu Zonghan *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2019, 374: 44
- [45] Romanov D A. *Materials Research Express*[J], 2020, 7(4): 045 010
- [46] Romanov D A, Moskovskii S V, Gromov V E *et al. IOP Conference Series*[J], 2018, 206(1): 012 030
- [47] Romanov D A, Sosnin K V, Gromov V E *et al. Materials Letters*[J], 2019, 242: 79
- [48] Ivanov Yu F, Petrikova E A. *IOP Conference Series*[J], 2020, 866(1): 012 052
- [49] Ivanov Yurii, Gromov Victor, Zaguliaev Dmitrii *et al. Materials Letters*[J], 2019, 253: 55
- [50] Romanov D A, Martusevich E A, Moskovskii S V. *Metalurgija*[J], 2018, 57(4): 299
- [51] Romanov Denis A, Sosnin Kirill V, Ivanov Yurii F. *Materials Science Forum*[J], 2020, 5940: 33
- [52] Romanov D A, Moskovskii S V, Sosnin K V *et al. Materials Research Express*[J], 2019, 6(5): 055 042
- [53] Romanov D A, Gromov V E, Glezer A M *et al. Materials Letters*[J], 2017, 188: 25
- [54] Oskolkova T N, Budovskikh E A, Goryushkin V F. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*[J], 2014, 55(2): 196
- [55] Romanov D A, Olesyuk O V, Budovskikh E A *et al. Journal of Surface Investigation*[J], 2015, 9(4): 699
- [56] Romanov D A, Protopopov E V. *Steel in Translation*[J], 2017, 47(12): 782
- [57] Albinas Andriusis, Valentinas Snitka, Juozas Padgurskas *et al. Wear*[J], 2006, 260(6): 652
- [58] Yang Jiazhi, Liu Zhongyang, Xu Dongwei *et al. Key Engineering Materials*[J], 2008, 27(747): 367
- [59] Zheng Hejing(郑合静). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [60] 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
- [61] Grabatin H, Schlett V, Stuke H *et al. Journal of Vacuum Science & Technology*[J], 1985, 3(6): 2545
- [62] Budovskikh E A, Gromov V E, Romanov D A. *Journal of Surface Investigation*[J], 2011, 5(6): 1112
- [63] Snitka Valentinas, Padgurskas Juozas, Jankauskas Vytenis *et al. Wear*[J], 2006, 260(6): 652
- [64] Demokan O. *IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2000, 28(5): 1720
- [65] Romanov D A, Goncharova E N, Teresov A D *et al. Inorganic Materials*[J], 2015, 6(5): 536
- [66] Romanov D A, Goncharova E N, Budovskikh E A *et al. Russian Metallurgy*[J], 2016, 11: 1064
- [67] Klopotov Anatolii A, Ivanov Yu F, Petrikova E A *et al. Materials Science Forum*[J], 2017, 4585(1812): 56
- [68] Panin V E, Gromov V E, Romanov D A *et al. Doklady Physics*[J], 2017, 62(2): 67
- [69] Raikov S V, Sosnin K V, Ivanov Yu F *et al. Russian Physics Journal*[J], 2014, 57(2): 252
- [70] Jin Guo(金国). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin:

- Harbin Engineering University, 2006
- [71] Liu Zongde, Li Bin, Wang Zhangqi *et al. Advanced Materials Research*[J], 2008, 29(70): 489
- [72] Budovskikh E A, Bashchenko L P. *IOP Conference Series*[J], 2020, 866(1): 012 037
- [73] Romanov D A, Olesyuk O V, Budovskikh E A *et al. Russian Metallurgy*[J], 2015, 10: 1134
- [74] Romanov D A, Moskovskii S V, Sosnin K V *et al. Journal of Physics Conference Series*[J], 2018, 1115: 032 079
- [75] Romanov D A, Protopopov E V. *Steel in Translation*[J], 2018, 48(2): 93
- [76] Snitka Valentinas, Zunda Andrius, Jankauskas Vytenis. *Materials Letters*[J], 2007, 61(8-9): 1763
- [77] Zunda Audrius, Mizariene Vida, Snitka Valentinas *et al. Physica status solidi*[J], 2007, 244(5): 1504
- [78] Ma Zhongyun(马忠云), Liu Zongde(刘宗德), Xu Liang(徐亮) *et al. Energy Conservation Technology*(节能技术)[J], 2005, 23(5): 405
- [79] Zhu Liang(朱亮), Zhao Jinfeng(赵进峰). *Journal of Lanzhou University of Technology*(兰州理工大学学报)[J], 2013, 39(6): 1
- [80] Zhu Liang(朱亮), Yang Qi(杨奇), Bi Xuesong(毕学松) *et al. High Voltage Engineering*(高压电技术)[J], 2009, 35(9): 2232
- [81] Zhu Liang(朱亮), Zhu Jin(朱锦), Bi Xuesong(毕学松). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2010, 23(4): 65
- [82] Zhu Liang(朱亮), Zhao Jinfeng(赵进峰), Shi Maohu(石茂虎). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2014, 35(6): 65
- [83] Bai Xuehu(白雪虎), Zhu Liang(朱亮), Han Feng(韩峰) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2020, 45(3): 158
- [84] Zhu Liang(朱亮), Shi Maohu(石茂虎), Wang Yong(王永). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(4): 968
- [85] Zhu Liang(朱亮), Zhang Youguo(张有国), Bi Xuesong(毕学松). *Journal of Lanzhou University of Technology*(兰州理工大学学报)[J], 2011, 37(6): 5
- [86] Fan Honglin(范宏林), Zhu Liang(朱亮), Han Feng(韩峰). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2018, 47(20): 144
- [87] Du Xinwu(杜新武), Song Qiuzhi(宋迺志), Wang Jianzhong(王建中) *et al. Transactions of Beijing Institute of Technology*(北京理工大学学报)[J], 2010, 30(6): 639
- [88] Wang Yanni, Jiang Xiaonin, Yang Ping. *Advanced Materials Research*[J], 2012, 1493(858): 72

Research Progress of Electrical Explosion Spraying Method

Yan Weiliang¹, Wang Xudong¹, Zhou Hui^{1,2}, Zhu Liang^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Electrical explosion spraying is a new method of thermal spraying, which uses high voltage to pulse discharge on the spraying material, and the instantaneous high current heats and explodes it. High temperature particles are produced and sprayed to the surface of substrate with shock wave to form coating. It is characterized by high particle velocity and small equipment size, which is suitable for spraying on the inner wall of the cavity. In this paper, the development status of electrical explosion spraying method is reviewed, which has experienced free, directional and constrained electric explosion spraying. The free spraying electrode is directly contacted, which causes serious burning damage and limits the pipe diameter. It is only used for the inner wall of small diameter pipe/hole. Ceramic materials are commonly used in the confinement chamber of directional spraying, which are easy to break or ablate during explosive impact. These problems can be solved by using ablation material to make the confinement cavity and introducing current into the gas discharge in constrained spraying. Secondly, the characteristics of the coating prepared by this method are described, that is, the coating is metallurgically bonded with the substrate. The compact coating with ultra-fine grain and nano-crystalline structure is formed, which has good wear resistance, corrosion resistance and high hardness. Then the relationship between the process parameters and the coating is given. The energy density and spraying distance are the main factors affecting the coating performance. Finally, the problems to be studied in the future are analyzed, and the development trend of electric explosive spraying method is prospected.

Key words: electrical explosion spray; spray forming; coating; metallurgical bonding; thermal spraying

Corresponding author: Zhu Liang, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: zhul@lut.cn