

# 高稳定性电弧喷涂刚性送丝机的设计

解芳<sup>1</sup>, 赵朋辉<sup>1</sup>, 翟长生<sup>2</sup>, 周先辉<sup>1</sup>, 蔡广宇<sup>1</sup>

(1. 南阳理工学院, 河南 南阳 473004; 2. 河南汉工机械再制造技术有限公司, 河南 南阳 473000)

**摘要:** **目的** 解决传统电弧喷涂送丝机的局限性, 特别是柔性送丝结构存在的送丝速率低、送丝波动大等问题。**方法** 设计了刚性送丝结构, 进而成功研制了高稳定性电弧喷涂刚性送丝机, 并通过送丝速率测试、喷涂电流测试及喷涂焰流观察等对比性试验, 验证了设计的有效性和可行性。**结果** 在无喷涂状态下, 传统柔性送丝机和文中研制的刚性送丝机的送丝速率均随送丝电压的增大而增大, 且刚性送丝速率呈近似线性变化趋势, 而柔性送丝速率具有一定随机性。在相同送丝电压下, 刚性送丝的速率高于柔性送丝, 即具有更小的送丝阻力; 且刚性送丝机两侧丝材送进平均速率的同步误差均小于 3%, 而柔性送丝机的同步误差为 5% 左右, 说明刚性送丝机具有较好的送丝同步性。同时, 柔性送丝机的送丝速率波动率为 10% 左右, 而刚性送丝机的仅为 2% 左右, 说明刚性送丝机在无喷涂状态下具有优异的送丝稳定性。在喷涂状态下, 刚性送丝机和柔性送丝机的喷涂电流波动率分别为 4.76% 和 29.36%, 且刚性送丝机的喷涂焰流比柔性送丝机的更加集中稳定, 说明刚性送丝机在喷涂状态下也能保持良好的送丝稳定性。**结论** 刚性送丝结构可以有效减小送丝机的送丝阻力并保证两侧丝材送进的同步性, 使送丝过程具有更高的稳定性。

**关键词:** 电弧喷涂送丝机; 柔性送丝; 刚性送丝; 送丝速率; 稳定性; 同步性

**中图分类号:** TG174.442; TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0206-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.028

## Design of High Stability Rigid Wire Feeder for Arc Spraying

XIE Fang<sup>1</sup>, ZHAO Peng-hui<sup>1</sup>, ZHAI Chang-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Xian-hui<sup>1</sup>, CAI Guang-yu<sup>1</sup>

(1. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;

2. Henan Hangong Machinery Remanufacturing Technology Co. Ltd, Nanyang 473000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve limitations of traditional arc spraying wire feeder, especially problems in flexible wire feeder including low wire feeding rate and great feeding fluctuation. A rigid wire feeding structure was designed, and a high stability arc spraying rigid wire feeder was developed successfully. Furthermore, effectiveness and feasibility of the design were verified by such comparative experiments as wire feeding rate test, spraying current test and spray flame flow observation. In the absence of spraying, the wire feeding rate of both traditional flexible wire feeder and the rigid wire feeder developed in this paper increased with the wire feeding voltage, and rigid wire feeding rate tended to increase linearly while flexible wire feeding

收稿日期: 2017-09-04; 修订日期: 2017-10-10

Received: 2017-09-04; Revised: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51605230); 河南省科技攻关项目 (172102210417); 河南省高等学校重点科研项目 (17B450003); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2016GGJS-148)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605230), Science and Technology Development Program of Henan Province (172102210417), Key Research Program of Higher Education Institutions of Henan Province (17B450003) and Training Program for University Young Key Teachers of Henan Province (2016GGJS-148)

作者简介: 解芳 (1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为摩擦学理论及其应用。

Biography: XIE Fang (1981—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: tribology theory and its application.

rate was of certain randomness. At the same wire feeding voltage, the rigid wire feeder exhibited higher feeding rate, i.e., smaller wire feeding resistance. Furthermore, synchronous errors of average wire feeding rate on both sides of the rigid wire feeder were less than 3% while that of the flexible wire feeder was nearly 5%, indicating that the rigid wire feeder had better wire synchronization. Meanwhile, fluctuation ratio of wire feeding rate of the flexible wire feeder was about 10% while that of rigid wire feeder was only about 2%, showing that the rigid wire feeder had excellent wire feeding stability in the absence of spraying. Under spraying condition, spraying current fluctuation ratio of the rigid wire feeder and flexible wire feeder was 4.76% and 29.36%, respectively. Spraying flame flow of the rigid wire feeder was more concentrated and stable than the flexible wire feeder, showing that the rigid wire feeder could maintain excellent wire feeding stability under spraying condition. Therefore, the rigid wire feeding structure can effectively reduce wire feeding resistance of wire feeder, and guarantee synchronization of wire feeding on both sides, and improve stability of the wire feeding process.

**KEY WORDS:** arc spraying wire feeder; flexible wire feeding; rigid wire feeding; wire feeding rate; stability; synchronization

电弧喷涂技术是一种常用的热喷涂方法，其工作原理是将两根成一定角度的金属丝材作为自熔性电极，利用丝材端部接触短路的瞬间引燃电弧，使丝材熔化，同时用高速压缩气流使熔化的金属熔滴雾化成为细小的微粒，并使其以很高的速率喷射到经过预处理的基体表面形成涂层<sup>[1-2]</sup>。由于电弧喷涂技术具有工艺灵活、高效率、低成本等优点，已广泛应用于石油石化、航空航天、汽车、工程机械等领域的零部件表面修复强化<sup>[3-6]</sup>及长效防腐<sup>[7-11]</sup>，成为再制造工程关键技术之一<sup>[12]</sup>。

电弧喷涂设备主要由专用喷涂电源、控制装置、电弧喷涂枪、送丝机以及空气压缩供给系统等组成<sup>[13]</sup>。其中，送丝机是电弧喷涂设备中的核心装置之一，其通常由电机、减速器、送丝轮、压紧机构、送丝盘、送丝管等部分组成。稳定的送丝特性是获得优质涂层的必要条件。然而，传统送丝机的送丝速率低，送丝速率波动大，导致喷涂过程中喷涂电流波动明显，喷涂熔滴雾化效果差，易于断弧，从而造成涂层结瘤、孔隙率大、致密性差、涂层与基体结合力低等问题，难以实现高品质涂层的制备。因而设计研制具有优良送丝稳定性的电弧喷涂送丝机已迫在眉睫。

目前，有部分学者对电弧喷涂送丝系统进行了研究<sup>[14-16]</sup>，他们大多采用软管送丝，通过送丝系统的自动控制来达到调节送丝速率和精度的目的。然而，电弧喷涂送丝机大多采用推式送丝的方式，送丝机与喷涂枪相隔数米远，在实际的电弧喷涂过程中，即使送丝机在自动控制系统作用下能保证丝材同步输出，但在输送过程中，由于送丝软管随机变形引起的阻力、喷嘴的阻力等原因将导致两丝材非同步输送至喷涂电弧区，进而严重影响喷涂层的质量<sup>[14]</sup>。已有研究表明送丝软管的弯曲程度是送丝阻力产生的主要原因<sup>[16]</sup>，其极大的送丝速率波动严重地影响喷涂过程的稳定性和喷涂质量的一致性。

基于此，本文根据送丝稳定性的要求，设计刚性

送丝结构，以取代传统推式送丝机中的软管送丝，从而研制新型电弧喷涂刚性送丝机，并通过对比性试验验证设计的有效性和可行性，以达到减小送丝阻力，提高送丝性能，从而获得优质涂层的目的。

1 技术要求

为了满足电弧喷涂技术的稳定性要求，对电弧喷涂刚性送丝机的技术参数要求如表 1 所示。

表 1 电弧喷涂刚性送丝机的技术参数  
Tab.1 Technical parameters of arc spraying rigid wire feeder

Parameter name	Parameter requirement
Voltage of electromotor	DC 24 V
Wire feeding rate	0.7 mm/min ~4 m/min
Wire feeding rate fluctuation	≤3%
Applicable wire diameter	φ0.8 ~3.0 mm, solid core, soft
Wire feeding method	Double wire symmetrically, rate synchronization error of double wire≤3%
Weight and size of wire plate	20 kg, φ300 mm× φ50 mm×103 mm
Outline size of wire feeder	460 mm×250 mm×280 mm
Overall weight of wire feeder	18 kg

2 电弧喷涂刚性送丝机的设计

2.1 刚性送丝结构的设计

目前，传统柔性送丝机均采用软管送丝结构，通常用聚四氟乙烯管、尼龙管、或钢丝绕成的螺旋管制成<sup>[16]</sup>。然而，送丝软管自身的随机变形会引起其内部丝材弯曲，从而导致送丝阻力的增大，此外，送丝软管自身的随机变形具有不确定性，将严重影响两侧丝材送进的同步性。为了解决以上问题，本文

设计刚性送丝结构, 其刚性送丝管由紫铜制作, 内径为 3.2 mm, 外径为 10 mm, 长度为 1500 mm×2, 送丝管表面包覆绝缘膜, 前端通过导电体连接装置与喷涂枪连接, 后端通过螺母与送丝机主机连接, 见图 1。

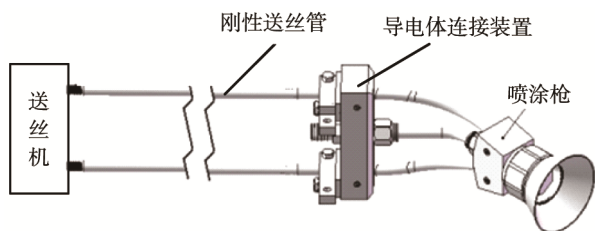


图 1 刚性送丝结构

Fig.1 Rigid wire feeding structure

与柔性送丝结构相比, 刚性送丝管具有较好的刚性, 避免了送丝软管随机变形引起丝材顺变而产生的变形阻力, 因而该刚性送丝结构较柔性送丝结构具有较小的送丝阻力, 且能保证两侧丝材同步送进。

## 2.2 总成设计

本文设计的电弧喷涂刚性送丝机总成的轴测图和主视图分别如图 2 所示, 其工作原理为: 送丝电机通过二级齿轮减速器将运动和动力传递给送丝机构中的主动齿轮, 主动齿轮通过与两侧从动齿轮的啮合传动, 将运动和动力传递给固连在从动齿轮上的送丝轮, 从而完成送丝。

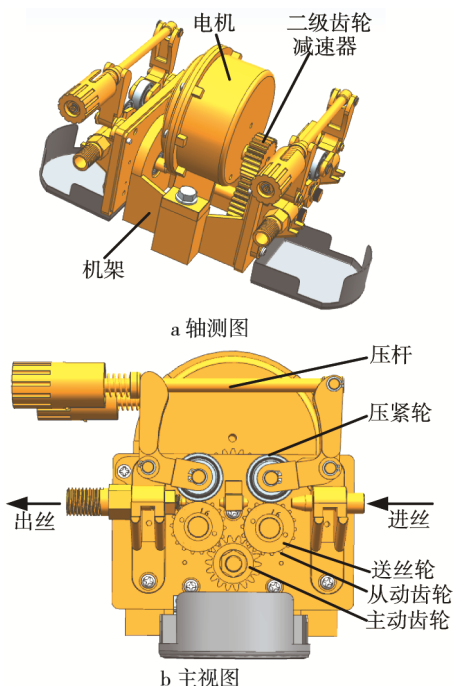


图 2 电弧喷涂刚性送丝机总成图

Fig.2 assembly drawing of arc spraying rigid wire feeder: (a) Axonometric view, (b) front view

由于送丝轮长期依靠静摩擦维持丝材的送进, 为了保证喷涂丝材稳定、均匀、同步的送进, 本文选用

梯形槽轮结构, 以 45#钢制成, 经过表面热处理后硬度可达 50~60HRC, 从而保证送丝轮的耐磨性。

为了使送丝轮具有足够大的摩擦力以保证丝材稳定送进, 本文采用压缩弹簧式压紧机构对其进行压紧, 如图 2b 所示。可通过压杆调节压紧力的大小, 使压紧轮压紧送丝轮, 以保证均匀稳定送丝。

送丝电机选用无刷直流电机, 其不仅具有传统直流电机良好的调速性能, 而且还具有结构简单、运行可靠、使用寿命长及噪声低等优点。本文设计的刚性送丝机与传统柔性送丝机均通过弧压反馈 PID 控制器对电弧喷涂过程进行反馈调节。

## 3 送丝特性的试验分析

为了验证本文设计的刚性送丝机具有优异的稳定性, 在河南汉工机械再制造技术有限公司对传统柔性送丝机和本文研制的刚性送丝机的送丝特性进行了对比性试验研究。

### 3.1 送丝速率及同步性

在无喷涂情况下, 选取不同的送丝电压  $U$ , 分别测量 5 个时间段内, 传统柔性送丝机和本文研制的刚性送丝机两侧丝材的送进长度, 进而分别求得 5 组送丝速率  $v$ , 并求得各自平均送丝速率, 如表 2 所示。由表可知: 当送丝电压相同时, 本文研制的刚性送丝机两侧丝材的平均送进速率均高于传统柔性送丝机。由于相同工况条件下, 送丝阻力与平均送丝速率成反比, 因此本文研制的刚性送丝机两侧丝材的送进阻力均小于传统柔性送丝机。此外, 传统柔性送丝机两侧丝材送进平均速率的差值较大, 同步误差为 5% 左右; 而刚性送丝机两侧丝材送进平均速率的差值较小, 同步误差均小于 3%, 符合设计要求, 具有较好的送丝同步性。

由表 2 数据可得送丝速率随送丝电压的变化曲线, 如图 3 所示。由图可知: 无论传统的柔性送丝机, 还是本文研制的刚性送丝机, 其电弧喷涂的送丝速率均随送丝电压的增大而增大, 且刚性送丝速率呈近似线性变化趋势, 而柔性送丝速率具有一定随机性。这说明刚性送丝的送丝阻力近似为定值, 而柔性送丝的送丝阻力与送丝软管的随机变形有关。

### 3.2 送丝波动性

送丝波动性是衡量送丝过程是否平稳的重要指标, 是影响电弧喷涂层质量的关键因素之一, 可由送丝速率波动率  $\xi$  衡量, 并按公式求得:

$$\xi = \frac{\Delta v}{v_m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\Delta v$  为送丝速率极差, 是最大送丝速率与

表 2 柔性送丝机与刚性送丝机的送丝速率  
Tab.2 Wire feeding rate of flexible wire feeder and rigid wire feeder

Wire feeding voltage $U/V$	Type of wire feeder	Side location	Wire feeding rate $v/(m \cdot min^{-1})$	Mean rate $v_m/(m \cdot min^{-1})$	Synchronization error
5	Traditional flexible wire feeder	Side 1	0.828, 0.842, 0.878, 0.904, 0.913	0.873	5.50%
		Side 2	0.779, 0.801, 0.836, 0.851, 0.858	0.825	
	Rigid wire feeder	Side 1	0.913, 0.918, 0.923, 0.924, 0.932	0.922	2.06%
		Side 2	0.895, 0.897, 0.905, 0.906, 0.913	0.903	
6	Traditional flexible wire feeder	Side 1	1.083, 1.122, 1.145, 1.168, 1.196	1.143	4.72%
		Side 2	1.035, 1.053, 1.102, 1.118, 1.137	1.089	
	Rigid wire feeder	Side 1	1.544, 1.554, 1.566, 1.562, 1.574	1.560	1.79%
		Side 2	1.516, 1.528, 1.535, 1.539, 1.543	1.532	
7	Traditional flexible wire feeder	Side 1	1.411, 1.462, 1.468, 1.514, 1.555	1.482	4.52%
		Side 2	1.473, 1.512, 1.547, 1.587, 1.626	1.549	
	Rigid wire feeder	Side 1	2.223, 2.246, 2.261, 2.268, 2.272	2.254	1.38%
		Side 2	2.205, 2.213, 2.216, 2.229, 2.252	2.223	
8	Traditional flexible wire feeder	Side 1	1.839, 1.882, 1.916, 1.954, 2.025	1.923	5.36%
		Side 2	1.918, 1.972, 2.019, 2.105, 2.116	2.026	
	Rigid wire feeder	Side 1	2.873, 2.889, 2.911, 2.923, 2.928	2.905	1.27%
		Side 2	2.838, 2.853, 2.875, 2.881, 2.892	2.868	
9	Traditional flexible wire feeder	Side 1	2.208, 2.246, 2.294, 2.362, 2.419	2.306	4.73%
		Side 2	2.335, 2.364, 2.395, 2.421, 2.560	2.415	
	Rigid wire feeder	Side 1	3.492, 3.518, 3.529, 3.543, 3.557	3.528	1.39%
		Side 2	3.445, 3.465, 3.472, 3.506, 3.508	3.479	

表 3 送丝速率波动性测试数据  
Tab.3 Test data of wire feeding rate fluctuation

Wire feeding voltage $U/V$	Type of wire feeder	Side location	Mean rate $v_m/(m \cdot min^{-1})$	Rate range $\Delta v/(m \cdot min^{-1})$	Fluctuation ratio of rate $\zeta$
5	Traditional flexible wire feeder	Side 1	0.873	0.085	9.74%
		Side 2	0.825	0.079	9.58%
	Rigid wire feeder	Side 1	0.922	0.019	2.06%
		Side 2	0.903	0.018	1.99%
6	Traditional flexible wire feeder	Side 1	1.143	0.113	9.89%
		Side 2	1.089	0.102	9.37%
	Rigid wire feeder	Side 1	1.560	0.030	1.92%
		Side 2	1.532	0.027	1.76%
7	Traditional flexible wire feeder	Side 1	1.482	0.144	9.72%
		Side 2	1.549	0.153	9.88%
	Rigid wire feeder	Side 1	2.254	0.049	2.17%
		Side 2	2.223	0.047	2.11%
8	Traditional flexible wire feeder	Side 1	1.923	0.186	9.67%
		Side 2	2.026	0.198	9.77%
	Rigid wire feeder	Side 1	2.905	0.055	1.89%
		Side 2	2.868	0.054	1.88%
9	Traditional flexible wire feeder	Side 1	2.306	0.211	9.15%
		Side 2	2.415	0.225	9.32%
	Rigid wire feeder	Side 1	3.528	0.065	1.84%
		Side 2	3.479	0.063	1.81%

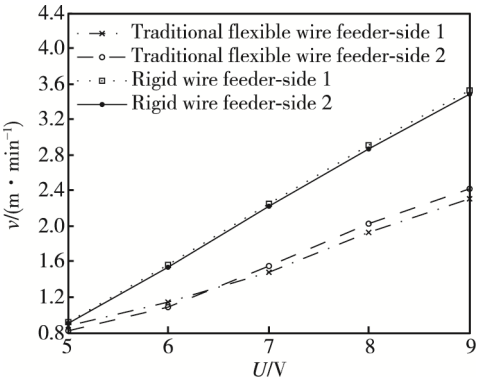


图 3 送丝速率随送丝电压变化曲线图

Fig.3 Variation curves of wire feeding rate vs. wire feeding voltage

最小送丝速率的差值； $v_m$ 为送丝平均速率。

将表 2 中数据带入上式，可分别计算出传统柔性送丝机和刚性送丝机的送丝速率波动率，如表 3 所示。由表 3 可知：当送丝电压相同时，本文研制的刚性送丝机两侧丝材的送丝速率极差均远小于传统柔性送丝机。传统柔性送丝机的送丝速率波动率为 10% 左右，而刚性送丝机的送丝速率波动率仅为 2% 左右，说明刚性送丝比柔性送丝有着更优异的送丝稳定性，达到了设计的技术指标要求。



### 3.3 喷涂电流波动性

为了进一步考察电弧喷涂过程中传统柔性送丝机和本文研制的刚性送丝机的送丝波动情况,在喷涂电压和送丝电压一定时,对二者的喷涂电流分别进行了测试。具体试验条件:喷涂材料为 $\phi 2$  mm的2Cr13不锈钢丝,喷涂电压为40 V,喷涂电流设定为230 A,送丝电压为7 V,气体压力为0.5~0.7 MPa。测试数据如表4所示。

表4 喷涂过程中电流测试数据  
Tab.4 Current test data during spraying process

Wire feeding type	Current I/A	Current range $\Delta I$ /A	Mean current $I_m$ /A
Traditional flexible wire feeder	194, 224, 242, 251, 263	69	235
Rigid wire feeder	226, 228, 231, 234, 237	11	231

由表4可知电弧喷涂过程中,两种送丝机均呈现不同情况的电流波动。在设定电流值为230 A时,传统柔性送丝机和刚性送丝机的最小喷涂电流值分别为194 A和226 A,最大喷涂电流值分别为263 A和237 A,两者的喷涂电流极差分别为69 A和11 A;平

均电流分别为235 A和231 A。喷涂电流波动率 $\zeta$ 可按式求得:

$$\zeta = \frac{\Delta I}{I_m} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\Delta I$ 为喷涂电流极差, $I_m$ 为喷涂平均电流。

将表4中数据带入上式,可分别计算出传统柔性送丝机和刚性送丝机的喷涂电流波动率分别为29.36%和4.76%。这说明本文研制的刚性送丝机不仅在无喷涂情况下送丝平稳,而且在喷涂状态下也能保持良好的送丝稳定性,从而确保喷涂涂层的质量。

### 3.4 喷涂焰流特性

图4a和4b分别为传统柔性送丝机和刚性送丝机在电弧喷涂过程中喷涂枪的喷涂焰流形态。由图可知,尽管柔性送丝也呈现束流集中,然而在连续喷涂时,经常出现如图4a中的发散焰流;而刚性送丝焰流稳定,且束流集中,如图4b所示,且并没有出现柔性送丝的发散焰流情况。这是由于,与柔性送丝相比,刚性送丝的送丝过程更加平稳,这对喷涂焰流的集中稳定至关重要,从而为制备高品质涂层奠定了基础。



a 传统柔性送丝机



b 刚性送丝机

图4 喷涂焰流形态

Fig.4 Patterns of spraying flame flow: (a) traditional flexible wire feeder, (b) rigid wire feeder

## 4 结论

1) 针对传统电弧喷涂送丝机广泛采用柔性送丝所引起的送丝速率低、送丝波动大等问题,设计了刚性送丝结构,以取代传统推式送丝机中的软管送丝,从而成功研制出了新型电弧喷涂刚性送丝机。

2) 对传统柔性送丝机和本文研制的电弧喷涂刚性送丝机的送丝特性进行了对比试验研究。研究表明,与传统柔性送丝机相比,在相同工况条件下,本文研制的刚性送丝机的送丝速率大、送丝阻力小、送丝速率波动率及喷涂过程中的电流波动率均较小,且喷涂焰流集中稳定,其送丝过程具有优异的稳定性和同步性,从而验证了本设计的有效性和可行性。

### 参考文献:

- [1] 徐滨士, 马世宁. 优质、高效电弧喷涂技术的应用和发展[J]. 表面工程, 1996(4): 7-14.  
XU Bin-shi, MA Shi-ning. Application and Development of High Quality High Efficiency Arc Spraying Technique[J]. Surface Engineering, 1996(4): 7-14.
- [2] 李承宇, 安云岐, 王会阳, 等. 电弧喷涂技术及其在不同行业中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(8): 70-74.  
LI Cheng-yu, AN Yun-qi, WANG Hui-yang, et al. Arc Spraying Technology and Its Application to Various Industries[J]. Electroplating & Finishing, 2011, 30(8): 70-74.
- [3] 梁秀兵, 陈永雄, 白金元, 等. 自动化高速电弧喷涂技术再制造发动机曲轴[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 112-116.  
LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong, BAI Jin-yuan, et

- al. An Automatic High Velocity Arc Spraying Technology Applied to Remanufacture Engine Crankshaft[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 112-116.
- [4] 刘黎明, 肖金坤, 徐海峰, 等. 热喷涂汽车发动机气缸内壁涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 68-76.  
LIU Li-ming, XIAO Jin-kun, XU Hai-feng, et al. Study Progress in Thermal Sprayed Inner Wall Coating of Automotive Engine Cylinder[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 68-76.
- [5] 刘翊军, 周涛. 表面喷涂对体育器械耐磨性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(8): 1639-1642.  
LIU Yi-jun, ZHOU Tao. Effect of Surface Coating on Wear Resistance of Sports Equipment[J]. Foundry Technology, 2016, 37(8): 1639-1642.
- [6] 李晖, 陈亚茹, 邓书彬, 等. 60Si2Mn 钢高速电弧喷涂耐磨涂层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 77-83.  
LI Hui, CHEN Ya-ru, DENG Shu-bin, et al. Friction-Wear Behavior of 60Si2Mn Steel Sprayed with Wear-resistance Coating by High Velocity Arc Spraying[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 77-83.
- [7] 童辉, 韩文礼, 张彦军, 等. 表面工程技术在石油石化管道中的应用及展望[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 195-201.  
TONG Hui, HAN Wen-li, ZHANG Yan-jun, et al. Application and Prospect of Surface Engineering Technology in Petroleum and Petrochemical Pipelines[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 195-201.
- [8] 楼森, 胡永乐, 强文江, 等. 高速电弧喷涂层在钢结构防腐中的作用及应用现状[J]. 材料保护, 2011, 44(3): 54-56.  
LOU Miao, HU Yong-le, QIANG Wen-jiang, et al. Application of High Velocity Arc Sprayed Coatings in Preventing Steel Structures from Corrosion[J]. Materials Protection, 2011, 44(3): 54-56.
- [9] 孙小东, 刘刚, 李龙阳, 等. 热喷涂锌铝合金超疏水涂层的制备及性能[J]. 材料研究学报, 2015, 29(7): 523-528.  
SUN Xiao-dong, LIU Gang, LI Long-yang, et al. Preparation and Properties of Superhydrophobized Sprayed Zn-Al Coating[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(7): 523-528.
- [10] 李龙阳, 李玉新, 曾志翔, 等. 电弧喷涂 Zn-Al 合金与硅氧烷自组制备超疏水涂层[J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 50-57.  
LI Long-yang, LI Yu-xin, ZENG Zhi-xiang, et al. Preparation of Super-hydrophobic Zn-Al Alloy Coating and Self-assembled Siloxane by Arc Spraying[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(6): 50-57.
- [11] 赵晓舟, 周正, 贺定勇, 等. 电弧喷涂镍基涂层腐蚀及磨损行为[J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 48-52.  
ZHAO Xiao-zhou, ZHOU Zheng, HE Ding-yong, et al. Corrosion and Wear Behavior of Wire-arc Sprayed Ni-based Coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 48-52.
- [12] 田浩亮, 魏世丞, 陈永雄, 等. 高速电弧喷涂在工程机械零部件再制造领域中的应用现状[J]. 表面技术, 2013, 42(3): 99-102.  
TIAN Hao-liang, WEI Shi-cheng, CHEN Yong-xiong, et al. Application Status of High Velocity Arc Spraying Technology in Remanufacturing Construction Machinery Parts[J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 99-102.
- [13] TOMA S L, BEJINARIU C, BACIU R, et al. The Effect of Frontal Nozzle Geometry and Gas Pressure on the Steel Coating Properties Obtained by Wire Arc Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 220: 266-270.
- [14] 李鹤岐, 李春旭, 陈克选. 电弧喷涂自适应控制系统研究[J]. 甘肃科学学报, 2002, 14(1): 11-16.  
LI He-qi, LI Chun-xu, CHEN Ke-xuan. Investigation of Adaptive Control System for Arc Spraying[J]. Journal of Gansu Sciences, 2002, 14(1): 11-16.
- [15] 张秀会, 索双富, 易春龙, 等. 电弧喷涂送丝系统的阻力分析[J]. 表面技术, 2004, 33(1): 25-27.  
ZHANG Xiu-hui, SUO Shuang-fu, YI Chun-long, et al. Analysis of Drag of Wire-feeder System in Arc Spraying[J]. Surface Technology, 2004, 33(1): 25-27.
- [16] 张秀会. 电弧喷涂送丝系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.  
ZHANG Xiu-hui. The Study on the Wire Feeder of Arc Spray Systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.