doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.04.001

# 冲压模具热喷涂涂层的优化\*

(德)沃尔夫冈・铁尔曼,(德)罗蔚峰,(德)音果・鲍曼,(德)彼得・霍林斯沃思,(德)本杰明・科力布斯,(德)雷夫・哈根

(多特蒙德工业大学 材料工程学院,德国 多特蒙德 44227)

**摘 要:**为了提高冲压模具的使用寿命,分别采用电弧喷涂工艺制备 FTC-FeCSiMn 耐磨涂层和高速火焰 喷涂工艺制备 WC-12Co 耐磨涂层,并对其参数进行优化。由于电弧喷涂工艺受到较少参数的影响,而高速 火焰喷涂工艺受到煤油流量、氢气流量和氧气比等十几个参数的影响,所以优化过程采用单次单因子法的试 验设计法。对微硬度、孔隙率、表面粗糙度及沉积效率等涂层性质进行研究,取得较好效果。其中高速火焰 喷涂的 WC-12Co 涂层经优化后,硬度 1 547 HV<sub>0.1</sub>,沉积效率 34.5%,孔隙率 1.0%,粗糙度 1.84 μm,与理论 预期值非常接近。最后使用销盘试验测试涂层耐磨性,结果表明电弧喷涂的 FTC-FeCSiMn 涂层使工件的 抗磨性提高 2 个数量级,而高速火焰喷涂的 WC-12Co 涂层更使工件的抗磨性提高 4 个数量级。

关键词:电弧喷涂;高速火焰喷涂;单次单因子;试验设计法;磨损

**中图分类号:** TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2012)04-0001-14

# **Optimization of Thermal Spray Coatings for Forming Tools**

TILLMANN Wolfgang, LUO Weifeng, BAUMANN Ingor, HOLLINGSWORTH Peter,

KREBS Benjamin, HAGEN Leif

(Institute of Materials Engineering, Technical University of Dortmund, Dortmund 44227, Germany)

**Abstract**: In order to extend the life time of forming tools, two wear resistance coating systems FTC-FeC-SiMn and WC-12Co were deposited, using arc spraying and HVOF processes respectively. To optimize the parameters, One-factor-at-a-time experiments were employed for arc spraying process due to its minor influence factors, and design of experiment method was used for HVOF spraying process, which is influenced by more than 10 factors. During the optimization process the micro hardness, porosity, roughness and deposition rate of the coatings were investigated, and the results were excellent. Especially the WC-12Co coatings have a hardness of 1 547 HV<sub>0.1</sub>, a deposition efficiency of 34.5%, a porosity of 1.0%, and a roughness of 1.84  $\mu$ m. These results are very close to the theoretically expected values. Afterwards, the wear resistances of the coatings were determined by pin-on-disk tests. The results show that the wear resistance of FTC-FeCSiMn coatings is two hundred times higher and corresponds with the wear resistance of WC-12Co coatings even sixty thousand times higher than those of the substrates.

Key words: arc spray; HVOF; one-factor-at-a-time; design of experiment; wear

## 0 引 言

由于能源危机和环境污染的问题日趋严重, 各汽车制造厂家越来越倾向于运用新技术,制造 更轻、更省油和更低排放的车辆。在欧洲,欧盟 一直严格控制并持续减少汽车的二氧化碳排放 量。例如,在德国小轿车二氧化碳界限将从 2012 年的 110 g/km 降低到 2020 年的 80 g/km<sup>[1]</sup>。另 外原油价格在过去十年中更是"突飞猛进",从

**收稿日期**:2012-05-10; **修回日期**:2012-07-10; **基金项目**: \* 德国合作研究中心项目(SFB708 TP A1, A2 & C2) **作者简介**: 罗蔚峰(1975-), 男(汉), 广东梅州人, 博士生; 研究方向: 热喷涂、磨损与表面技术

网络出版日期: 2012-07-11 11:26; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120711.1126.002.html 引文格式: 沃尔夫冈・铁尔曼, 罗蔚峰, 音果・鲍曼, 等. 冲压模具热喷涂涂层的优化 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 1-14. 2002 到 2012 年涨了将近 100 美元/桶<sup>[2]</sup>。在这 种形势下,各汽车厂商纷纷采用各种新型材料, 比如使用高强度钢板、铝镁合金、纤维增强塑料 来降低车身重量来达到降低油耗及排放的目的。 由于价格的原因,目前轻量化的高强度钢板最受 各汽车厂商青睐[3]。在对高强度钢板的冲压过 程中,对冲压模具的抗磨损性能的要求也相应提 高,而传统的热处理已经不能满足这一要求。热 喷涂技术在 1912 年被发明之后,作为一种新型 的表面强化技术,是利用热源将喷涂材料加热至 熔化或半熔化状态,高速喷射并沉积到经过预处 理的基体表面形成涂层的方法<sup>[4]</sup>。它具有喷涂 材料广泛(金属、陶瓷、塑料、复合材料等)、基体 材料和尺寸不受限制、基体受热影响小等特 点[5-6]。运用热喷涂技术,能够在冲压模具表面 沉积一层耐磨涂层,来提高模具的使用寿命并且 在正常寿命期内更充分确保模具的精确度。

双丝电弧喷涂是一种传统的喷涂技术,具有 的运营费用低、附着效率高的特点<sup>[7]</sup>。新型的热 喷涂铁基涂层由于特殊的非晶结构,使它具有高 硬度和优良的耐腐蚀和抗磨损的特性<sup>[8-10]</sup>。通过 使用含硬质颗粒粉芯丝材可以使得涂层的硬度 和耐磨性再一次产生质的飞跃。He<sup>[11]</sup>和 Dallaire<sup>[12]</sup>在他们的论文中写道,作为硬质颗粒镶嵌 在电弧喷涂涂层中的碳化钨和碳化铬,能明显地 提高涂层的硬度和抗磨性。高速火焰喷涂 (HVOF)作为一种全新的喷涂工艺,具有火焰温 度低及速度高的特点,其速度一般能超过音速, 所以又称之为超音速喷涂。由于这一特征使通 过高速火焰喷涂沉积的涂层,在微观上具有非常 低的孔隙率、颗粒氧化率、碳化钨分解率的特点, 在宏观上具有超高的硬度和抗磨能力<sup>[13-14]</sup>。

文中使用电弧喷涂和高速火焰喷涂沉积抗 磨损涂层,并优化其参数,在保证高沉积效率的 前提下制备高硬度、低孔隙率和低粗糙度的涂 层,并使用销盘试验确定涂层的抗磨损性能。

1 试验材料与方法

## 1.1 基材

由于销盘摩擦磨损试验的需要,选用圆盘形 (Φ40 mm × 6 mm)45 钢毛坯作为基材。为了 确保涂层和基材间良好的机械咬合力,首先必须 对基材进行喷砂处理。对电弧喷涂和高速火焰 喷涂使用的基材分别用 F14 和 F100 的刚玉进行 喷砂处理。使用不同颗粒度刚玉处理后的表面 粗糙度 Ra 分别为(9.0±1.3) μm 和 (1.4± 0.4) μm。

## 1.2 双丝电弧喷涂

双丝电弧喷涂使用德国 Durum 公司提供的 FTC-FeCSiMn 粉芯线材(Durmat AS-850)。该 粉芯线材质量的 50%为熔融碳化钨(Fused Tungsten Carbide,FTC)硬质颗粒,其颗粒大小 在  $25 \sim 90 \ \mu m$ 之间。表 1 中列出其具体化学 成分。

表 1 AS-850 粉芯线材的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Material content of AS-850 wires (w/%)

FTC	С	Si	Mn	Fe
44.2	2	0.2	0.5	Bal.

喷涂设备采用瑞士 Sulzer Metco 公司 Arc PPT 350 双丝电弧喷涂系统。如图 1 所示,线材 由两个分别接在正负极上铜制的导嘴引进喷嘴 内。在高压直流电的作用下,两线材的接触点间 产生电弧火花。在电弧火花的高温作用下融化 的颗粒被高压高速气体(一级雾化气体,primary atomization gas)通过喷嘴孔向基体加速。在中 心喷嘴的周围对称分布了 4 个倾斜向前方中心 聚拢的小孔。在这 4 个小孔中喷出的二级气体 (secondary focusing gas)对熔融颗粒有聚集和再 雾化的作用。



图 1 双丝电弧喷涂设备示意图



#### 1.3 高速火焰喷涂

高速火焰喷涂工艺采用 Thermico 公司提供的 CJS-HVOF 喷枪(图 2)作为喷涂设备。该喷

枪具有两级燃烧室:氢氧燃烧室和液体燃料燃烧 室,分别作为热能和动能的来源,所以该喷枪具 有可以独立控制火焰速度和温度的特点。经过 喷枪内前后两级拉瓦尔喷嘴的加速,火焰速度可 以到达超音速的状态。喷涂粉末在第二级拉瓦 尔喷嘴的后端轴向注入,在这个区域燃烧已经基 本结束,所以粉末不会被加热到很高的温度,而 在接下来的喷管中被加速到非常高的速度[15]。 为了能生成致密涂层结构,试验采用德国 Thermico公司提供的超细烧结破碎 WC-12Co 粉末 (SJA 610/48 1~8 µm)。由于该超细粉末颗粒 的比重非常小,因此其运动惯量也非常低。其次 该粉末具有尖锐的边角,所以它的流动性和可供 性都非常差。再次微小粉末颗粒具有巨大表面 能量,容易凝聚在一起,会导致供粉管道堵塞。 所以系统特别采用了德国 Thermico 公司的 CPF 送粉器。该送粉器底部配置了一个震动器。整 个容器在送粉时会一起震动。这样粉末颗粒不 会凝聚在一起,并会顺着倾斜的底部流动,通过 送粉孔进入管道。





## 1.4 涂层性能研究

使用加拿大 Tecnar 公司的 Accuraspray g3 测定飞行颗粒的速度和温度,使用德国 Hommel 公司的 T-1000 粗糙度仪测量涂层粗糙度,涂层 硬度由德国 LECO 公司 M-400 显微硬度仪来测 得。涂层的沉积效率是以试件质量增加量除以 喷枪经过基材的相应时间内实际耗材量计算出。 为了估算涂层冷却后产生的热残余应力,试验中 还使用德国 NETZSCH 公司的 402 E 热膨胀仪 测试了涂层和基体的热膨胀系数。试件为长 25 mm、宽 3 mm、厚 2 mm 的纯涂层材料或纯基 体材料。

摩擦磨损试验是在销盘式摩擦磨损试验机 (瑞士 CSEM 公司 CH-2000)上进行的。为了避 免涂层粗糙度对试验的影响,涂层必须先旋转磨 台上磨光。经磨光后涂层粗燥度 Rz 需控制在 0.2 μm以下。

磨损试验使用氧化铝珠和不锈钢珠 (100Cr6)作为摩擦副。摩擦珠以10N的正向压 力和0.4 m/s的相对速度分别在半径为18、24 和30 mm的轨道上跑12万圈。磨损试验后产生 的磨损量使用三维轮廓测量仪(奥地利 Alicona 公司的 Infinite Focus)测量。磨损系数按以下公 式计算:

## 2 结果与分析

#### 2.1 喷涂参数与涂层质量的优化

2.1.1 双丝电弧喷涂

在电弧喷涂过程中飞行颗粒的性质和涂层的结构主要受一、二级气体的压强以及两级间电流和电压这4个参数影响,这在Wang<sup>[16]</sup>和Wilden<sup>[17]</sup>报告中得到证明。而另外2个次要参数, 喷涂距离和喷枪移动速度在另一试验中研究过, 这里不做详细阐述。喷涂距离和喷枪移动速度 分别取110 mm和12000 mm/min。4个主要参 数(一、二级气体、电流和电压)对涂层性能的影 响以及参数优化过程使用了传统单次单因子试 验法(One-factor-at-a-time experiments),也 就是说在每次研究一种参数变量时保持另外变 量不变。

(1) 一级雾化气体

一级雾化气体在高压作用下通过位于两电极间的喷嘴形成高速的气体流,该气体流轴吹向电弧间融化的线材颗粒,熔融颗粒被吹散、雾化并向前方加速。在试验中一级雾化气体的压力可以在 0~0.6 MPa之间调整。压力越高,从喷嘴中出来的气体速度就越高,从而被加速的熔融颗粒的速度也越高。如图 3(a)所示,一级雾化气体压力从 0.2 MPa 提高到 0.4 MPa,颗粒速度提高了接近 100%,压力继续提高到 0.6 MPa,颗粒





0.6 MPa,颗粒温度才降低约 2.5% 左右。其原 因是,在高压气体下被电弧融化的线材被雾化成 非常小的颗粒<sup>[7]</sup>,能被气体流快速加速,颗粒和 气体流相对速度非常小,所以气体流对颗粒的冷 却作用在气体流速度增加时没有明显提高。图 3 中 SG 表示二级压缩气体。

根据试验结果,提高一级雾化气体的气压可 以在电弧喷涂过程中产生更细微的颗粒,并以更 高动能撞击基材。在颗粒温度基本没有降低的 前提下,颗粒撞到基材后能更充分的变形从而形成更加平整和致密的涂层(图4(c))。而使用较低的一级雾化气体气压则会形成相对疏松的结构,涂层中出现大量粗大的球形颗粒(图4(a))和 孔隙。在图4(d)中可以看到,一级雾化气体从 0.2 MPa增加到0.4 MPa,可以把涂层的孔隙率 从11%左右降低到4%以下,继续把一级雾化气 体气压增加到0.6 MPa,涂层的孔隙率会再次降 低到2%左右。



(a) 0.2 MPa (b) 0.4 MPa (c) 0.6 MPa (d) Porosity

图 4 不同一级雾化气体压力下电弧喷涂产生的 FTC-FeCSiMn 涂层微观结构及孔隙率

Fig. 4 Microstructure and porosity of arc sprayed FTC-FeCSiMn coatings under different primary atomization gas pressure

#### (2) 二级压缩气体

二级压缩气体是通过四个小孔倾斜喷向电弧后端的气体流。从图 5(a)可以看到,随着二级 气体气压的增高,涂层表面的粗糙度明显降低。 其原因是由于二级气体对飞行颗粒有再度雾化 作用,更高的气压能产生更细的颗粒,从而形成 更加均匀的涂层及更加良好的表面质量<sup>[16]</sup>。

对二级压缩气体的研究表示,把气压提高到 0.4 MPa可以形成非常细腻的涂层结构,而高于 0.4 MPa则有可能形成旋涡,影响颗粒的飞行,从 而降低涂层的质量。从图 5(b)可以看到,二级气 体气压从 0 MPa 提高到 0.4 MPa,其沉积率呈现出 一个线性增加的趋势,继续提高到 0.6 MPa 沉积 率不再继续提高。图 5 中 PG 表示一级雾化气体。

在喷涂具有复杂形状的零件时,喷涂火焰的 发散角度对涂层厚度的均一性起到了巨大的影 响。过大的火焰角度会在不恰当的位置产生过 喷(Overspray),而二次压缩气体对火焰角度的聚 集作用恰恰能很好的降低过喷的产生。从图 6 可以看到,把二级气体压力从 0 MPa 增加到 0.4 MPa,火焰的发散角度降低了 1.5°。这正是增加 二级气体压力能增加沉积率的主要原因。







(a) 0 MPa

(b) 0.4 MPa

图 6 不同二级气体压力下的火焰发散角度 Fig. 6 Angle of spray flame under different secondary gas pressure

# (3) 电压

两线材间的电压是形成电弧的重要参数。 增加电压可以提高电弧的强度,在两级间形成稳 定和高强度的电流。从而使电弧以及被电弧加 热并融化的颗粒的温度升高(图7(b))。过高的 颗粒温度会带来 3 个负面作用。首先,会导致涂 层温度过高。由于涂层与基材间相对接近的弹性 模量<sup>[18]</sup>和较大的热膨胀系数差(经热膨胀仪测得 FTC-FeCSiMn涂层膨胀系数为 6.7×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>,基 材 45 钢的膨胀系数为 11.7×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>),过高的 涂层温度会使冷却后涂层内部保留过高的热残 余应力,从而导致涂层脱落。其次,相对于粉芯 线材来说,过高的颗粒温度会导致线材添加物 (如碳化钨)的分解,最终大大的降低涂层的抗磨 性<sup>[19]</sup>。再次,提高电压同时会使得两级间的电弧 变长,导致两线材间溶化的颗粒变大,从而导致 雾化后的颗粒大小也随之提升。颗粒越大它的 动量也越高,在相同情况下更难被加速。所以提 高两级间的电压会导致颗粒飞行速度的降低(图 7(a)),涂层的致密度相应降低。

所以在电弧喷涂工艺中提高电弧电压会对 涂层质量起到负面作用。相对低的电压可以产 生相当致密和低热残余应力的涂层。当电压降 低到 28 V时,两级间电弧的稳定性开始降低,火 焰时断时续,所以在之后的试验中 30 V将作为 最佳电压使用。



图 7 电弧电压与(a)速度和(b)温度间的关系 Fig. 7 Particle velocity (a) and particle temperature (b) dependent on arc voltage

(4) 电流

电弧间的电流主要由线材的输送系统来控制。当输送速度提高时,两级间的间距缩小,电 弧的电离电阻也随之降低,使两级间的电流在保 持电压不变的前提下相应提高。所以说提高电 流也就是提高输送速度,首先可以直接提高喷涂 效率,在相同时间里沉积更厚的涂层;其次两级 间单位时间内融化的线材量随之提高,融化后颗 粒的直径也增大。由于颗粒质量和体积的增大, 在相等雾化条件下,颗粒的速度相应降低(与电压相类似,如图8(a))。从图8(b)可以看到,提高电弧电流并没有使颗粒温度提高。电流从200 A 提高到260 A,颗粒温度基本保持在2340 ℃左右。其原因是电流的提高是靠提高线材的输送 速度来实现的。因为由增加电流而增加的热能 会平均分配到由增加输送速度而数量上增加的 融化颗粒上,每个融化颗粒上的热能基本保持不 变,所以颗粒温度也没有提高。





提高电弧电流虽然能提高喷涂效率,但是同时导致颗粒飞行速度的降低,从而使得涂层更加 疏松。此外增加电流的同时,会提高单位时间内 基体零件的受热量,使得基体温度的提高,使冷 却后残余更多的热应力。从图(9)可以看到,电 流从 200 A 增加到 220 A 后,涂层在厚度增加的 同时,其结构没有很大的变化。但是当电流增加 到 260 A 后,涂层内出现大量圆形孔隙和因热残 余应力而产生的裂痕。所以 220 A 将作为电流 的最佳值。







(a) 200 A (b) 220 A (c) 260 A



# (5) 最优参数

试验采用单次单因子试验法对一、二级气体、电流和电压对电弧喷涂 FTC-FeCSiMn 涂层性能的影响进行研究。表 2 中列出了经研究后FTC-FeCSiMn 电弧喷涂最优参数。

表 2 最优电弧喷涂参数

Table 2 Optimized arc-spraying parameters

a	Primary atomization gas/MPa	Secondary focusing gas/MPa	Arc voltage/ V	Arc current/ A	Stand-off distnace /mm	Jet velocity/ (mm• min <sup>-1</sup> )
	0.6	0.4	30	220	110	12 000

### 2.1.2 高速火焰喷涂

由于高速火焰喷涂工艺的复杂性,涂层结构 和性能受到煤油流量、氢气流量、氧气供给比等 十个参数(影响因子)的影响。所以需要使用试 验设计方法(Design of Experiment)来研究喷涂 参数对涂层性能的影响并对其优化。试验主要 分3个部分:

(1) 初选

初选的主要任务是确定各个影响因子的范 围和位级。依据本研究所内以往的试验数据<sup>[20]</sup>, 煤油流量(KF)在 9.8~17.8 L/h 之间,喷涂距离 (SOD)在 100~250 mm 之间以及氧气混合比  $\lambda$ 在 0.8~1.75 之间基本上都可以生成有效的涂 层,涂层的硬度基本上在 1 100 HV<sub>0.1</sub>以上,涂层 沉积效率也在 35%以上。

使用单次单因子法进行了一系列进一步的 初选试验。试验结果表明,过近的喷涂距离 (SOD=100 mm) 会使涂层形成烧结状突起(图 10(a))。由于过短的飞行距离和飞行时间,导 致热能没有来得及传导到颗粒内核,颗粒表面 已经融化而内核还是固态。这样会导致颗粒在 基材表面不能完全变形而堆积成拱桥状。另外 当煤油流量过高时,会在涂层中出现大量的水 平裂痕(图 10(b))。这是由于大量的煤油燃烧 会产生过高的火焰温度以及相应过高的颗粒温 度(>1 750 ℃),使涂层在上下表面间形成强烈 的温度梯度,导致涂层中出现巨大的热残余应力, 在热应力的撕扯下形成裂痕。最后氧气混合比λ 也应保持在1以上,这样才能保证燃料完全燃烧, 否则会污染燃烧室内壁。表 3 列出了经过初选后 各个试验参数(影响因子)在不同位级时的设置。



图 10 (a) 喷涂距离过短时出现的拱桥状烧结现象及(b) 煤油流量过大时产生的裂痕 Fig. 10 Particle agglomeration in coating at short SOD (a) and cracks formed at excessive kerosin flows (b)

	Table 3 Factor levels in Placket Burman design										
Level	Keronsin fuel/ (L • h <sup>-1</sup> )	Oxygen fuel radio λ	Stand-off distance/ mm	Hydrogen fuel/ (L•min <sup>-1</sup> )	Jet velocity/ (m•min <sup>-1</sup> )	Backside cooling presure/ kPa	Front cooling pressure/ MPa	Carry gas flow/ (L•min <sup>-1</sup> )	Powder feed rate/ (g•min <sup>-1</sup> )	Nozzle length/ mm	
+	16.0	1.75	250	140	25.0	413.70	0.6	12	60	140	
_	10.0	1.05	150	70	10.0	68.95	0	8	30	100	

表 3	Plackett	Burman	设计中省	函子的	位级
ahle	3 Factor	levels in	Placket	Burman	desig

## 表 4 Plackett Burman 设计

Table 4 Packett Burman design

	Influence factor										Response factor			
Nr.	KF	λ	SOD	HF	V	BCP	FCP	CGF	PFR	NL	Micro hardness/ HV <sub>0.1</sub>	Deposition efficiency/ %	Porosity/ %	Roughness/ µm
8	+	_	+	_	_	_	+	+	+	_	1 676	45.9	0.1	2.7
11	+	+	_	+	_	_	_	+	+	+	1 912	36.8	0.1	2.4
5	_	+	+	_	+	_	_	_	+	+	1 447	38.3	2.4	2.4
12	+	_	+	+	_	+	_	_	_	+	1 802	51.9	0.3	2.6
6	+	+	_	+	+	_	+	_	_	_	1 305	30.8	1.3	2.6
10	+	+	+	_	+	+	_	+	_	_	1 433	32.3	0.7	3
1	_	+	+	+	_	+	+	_	+	_	897	27.4	7.6	3.5
7	_	—	+	+	+	_	+	+	_	+	706	42	0.8	3.8
3	_	—	_	+	+	+	_	+	+	_	803	28.5	3	4.1
4	+	_	_	_	+	+	+	_	+	+	1 764	49.1	3.1	3.7
2	_	+	_	_	_	+	+	+	_	+	1 575	40.7	1.5	2.5
9	_	_	—	_	_	_	_	_	_	_	1 154	61.7	10.5	3.1

## 9

#### (2) 筛选

筛选的目的是把重要的影响因子从众多影 响因子中挑选出来,从而达到减小因子数量的目 的。这一过程使用了 Plackett Burman 设计法, 这是一种由非完全平衡法导出的高混淆设计 法<sup>[21]</sup>。这种设计法的主要特征是,每一列都是左 边一列向下移动一格形成的,而且试验数目只要 略大于因子数并且是4的倍数。因为试验因子 数位11,所以试验数选12。表4左边为试验采用 的 Plackett Burman 设计。为了避免系统偏差, 试验顺序是随机安排的。试验后,在表4右边填 入各个试验结果(响应因子)即沉积率 DE、显微 硬度 MH、孔隙率 P 和粗糙度 Ra,构成完善的设 计试验矩阵。

借助计算机软件"Statistica 7"得出各个影响 因子对各个响应因子的效应(Effect)以及其标准 化效应值(Standardized effect)。而图 11 则以 Pareto 图的方式给出各个不同影响因子对显微 硬度 MH 的标准化效应值。当标准化效应值高 于 α线时(α在试验中取值为 0.05),表示该影响 因子对此响应因子有显著的效应<sup>[21]</sup>。在 Pareto 图 中可以看到对显微硬度 MH 有 4 个影响因子:煤 油流量 KF、氢气流量 HF、喷涂距离 SOD 和后冷却 气体压力 BCP 的标准化效应值超过 α线。也就是 说这 4 个参数对显微硬度 HV<sub>0.1</sub>有显著效应,其中 KF 和 HF 的效应是正向的,而 SOD 和 BCP 的效 应是反向的。换句话说,就是把 KF 和 HF 从低位 级调到高位级或者把 SOD 和 BCP 从高位级调到 低位级都可以使涂层的显微硬度提高。



图 11 各个影响因子对显微硬度影响的 Pareto 图 Fig. 11 Pareto diagram of the effects on microhardness

表 5 中列出了所有对响应因子有显著效应 的影响因子。从该表中可以看出,对于粗糙度没 有影响因子有显著效应。而对其它 3 个响应因 子,有 7 个影响因子有显著效应:煤油流量、氢气 流量、喷涂距离、背后冷却气体、氧气混合比、前 方冷却气体、喷嘴长度。而另外 3 个对任何响应 因子没有显著效应的影响因子,将在以后的试验 中取高、低位级间的中间值,即喷枪移动速度为 17.5 m/min、粉末输送气体流量为 10 L/min 和 粉末输送量 50 g/min。

#### 表 5 对响应因子有显著效应的影响因子

Table 5 Significat effect of the influencing factors on response factors

Response factor	Influence factor	Effect	Standardized effect
Micro hardnes / HV <sub>0.1</sub>	KF	535.0	6.7
	HF	339.4	4.2
	SOD	-254.2	-3.2
	BCP	-243.0	-3.1
Deposition	λ	-12.1	-5.6
efficiency / /0	SOD	-8.4	-3.9
	BCP	-7.2	-3.3
	FCP	-5.6	-2.6
Porosity / 1/0	NL	-3.2	-3.4
	KF	-3.4	-3.1
Roughness/ $\mu$ m			

在7个显著因子中,喷嘴长度对孔隙率有负 面效应,即用长的喷嘴涂层孔隙率就小,由于没 有更长的喷嘴,所以只能在下一步的试验中把喷 嘴固定在高位级(140 mm)。前方冷却气体对沉 积效率有显著的负面效应,减小冷却气体的压力 可以增加沉积效率,冷却气体压力的最小值只能 是 0, 所以在下一步试验中使用低位级(0 MPa)。 背后冷却气体压力虽然对显微硬度和沉积效率 都有显著负面效应,在低位级时能使涂层的显微 硬度和沉积效率提高。但是其标准化效应值都 相当比较小(-3.2和-3.3),另外冷却空气大小 还由基体零件尺寸来决定,更大的零件需要更多 的气体来冷却,由于试验中基体零件的尺寸保持 不变,所以背后冷却气体也将在下一步试验中保 持在低位级不变。氢气流量对显微硬度有相对 显著的正面效应,在高位级的时候能产生更高的

显微硬度。然而且氢气流量的最高值由于设备的原因被限制在180 L/min。所以在接下来的试验中氢气流量只能保持在高位级不变。

最后 3 个因子:煤油流量、喷涂距离和氧气 混合比对显微硬度、沉积效率和孔隙率表现出非 常显著的效应,所以要在下一步优化试验中继续 研究。由于喷涂距离和氧气混合比对显微硬度 和沉积效率只有负面效应,所以这两个参数将在 下一步试验中在低位级区域附近继续研究。煤 油流量对显微硬度有强烈的正面效应,对孔隙率 却是负面效应,而孔隙率本身是一个负响应因 子,即值越低质量越好,所以煤油流量要在高位 级附近区域继续研究。

## (3) 优化(Optimizition)

经过筛选只剩下煤油流量、氧气混合比和喷涂距离这三个非常显著影响因子需要继续研究。 试验要在最优参数附近进行,在这一阶段中使用 简单的线性 2<sup>k</sup> 设计法已经不够,这时需要引进非 线性设计法。本次试验中引进的新的设计法是中 心复合设计法(Central composite design,CCD),这 种设计法是在保证各影响因子间交互效应以及影 响因子对响应因子的二次幂效应的前提下的一个 缩减设计法。图 12 表示一个典型的 3 因子的中心 复合设计 CCD,它包括了一个原点,一个 2<sup>3</sup> 全因子 矩阵和 6 个离原点距离为 α 的星点。为了保证设 计的旋转性,α 取值 1.6818<sup>[21]</sup>。



图 12 3 个因子的中心复合设计

Fig. 12 Central composite design with three variables

根据上一阶段的试验结果,中心复合设计试 验里各个位级的参数如表 6 所示。而整个设计 则在表 7 给出,左边是试验安排,右边是试验后 得到的响应因子。与 Plackett Burman 设计一 样,试验顺序也是随机安排的。

#### 表 6 中心复合设计中各因子的位级

Table 6 Factor levels in central composite design

		-α	-1	0	+1	$+ \alpha$	
	$KF/(L \cdot h^{-1})$	13.6	15.0	17.0	19.0	20.4	
Constant	λ	0.95	1.05	1.20	1.35	1.45	
	SOD /mm	120	140	170	200	220	
	HF /(L • min <sup>-1</sup> )			140			
	$V/(m/ \cdot min^{-1})$	17.5					
	BCP /kPa	68.95					
Variable	FCP / MPa	0					
	$CGF/(L \cdot min^{-1})$			10			
	PFR /(g • min <sup>-1</sup> )			50			
	NL /mm			140			

#### 表 7 中心复合设计

Table 7 Central composite design

Nr.	Influ	ence	factor		Response factor					
Ne	KF	λ	SOD	MH/	DE/	P/	Ra/			
INT.	$\mathbf{x}_1$	$\mathbf{x}_2$	$\mathbf{X}_3$	$HV_{\scriptscriptstyle 0.1}$	%	%	$\mu m$			
18	—	_	_	1 509.7	47.85	2.12	2.5			
5	+	_	—	1 388.3	49.15	3.47	2.72			
19	—	+	—	1 360	39.35	1.76	2.68			
6	+	+	—	1 842.7	30.25	0.41	1.91			
13	—	_	+	1 776.1	32.52	4.48	10.34			
16	+	_	+	1 141.5	30.96	0.18	1.55			
11	_	+	+	1 424.6	26.19	4.96	12.38			
10	+	+	+	1 418.1	24.58	0.80	1.62			
7	α	0	0	1 592	36.01	1.58	2.19			
8	0	α	0	1 420.4	5.59	2.42	5.54			
9	0	0	α	1 213.1	34.56	2.21	2.14			
3	-α	0	0	1 404.5	33.73	1.14	2.35			
4	0	-α	0	1 803.6	39.3	2	6.51			
15	0	0	-α	1 490	31.06	1.75	1.74			
2	0	0	0	1 926	39.83	1.42	2.31			
14	0	0	0	1 662.4	29.05	0.22	1.83			
12	0	0	0	1 489.2	30.31	1.60	1.87			
1	0	0	0	1 436.6	39.51	0.22	2.31			
17	0	0	0	1 403.2	29.46	1.12	1.84			

表 7 中的试验结果经过计算机软件"Statistica 7"的分析后得出了各个显著因子的效应及其 标准化效应值(表 8)。

根据表 8 中各个影响因子的效应,各个响应 因子与影响因子的关系式可以写成下面 4 个效 应方程式,其中 x1 为煤油流量、x2 为氧气混合比 和 x3 为喷涂距离。

$$\begin{split} \hat{Y}_{\underline{a}\,\underline{a}\,\underline{w}\,\underline{e}\,\underline{e}} &= 1583.\,4 - 193.\,7 \cdot x_2{}^2 - 250.\,6 \cdot \\ x_1 x_3 + 308.\,1 \cdot x_2 x_3 \\ \hat{y}_{\underline{0}\,\underline{R}\,\underline{w}\,\underline{e}} &= 23.\,9 - 15.\,2 \cdot x_1 \end{split}$$

 $\hat{y}_{\mathrm{ABR}} = 0.9 - 1.3 \cdot x_3 - 2.1 \cdot x_1 x_3$ 

 $\hat{y}_{\text{##deg}} = 3.7 + 3.2 \cdot x_1 + 1.7 \cdot x_1^2 - 4.1 \cdot x_3 + 1.9 \cdot x_3^2 + 4.8 \cdot x_1 x_3$ 

#### 表 8 对响应因子有显著效应的影响因子

Table 8 Significat effect of the influencing factors on response factors

Response factor	Influence factor	Effect	Standardized effect	
Micro hardness /HV <sub>0.1</sub>	Average	1583.4	23.73	
	$\lambda^2$	-193.7	-2.4	
	KF • SOD	-250.6	-2.4	
	$\lambda$ • SOD	308.1	2.9	
Deposition efficiency / $\frac{9}{0}$	Average	23.9	12.46	
	KF	-15.2	-4.7	
Porosity / %	Average	0.9	2.4	
	SOD	-1.3	-2.8	
	KF • SOD	-2.1	-3.5	
Roughness $/\mu m$	Average	3.7	4.1	
	KF	3.2	5.4	
	$\mathrm{KF}^2$	1.7	2.9	
	SOD	-4.1	-6.9	
	$\mathrm{SOD}^2$	1.9	3.2	
	KF • SOD	-4.8	-6.2	

为了从4个响应因子中找到一个共同的最 优点,这里引进了意愿的概念。当意愿值为1 时,就是该响应因子达到或超过预期最佳值;反 之意愿值为0时,就是该响应因子没有或者刚刚 达到预期最差值。处于最佳值和最差值中间的 的响应因子通过线性转换换算成意愿值。表9 中给出各个响应因子对应意愿值为1和0之间的 区间。

表 9 响应因子对应的意愿值

Table 9 Desirability of the response factors

	Desirability	MH/ HV <sub>0.1</sub>	DE/ %	P/ %	$Ra/\mu m$
High	1	1 700	38	1.0	2.0
Low	0	1 300	28	2.5	7.0

由于没有特殊要求,所以对所有响应因子的 意愿都加以1的权重,这样4个响应因子的综合 意愿为各个单独意愿的几何平均值:

$$W = (\prod_{i=1}^n w_i)^{\frac{1}{n}}$$

再次借助软件"Statisca 7"绘制出综合意愿 与 3 个影响因子间关系曲面的色差投影图。因 为不能同时把 3 个变量(因子)填入二维图中,所 以只能把其中一个变量固定,再绘出另外两个变 量和综合意愿间关系的二维色差投影图(图 13)。 从该图中可以看到当λ和 SOD 在 0 位级时(氧气 混合比为 1.2,喷涂距离为 170 mm),KF 在-0.84 位级时(煤油流量为 15.3 L/h),综合意愿达到最 高值。

经过这一系列试验,确定了超细 WC-Co 粉 末高速火焰喷涂的最优参数(表 10)。在表 10 同 时中还给出依照前面 4 个效应方程是算出的最 优质量的理论值以及按照最优参数实际制成的 5 个样品性能的平均值。可以看到实际值虽然没 有完全达到理论值,但是都只是非常接近,特别 是显微硬度,实际值和理论值间只相差 2.3%。 这说明涂层的性能除了受到十个已知因子的影 响外,还受到诸如天气、温度和湿度等未知因子 的负面影响,这也是试验设计方法不能排除的 因素。

图 14 为经过优化后的涂层的 SEM 显微结构。 用 400 倍的放大率可以清楚的看到涂层的片状层 结构。用 10 000 倍的放大率,可以明显的看到在 单一片状结构中 WC 颗粒紧密的镶嵌在 Co 基体 里而形成致密的复合结构,且其孔隙率非常小。

## 2.2 涂层摩擦学研究

由于板材在冲压过程中摩擦系统的复杂性 包括了板材与模具间的高速滑动和极高的压力, 这种复杂摩擦系统很难用标准试验来模拟,只能 用标准冲压试验来验证。然而这种标准冲压试 验又要需要大量和优质高硬度板材和时间来实 现,所以为了得到涂层的一个相对耐磨性能,在 试验中使用了销盘试验来确定涂层的相对抗磨 损性能。



图 13 复合意愿曲面投影图

Fig. 13 Projection of the desirability surface

#### 表 10 最优参数及最优涂层质量

Table 10 Optimized parameter and coating quality

Optimized parameters									
KF/ (L•min <sup>-1</sup> )	λ	SOD/ mm	HF/ (L•min <sup>-1</sup> )	V/ (m•min <sup>-1</sup> )	BCP/ kPa	FCP/ MPa	CGF/ (L•min <sup>-1</sup> )	PFR/ (g•min <sup>-1</sup> )	NL/ mm
15.3	1.2	170	140	17.5	68.95	0	10	50	140
Optimized coating properties									
			MH/HV		E/ %	$P/\sqrt[9]{c}$	)	$R/\mu{ m m}$	
Theo	oretica	al	1584.2	3	6.68	0.9		1.58	
Real 1547.4		3	4.46	1.03	:	1.84			



(a)  $400 \times$ 

(b) 10 000 ×



为了模拟冲压过程中大量出现的微切削磨损,在销盘试验中首先使用氧化铝珠作为摩擦 副。图 15 分别是基体 45 钢、FTC-FeCSiMn 涂 层和 WC-12Co 涂层以氧化铝为摩擦副的磨损率 结果。

图中可以清楚看到,基体材料经过电弧喷涂

FTC-FeC-SiMn 涂层后可以把磨损系数降低 250 倍左右,而高速火焰喷涂的 WC-12Co 涂层 能把磨损率再次降低 250 倍左右,比起基体 45 钢 足足降低了 62 500 倍左右。所以高速火焰喷涂 的 WC-12Co 的涂层对抗微切削磨损具有非常优 秀的耐磨性。





为研究涂层对摩擦副的磨损,还用相对比较 软的不锈钢珠(100Cr6)作为摩擦副进行试验。 其试验结果(图 16)表示,由微细粉末沉积成的 WC-12Co涂层对不锈钢球产生的磨损非常微 小,并比电弧喷涂沉积的FTC-FeCSiMn涂层足 足减低了40倍。原因是FTC-FeCSiMn涂层中的 FTC颗粒(100微米级别,如图4)比WC-12Co涂 层中的WC颗粒(1微米级别,如图4)比WC-12Co涂 层中的WC颗粒(1微米级别,如图14)大100倍左 右。在跟不锈钢摩擦副对磨的时候,就像是砂纸 上的刚玉颗粒一样在摩擦副上产生一定量的微 切削磨损。而微细粉末形成的WC-12Co涂层, 相对来说产生的微切削磨损的量非常微小。





# 3 结 论

(1)由于电弧喷涂工艺相对简单,主要只受 4个的参数影响,数量较少,所以在试验中采用单次单因子法很快就能找到最优参数,制备成致密 和高硬度的涂层。

(2) 高速火焰喷涂工艺非常复杂,受到不同 的燃料量、氧气供给比等十个参数的影响。如果 使用传统的单次单因子法,试验数量将非常庞 大。因此必须采用试验设计法而减少试验数量, 逐级筛选重要参数,最后在几个少数的重要参数 中算出参数与性能间的关系式,并找出最优参数 的位置和对应的最优性能。

(3) 工艺参数最优化后,涂层的耐磨程度进行了研究和试验。试验数据表明,昂贵的高速火焰喷涂以及其高价的微细 WC-12Co 粉末,能使模具的抗磨损性能得到 4 个数量级的提高。同时廉价的电弧喷涂沉积的 FTC-FeCSiMn 涂层也能使抗磨性得到 2 个数量级的提升。但是由于 FTC-FeCSiMn 中存在着巨大的 FTC 颗粒, 会在摩擦副上产生一定量的微切削磨损。

在喷涂参数的优化后,下一步工作是将两种 涂层应用到冲压模具上。使用大量重复的冲压 试验来继续验证涂层的抗磨性能,并研究在高强 度条件下涂层剥落和形成裂痕等涂层失效问题。

# 参考文献

- [1] Mehlin M, Zimmer W. Ein weg für klimagerechte mobilität-das forschungsprojekt renewbility [J]. Internationales Verkehrswesen, 2010, 62(5): 10-15.
- [2] Amstad M, Hildebrand P. Erdölpreis und geldpolitik ein neues paradigma [J]. SNB Quartalsheft, 2005(3): 62-81.
- [3] Trechow P. Leichtbau wird materialmix des automobils massiv verändern [J]. VDI – Nachrichten, 2012, 66 (1): 9.
- [4] 吴子健,吴朝军,曾克里,等. 热喷涂技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [5] 张伟, 郭永明, 陈永雄. 热喷涂技术在产品再造领域的应 用及发展趋势[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 1-10.
- [6] Bach Fr W, Möhwald K, Dröβler B, et al. Technology and potential of wear resistant thermal spray coatings [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2005, 36(8): 353-359.
- [7] Tillmann W, Vogli E, Nebel J. Einfluss der spritzparameter auf die mechanischen und tribologischen eigenschaften von lichtbogengespritzten WSC – FeCSiMn schichten [C]. SFB 708-3. öffentliches Kolloquium, 2009: 141152.
- [8] Steeb S. Glasartige metalle [M]. Ehningen: expert-Verlag, 1990.
- Bobzin T, Schläfer T, Richardt K, et al. Microstructure and properlies of Fe-based wire arc sprayed coatings [J]. Materials Science and Engineering Technolgy 2008, 39 (12): 867-870.
- [10] Wilden J, Wank A, Schreiber F, Lichtbogenspritzen verstärkter selbstflieβender legierungen zum kombinierten korrosions und erosionsschutz [C]. Proceedings of

Plasmatage in Ilmenau, 1999.

- [11] He D, Fu B, Jiang J, et al. Microstructure and wear performance of arc sprayed Fe-FeB-WC coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17: 757.
- [12] Dallaire S, Levert H. Development of cored wires for improving the abrasion wear resistance of austenitic stainless steel [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6 (4): 456-62.
- [13] Steffens H, Brandl W. Moderne beschichtungsverfahren [M].
   Weinheim: Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, 2005.
- [14] Niemine R, Vuoristo P, Niemi K, et al. Rolling contact fatigue failure mechanisms in plasma and HVOF sprayed WC-Co coatings [J]. Wear, 1997, 212(1): 66-77.
- [15] Matthäus G. Neue HVOF anlagentechnologie für superfeine pulver-10 μm und innenbe-schichtung [C]. Proceeding of 6. Kolloquium Hochgeschwindigkeitsflammspritzen, 2003, 167-176.
- [16] Wang X, Heberlein J, Pfender E, et al. Effect of gas velocity and particle velocity on coating adhesion in wire arc spraying [C]. ITSC, 1996.
- [17] Wilden J, Bergmann J P, Jahn S. Einfluss der strom-spannungs-charakteristik auf die schichtbildung und - eigen-

schaften beim Lichtbogenspritzen [C]. Tagungsband zum 7. Werkstofftechnischen Kolloquium Neue Materialien und Verfahren in der Beschichtungstechnik, 2004, 95-100.

- [18] Tillmann W, Selvadurai U, Luo W F. Measurement of the young's modulus of thermal spray coatings by means of several methods [C]. ITSC, 2012.
- [19] Steffens H D, Dvorak M, Wewel M. Einfluss der prozessparameter beim lichtbogenspritzen [J]. Ein Leifaden für den Praktiker, 1990, 23-26.
- [20] Tillmann W, Vogli E, Baumann I. Manufacturing of HVOF sprayed, finest structured cermet coatings using fine WC-12Co powders (-8 +1 μm) [J]. Materials Science and Engineering Technology, 2008, 39 (12): 859 -866.
- [21] Weihs C, Jessenberger J. Statistische methoden zur qualitätssicherung und-optimierung [M]. Weinheim: WI-LEY-VCH Verlag, 1999.

作者地址: Leonhard-Euler-Str. 2, Dortmund, Germany Tel: 0049 231 755 7315

E-mail: weifeng. luo@udo. edu

# 《中国表面工程》期刊再次入编《中文核心期刊要目总览》

《中文核心期刊要目总览》2011 年版编委会依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、计算和分析,以及学科专家评审,从我国正在出版的14400余种中文期刊中评选出1982 种核心期刊。《中国表面工程》入编《中文核心期刊要目总览》2011 年版(即第六版)之金属学与金属工艺类的核心期刊。这是本刊继入编《中文核心期刊要目总览》2008 年版(即第五版)之后再次被评选为核心期刊,是《中国表面工程》期刊编委、广大读者和作者共同努力的结果,编辑部在此表示衷心的感谢并致以崇高的敬意。

近几年来,《中国表面工程》期刊内容日益丰富、载文量不断增加、影响力稳步上升。2009年,在 1946种中国科技期刊中综合排名第271位,学科内综合排名第4位。2010年影响因子为0.519。2012 年起期刊全新改版,设计和排版风格趋向专业与大气。今后编辑部将进一步提高期刊的学术性、指导 性和实用性,希望各位专家、作者和读者一如既往地关注和支持期刊。