等离子喷涂改善秸秆压块机模块耐磨性的研究

肖磊，马跃进，赵建国，曲平，张印勇
（河北农业大学 机电工程学院，保定 071001）

[摘 要] 针对当前秸秆压块机模块耐磨性差、易失效等问题，分析了模块失效机理，提出了采用等离子喷涂改善模块表面性能。通过试验，研究了电压、电流及喷涂距离等因素对材料耐磨性的影响，优化了等离子喷涂工艺参数。结果表明：喷涂电流的影响最为显著，其次是喷涂距离；等离子喷涂 Ni60＋50WC 涂层后，试样的抗磨损性能大幅提高。

[关键词] 压块机；模块；等离子喷涂；耐磨性
[中图分类号]TG174.442 [文献标识码]A [文章编号]1001-3660(2012)03-0087-03

Research on Enhancement of Wear Resistance of the Straw Press Block Module by Plasma Spraying Technology

XIAO Lei, *MA Yue-jin*, *ZHAO Jian-guo*, *QU Ping*, *ZHANG Yin-yong*
(Mechanical and Electrical Engineering College, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

[**Abstract**] In allusion to the problems of bad wear resistance and easy efficiency-losing, etc. of the current straw press block, the failure mechanism of the module was analyzed, a new technology on improving the properties of the module surface by plasma spraying was put forward. The effect of the voltage, electric current, spraying distance and so on on the material wear resistance was studied through test, the technological parameters of plasma spraying were optimized. The results show that the spraying current influences most significantly, and followed by the spraying distance; After the plasma spraying Ni60＋50WC coating sample, wear resistance of the test sample increases greatly.

[**Key words**] straw press block; module; plasma spraying; wear resistance

秸秆压块机的关键部件是模块，这也是最容易损坏的部位[1]。据统计，环模损耗费占整个生产车间维修费的 25％以上，每台饲料机每年报废 6～10 只压模，压辊 80 个左右，每年消耗模块上万只，折合人民币数千万元[2]。为提高模块的使用寿命，研究人员采用了气焊修复法、电弧喷涂法等强化方法。气焊法经济性好，但生产效率较低，焊接后，工件变形，热影响区较大；而关于电弧喷涂法，崔娜等[3]在秸秆压块机模块表面通过该方法喷涂 3Cr13，模块的抗磨损性能有所提高，但涂层结合强度不够，孔隙率过大。可见气焊及电弧喷涂都不能较好地解决模块寿命较低的问题。

文中采用等离子喷涂方法在模块表面喷涂 Ni60＋50WC 涂层，拟达到强化和修复失效秸秆压块机模块，延长模块使用寿命的目的。该方法有望降低饲料加工成本，增加饲料企业的经济效益[4]。

1 模块失效机理

模块在秸秆成形过程中起关键作用。物料在重力和压轮挤压力的共同作用下进入模孔，在压轮的高压作用下成形，由文献[5]可知，当秸秆成形温度在 140～200 ℃，成型压强为 4～8 MPa 时，可以形成比较致密的颗粒，满足成形效果和加工要求。如图 1 所示，模块受到压轮的压力(P)、物料的摩擦力(F)及其它模块的压力(N)。

压模工作时会受到很大的挤压力，而且原料中的砂砾、粉尘对环模内壁刃口和模孔壁产生摩擦磨损，使得模壁变薄，模孔变大。并且，环模和压辊挤压、轧碎原料中的粗砂和石块时，会产生很大的冲击，连续冲击会导致疲劳，当某次冲击产生的应力超过其屈服强度

[收稿日期]2012-03-09；[修回日期]2012-03-26
[基金项目]河北省杰出青年基金(E2011204036)
[作者简介]肖磊(1986－)，男，河北石家庄人，硕士生，主攻表面工程及智能控制。
[通信作者]马跃进(1958－)，男，工学博士，教授，博士生导师，主要研究方向为表面工程及智能控制。

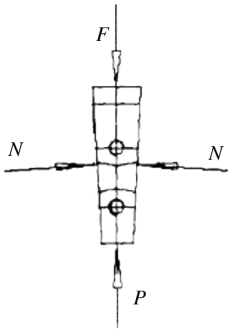


图 1　模块受力图

Fig. 1 Pictures of module forcing

时，压模就会破裂。所以，模块的失效形式主要是磨损破裂，以磨损为主。

2　试验

2.1　试样与前处理

试件为 25 mm×25 mm×7 mm 的 ZG200-400 铸钢板，等离子喷涂前，先用化学试剂清洗掉表面的油污和铁锈，然后经喷砂处理去除表面的氧化皮或其它氧化物，以增加涂层与基体的结合强度[6]。喷砂材料为 G14 激冷钢砂，粒径为 1.18～2 mm。

2.2　试验设计思路及具体方案

2.2.1　确定试验目标

秸秆压块机模块在工作过程中受到温度与压力的双重作用，而目前的主要问题是铸钢材料虽然具有较高的强度、塑性、韧性和耐磨性，但产品的生产主要是通过模块与压轮的挤压作用来实现的，其过程当中不可避免地会产生压力与热量，造成模块部分磨损失效，从而影响秸秆压块机的工作效率。根据现场调查，如果压块机能够持续工作，省掉停车时间，生产效率将大大提高。Ni60＋50WC 是添加了 50%（质量分数）碳化钨的自熔合金，可对抗严重的磨粒磨损，用于需要高度耐磨的工况。因此，试验中以 Ni60＋50WC 涂层的耐磨性能为研究目标，并对喷涂工艺参数进行设计和优化。

2.2.2　确定试验因素

当送粉量一定时，如果喷涂功率过小，则粉末的熔化效果将不理想，涂层中所夹杂的未熔化粉末过多，粉末不能在基体表面完全铺展，以致有较多的粉末损失，导致沉积效率降低，且涂层与基体的结合强度低；相反，若喷涂功率过大，即使粉末熔化完全，也可以充分铺展，但是由于粉末严重氧化、烧损，会使涂层中夹杂过多的烟尘，同样也会导致沉积效率降低，涂层的耐磨性能差且结合强度不高。在实际应用中，喷涂距离的影响也很大：若喷涂距离过小，粉末在焰流中不能受到完全的加热和加速，将导致涂层疏松，内应力变大，性能降低，且容易造成工件局部温度过高，使工件发生热变形；如果喷涂距离过大，将会使熔粒与基体和涂层撞击时的速度与温度都降低，以致熔粒变形不完全，使涂层气孔率增大，结合强度降低[7]。根据以上分析，认为喷涂电流 I、喷涂电压 U、喷涂距离 L 是影响涂层耐磨性能的主要因素。

以模块耐磨性为考察目标，按照 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行等离子喷涂试验，所用设备为 ZB-80 型等离子喷涂设备，表 1 为试验设计。其它喷涂工艺参数为：氩气压力 0.8 MPa，氢气压力 0.4 MPa，喷涂厚度 0.5 mm，送粉速率 38～42 g/min。

表 1　Ni60＋50WC 涂层喷涂试验因素及水平

Tab. 1 Factor and its level of Ni60＋50WC coating spraying experiment

编号	喷涂电流 I/A	喷涂电压 U/V	喷涂距离 L/mm
1#	600(1)	50(1)	100(1)
2#	600(1)	60(2)	150(2)
3#	600(1)	70(3)	200(3)
4#	650(2)	50(1)	150(2)
5#	650(2)	60(2)	200(3)
6#	650(2)	70(3)	100(1)
7#	700(3)	50(1)	200(3)
8#	700(3)	60(2)	100(1)
9#	700(3)	70(3)	150(2)

2.3　摩擦磨损试验及结果

用 HSR-2M 往复摩擦磨损试验机测试涂层的耐磨性能，设定载荷为 50 N，摩擦时间为 30 min，摩擦速度为 500 r/min，摩擦方式为干摩擦。在进行摩擦磨损试验前，对涂层进行抛光，避免表面粗糙度对摩擦因数的影响，使试验结果能够反映出硬质涂层自身的耐磨性能[8]。9 个试件试验前后，用 BSA224S 型分析天平称量，根据磨损前后的质量损失情况来评价涂层的耐磨性。每个试件测试 3 次，取平均值。磨损失重测试结果见表 2，磨损级差分析见表 3，方差分析见表 4。

表 2　涂层磨损失重测试结果

Tab. 2 Test result on coating attrition weightlessness

编号	磨损质量损失/mg			平均质量损失/mg
1#	3.32	2.76	2.35	2.81
2#	1.93	2.47	2.29	2.23
3#	2.11	2.58	2.69	2.46
4#	1.73	1.77	1.48	1.66
5#	1.72	2.08	1.87	1.89
6#	1.54	1.69	1.90	1.71
7#	1.38	1.53	1.50	1.47
8#	1.40	1.23	1.33	1.32
9#	0.98	1.17	1.15	1.10

表 3　磨损级差分析结果

Tab.3 Analysis result of friction differential　mg

因素	T_1	T_2	T_3	T_{1AV}	T_{2AV}	T_{3AV}	R
喷涂电流	7.5	5.26	3.89	2.50	1.75	1.30	1.20
喷涂电压	5.94	5.44	5.27	1.98	1.81	1.76	0.22
喷涂距离	5.84	4.99	5.67	1.95	1.66	1.89	0.29

注：T_1，T_2，T_3 分别为某因素 1 水平、2 水平、3 水平三次试验的结果之和，而 T_{1AV}，T_{2AV}，T_{3AV} 分别为其均值，R 为极差。

表 4　方差分析

Tab.4 Analysis of variance

方差来源	离差平方和 S	自由度 f	均方 S/f	F 统计量	显著性
I	2.20	2	1.10	55	* 最显著因素
U	0.08	2	0.04	2	[*]最不显著
L	0.40	2	0.20	10	(*) 一般因素
误差(e)	0.04	2	0.02		
总和(T)	2.72	8			

注：F_a：$F_{0.10}(2,2)=9$，$F_{0.05}(2,2)=19$。

3　试验结果与分析

3.1　摩擦磨损试验数据分析

根据表 3 中的 R 值可知，喷涂电流的影响最大，其次是喷涂距离，影响最小的是喷涂电压。由 T_{1AV}，T_{2AV}，T_{3AV} 可确定各因素的最佳水平组合为 $I_3U_3L_2$，即喷涂电流 700 A，喷涂电压 70 V，喷涂距离 150 mm。由表 3 数据可知，影响涂层耐磨性的因素主要有两个方面：

1）喷涂电流。当喷涂电流为 600 A 时，涂层的摩擦磨损失重较严重，平均质量损失最大，如 1# 试验的质量损失达到 2.81 mg。当喷涂电流增加到 700 A 时，磨损失重波动减小，平均质量损失最小，如 9# 试验仅为 1.30 mg。

2）喷涂距离。当喷涂电流不变，喷涂距离为 150 mm 时，涂层的耐磨性最好，如 2#，4# 和 9# 试验的摩擦磨损失重比相同电流条件下的其它两组试验都小，表明抗摩擦磨损能力好。

由表 4 可知：$F_I=55>19$，说明喷涂电流对涂层的耐磨性影响最大，为高度显著；$19>F_L=10>9$，说明喷涂距离对涂层耐磨性能的影响次之，为影响显著；而 $F_U=2<9$，说明喷涂电压对涂层耐磨性的影响较小，为最不显著因素。

3.2　表征结果分析

用 LEICADM 4000m 光学显微镜观察 9# 试件经过等离子喷涂后的结合截面形貌（如图 2 所示），并用 MH-6 显微硬度计测其显微硬度。图 2 中的菱形标记是测试显微硬度时的压痕（左边为涂层，右面为基体），在系统砝码 200 g 的作用下，可以明显看出涂层的硬度高于基体硬度。表面涂层硬度最大处达到 1 020HV，铸钢基体的平均硬度约为 265HV，而涂层的平均硬度约为 982HV，涂层的硬度大约是基体硬度的 4 倍。

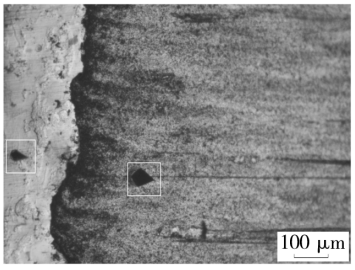


图 2　试样截面显微组织 100×

Fig. 2 Microstructure pictures of section specimen 100×

图 3 为 9# 试件和基材摩擦系数与滑动时间的关系对照曲线图。从图 3 可看出：在磨损试验初期，基材的摩擦系数由 1.0 左右下降到 0.53，又上升到 0.81，而之后呈现逐渐平稳的态势，最终的摩擦系数稳定在 0.89 左右；喷涂 Ni60＋50WC 涂层的 9# 试件，刚开始时，由于金刚石刚与试件接触，磨损尚未稳定，摩擦系数有一些轻微波动，5 s 之后，摩擦系数趋于平稳，最后稳定在 0.37 左右。由此说明，Ni60＋50WC 涂层的表面硬度高，耐磨性好。

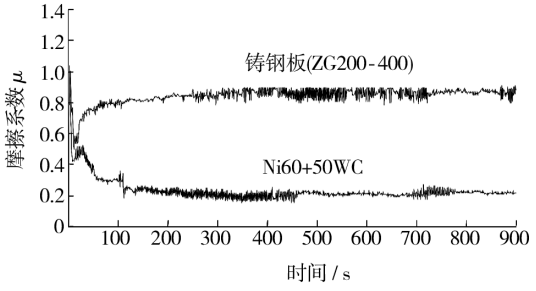


图 3　摩擦系数与滑动时间的关系

Fig. 3 Relationship curve on friction coefficient and sliding time

4　结论

1）涂层的耐磨性主要受喷涂电流、喷涂距离、喷涂电压等工艺参数的影响，其中，喷涂电流的影响最为显著，其次是喷涂距离。

2）获得具有良好耐磨性能的涂层的最佳工艺参数为：喷涂电流 700 A，喷涂距离 150 mm，喷涂电压 70 V。等离子喷涂 Ni60＋50WC 涂层后，ZG200-400 铸钢板表面的抗磨损性能显著提高。

（下转第 93 页）

表 2　PI 薄膜处理前后的 XPS 分析结果

Tab.2 XPS analysis result of PI film before and after treatment

PI 样品	元素的原子数分数/%		
	C	O	N
未处理	71.11	21.25	7.64
处理后	65.97	26.55	7.48

3　结论

经过等离子体处理的聚酰亚胺薄膜，其亲水性得到显著的提高，且与铜箔的剥离强度明显增大。主要原因是等离子体处理后，薄膜表面刻蚀效果明显，表面引入了羧基、羟基等含氧极性基团，从而改善了界面，提高了粘合剂对材料的粘附强度。

[参　考　文　献]

[1] 崔永丽，张仲华，江利，等. 聚酰亚胺的性能及应用[J]. 塑料科技，2005(6)：50－53.

[2] 来育梅. 热塑性聚酰亚胺及其改性材料的热性能研究[D]. 南京：南京工业大学，2006.

[3] 马进，吴臣国，吴佩璇，等. 等离子体轰击致聚酰亚胺表面亲水性研究[J]. 真空科学与技术学报，2009，29(6)：664－668.

[4] KIM Soo Hong，SUN Woong Na，LEE N-E，et al. Effect of Surface Roughness on the Adhesion Properties of Cu/Cr Films on Polyimide Substrate Treated by Inductively Coupled Oxygen Plasma[J]. Surface & Coatings Technology，2005，200：2072－2079.

[5] KOH Seok-Keun，PARK Sung-Chul，KIM Sung-Ryong，et al. Surface Modification of Polytetrafluoroethylene by Ar + Irradiation for Improved Adhesion to Other Materials [J]. Journal of Applied Polymer Science，1997，64(10)：1913－1921.

[6] SOON Cheon Cho，YONG Cheol Hong，SOON Gook Cho，et al. Surface Modification of Polyimide Films，Filter Papers，and Cotton Clothes by HMDSO/Toluene Plasma at Low Pressure and Its Wettability[J]. Current Applied Physics，2009(9)：1223－1226.

[7] 雷渭媛，许亚洪，吴志文，等. 表面改性芳纶复合材料的界面粘结与界面断裂韧性[J]. 玻璃钢/复合材料，1996(1)：35－37.

[8] 沈丽，曹淑华，胡田，等. 等离子体预处理的芳纶织物涂料印花性能[J]. 印染，2010(1)：13－15.

[9] SHEN Li，DAI Jin-jin. Improvement of Hydrophobic Properties of Silk and Cotton Surfaces by Hexafluoropropene Plasma[J]. Applied Surface Science，2007，253(11)：5051－5055.

[10] 李娟，陈强，杨丽珍. 等离子体技术表面改性高分子材料的研究进展[J]. 北京印刷学院学报，2008(12)：77－79.

[11] HOCKER H. Plasma Treatment of Textile Fibers[J]. Pure Appl Chem，2002，74：423－427.

[12] 陈平，王静，贾彩霞，等. 芳纶纤维表面等离子体改性对其复合材料界面性能的影响[C]//第十届绝缘材料与绝缘技术学术交流会论文集. 北京：中国电工技术学会，2008：355－360.

[13] 梁静，戴瑾瑾. 氧等离子体对丙纶涂料印花性能的研究[J]. 纺织学报，2004，25(4)：51－54.

[14] SHEU G S，SHYU S S. Surface Modification of Kevlar 149 Fibers by Gas Plasma Treatment. Part I. Morphology and Surface Characterization[J]. Journal of Adhesion Science and Technology，1994，4(5)：531－542.

[15] SHEU G S，SHYU S S. Surface Modification of Kevlar 149 Fibers by Gas Plasma Treatment. Part II. Improved International Adhesion to Expoxy Resin[J]. Journal of Adhesion Science and Technology，1994，8(9)：1027－1042.

[16] DAVID A B，GERALD P，YVES D. Application of the Microbond Technique IV. Improved Fiber-matrix Adhesion by RF Plasma Treatment of Organic Fiber[J]. Journal of Applied Polymer Science，1993，47(5)：883－894.

(上接第 89 页)

[参　考　文　献]

[1] 张志强. 秸秆压块饲料机成型区的研究与分析[D]. 保定：河北农业大学，2007.

[2] 阳向军. 卧式环模制粒机环模失效原因浅析[J]. 饲料工业，2003(9)：13－16.

[3] 崔娜，赵建国，时君伟，等. 秸秆压块机模块电弧喷涂耐磨性的研究[J]. 中国新技术新产品，2009(18)：11－12.

[4] 张涛. 电弧喷涂工艺对饲料压块机模块耐磨性的研究[D]. 保定：河北农业大学，2009.

[5] 马孝琴. 生物质(秸秆)成型燃料燃烧动力学特性及液压秸秆成型机改进设计研究[D]. 郑州：河南农业大学，2002.

[6] 姚寿山，李戈扬，胡文彬. 表面科学与技术[M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[7] 刘扬. 等离子喷涂提高铸铝压铸膜性能的研究[D]. 保定：河北农业大学，2011.

[8] 陈飞，陈家庆，刘鹏程，等. 牙轮钻头金属密封环表面喷涂 WC-Co 涂层耐磨性研究[J]. 表面技术，2009，38(5)：1－5.