

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.06.014

激光打标参数对黑色无卤阻燃尼龙打标效果的影响

梁惠强¹,李皓¹,钟毅文¹,周敏¹,张现军²,金雪峰²

(1. 广东金发科技有限公司,广东清远 511545; 2. 金发科技股份有限公司,广州 510663)

摘要:通过激光打标机在不同参数设计下对黑色次磷酸盐阻燃尼龙 66 (PA66) 与 MCA 阻燃 PA6 材料进行激光打标,运用工作矩阵判断激光打标效果,通过可量化的评价手段,研究了不同激光打标参数如不同电流强度、步长和频率对两种材料激光打标效果的影响,最终选出对应材料的最佳打标工艺参数。结果表明,次磷酸盐阻燃 PA66 材料在电流强度为 16 A、频率为 1~2.5 kHz、步长为 0.001~0.0175 mm 范围内可以打标出满意的效果;MCA 阻燃 PA6 材料在电流强度为 16 A、频率为 1~3 kHz、步长为 0.006~0.024 mm 范围内可以打标出满意的效果。

关键词:激光打标;阻燃尼龙;电流强度;步长;频率

中图分类号:TQ323.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2019)06-0076-05

Impacts of Laser Marking Parameters on Black Halogen-free Flame-retardant Nylon Marking Effects

Liang Huiqiang¹, Li Hao¹, Zhong Yiwen¹, Zhou Min¹, Zhang Xianjun², Jin Xuefeng²

(1. Guangdong Kingfa Sci. & Tech. Co., Ltd., Qingyuan 511545, China; 2. Kingfa Sci. & Tech. Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Through laser marking of black hypophosphite flame-retardant nylon 66 (PA66) and melamine cyanurate (MCA) flame-retardant PA6 materials by laser marking machine under different parameter design, the effects of different laser marking parameters such as different current intensity, step-size or frequency on the laser marking effect were studied. The best laser marking parameters of the corresponding materials were selected according to the laser marking effects which judged by laser making matrix through quantifiable evaluation method. The results show that the hypophosphite flame-retardant PA66 can get satisfactory laser marking effect at a current intensity of 16 A, a frequency of 1~2.5 kHz and a step size of 0.001~0.0175 mm. MCA flame-retardant PA6 can get satisfactory laser marking effect at a current intensity of 16 A, a frequency of 1~3 kHz and a step size of 0.006~0.024 mm.

Keywords: laser marking; flame-retardant nylon; current intensity; step-size; frequency

激光打标技术作为一种现代精密加工方法,与丝网印刷、转移印刷和油墨印等传统加工方法相比,具有标记速度快,字迹清晰、永久,非接触式加工,环保且无磨损,操作方便,防伪功能强,以及生产成本低等独特的优势,激光加工系统与计算机数控系统结合构成的高效自动化设备,可以打出各种文字、符号和图案,而且长时间不易磨损与退色^[1-2]。激光打标机将产生的激光通过开关调制后形成脉冲激光,再经过光学扫描与聚焦后到达可以上下移动的工作台面。激光打标加工时,通过在专用控制软件中设定文字、图样、总标刻面积、激光束的行走速度和重复次数等,在计算机控制下进行打标工作^[3-4]。

尼龙 (PA) 作为一种重要的高分子材料,广泛应用于服装、汽车、国防和航天等多个领域^[5-6],其中汽车、电子电器、家用电器和通讯设备等领域均要求 PA 材料具有较高的阻燃性能^[7]。随着人们生活水平的提高和环境意识的加强,对无卤阻燃 PA 的开发呼声日趋高涨。在满足低毒、低发烟和高耐热的同时,选择能使 PA 材料力学性能保持率高的无卤阻燃剂和对各种阻燃剂间协同效应的研究是目前无卤阻燃 PA 研究与开发的重点^[8]。

金发科技已开发出多种无卤阻燃 PA 材料,其中采用次磷酸盐和 3-三聚氰胺氰尿酸盐 (MCA) 无卤阻燃剂制备的黑色无卤阻燃 PA 具有低烟、低毒、高

通讯作者:梁惠强,硕士,主要从事高分子材料的改性研究 E-mail: lianghuiqiang@kingfa.com.cn

收稿日期:2019-03-13

引用格式:梁惠强,李皓,钟毅文,等.激光打标参数对黑色无卤阻燃尼龙打标效果的影响[J].工程塑料应用,2019,47(6):76-80.

Liang Huiqiang, Li Hao, Zhong Yiwen, et al. Impacts of laser marking parameters on black halogen-free flame-retardant nylon marking effects[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(6): 76-80.

相对耐漏电起痕指数 (CTI) 值和良好的力学性能^[9-10],被广泛应用于电子、电气和家电等行业。在这些行业中,采用无卤阻燃 PA 制造的大部分部件表面都需有相关文字说明或图案标识,因此,对无卤阻燃 PA 部件的标记是这些产品生产过程中的重要工序。因此,随着无卤阻燃 PA 材料的应用发展,对其进行激光打标研究就显得尤为必要。

目前,激光打标技术在高端产品的标识和记忆等方面被广泛应用,为了获得较好的激光打标效果,除了在材料中加入激光打标助剂,选择合适的激光打标工艺参数也非常重要。现有激光打标工艺研究主要针对聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT)^[11]、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS)^[12] 和聚丙烯 (PP)^[13] 等材料,而对 PA 材料的激光打标工艺研究较少,叶士兵等^[14] 研究了打标工艺对非阻燃 PA6 材料打标效果的影响,研究表明,合适的电流、频率和扫描速度引发材料表面发泡,可以获得亮度较高的标记效果。魏华等^[15] 针对 PA 壳体激光标记出现图形、字迹模糊和不清晰的问题,通过对不同打标方法和打标参数的实验研究,找到了适合于 PA 壳体的激光标刻的工艺参数,但其通过目测进行评价打标效果,缺少可量化的评价手段,容易造成误判。笔者在具有激光打标功能的黑色次磷酸盐阻燃 PA66 和 MCA 阻燃 PA6 两种典型无卤阻燃 PA 材料基础上,通过可量化的评价手段,探讨了不同激光打标工艺参数对其打标效果的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

次磷酸盐阻燃 PA66, MCA 阻燃 PA6: 黑色,自制。

1.2 主要仪器及设备

注塑机: BT80-560T 型, 博创机械股份有限公司;

激光打标机: Nd-YAG 型, 深圳大族激光科技有限公司;

色差仪: Ultra Scan XE 型, 美国 Hunter Lab 有限公司。

1.3 试样制备

先将材料在 120℃ 条件下干燥 4 h, 之后在注塑机上加工成型标准测试色板 (50 mm × 80 mm × 2 mm)。次磷酸盐阻燃 PA66 的三段注塑温度依次为 270, 280, 290℃; MCA 阻燃 PA6 的三段注塑温度依次为 240, 250, 260℃。注射速度为注塑机最大注

射速率的 99%, 注塑压力为最大注塑压力的 99%, 保压时间为 2 s, 冷却时间为 4 s, 模具温度为 80℃。

1.4 实验方法

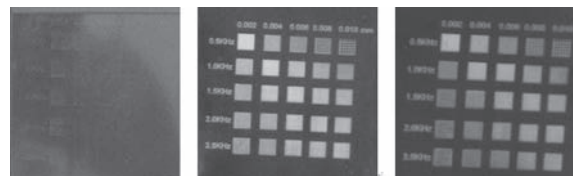
将注塑成型的标准色板在激光打标机上进行激光打标, 重点考察不同电流强度、频率与步长三个工艺参数组合对无卤阻燃 PA 激光打标效果的影响, 观察打标工作矩阵最佳效果点。通过测试矩阵内外的色差 (ΔE) 值反映打标对比度并评价打标效果。

2 结果与讨论

2.1 电流强度对材料打标效果的影响

激光打标机通过发射波长 1064 nm 的红外激光, 利用激光光斑的移动, 以脉冲方式输出, 使材料表面受热熔融发泡或炭化, 从而达到打标的目的。激光打标时, 通过激光打标机的脉冲输出在材料表面形成间断的线条, 最终组成完整的打标图案, 线条的宽度和颜色决定了打标图案的精确程度和色彩表现。本实验通过打标工作矩阵组合的图案外观来评价打标效果的优劣。在采用激光打标机打标时, 影响激光打标效果的因素较多, 如激光打标机的焦距、线宽、电流强度、频率与步长等。激光打标机在工作时由于要加工不同厚度的工件, 所以需要具备工作焦距调节的功能, 其实质就是一套能上下调节的机械结构。打标机的线宽影响打标的精细程度, 最小线宽越小代表打标越精确, 清晰度越高。本实验是在已经调整好激光打标机的焦距 (70 mm) 与线宽 (0.1 mm) 的条件下, 重点评估电流强度、频率与步长对次磷酸盐阻燃 PA66 和 MCA 阻燃 PA6 两种材料的打标效果的影响。

电流强度直接关系到激光输出能量的大小, 电流强度越大, 能量越大。不同电流强度下次磷酸盐阻燃 PA66 的激光打标工作矩阵如图 1 所示。



(a) (b) (c)
工作矩阵的横标数据为步长, 从左到右依次为
0.002, 0.004, 0.006, 0.008, 0.010 mm;
工作矩阵的纵标数据为频率, 从上到下依次为
0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 kHz
电流强度: a—14 A; b—16 A; c—17 A

图1 不同电流强度下次磷酸盐阻燃 PA66 的激光打标工作矩阵

从图 1a 可以看出, 当电流强度为 14 A 时, 由于电流强度较小, 输出能量较低, 在次磷酸盐阻燃

PA66 上标刻的工作矩阵效果差,几乎看不出打标工作矩阵。当电流强度提高至 16 A 时,如图 1b 所示,在一定的频率(1~2.5 kHz)、步长(0.002~0.008 mm)设置下,能够显现出打标工作矩阵。当电流强度继续提高至 17 A 时,如图 1c 所示,同样可显现出打标工作矩阵,但打标工作矩阵有明显变黄与边界模糊不良现象。这是由于电流强度过大,积聚在表面的能量过高,导致材料表面烧焦和降解,从而出现图案发黄、发黑^[16]。此外,次磷酸盐阻燃剂在较大能量作用时会分解产生较多磷酸和焦磷酸促进 PA66 降解成炭^[17],较多炭化物容易导致图案发黑与麻点等不良现象。

激光打标前后色板的 ΔE 会发生变化,采用 ΔE 表征打标后的色块与未打标色块的颜色差异。 ΔE 越大,打标的对比度越好,打标效果越好;反之, ΔE 越小,打标的对比度越差,打标效果可能无法分辨,或者说目测比较难判断^[1]。不同电流强度下次磷酸盐阻燃 PA66 打标前后的 ΔE 及打标效果列于表 1。

表 1 不同电流强度下次磷酸盐阻燃 PA66 打标前后的 ΔE 及打标效果

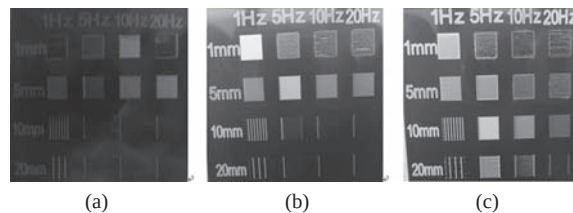
电流强度 / A	ΔE	水花	麻点	清晰度	对比度
14	0.31	无	无	差	差
16	3.24	无	无	较好	较好
17	3.02	有	有	一般	一般

注:频率为 0.5~2.5 kHz,步长为 0.002~0.010 mm。

从表 1 可以看出,在频率为 0.5~2.5 kHz 和步长为 0.002~0.010 mm 条件下,当电流强度为 14 A 时, ΔE 仅为 0.31,打标效果较差;当提高至 16 A 时, ΔE 达到 3.24,打标效果较好;当提高至 17 A 时, ΔE 为 3.01,虽然 ΔE 也较大,但由于发黄、发黑和炭化物导致打标的清晰度欠佳。

不同电流强度下 MCA 阻燃 PA6 的激光打标工作矩阵如图 2 所示,表 2 给出相应的 ΔE 和打标效果。

从图 2 和表 2 可以看出,对 MCA 阻燃 PA6 进行激光打标,在电流强度为 14 A 时就可以打标出较为清晰的效果。这是由于 PA6 的熔点比 PA66 低,较低能量就可以使材料熔融发泡。此外, MCA 的加入降低了 PA6 的热稳定性,当激光打标能量作用在 MCA 阻燃 PA6 上时, MCA 与 PA6 发生相互作用从而导致催化分解,分解产生水和氮气等不燃气体促使材料表面膨胀发泡^[18]。当电流强度增加到 16 A 时,打标效果变得更为清晰,大部分工作矩阵



工作矩阵的纵标数据为步长,图中 1 mm 代表实际 0.006 mm,

从上到下实际步长依次为 0.006, 0.03, 0.06, 0.12 mm;

工作矩阵的横标数据为频率,图中 1 Hz 代表实际 1 kHz,从左到右

实际频率依次为 1, 5, 10, 20 kHz

电流强度: a—14 A; b—16 A; c—17 A

图 2 不同电流强度下 MCA 阻燃 PA6 的激光打标工作矩阵

表 2 不同电流强度下 MCA 阻燃 PA6 打标前后的 ΔE 及打标效果

电流强度 / A	ΔE	水花	麻点	清晰度	对比度
14	3.19	无	无	差	差
16	7.42	无	无	较好	较好
17	8.16	无	有	好	好

注:频率为 0.5~2.5 kHz,步长为 0.006~0.120 mm。

能显示出来。而当电流强度达到 17 A 时,虽然打标的对比度较高,但有明显的变黄和边界模糊不清的不良现象。

从表 2 还可见,激光打标前后色板的 ΔE 发生了明显变化,在频率为 0.5~2.5 kHz 和步长为 0.006~0.120 mm 条件下,当电流强度为 14 A 时, ΔE 为 3.19,但打标的清晰度较差;当提高至 16 A 时, ΔE 达到 7.42,打标效果较好;当提高至 17 A 时, ΔE 为 8.16, ΔE 更大,清晰度更佳,但由于打标有麻点,使打标效果变差。

由上述打标结果可知,对于不同材料需要调整合适的电流强度,若电流强度太低,则不能打出图案或图案太浅,难以辨别;电流强度过高,激光打标图案会因能量过高导致材料炭化和烧焦。所以,不同材料需要与之匹配的基本电流强度才能达到较好的打标效果。在本实验中,当电流强度达到 16 A 时,次磷酸盐阻燃 PA66 和 MCA 阻燃 PA6 两种材料的打标效果均最好。

2.2 频率与步长对材料打标效果的影响

频率是指单位时间内激光出光的数目,在相同电流强度条件下,频率低,则峰值功率高,激光输出能量大,同时每个点的作用时间长,从而增加了每个作用点的打标深度,比较适合标刻深的图案;频率高,则作用线条的连续性好,打标的底纹比较光滑、平整。步长是指单位时间内激光移动的距离。在这些参数中,步长与频率的联系最为紧密,通常需要二者相匹配才能打标出较好的效果,如果步长较大,则

频率就不能太低,否则会出现线条不连续等不良现象^[19-20]。

当电流强度为 16 A 时,在不同频率和步长下,次磷酸盐阻燃 PA66 的激光打标工作矩阵如图 3 所示。

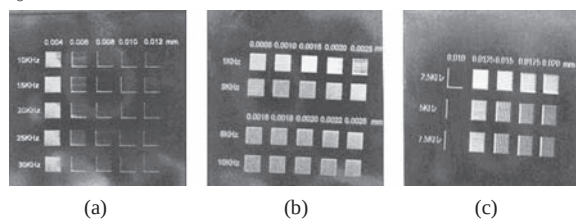


图 3 不同频率和步长下次磷酸盐阻燃 PA66 的

激光打标工作矩阵 (电流强度为 16 A)

工作矩阵的纵标数据为频率,从上到下:

a—10,15,20,25,30 kHz;

b—1,3,5,10 kHz;c—2.5,5,7.5 kHz

工作矩阵的横标数据为步长,从左到右:

a—0.004,0.006,0.008,0.010,0.012 mm;

b—0.0005,0.001,0.0015,0.002,0.0025 mm;

c—0.01,0.0125,0.015,0.0175,0.02 mm

图 3 不同频率和步长下次磷酸盐阻燃 PA66 的

激光打标工作矩阵 (电流强度为 16 A)

由图 3a 可以看出,当步长为 0.004 mm、频率为 10~30 kHz 时,打标效果没有太大变化;而当频率为 10~30 kHz,步长从 0.004 mm 增加到 0.012 mm 时,都没有较清晰的激光打标效果。由图 3b 可以看出,将频率控制在 10 kHz 以下,即频率从 1 kHz 增加到 10 kHz、步长从 0.0008 mm 增加到 0.0025 mm 时,可以看出,当频率为 1 kHz、步长为 0.001~0.002 mm 以及频率为 3 kHz、步长为 0.002~0.0025 mm 时,打标的效果较好。由图 3c 可以看出,设定频率从 2.5 kHz 增加到 7.5 kHz,步长从 0.01 mm 增加到 0.02 mm,可以看出,当频率为 2.5 kHz、步长为 0.0125~0.0175 mm 时也有较好的激光打标效果。由上述可知,当电流强度为 16 A 时,频率为 1~2.5 kHz、步长为 0.001~0.0175 mm 时,可以打标出满意的效果。从图 3 的三个工作矩阵可以看出,频率和步长是互相配合的,若要得到较好的激光打标效果,在保证具有一定功率值的前提下,需同时调整步长和频率才能达到较好的效果。

当电流强度为 16 A 时,在不同频率和步长下,MCA 阻燃 PA6 的激光打标工作矩阵如图 4 所示。

由图 4a 可以看出,当频率控制在 1~20 kHz 时,将步长从 0.06 mm 增加到 0.18 mm,打标效果越来越差。将步长控制在 0.06~0.18 mm,将频率从 1 kHz 增加到 20 kHz 时,打标的效果先变好后变差,在频率为 5 kHz 时打标效果最佳。由图

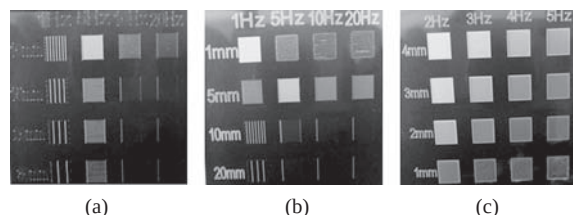


图 4 不同频率和步长下 MCA 阻燃 PA6 的

激光打标工作矩阵 (电流强度为 16 A)

工作矩阵的横标数据为频率,图中 1 Hz 代表实际 1 kHz,

从左到右实际频率依次为:a—1,5,15,20 kHz;

b—1,5,15,20 kHz;c—2,3,4,5 kHz

工作矩阵的纵标数据为步长,1 mm 代表实际 0.006 mm,

从上到下实际步长依次为:a—0.06,0.09,0.12,0.18 mm;

b—0.006,0.03,0.06,0.12 mm;c—0.024,0.018,0.012,0.006 mm

图 4 不同频率和步长下 MCA 阻燃 PA6 的

激光打标工作矩阵 (电流强度为 16 A)

4b 可以看出,将频率控制在 1~20 kHz,当步长从 0.006 mm 增加到 0.12 mm 时,只有步长在 0.006~0.03 mm 范围内时打标的效果较好。由图 4c 可以看出,进一步将步长控制在 0.006~0.024 mm,当频率从 2 kHz 增加到 5 kHz 时,打标效果都较好,且在 2~3 kHz 范围内打标效果更好,图案更清晰。因此与 MCA 阻燃 PA6 匹配的频率与步长的参数范围为:频率为 1~3 kHz、步长为 0.006~0.024 mm。

3 结论

(1) 对于次磷酸盐阻燃 PA66,当电流强度为 16 A、频率为 1~2.5 kHz、步长为 0.001~0.0175 mm 时可以打标出满意的效果。

(2) 对于 MCA 阻燃 PA6,当电流强度为 16 A、频率为 1~3 kHz、步长为 0.006~0.024 mm 时可以打标出满意的效果。

参考文献

- [1] 岑茵,田征宇,何继辉,等. 颜料和填料对高光聚碳酸酯激光打标的影响[J]. 工程塑料应用,2015,43(12):96-98.
Cen Yin, Tian Zhengyu, He Jihui, et al. Impacts of pigment blacks and fillers on high-gloss polycarbonate laser marking process[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(12):96-98.
- [2] 徐亮,周勇. 高清晰激光打标尼龙的研究[J]. 企业科技与发展, 2016(10):36-38.
Xu Liang, Zhou Yong. Study on high definition laser marking nylon[J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2016(10):36-38.
- [3] 王力何,马殿光. 激光打标机的发展趋势及其控制系统设计[J]. 机电信息,2015(3):103-104.
Ma Lihe, Ma Dianguang. Development trend of laser marking machine and its control system design[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(3):103-104.
- [4] 陈大江,孙传金,刘丰丰,等. 电气产品激光打标技术研究进展[J]. 电工材料,2018(1):24-28.

- Chen Dajiang, Sun chuanjin, Liu Fengfeng et al. Research progress of laser marking on plastics specially applied in switchgears [J]. Electrical Engineering Materials, 2018(1):24-28.
- [5] 董建勋,何泽涵,杨光杰,等. 我国尼龙 6 和尼龙 66 发展研究 [J]. 能源与环保, 2018, 40(6):162-164.
- Dong Jianxun, He Zehan, Yang Guangjie, et al. Study on development of nylon 6 and nylon 66 in China[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(6):162-164.
- [6] 鲁哲宏,班大赛,李豪,等. 阻燃改性尼龙研究进展 [J]. 化学研究, 2018, 29(3):310-316.
- Lu Zhehong, Ban Dasai, Li Hao, et al. Research progress of flame retardant modified nylon [J]. Chemical Research, 2018, 29(3):310-316.
- [7] 夏学莲,史向阳,赵海鹏,等. 工程塑料尼龙在机械零件中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(2):128-132.
- Xia Xuelian, Shi Xiangyang, Zhao Haipeng, et al. Application of nylon engineering plastics in mechanical parts field[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(2):128-132.
- [8] 许光晟,胡宏军. 阻燃尼龙的制备与性能分析研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):147-150.
- Xu Guangsheng, Hu Hongjun. Progress of preparation and performance analysis of flame retardant nylon[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):147-150.
- [9] 王丰,梁惠强,金雪峰,等. MCA 阻燃 PA66 的研究 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(2):104-107.
- Wang Feng, Liang Huiqiang, Jin Xuefeng, et al. Study on MCA flame retardant PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(2):104-107.
- [10] 吴长波,郑一泉,金雪峰,等. 缩合磷酸铝在二乙基次磷酸铝阻燃 PA66 / GF 材料中应用评估 [J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(5):15-18, 38.
- Wu Changbo, Zheng Yiquan, Jin Xuefeng, et al. The application assessment of aluminium phosphate used in aluminium diethyl phosphonate flame retarded PA66 / GF composite[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(5):15-18, 38.
- [11] 殷年伟,卢立波,陈锐,等. 黑色 PBT 材料激光打标工艺研究及数学模型的建立 [J]. 塑料工业, 2018, 46(3):128-134.
- Yin Nianwei, Lu Libo, Chen Rui, et al. Study on laser marking process of black PBT material and establishment of mathematical model[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(3):128-134.
- [12] 蒋世磊,杨国锋,张锦,等. ABS 材料红外激光打标工艺参数分析 [J]. 光学仪器, 2015, 37(2):142-145.
- Jiang Shilei, Yang Guofeng, Zhang Jin, et al. Analysis of infrared laser marking technical parameters of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer[J]. Optical Instruments, 2015, 37(2):142-145.
- [13] 胡崇镜,闫飞,俞鸿斌,等. 聚丙烯塑料激光打标工艺研究 [J]. 应用激光, 2015, 35(3):351-355.
- Hu Chongjing, Yan Fei, Yu Hongbin, et al. Technological research on polypropylene plastics using laser marking[J]. Applied Laser, 2015, 35(3):351-355.
- [14] 叶士兵,张超,谭麟,等. 黑色玻纤增强尼龙 6 激光标记工艺及配方设计 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(2):53-59.
- Ye Shibing, Zhang Chao, Tan Lin, et al. Technology and formula design of laser marking of black glass-fiber-reinforced PA6[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):53-59.
- [15] 魏华,熊艳莉. 针对尼龙壳体的激光标刻工艺研究 [J]. 科技创新与应用, 2015(26):1-2.
- Wei Hua, Xiong Yanli. Study on laser marking technology for nylon shell[J]. Technology Innovation and Application, 2015(26):1-2.
- [16] 岑茵,孙东海,叶南彪,等. 打标工艺对高光聚碳酸酯激光打标的影响 [J]. 塑料工业, 2013, 41(10):102-105.
- Cen Yin, Sun Donghai, Ye Nanbiao, et al. Impacts of laser marking progress on high-gloss polycarbonate[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(10):102-105.
- [17] 班大赛,鲁哲宏,康兴隆,等. 阻燃 PA66 / 二乙基次磷酸铝复合材料的制备 [J]. 化学研究, 2018, 29(5):465-468.
- Ban Dasai, Lu Zhehong, Kang Xinglong, et al. Study on flame retardant PA66 / diethyl-phosphatealuminum composites[J]. Chemical Research, 2018, 29(05):465-468.
- [18] 傅轶凡,侯伟,曾岑,等. 氮系阻燃 PA6 的制备与结构性能研究 [J]. 河南工程学院学报:自然科学版, 2018, 30(2):44-47.
- Fu Yifan, Hou Wei, Zeng Cen, et al. Preparation of FRPA6 and its properties[J]. Journal of Henan University of Engineering: Natural Science Edition, 2018, 30(2):44-47.
- [19] 王建平,李正佳,范晓红. 激光打标系统及工艺参数的分析 [J]. 光学与光电技术, 2005, 3(3):32-35.
- Wang Jianping, Li Zhengjia, Fan Xiaohong. Analysis of laser marking system and process parameters[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(3):32-35.
- [20] 胡崇镜,闫飞,俞鸿斌,等. 聚丙烯塑料激光打标工艺研究 [J]. 应用激光, 2015, 35(3):351-355.
- Hu Chongjing, Yan Fei, Yu Hongbin, et al. Technological research on polypropylene plastics using laser marking[J]. Applied Laser, 2015, 35(3):351-355.
- [16] 姚蕊,刘训伟,孙智,等. 抗溶剂中静电喷雾法制备聚己内酯微颗粒 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(11):30-34.
- Yao Chang, Liu Xunwei, Sun Zhi, et al. Preparation of PCL microparticles from electrospinning in anti-solvent[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46 (11):30-34.

(上接第 69 页)

using electrospraying[J]. J Mater Sci, 2012, 47:1 372-1 377.

- [15] Levitt A S, Vallett R, Dion G, et al. Effect of electrospinning processing variables on polyacrylonitrile nanoyarns[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(25):doi:10.1002/app.46404.