

前处理对锦纶化学镀银的影响

孙振华, 郭亚, 蒋志青, 陈韶娟, 马建伟
(青岛大学 纺织服装学院, 青岛 266071)

摘要: 为探索锦纶化学镀银前处理的最优工艺条件, 文章采用钯催化化学镀银的方法, 按除油、粗化、敏化、活化顺序逐步处理锦纶纤维, 着重探讨锦纶化学镀银前处理工艺中每一步的最佳温度、质量分数和时间, 最后对前处理纤维和镀银纤维进行测试和表征。研究表明, 最佳前处理工艺条件为除油: 温度 40 ℃、质量分数 60% 的乙醇溶液和时间 90 min; 粗化: 温度 40 ℃、质量分数 15% 的盐酸溶液和时间 90 min; 敏化: 温度 40 ℃、质量分数 2% 的盐酸及 0.6% 的氯化亚锡和时间 50 min; 活化: 温度 40 ℃、质量分数 0.05% 的氯化钯和时间 50 min。采用此工艺的镀银纤维清洗失银率、电阻、强力损失率和镀银率分别为 2.5%、0.4 Ω、17.5% 和 28.48%。

关键词: 锦纶 6; 前处理; 除油; 粗化; 敏化; 活化

中图分类号: TQ153.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2019)03-0017-07

引用页码: 031104

Influence of pretreatment on electroless silver plating of polyamide

SUN Zhenhua, GUO Ya, JIANG Zhiqing, CHEN Shaojuan, MA Jianwei

(College of Textile & Clothing, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to explore the optimum pre-treatment conditions for the preparation of electroless silver plating of polyamide fibers, the method of electroless silver plating catalyzed by palladium was adopted. Polyamide fibers were treated gradually by oil cleaning, coarsening, sensitization and activation. The optimal temperature, mass fraction and treatment time in each process were investigated. Finally, pre-treated fibers and silver-plated polyamide fibers were tested and characterized. It was found that the optimal pretreatment conditions were as follows: oil cleaning: 60% wt ethanol solution, time 90 minutes, temperature of 40 ℃; coarsening: 40 ℃, 15% wt hydrochloric acid solution, time 90 minutes; sensitization, 2% wt hydrochloric acid and 0.6% wt stannous chloride, time 50 minutes, temperature 40 ℃; activation, 40 ℃, 0.05% wt palladium chloride, time 50 minutes. By using these pre-treatment parameters, the silver loss rate after cleaning, resistance, strength loss and silver plating content were 2.5%, 0.4 Ω, 17.5% and 28.48%, respectively.

Key words: polyamide 6; pretreatment; oil cleaning; coarsening; sensitization; activation

近年来,人民生活水平越来越高,因而对于生活质量的要求逐步提高。科技的发展给人们带来便利的同时,也给人们带来了电磁辐射,因此对于防辐射产品的研发势在必行。

化学镀银是指通过氧化还原反应在纤维表面沉积金属银的过程^[1]。镀银纤维具有优良的电磁屏蔽

性能^[2],研究表明,纤维镀银后可以对微波有强烈的反射作用。很多研究中探讨过镀银织物的电子屏蔽性能,其中镀银的涤纶织物的电磁屏蔽性能为 50 ~ 90 dB^[3],镀镍棉纤维电磁屏蔽性能为 32 ~ 37 dB^[4],镀银纤维制成的织物屏蔽率可以达到 99.99%^[5]。镀银织物已经成为重要的医疗产品材料和电磁辐射材料^[6],主要应用于电子作业防护、航空航天及医疗器械等产业^[7]。锦纶作为重要的化纤之一,不仅具有成本低、性能优良的特点,而且锦纶表面活性基团多,沉积的镀层质量好,因此在锦纶表面镀银具有重

收稿日期: 2018-06-24; 修回日期: 2019-01-09

作者简介: 孙振华(1994—),男,硕士研究生,研究方向为纤维材料的开发与应用。通信作者: 马建伟,教授, 915286867@qq.com。

要意义。高质量的镀银锦纶才能保证镀银织物具有优良的性能,前处理是影响化学镀银最关键的因素,其中包括除油、粗化、敏化和活化。

除油就是为了去除纤维表面的油剂、油渍和污垢。合成纤维在生产过程中都会施加一定量油剂,以满足纺丝工艺的要求。同时,为了满足后道加工的要求,也会对纤维施加一些抗静电剂等助剂。这些油剂,无论是动物油、植物油或者矿物油,对于化学镀银来说都是多余的,在化学镀银之前均应去除,否则会影响镀层和纤维之间的结合牢度、镀银层的均匀性和化学镀银效率等。常用的除油剂为有机溶剂、中性洗涤剂、酸碱性试剂,选择洗涤剂需要根据基材的性质决定。有机溶剂适用于大多数高聚物,锦纶可以选择使用有机溶剂丙酮。张梦婕^[8]使用十二烷基苯磺酸钠清洗 PA6 后再使用丙酮进行除油,刘志才^[9]使用 NaOH 和 OP 乳化剂除油,侯伟等^[10]使用无水乙醇进行除油处理,但考虑到安全性问题,无水乙醇更适合绿色环保化生产。

粗化就是在锦纶表面形成不规则致密的微孔,增加了纤维表面的粗糙度和比表面积。锦纶表面的活性基团虽然比涤纶要多,但是直接进行化学镀银效果不好,结合力小,强度差。通过粗化可增大锦纶纤维的比表面积,提高表面活性,使锦纶具有高的离子吸附能力。粗化会改变纤维微观形态,使其表面形成具有亲水性的极性基团,从而使化学镀进行更顺利,增强镀层和纤维之间的结合牢度。粗化的方法有化学刻蚀、机械刻蚀、溶剂溶胀和等离子刻蚀等^[11]。根据基材化学性质的不同,选择使用不同的粗化试剂,例如涤纶耐碱性差,可选择使用碱处理。王春霞^[12]使用 20% / 30% 的 NaOH 处理涤纶进行粗化,ZHANG 等^[13]对位芳纶可采用碱处理进行粗化,都具有良好的效果。

敏化过程会使锦纶纤维表面吸附还原性离子,为下一步活化提供还原性离子。敏化液配方基本上是氯化亚锡或者是氯化亚锡和盐酸混合,氯化亚锡和盐酸溶液混合会水解形成凝胶状附在基材表面。纤维表面吸附的亚锡离子具有还原性,可以将金属离子还原成金属颗粒附着在纤维表面,金属颗粒就是通过活化产生的镀银反应的催化点。

活化是预先在纤维表面进行小剂量的化学镀银,纤维表面吸附的金属颗粒就是化学镀银过程的活化点。活化可使用氯化钯或银氨溶液处理纤维,

采用氯化钯活化的主要反应机理是 $\text{Sn}^{2+} + \text{Pd}^{2+} = \text{Sn}^{4+} + \text{Pd}$,采用银氨溶液活化的反应机理是 $2\text{Ag}^+ + \text{Sn}^{2+} = 2\text{Ag} + \text{Sn}^{4+}$ 。不经活化的纤维表面能较高,不易引发沉积反应,活化后纤维表面具有催化活性,活化能降低,因此活化直接影响镀银质量。活化常用方法有:光化学法、银浆法、介电层放电法、催化性涂料法、钼锰法、气相沉积法和浸钯法等^[14]。离子钯活化法或胶体钯活化法是目前较为常用的方法,纤维表面附着的被还原的金属钯颗粒作为催化中心,通过催化作用,化学镀液中的银离子被还原剂还原成金属银颗粒附着在纤维表面,得到均匀连续的镀层。于春兰^[15]使用银氨溶液作为活化剂进行试验,采用银氨溶液活化节约成本。虽然钯价格昂贵,但钯催化效果更明显,采用氯化钯进行活化处理得到的镀层更均匀。

关于化学镀银国内外已有大量研究,但在这些已有的研究当中,更注重的是对镀银纤维性能表征与分析,而对于化学镀前处理工艺的详细研究很少^[16-20]。本文以锦纶为化学镀基材,利用化学镀银的方法,将除油、粗化、敏化和活化的温度、时间及药品质量分数进行分组,着重探讨了化学镀前处理每一步的最佳工艺条件,对指导化学镀生产镀银锦纶具有重要意义。

1 试验

1.1 材料与设备

锦纶 6 长丝(70D/24F,杭州萧山钱潮锦纶有限公司),无水乙醇、盐酸、氢氧化钠、硝酸银、氯化钯、氯化亚锡和氨水(国药集团化学试剂有限公司)。

LLY-06 电子单纤维强力仪(莱州市电子仪器有限公司),MPLK-701 超声清洗器(金坛市大地自动化仪器厂),SHZ-82 水浴恒温振荡器(金坛市天竟实验仪器厂),FA 2004B 电子天平(上海精密科学仪器有限公司),MS 8240D 数字万用表(东莞华仪仪表科技有限公司),Phenom Pro(复纳科学仪器(上海)有限公司)。

1.2 准备

1.2.1 前处理试验条件

除油: 温度 20 ~ 40 °C,乙醇质量分数 40% ~ 80%,处理时间 30 ~ 90 min。

粗化: 温度 20 ~ 40 °C,盐酸质量分数 10% ~ 20%,处理时间 30 ~ 90 min。

敏化: 温度 20 ~ 40 °C , 盐酸/氯化亚锡质量分数 1% / 0.4%、2% / 0.6% 和 3% / 0.8% , 处理时间 30 ~ 50 min。

活化: 温度 20 ~ 40 °C , 氯化钾质量分数 0.01% ~ 0.1% , 处理时间 30 ~ 50 min。

由于试验数量庞大 , 故选取 9 组典型试验 , 考虑到药品质量分数是影响前处理各步骤的首要因素 , 温度和时间为主要因素 , 因此绑定温度和时间同时变化 , 单独变化质量分数因素 , 9 组典型试验条件如表 1 所示。

表 1 9 组典型试验条件

Tab. 1 9 groups of typical test conditions

试样 编号	除油			粗化			敏化			活化		
	温度/ °C	质量分数/ %	时间/ min									
1 [#]	20	40	30	20	10	30	20	1/0.4	30	20	0.01	30
2 [#]	30	40	60	30	10	60	30	1/0.4	40	30	0.01	40
3 [#]	40	40	90	40	10	90	40	1/0.4	50	40	0.01	50
4 [#]	20	60	30	20	15	30	20	2/0.6	30	20	0.05	30
5 [#]	30	60	60	30	15	60	30	2/0.6	40	30	0.05	40
6 [#]	40	60	90	40	15	90	40	2/0.6	50	40	0.05	50
7 [#]	20	80	30	20	20	30	20	3/0.8	30	20	0.10	30
8 [#]	30	80	60	30	20	60	30	3/0.8	40	30	0.10	40
9 [#]	40	80	90	40	20	90	40	3/0.8	50	40	0.10	50

1.2.2 镀银试验

1) 称取适量硝酸银粉末、少量葡萄糖和 NaOH 粉末分别配置成一定质量分数的 AgNO₃、葡萄糖和 NaOH 溶液 , 量取适量氨水配制一定质量分数的氨水溶液;

2) 把配好的氨水加入硝酸银溶液中 , 溶液逐渐变浑浊 , 继续加入氨水后 , 溶液变澄清。逐滴加入 NaOH 溶液使其 pH 值为 9 ~ 10 , 然后滴加氨水使因为滴加 NaOH 产生的浑浊变澄清;

3) 将前处理的纤维浸入盛有还原液葡萄糖和银氨溶液比例是 1:1 的烧杯中 , 室温下水浴振荡 , 反应一段时间。

1.3 测试方法

1.3.1 前处理纤维

1) 失重率: 利用 FA 2004B 电子天平称量纤维经过前处理前后的质量 , 计算锦纶经过前处理的失重率。

2) 强力损失率: 利用 LLY-06 电子单纤维强力仪测试纤维经过前处理前后的强力 , 计算锦纶的强力损失率。

1.3.2 镀银纤维

1) 镀银率: 使用 FA 2004B 电子天平称量纤维镀银前后的质量 , 计算纤维的镀银率。

2) 电阻: 利用 MS 8240D 数字万用表测试镀银纤维的电阻 , 测试距离为 1 cm。

3) 清洗失银率: 利用超声清洗器将镀银纤维进行清洗 , 使用 FA 2004B 电子天平称量镀银纤维超声清洗前后的质量 , 计算镀银纤维清洗失银率。

4) 强力损失率: 利用 LLY-06 电子单纤维强力仪测试纤维镀银前后的强力 , 计算镀银纤维的强力损失率。

2 结果与分析

2.1 前处理纤维

镀银试验前处理中使用的盐酸质量分数为 10%、15% 和 20%。为了更清楚地表达盐酸对原纤维失重和强力变化的影响趋势 , 增加质量分数为 5% 和 30% 两组试验。

2.1.1 粗化失重率

$$\text{失重率}/\% = \frac{\text{粗化前质量} - \text{粗化后质量}}{\text{粗化前质量}} \times 100 \quad (1)$$

粗化后 5 组试验的原纤维失重率如图 1 所示。如图 1 所示 , 纤维失重率随着盐酸质量分数的上升而增大 , 增速先变快后减慢。盐酸质量分数变大对纤维的损伤更严重 , 为保证最终镀银纤维具有较高的强力和镀银层有较好的连续性、均匀性 , 要适度选择盐酸的质量分数。盐酸作用主要是增大纤维的比表面积 , 比表面积大有利于提高纤维的表面镀层结合力 , 同时考虑对纤维性能的影响 , 因此要选择合适的质量分数进行粗化 , 既能保证镀银纤维表面

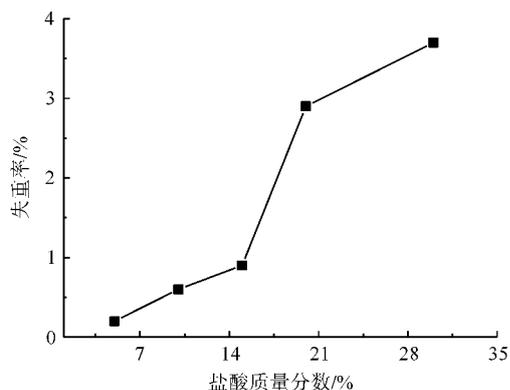


图 1 盐酸质量分数与失重率关系

Fig. 1 Relationship between the concentration of hydrochloric acid and weight loss rate

银层的牢度和连续,又能保证镀银纤维的强度满足工业化生产的需要。

2.1.2 粗化强力损失率

$$\text{强力损失率}/\% = \frac{\text{粗化前强力} - \text{粗化后强力}}{\text{粗化前强力}} \times 100 \quad (2)$$

粗化后 5 组试验的原纤维强力损失率如图 2 所示。图 2 可直观地看出,纤维强力损失随着盐酸质量分数的上升而增加,增速随质量分数增大而变小。盐酸质量分数对纤维强力的影响巨大,过高的盐酸质量分数导致纤维的物理机械性能损失,这样的镀银纤维将难以承受机械外力,不能织造成布。结合失重率分析,盐酸质量分数越高,对纤维的影响越大,因此要控制盐酸质量分数;同时要保证纤维比表面积足够大,使镀层结合力较好。通过对纤维粗化失重率和强力损失率分析得出,随着盐酸质量分数的升高,纤维受到的破坏越严重,强力损失越大,因此为满足镀银纤维性能的要求,应尽量选择较低质量分数的盐酸进行粗化。为进一步得出前处理的最

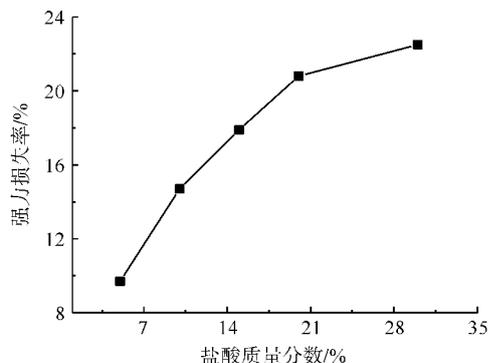


图 2 盐酸质量分数与强力变化率关系

Fig. 2 Relationship between the concentration of hydrochloric acid and the change rate of strength

佳工艺条件,对镀银纤维的镀银率、电阻、清洗失重率和强力损失率进行表征。

2.2 镀银纤维

2.2.1 镀银率分析

$$\text{镀银率}/\% = \frac{\text{镀银纤维质量} - \text{原纤维质量}}{\text{镀银纤维质量}} \times 100 \quad (3)$$

镀银率的大小不仅从正面反映镀银纤维中银的含量,也能从侧面反映出纤维的导电性能和结合牢度等。图 3 显示了 9 份镀银试样的镀银率,可以看出随着温度、质量分数和时间三个工艺条件的递增,9 份镀银样品的镀银率基本呈现正比增长。在较低药品质量分数下,随着温度和时间的增加,其镀银率也不会超过 20%;当除油、粗化、敏化和活化的药品质量分数分别提升 60%、15%、2%、0.6% 和 0.05% 以上时,随着温度和时间的增加,其镀银率均超过 26%;但随着反应体系的饱和,镀银率达到 29% 左右后并没有继续上升,镀银样品 5#~9# 的镀银率基本属于同一水平,其含银量能充分包裹锦纶纤维表面,达到更好的镀层连续性,能有效提升导电率和电磁屏蔽性能。因此通过对锦纶纤维的镀银率分析得出,试样 5#~9# 的镀银率最高。

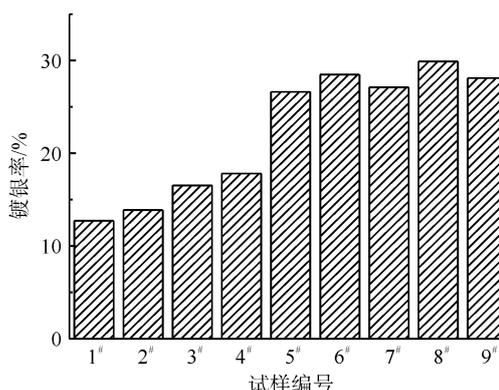


图 3 9 份试样镀银率

Fig. 3 Silver plating content of 9 samples

2.2.2 电阻分析

镀银纤维的电阻柱状图如图 4 所示。图 4 显示出电阻最低的是 6#、7#、8# 和 9#,每厘米电阻值都不到 1 Ω, 较低的电阻值说明试样的表面镀层均匀性和连续性更好,这四组试样的工艺条件更接近最佳工艺条件。从图 4 的走势中看出,前处理的温度和时间与镀银纤维的电阻基本呈正比关系,说明较高的温度和较长的时间有利于镀层的沉积,当药品质量分数大于 6# 试样质量分数时,镀银纤维的电阻已不

足 1 Ω。在镀银率的分析中得出 5[#]~9[#] 试样的镀银率最高,反映出纤维表面银含量影响着电阻,镀银率越高,纤维表面银层的连续性越好,其电阻相应地越低。所以从镀银纤维的电阻测试分析得出,试样 6[#]~9[#] 的电阻更小,镀层连续性和均匀性更好,与镀银率的规律基本一致。

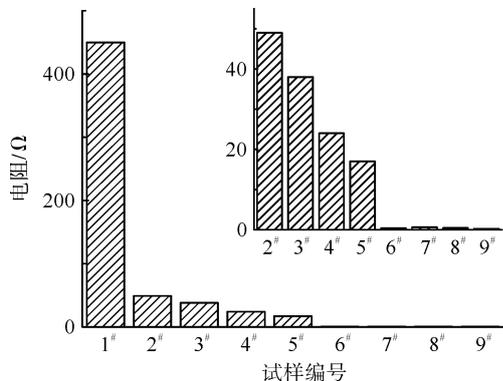


图 4 9 份试样电阻

Fig. 4 Resistance of 9 samples

2.2.3 清洗失银率分析

$$\text{清洗失银率}/\% = \frac{\text{原样质量} - \text{四次洗后质量}}{\text{原样质量}} \times 100 \quad (4)$$

镀银纤维经过水洗的失重率,用于说明镀层的结合牢度。失重率越大,镀银纤维镀层的结合力越小。图 5 是 9 份镀银纤维清洗后失银率,可以看出清洗失银率较小的是 6[#]、7[#] 和 8[#],试样 1[#]、2[#] 和 3[#] 的清洗失银率较大,是因为前三组试验的盐酸质量分数最低,纤维比表面积最小。试样 4[#]、5[#] 与 6[#] 在同样盐酸质量分数的情况下,清洗失银率却较 6[#] 大,原因是时间和温度对镀层结合力的影响,合适的时间和温度会让反应进行得更加充分,较低的温度与较短的

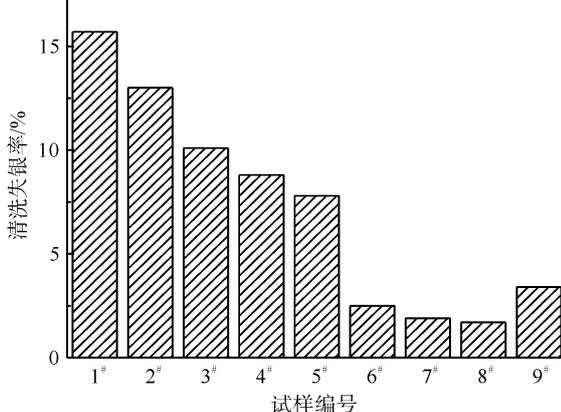


图 5 9 份试样清洗失银率

Fig. 5 Ag loss rate of 9 samples after cleaning

时间对反应都有负面作用;9[#] 试样失银率较大,可能是因为药品质量分数过高,同时反应温度较高,时间较长,反应过于激烈、充分,导致银颗粒在表面团聚,使得镀层结合力下降。因此,通过对镀银纤维清洗失银率分析得出,试样 6[#]、7[#] 和 8[#] 镀层结合牢度更好。

2.2.4 强力损失率分析

$$\text{强力损失率}/\% = \frac{\text{原纤维强力} - \text{镀银纤维强力}}{\text{原纤维强力}} \times 100 \quad (5)$$

镀银纤维的强力损失率如图 6 所示。图 6 显示了 9 份试样的强力损失率,试样 1[#]、2[#] 和 3[#] 的强力损失率小,镀层牢度、均匀性和连续性较差;试样 7[#]、8[#] 和 9[#] 的强力损失率过大,导致纤维物理机械性能下降严重,不能满足后道工序对纤维强力的要求,同时考虑到节约环保,这三组使用药品质量分数高,不利于环保和节约药品;试样 4[#]、5[#] 和 6[#] 的强力损失率在 17% 左右,从强力方面讲,纤维强力满足织造要求,结合镀银率、电阻和清洗失银率分析,从镀层结合牢度、均匀性和连续性方面看,试样 6[#] 的镀层牢度、均匀性和连续性最好且强力损失率较低。

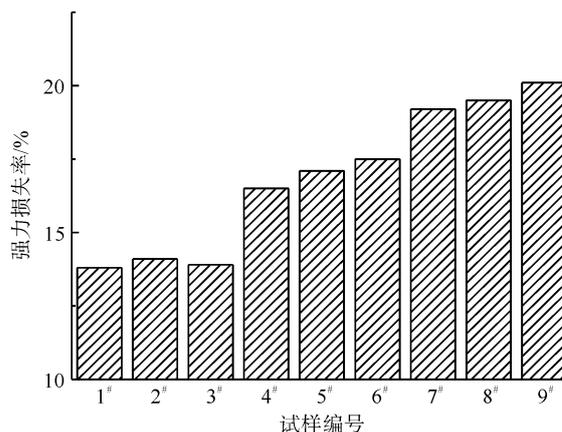


图 6 9 份试样强力损失率

Fig. 6 Strength loss rate of 9 samples

2.2.5 6[#] 清洗纤维和镀银纤维图

通过对前处理纤维和镀银纤维的测试和表征得出,试样 6[#] 镀银纤维的前处理工艺为最佳工艺,其镀银纤维强力较好,镀层结合牢度、连续性和均匀性较好。从图 7 可以看出,锦纶原纤维经过清洗后表面光滑没有杂质,这种纤维更容易得到连续均匀的镀层。如图 8 所示,锦纶镀银纤维的镀层均匀性、连续性较好,达到了更好的屏蔽效果。

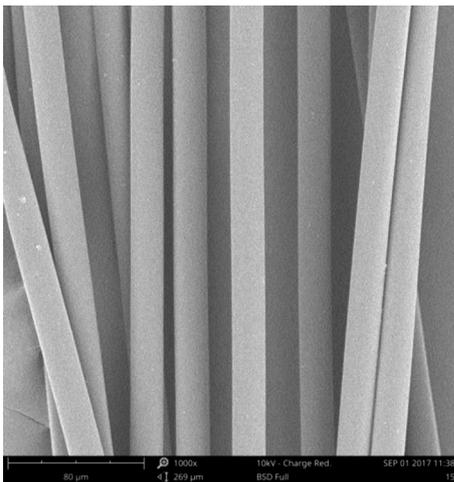


图7 6#清洗锦纶纤维扫描电镜照

Fig.7 Scanning electron microscope images of cleaned polyamide fiber of 6#

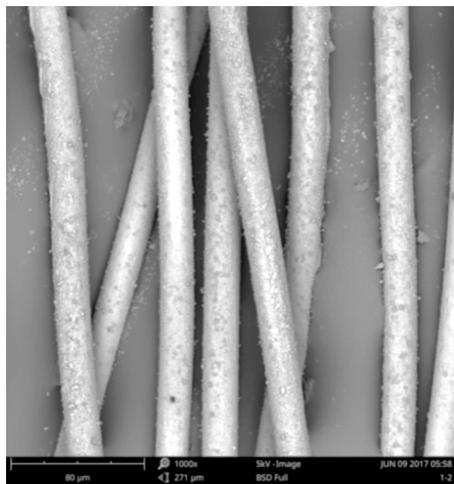


图8 6#镀银纤维扫描电镜照

Fig.8 Scanning electron microscope images of silver plated fiber of 6#

3 结论

通过前处理和镀银锦纶的测试、表征和分析得出试样6#较适合工艺为:在40℃下用60%的乙醇溶液处理90 min进行除油;在40℃下用15%的盐酸溶液处理90 min进行粗化;在40℃下用2%的盐酸溶液和0.6%的氯化亚锡溶液处理50 min进行敏化;在40℃下用0.05%的氯化钾溶液处理50 min进行活化。本工艺条件制得的镀银纤维具有良好的均匀性、连续性、结合牢度和较高的纤维强力,良好的镀银纤维性能保证镀银织物的屏蔽性能更加优异。

在今后的研究中,将进一步探究前处理最佳工艺条件,在试样6#工艺条件两端进行更小梯度的试

验,得出更接近最佳的前处理工艺。

参考文献:

- [1]穆世鹏. 银/聚苯胺/涤纶复合材料的制备及其性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
MU Shipeng. Studies on Preparation and Properties of Ag/PANI/PET Composite [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [2]靳武刚. 碳纤维在电磁屏蔽材料中的应用[J]. 现代塑料加工应用, 2004, 16(1): 24-27.
JIN Wugang. Application of carbon fiber in ems composites [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2004, 16(1): 24-27.
- [3]MU S P, XIE H Y, WANG W, et al. Electroless silver plating on PET fabric initiated by in situ reduction of polyaniline [J]. Applied Surface Science, 2015, 353: 608-614.
- [4]GUO R H, JIANG S Q, YUENCWM, et al. An alternative process for electroless copper plating on polyester fabric [J]. Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 2009, 20(1): 33-38.
- [5]江日金, 黄建华, 徐民, 等. 镀银纤维多功能屏蔽织物的开发[J]. 上海纺织科技, 2009, 37(12): 40-41.
JIANG Rijin, HUANG Jianhua, XU Min, et al. Development of multi-functional shielding fabric made of silver plated fiber [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2009, 37(12): 40-41.
- [6]ARENA P, BASILE A, BUCOLO M, et al. Image processing for medical diagnosis using CNN [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A, 2003 (497): 174-178.
- [7]张丽. 阻燃抗静电织物的研制[J]. 产业用纺织品, 2004 (4): 17-21.
ZHANG Li. The research of double-functional fabric with flame-retardant and antistatic [J]. Technical Textiles, 2004 (4): 17-21.
- [8]张梦婕. 氯化钙/甲醇前处理及多巴胺改性 PA6 织物镀银研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
ZHANG Mengjie. Research on Preparation of Silver Plated Polyamide Fabric Modified by Dopamine after the Calcium Chloride/Methanol Pretreatment [D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [9]刘志才. 聚酰胺6 织物化学镀银工艺及屏蔽效测试方法的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2011.
LIU Zhicai. The Study of Electroless Ag Plating Process on Polyamide 6 and Test Methods of Shielding Effectiveness [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2011.
- [10]侯伟, 潘功配, 关华, 等. 碳纤维表面化学镀银工艺研究[J]. 材料保护, 2007, 40(12): 45-47.

- HOU Wei , PAN Gongpei , GUAN Hua , et al. Electroless silver plating on surface of carbon fiber [J]. *Materials Protection* , 2007 , 40(12) : 45-47.
- [11] 李宁. 化学镀实用技术 [M]. 北京: 北京工业出版社 , 2004: 61-64.
LI Ning. *Practical Technology of Electroless Plating* [M]. Beijing: Beijing Industry Press , 2004: 61-64.
- [12] 王春霞. 化学镀银导电涤纶纤维织物的制备及性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学 , 2015.
WANG Chunxia. *Study on Preparation and Properties of Conductive PET Fabric with Electroless Silver Plating* [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University , 2015.
- [13] ZHANG H R , ZOU X G , LIANG J J , et al. Development of electroless silver plating on para-aramid fibers and growth morphology of silver deposits [J]. *Journal of Applied Polymer Science* , 2012(124) : 3363-3371.
- [14] 姜晓霞 , 沈伟. 化学镀理论及实践 [M]. 北京: 国防工业出版社 , 2000: 336-339.
JIANG Xiaoxia , SHEN Wei. *The Fundamental and Practice of Electroless Plating* [M]. Beijing: National Defense Industry Press , 2000: 336-339.
- [15] 于春兰. 镀银聚酰胺 6 纳米纤维的制备和性能研究 [D]. 上海: 东华大学 , 2012.
YU Chunlan. *Analysis on Preparation and Performance of Silver Plated PA6 Nanofiber* [D]. Shanghai: Donghua University , 2012.
- [16] 张丽娟 , 李瑞洲 , 邢国江. 镀银混纺纱电磁屏蔽织物的开发与屏蔽效能 [J]. *上海纺织科技* , 2011 , 39(7) : 40-41.
ZHANG Lijuan , LI Ruizhou , XING Guojiang. *Development of anti-electromagnetic radiation fabric from silver-plated blending yarns and its shielding effectiveness* [J]. *Shanghai Textile Science & Technology* , 2011 , 39(7) : 40-41.
- [17] YU D , TIAN W C , LI Y F , et al. Preparation of silver-plated wool fabric with antibacterial and anti-mould properties [J]. *Materials Letter* , 2015(151) : 1-4.
- [18] JIANG S Q , NEWTON E , YUEN C W M , KAN C W. Chemical silver plating on cotton and polyester fabrics and its application on fabric design [J]. *Textile Research Journal* , 2006 , 76(1) : 57-65.
- [19] YU D , MU S P , LIU L L , et al. Preparation of electroless silver plating on aramid fiber with good conductive and adhesion strength [J]. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects* , 2015 , 483: 53-59.
- [20] LIAO Y , CAO B , WANG W C , et al. A facile method for preparing highly conductive and reflective surface-silvered polyimide films [J]. *Applied Surface Science* , 2009 , 255: 8207-8212.