

电磁屏蔽织物材料研究进展

潘智勇¹, 张慧², 吴中伟¹, 张聪¹, 赵前进¹, 汤伟¹, 高沛²

1. 北京雷特新技术实业公司, 北京 100074

2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074

摘要 通过介绍电磁辐射的危害性及其对现代战争的影响, 阐述了发展电磁屏蔽材料的重要性。论述了不同情况下电磁屏蔽材料的屏蔽原理、常见电磁屏蔽织物材料的种类和特点, 分析了目前制备电磁屏蔽织物材料的技术手段, 综述了表面镀金属织物、表面涂覆织物、贴金属箔织物、导电纤维混纺织物的研究现状, 对比分析了各种织物材料制备工艺的优缺点, 简要介绍了国内外电磁屏蔽织物的生产现状, 展望了电磁屏蔽织物材料的发展趋势。

关键词 电磁屏蔽; 织物; 屏蔽材料

中图分类号 TQ153.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)24-0086-06

Advances of Studies on Electromagnetism Shielding Fabric

PAN Zhiyong¹, ZHANG Hui², WU Zhongwei¹,
ZHANG Cong¹, ZHAO Qianjin¹, TANG Wei¹, GAO Pei²

1. Beijing Rate New Technology Corporation, Beijing
100074, China

2. Beijing Institute of Aerospace Test Technology, Beijing
100074, China

Abstract The harm of electromagnetic radiation is discussed, in particular, the harm of electromagnetic radiation in the modern warfare, to reveal the significance of developing EMS (electromagnetic shielding) materials. The shielding mechanisms in different conditions, the species and the characteristics of the EMS fabric materials are described. The preparation technologies of various EMS fabric materials, the metal-coating fabric, surface-spreading fabric, affixed foil metal fabric and blended fabric, are analyzed, including the advantages and disadvantages and their present status. The development trend of EMS fabric materials is pointed out.

Keywords electromagnetic shielding; fabric; shielding material

0 引言

随着电子工业的迅猛发展, 电磁波特别是微波在航空、航天、通信、家用电器、军事等领域得到广泛应用, 而电磁污

染问题也日渐突出。

目前, 在世界各地, 各种信息网络传递着数以亿计的军事、政治、经济等方面的重要情报和信息, 由于电磁波辐射而导致的信息泄密事件时有发生, 直接威胁到国家政治、经济、军事安全, “电磁战”已成为现代战争的重要特征之一。同时, 电磁波还会造成武器系统失灵(表1), 给作战带来严重隐患。因此, 防止电磁波辐射以保障信息、武器系统安全及人体健康成为迫切任务。电磁屏蔽材料成为世界各国关注的重要问题^[1-3]。

目前, 电磁防护的主要措施有屏蔽、微波吸收等^[4]。本文论述电磁屏蔽织物材料的屏蔽原理和研究现状, 对目前国内外电磁屏蔽织物材料的生产、技术手段进行分析归纳, 提出开发高性能电磁屏蔽织物的研发思路。

1 电磁屏蔽原理

电磁屏蔽, 即利用屏蔽体的反射、衰减等使电磁辐射场源所产生的电磁能流不进入被屏蔽区域。通常, 屏蔽材料对空间某点的屏蔽效果用屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)表示, 即 $SE=20\lg(E_0/E)$, 其中, E_0 是无屏蔽材料时该点场强, E 是有屏蔽体后该点场强。

电磁波传播到达屏蔽材料表面时, 通常按3种不同机制进行衰减(图1): ① 在入射表面的反射损耗; ② 未被反射而进入屏蔽体的电磁波被材料吸收的损耗; ③ 在屏蔽体内部的多重反射损耗。

电磁波通过屏蔽材料总屏蔽效果可按下式计算:

$$SE=A+R+B$$

其中, SE 为电磁屏蔽效果, R 为表面单次反射衰减, A 为吸收损耗, B 为内部多次反射损耗。当 $B<10$ dB 时, B 可忽略不计,

收稿日期: 2009-06-22

作者简介: 潘智勇, 工程师, 研究方向为特种材料开发, 电子信箱: pzysos@163.com; 吴中伟(通信作者), 工程师, 研究方向为新型复合材料, 电子信箱: wu2535@sina.com

的目的, Ni 织物材料除了表面的反射外, 还有本身吸收损耗。其中 Ag 制屏蔽织物屏蔽效果在电磁辐射频率 0.15 MHz~20 GHz 范围内屏蔽效果在 60 dB 以上^[6-7], 该类织物质地轻薄、柔软、透气、耐腐蚀和抗菌, 防电磁辐射安全可靠, 但价格昂贵; Cu 制屏蔽织物屏蔽性能在 35~68 dB, 但抗氧化能力较差, 可能会引起皮肤过敏, 并且铜特定络合物可治癌; Ni 制织物材料屏蔽性能在 32~37 dB^[8], 具有较强的抗氧化性能, 但镍具有致癌作用, 与皮肤接触可能过敏, 不适宜直接作为防护内衣面料。目前该技术是电磁屏蔽织物材料用的最多、效果最好的方法, 主要是在棉、涤及芳族聚酰胺等织物材料上, 进行镀铜、镀银或镍铜工艺。其优点是不受织物形状及大小限制, 镀层均匀、织物材料柔软, 设备投入量小, 但镀层容易被刮擦而失去屏蔽性能, 并且制备过程污染严重, 须进行污水处理。Guo 等^[9]采用 AgNO₃ 替代传统价格昂贵的 PaCl₂ 作为靶向催化剂进行镀铜织物制备, 结果表明, AgNO₃ 是一种良好的 PaCl₂ 替代品, 并且制备织物表面的金属镀铜厚度约 37.13 nm, 电磁辐射频率在 2~18 GHz 时, 屏蔽效果可达 45~55 dB。化学镀镍织物研究^[10-13]表明, 其制备方法多数采用镀镍磷合金方式, 其中碱性化学镀镍多获得低磷镀层, 而酸性镀液多获得高磷镀层^[5], 织物的屏蔽效果与镀铜织物相比, 屏蔽性能较低, 屏蔽效果不超过 40 dB, 但抗氧化腐蚀力强^[14]。

随着电磁屏蔽织物性能要求的提高, 单一镀层的屏蔽织物往往难以满足应用要求, 因此研究多层复合型镀覆织物材料是目前重点研究的方向之一^[15-17]。楚克静等^[18]在已化学镀铜的涤纶织物上电镀锡镍合金, 制得织物材料表面光滑、光亮度好、表面电阻率低, 屏蔽效果达到 80 dB 以上, 并具有良好的装饰效果, 对人体完全无害, 同时镀层具有较好的耐腐蚀和耐摩擦性能。其屏蔽原理是: 电磁波首先在锡镍合金层反射部分电磁波及吸收少量的电磁波; 透过锡镍合金层的电磁波, 在铜层大量的反射, 电磁波在屏蔽层内大量反射, 提高了外层锡镍合金的吸收损耗, 同时部分电磁波透过锡镍合金, 进一步使电磁波衰减, 最终达到高效的屏蔽效果。该类屏蔽织物可应用于军事、通信及民用等领域。锡具有导电性较好、易钎焊、耐腐蚀、无毒, 与硫酸、硝酸几乎不反应等优点, 可制得优良性能的电磁屏蔽织物; 刘绍芝等^[19-20]通过粗化、敏化、活化、强化、化学镀铜、化学镀镍、后处理等工艺在棉涤织物上制备电磁屏蔽织物材料, 材料屏蔽性能达到 60 dB 以上, 可用做军事作战指挥帐篷、防电磁屏蔽服及电磁屏蔽室等; 王伟等^[21]采用置换反应进行化学镀铜, 镀层厚度 8 μm, 然后采用阴极移动或搅拌的方式进行电镀镍工艺, 厚度为 1 μm, 得到的电磁屏蔽织物在 10~3 000 MHz 屏蔽效能达到 80 dB; Gan 等^[22-23]采用 K₄Fe(CN)₆ 降低沉积速率对 PET 纤维材料进行 Cu-Ni-P 合金镀层, 添加 K₄Fe(CN)₆ 明显增加了镀层的致密程度, 纤维表面镀层光亮度好, 并且镀层表面电阻明显改善, 其制备的电磁屏蔽织物在 100 MHz~20 GHz 时, 屏蔽效果达到 85 dB 以上。

2.1.2 真空镀

真空镀是采用物理沉积方法, 在真空和高温状态下, 将

金属熔化, 当被熔化的金属升至沸点时, 金属粒子蒸发并向织物表面飞溅, 从而沉积在织物或纤维表面。其优点是不会造成危害性较大的化学污染、材料美观及显著的屏蔽效果, 但镀覆的金属层厚度一般在 3 μm 以下, 金属与织物的结合力较差, 易脱落, 至今在电磁屏蔽领域内未得到广泛应用。目前山西晋东化工厂对该技术在无纺布材料中有所应用, 但附着力较差。

2.1.3 磁控溅射镀

磁控溅射镀^[14,24-26]又称等离子电镀, 是一种高速率低基片升温的成膜新技术, 主要利用高能离子撞击金属靶材进行能量交换, 把从靶材表面飞溅出的靶材原子或分子沉积到纺织基材衬底, 形成屏蔽的金属薄膜。该技术工艺简单、无污水处理问题, 金属化的织物具有良好的机械性能和耐热性, 纤维与金属层之间的结合力强, 但手感及耐洗涤性能较差。目前常见的磁控溅射技术有多靶磁控溅射、磁控扫描、非平衡磁控溅射和脉冲磁控溅射等。陈文兴等^[24]采用直流磁控溅射镀铜工艺, 发现溅射功率越大, 沉积速率越大, 膜层颗粒分布越均匀, 溅射压力在 0.9 Pa 左右适宜, 镀层与基底结合牢固, 屏蔽效果达到 70 dB 以上。洪剑寒^[27]采用磁控溅射技术在 PET 非织造布上沉积纳米尺度的银薄膜, 由于量子尺寸效应使纳米级银颗粒的电子能级分裂, 从而形成新的吸波通道, 并且银颗粒表面层附近的原子密度较小, 造成光吸收增强、磁性能增强等^[28], 当银膜厚度为 100 nm 时, 织物在 30 kHz~1.5 GHz 时的屏蔽效果达到 26 dB 以上。周菊先^[26,29]采用磁控溅射与化学镀膜相结合技术, 并采用吸波物质保护层和等离子体辅助淀积薄膜技术, 制成的屏蔽织物金属覆层牢固, 1~18 GHz 的屏蔽效能达到 90 dB 以上, 并且织物材料具有一定的吸波性能。余凤斌等^[30-32]采用磁控溅射法将 Ni 溅射在不同的纺织布料上, 镀层厚度为 0.005~1 μm, 再置于连续电镀槽中进行电镀铜和镍工艺, 镀层厚度为 1~5 μm, 结果表明, 织物材料具有良好的耐磨性, 镀层与织物结合力强, 在 1 kHz~40 GHz 频率范围内达到 60 dB 以上, 织物纤维越细、纤维排列越松散, 镀层分布越均匀, 电磁屏蔽效果越好。Savrum 等^[33]用磁控溅射方法在 ZnS 上沉积一层 30.7 μm 的薄膜, 材料在 2 GHz 屏蔽效能可达 53 dB。磁控溅射镀技术制备的织物材料, 对于抑制生物菌活性、纤维抗紫外性能具有明显的作用。Yuen 等^[34]分别在氩气、氧气气氛下, 采用溅射镀镍的方法, 制得屏蔽织物材料, 通过 SEM 分析得出, 镍镀层可有效防护紫外线辐射, 其中氧气气氛下的镀镍层对聚酯织物的保护更加有效。Scholz 等^[35]研究不同金属镀层的 SiO₂ 纤维织物生物活性, 结果表明, 铜及银镀层织物具有良好的抗生物活性性能, 其原因可能是由于金属离子存在于织物表面所致。目前, 具有代表性的表面镀层屏蔽织物材料的性能特点见表 2。

2.2 涂层屏蔽织物

涂层屏蔽织物是在织物涂层剂中加入适当的金属粉末、金属氧化物或者非金属导电材料; 或让涂层剂中含有高分子成膜剂、导电成分涂料, 涂覆在织物表面, 使织物具有电磁屏



表 2 表面镀层电磁屏蔽织物的性能特点
Table 2 Characteristics of surface-spreading
film shielding fabrics

工艺方法	膜厚/ μm	屏蔽效果/dB
化学镀 Cu	0.30~1.00	35~70
化学镀 Ni	0.30~1.00	30~40
磁控溅射镀 Cu/Ni	1.00~4.00	60~120
磁控溅射镀 Ag	0.05~0.10	20~30
磁控溅射镀 Ni+电镀 Ni/Cu	1.00~6.00	50~90
真空镀 Al	0.50~1.30	50~70
化学镀 Cu+电镀 Ni	1.00~8.00	60~120

注:测试条件为 30~1 000 MHz。

Note: Test condition is 30~1 000 MHz.

蔽效果。该方法金属粉末涂层主要起到反射损耗,达到屏蔽的目的,而金属氧化物或者非金属导电涂层主要以自身吸收损耗为主。该方法制备的屏蔽织物材料屏蔽效果一般、不透气、手感性较差,目前应用较为局限。

聚苯胺、聚吡咯、聚噻吩等是含有 π -电子共轭体系的高聚物,经掺杂导电材料,其电导率可发生较大的变化,当其电导率处于半导体状态时,对微波具有良好的吸波性能。其导电原理为由于共轭结构链提供了电荷流动的通道,而加入掺杂剂后,在外加掺杂的推动下,一定结构的聚合物就突破绝缘区,使内部电子被释放,形成自由移动的电荷,因此织物表面能都导电,该类吸波织物材料是目前争相研究的课题^[36-37]。Lee 等^[38]使用聚吡咯和 AgPd 金属混合物在织物或非织造布上涂层,得到产品的屏蔽效果在 8~80 dB,并具有良好的吸波性能,是一种比较有前途的吸波纺织品。Hong 等^[39]研究了经蒽醌磺酸或萘磺酸处理的聚吡咯,并加入适量的 Ag 纳米粒子,涂覆于 PET 织物表面,屏蔽性能超过 30 dB,并且屏蔽机制以涂层材料的吸波为主。Kim 等^[40]在 PET 织物上聚合一层本征型导电聚合物(ICP),表明 PET/PPy 复合织物材料屏蔽效果达到 36 dB。

义小苏等^[41]采用单臂碳纳米管作为导电填料,制备的单臂碳纳米管无纺布厚度 100 nm~1 μm ,材料的性能优良且比重较轻。目前对于多壁碳纳米管(MWNT)也有不少研究^[42-43],其关键技术是防止 MWNT 的团聚,以及对 MWNT 进行表面覆载改性技术,与金属粉末或导电纤维材料共同作用,达到高效的电磁屏蔽效果。该方法多用于复合电磁屏蔽薄膜或壳体材料中,在织物材料中应用较少。目前,国内外一些研究机构采用多种纳米材料复合技术^[44-45],并采用合适的胶粘剂作为涂料涂覆于材料表面,以达到吸波的功效。

2.3 贴金属箔

贴金属箔是利用铝箔和铜箔等金属薄膜同织物经胶黏剂复合制成的材料,其中表面金属箔起到屏蔽电磁波的作用。其优点是方法简单易行、粘结强度高、不易部分脱落、导

电性能良好,但织物材料的透气性及柔软程度较差,目前常见的贴金属箔织物多用于消防防护服,主要通过反射高温辐射能,达到保护人体的作用。

2.4 导电纤维混纺织物

该类织物主要将导电纤维与普通纤维经混纺技术织成织物。选用的导电纤维主要有镍纤维、铜纤维和碳纤维等^[46],这种工艺制备的电磁屏蔽织物材料主要应用于防辐射服、保密室窗帘、精密仪器防护罩及活动式屏蔽帐篷等,其生产工艺简单有效,但由于在纺织过程中,导电纤维本身比重较大、梳理过程易打结及抗弯强度差等缺点,使得该方法制备的电磁屏蔽织物性能不高,一般在 15~40 dB,而且不同频段的屏蔽效果差异很大,不能完全满足民用服装的需求。目前,对于改善纺织工艺、提高电磁屏蔽效果及提高材料的服用性是各国争相研究的课题。Chen 等^[47-48]采用铜纤维、PET 纤维等混纺的方法制备了电磁屏蔽织物,结果表面覆金属 Cu(54.87%)、Zn(1.90%)、Sn(43.23%)纤维材料,在 30~1 000 MHz 频率范围内,屏蔽效果达到 30 dB 以上,进行 6 层层压的电磁屏蔽织物材料屏蔽效果达到 55 dB 以上。中国山西华丽服饰科技发展有限公司开发的电磁屏蔽织物材料,将不锈钢纤维均匀分布在涤棉纤维中,在 10 GHz 时织物的屏蔽性能达到 34.77 dB^[49]。

由于碳纤维材料具有良好的吸波性能,近年国内外许多学者对其与普通纤维进行混纺或单独纺织制得电磁屏蔽织物材料^[50-51]。日本一研究所采用沉积聚合的新工艺,制得一层具有石墨颗粒的碳纤维,其电导率提高了 100 倍,该材料应用与电磁吸波材料中具有广阔的前景。

2.5 多离子电磁屏蔽织物

多离子电磁屏蔽织物材料是当今最先进的第六代屏蔽电磁辐射材料,采用先进的物理和化学工艺对金属进行离子化处理。该方法制备的屏蔽织物以吸收为主,主要将电磁波能量通过织物自身的特殊功能转变成热能散发掉,从而避免了环境的二次污染,净化了空气,其屏蔽低频、中频段电磁辐射具有良好的效果,该类织物具有柔软舒适、色泽均匀、抗菌性强、耐洗、耐磨及使用寿命长等优点,并且对皮肤无刺激,有助于人体表皮的微循环,目前国内产业化的主要是红豆集团与科研单位联合开发的多离子电磁屏蔽夹克衫,其电磁辐射屏蔽衰减达到 99.4%,可用于多种场合的电磁辐射防护,也可应用于军队保密、伪装等领域。

2.6 电磁屏蔽织物生产现状

电磁屏蔽织物作为新型的 EMC 材料,兼有金属的导电性、电磁屏蔽的特性和纺织品的柔软、透气特性,是新兴用途广泛的屏蔽材料之一。目前,国内生产电磁屏蔽织物材料的企业多数采用化学镀、电镀工艺,制备的电磁屏蔽织物多以反射损耗为主。由于金属镀液受环境、人员操作、离子浓度、pH 值等的影响,电磁屏蔽织物产品稳定性较差;这些工艺多采用大量的重金属材料,环境污染严重。目前国内采用该技术的产品性能多处于 60~90 dB。此外,部分力量较为雄厚的企业采用改进的磁控溅射镀膜技术,虽然解决一定环境污染问

题,但该技术生产效率相对较低,一定程度上增加了产品的生产成本。

对于混纺技术开发,主要是金属丝和纤维纱线按照不同的比例合股,改变纱线的密度和合股纱的种类,来达到电磁屏蔽的效果,但由于国内技术设备精度、超细金属纤维在织造过程中的缠绕问题、金属纤维易断等问题一直未解决,因此目前采用该技术生产的产品屏蔽性能相对较差。

目前在国际上,供应电磁屏蔽织物产品的只有几家企业,如韩国 Metaline、德国 Schlegel、Shiedex、美国英国跨国公司 Laird 和日本 Seiren,这些公司技术力量雄厚,在电磁屏蔽材料行业已有多年的技术经验,产品的性能稳定,其采用的技术已从污染严重的电镀或化学镀工艺向环保的技术工艺发展,如采用先进的等离子技术、超临界技术等,同时也有部分公司采用先进的编织技术、混纺技术织造电磁屏蔽材料,产品档次高、性能稳定、生产效率高。与此同时,这些公司加大对吸波材料的研究,尤其是智能隐身材料的研究,部分先进的技术已应用到武器装备中,而国内对于智能型吸波材料的研究仍处于探索性阶段,技术力量相对薄弱,研究主要集中在概念及基础理论研究、机体智能材料及结构元件的研制等方面。对于新型多离子电磁屏蔽织物的研究开发,国内的技术相对薄弱,虽已有新产品面市,但价格昂贵。

3 电磁屏蔽织物材料发展趋势

随电器产品越来越普遍,电磁辐射产生的问题也日益严重,探索高效电磁屏蔽材料尤其是柔性电磁屏蔽织物,防止电磁波引起的电磁干扰、电磁兼容及对人体的伤害,对提高电子产品、弹药、引信、精密电子武器装备等的安全可靠性及人身安全,确保信息通信系统、网络系统、传输系统、武器平台等的安全畅通及人身安全具有十分重要的意义。

新型的电磁屏蔽织物材料将向吸波织物材料的方向发展,并且要求屏蔽织物材料具有“薄、轻、宽、强”的特性,同时需要建立相应的屏蔽理论、材料的表征参数及材料的设计机制。而采用纳米材料和纳米技术是未来电磁屏蔽织物材料最重要的发展方向,但该技术目前仍处于萌芽阶段,尚无可投产的产品。而采用纺织复合方法制备的电磁屏蔽织物是充分开发现有材料性能潜力、增进材料吸波性能的一种有效方法。此外,对于混纺技术中金属纤维束不易牵伸、细纱的粗细节多、混合不均及断头效率高等问题,应进一步探索工艺,改善纺纱质量,提高生产效率及成品率。

而随着电磁屏蔽织物材料需求的不断扩大,对电磁屏蔽织物的性能要求也越来越高,不仅要求织物材料具有抗宽频电磁屏蔽波辐射、耐候性、可热封、可折叠等优点,而且还希望织物具有穿着舒适、抗紫外线辐射、抗菌等功能。

4 结论

电磁屏蔽织物材料因涉及民用产品关键性能、国家信息安全和军事核心机密,国际上公开交流的有价值信息不多,

尤其是产业化的技术更是较少。而欧、美等国对电磁屏蔽理论研究与商业应用开展较早,中国与之差距较大。尤其是民用纺织品的价格昂贵,难以推广,须加强电磁屏蔽织物材料的研究和开发,实质性的提升国际竞争力。

参考文献 (References)

- [1] 赵灵智, 胡社军, 何琴玉, 等. 电磁屏蔽材料的屏蔽原理与研究现状[J]. 包装工程, 2006(2): 1-4.
Zhao Linzhi, Hu Shejun, He Qinyu, et al. *Packaging Engineering*, 2006 (2): 1-4.
- [2] Hong Y K, Lee C Y, Jeong C K, et al. Electromagnetic interference shielding characteristics of fabric complexes coated with conductive polypyrrole and thermally evaporated Ag [J]. *Current Applied Physics*, 2001, 1(6): 439-442.
- [3] Hakansson E, Amie A, Kaynak A. Dielectric characterization of conducting textiles using free space transmission measurements: Accuracy and methods for improvement [J]. *Synthetic Metals*, 2007, 157: 1054-1063.
- [4] Lin J C. Personal telecommunication radiation safety and the precautionary principle [J]. *IEEE Antennal and Propagation Magazine*, 2003, 45(2): 142-145.
- [5] Kim M S, Kim H K, Byun S W, et al. PET fabric/polypyrrole composite with high electrical conductivity for EMI shielding [J]. *Synthetic Metals*, 2002, 126(2-3): 233-239.
- [6] 甘雪萍, 胡文彬, 张青青, 等. 电磁波屏蔽织物的发展现状 [J]. 表面技术, 2006, 35(6): 48-50.
Gan Xueping, Hu Wenbin, Zhang Qingqing, et al. *Surface Technology*, 2006, 35(6): 48-50.
- [7] 詹建朝, 张辉, 沈兰平. 不同增重率化学镀银电磁屏蔽织物的研究[J]. 表面技术, 2006, 35(3): 25-27.
Zhan Jianchao, Zhang Hui, Shen Lanping. *Surface Technology*, 2006, 35 (3): 25-27.
- [8] Han E G, Kim E A, Oh K W. Electromagnetic interference shielding effectiveness of electroless Cu-plated PET fabrics [J]. *Synthetic Metals*, 2001, 123: 469-476.
- [9] Guo R H, Jiang S Q, Yuen C W M, et al. An alternative process for electroless copper plating on polyester fabric [J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2009, 20: 33-38.
- [10] 杨广舟, 宣天鹏, 冯书争, 等. Ni-P-La 合金镀层电磁屏蔽效能的研究[J]. 金属功能材料, 2006, 13(2): 17-20.
Yang Guangzhou, Xuan Tianpeng, Feng Shujing, et al. *Metallic Functional Materials*, 2006, 13(2): 17-20.
- [11] Takano N, Hosoda N, Yamada T, et al. Effect of oxidized silicon "surface on chemical deposition of nickel on n-type silicon wafer"[J]. *Electrochemical Acta*, 2000, 45: 3263-3268.
- [12] 魏杰, 苏荣军, 周定. 电镀镍新工艺的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(4): 97-101.
Wei Jie, Su Rongjun, Zhou Ding. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1998, 30(4): 97-101.
- [13] Yuen C W M, Jiang S Q, Kan C W, et al. Influence of surface treatment on the electroless nickel plating of textile fabric [J]. *Applied Surface Science*, 2007(253): 5250-5257.
- [14] 贺娟, 王花娥, 薛元, 等. 电磁波辐射屏蔽织物的研究发展现状[J]. 山东纺织科技, 2008(3): 44-47.
He Juan, Wang Hua'e, Xue Yuan, et al. *Shandong Textile Science and Technology*, 2008(3): 44-47.
- [15] Huang C Y, Wu C C. The EMI shielding effectiveness of PC/ABS/nichel-coated-carbon-fibre composites [J]. *European Polymer Journal*, 2000, 36: 2729-2737.
- [16] 钟良, 刘传慧, 刘继胜. 多层电磁屏蔽镀层制备工艺研究 [J]. 工艺与



- 检测, 2008(11): 82-83.
Zhong Liang, Liu Chuanhui, Liu Jisheng. *Technology and Test*, 2008 (11): 82-83.
- [17] 甘雪萍, 胡文彬, 刘自强, 等. 电磁波屏蔽用导电涤纶织物的制备方法[P]. CN 1693576, 2005-11-09.
Gan Xueping, Hu Wenbin, Liu Ziqiang, *et al.* The preparation method of electromagnetic shielding conductive polyester fabric[P]. CN 1693576, 2005-11-09.
- [18] 楚克静, 王炜. 锡镍合金柔性电磁屏蔽材料的研制[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(6): 16-20.
Chu Kejing, Wang Wei. *Development and Application of Materials*, 2008, 23(6): 16-20.
- [19] 刘绍芝, 郑惠敏. 一种电磁波屏蔽织物及其制备方法 [P]. CN 1173092, 2004-10-27.
Liu Shaozhi, Zheng Huimin. An electromagnetic shielding fabric and its preparation method[P]. CN 1173092, 2004-10-27.
- [20] 邹建平. 抗电磁辐射屏蔽织物的制备方法 [P]. CN 1345996, 2004-04-24.
Zou Jianping. A preparation method of anti-electromagnetic radiation shielding fabric[P]. CN 1345996, 2004-04-24.
- [22] Gan Xueping, Wu Yating, Liu Lei, *et al.* Electroless plating of Cu-Ni-P alloy on PET fabrics and effect of plating parameters on the properties of conductive fabrics [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 445: 308-313.
- [23] Gan Xueping, Wu Yating, Liu Lei, *et al.* Electroless copper plating on PET fabrics using hypophosphite as reducing agent [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201: 7018-7023.
- [24] 杜莉娟, 姚玉源, 陈文兴. 粘合剂涂层对磁控溅射镀铝织物牢度的影响[J]. 浙江理工大学学报, 2007, 24(2): 122-124.
Du Lijuan, Yao Yuyuan, Chen Wenxing. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2007, 24(2): 122-124.
- [25] Yu Xiaozheng, Shen Zhigang. Metal copper films coated on microparticle substrates using an ultrasonic-assisted magnetron sputtering system[J]. *Powder Technology*, 2008, 187: 239-243.
- [26] 周菊先. 电磁波屏蔽织物的溅射/化学复合技术镀膜技术 [J]. 印染, 2008, 34(5): 1-6.
Zhou Juxian. *Printing and Dying*, 2008, 34(5): 1-6.
- [27] 洪剑寒. 磁控溅射镀银电磁屏蔽织物的开发 [J]. 高职论丛, 2007(4): 21-23.
Hong Jianhan. *Higher Vocational Education Forum*, 2007(4): 21-23.
- [28] 刘飏, 宫建国. 纳米技术在微波材料中的应用 [J]. 材料导报, 2003(3): 45-47.
Liu Biao, Gong Jianguo. *Materials Review*, 2003(3): 45-47.
- [29] 周菊先, 吴永刚. 电磁波屏蔽织物的真空溅射镀膜和化学镀膜复合制造方法及其产品[P]. CN 200710039226.2, 2007-09-22.
Zhou Juxian, Wu Yonggang. The manufacturing method and products of electromagnetic shielding by sputtering vacuum and chemical coating [P]. CN 200710039226.2, 2007-09-22.
- [30] 余凤斌, 牛玉超, 夏祥华. 导电聚合物材料镀层电阻特性及附着力研究[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 37-39.
Yu Fengbin, Niu Yuchao, Xia Xianghua. *Insulating Materials*, 2008, 41 (3): 37-39.
- [31] 林磊, 夏祥华, 耿秋菊, 等. 一种导电屏蔽织物 [P]. CN 201174256, 2008-03-24.
Lin Lei, Xia Xianghua, Geng Qiuju, *et al.* A conductive electromagnetic shielding fabric[P]. CN 201174256, 2008-03-24.
- [32] 余凤斌, 夏祥华, 耿秋菊, 等. 电磁屏蔽织物的制备及性能表征[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(6): 34-35.
Yu Fengbin, Xia Xianghua, Geng Qiuju, *et al.* *Electroplating and Finishing*, 2008, 27(6): 34-35.
- [33] Savrum E, Aguila H D. Electrically conductive tungsten silicide coatings for EMI/RFI of optically transparent windows [J]. *Journal of Materials Science*, 1998(3): 2893-2897.
- [34] Yuen C W M, Jiang S Q, Kan C W, *et al.* Influence of surface treatment on the electroless nickel plating of textile fabric [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253: 5250-5257.
- [35] Scholz J, Nocke G, Hollstein F, *et al.* Investigations on fabrics coated with precious metals using the magnetron sputter technique with regard to their anti-microbial properties [J]. *Surface and Coating Technology*, 2005, 192(2-3): 252-256.
- [36] Li Y, Cheng X Y, Leung M Y, *et al.* A flexible strain sensor from polypyrrole-coated fabrics[J]. *Synthetic Metals*, 2005, 155: 89-94.
- [37] Cucchi I, Boschi A, Arosio C, *et al.* Bio-based conductive composites: Preparation and properties of polypyrrole (PPy)-coated silk fabrics[J]. *Synthetic Metals*, 2009, 159: 246-253.
- [38] Lee C Y, Lee D E, Jeong C K, *et al.* Electromagnetic interference shielding by using conductive polypyrrole and metal compound coated on fabric[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2002, 13: 577-583.
- [39] Hong Y K, Lee C Y, Jeong C K, *et al.* Electromagnetic interference shielding characteristics of fabric complexes coated with conductive polypyrrole and thermally evaporated Ag [J]. *Current Applied Physics*, 2001, 1(6): 439-442.
- [40] Kim M S, Kim M S, Song K. EMI shielding intrinsically conducting polymer/PET textile composites [J]. *Synthetic Metals*, 2003 (135-136): 105-106.
- [41] 义小苏, 解思深, 刘刚, 等. 碳纳米管无纺布电磁屏蔽复合材料的制备方法[P]. CN 101163390, 2007-11-29.
Yi Xiaosu, Xie Sishen, Liu Gang, *et al.* The preparation of carbon nanotubes non-woven electromagnetic shielding [P]. CN 101163390A, 2007-11-29.
- [42] Park K Y, Lee S E, Kim C G, *et al.* Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66: 576-584.
- [43] Yuen Siu M, Ma Chen C M, Chuang Chia Y, *et al.* Effect of processing method on the shielding effectiveness of electromagnetic interference of MWCNT/PMMA composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68: 963-968.
- [44] 邓龙江, 周佩珩, 翁小龙. 磁性电磁吸波材料的研究现状与进展[J]. 功能材料学报, 2005, 2(4): 8-10.
Deng Longjiang, Zhou Peiheng, Weng Xiaolong. *Functional Materials*, 2005, 2(4): 8-10.
- [45] Cao Huiqun, Zhu Meifang, Li Yaogang. Synthesis and characterization of polypyrrole nanocomposites cooperated with multiwalls carbon nanotubes/Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe₂O₄[C]. Proceedings of 2005 International Conference on Advanced Fibers and Polymer Materials, 2005: 1048-1051.
- [46] 商善思. 屏波织物及其应用[J]. 安全与电磁兼容, 2002(2): 43-45.
Shang Shansi. *Safety and EMC*, 2002(2): 43-45.
- [47] Chen H C, Lee K C, Lin J H, *et al.* Comparison of electromagnetic shielding effectiveness properties of diverse conductive textiles via various measurement techniques [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192: 549-554.
- [48] Chen H C, Lee K C, Lin J H, *et al.* Fabrication of conductive woven fabric and analysis of electromagnetic shielding via measurement and empirical equation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184: 124-130.
- [49] 山西华丽服饰科技发展有限公司. 电磁波防护面料的开发研究与应用[J]. 中国个体防护装备, 2006(1): 15-17.
Shanxi Huali Trappings Technology Development Limited Corporation. *China Personal Protection Equipment*, 2006(1): 15-17.
- [50] Lee S E, Park K Y, Oh K S, *et al.* The use of carbon/dielectric fiber woven fabrics as filters for electromagnetic radiation [J]. *Carbon*, 2009, 47(8): 1896-1904.
- [51] Chung D D L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J]. *Carbon*, 2001(17): 279-285. (责任编辑 陈广仁)

