

蓄光织物的性能及应用

邵月冰, 宋晓霞*

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

摘要:介绍了蓄光织物用发光材料及纤维的发展,总结当前蓄光织物的不同性能,着重叙述发光性能的影响因素,分析蓄光织物在服装等领域的市场和应用现状。研究得出,蓄光织物安全无毒,节省能源,环保可回收,附加值高,服用性能良好,应用领域广泛;但同时存在发光材料和纤维颜色不够丰富,发光亮度较低,服装市场受限等问题。分析认为,未来可以提升蓄光型发光材料和纤维的制备技术,着重研究夜光服装的热湿舒适性,并针对不同需求进行产品设计。

关键词:蓄光织物;夜光;稀土;发光性能;安全警示功能

中图分类号:TS 156 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2024)01-0011-07

Properties and Applications of Light Storage Fabrics

SHAO Yuebing, SONG Xiaoxia*

(School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: This paper introduced the development of luminescent materials and fibers for light storage fabrics, summarized the different properties of current light storage fabrics, focused on the influencing factors of luminescent properties, and analyzed the market and application status of light storage fabrics in the field of clothing. The results show that light storage fabrics are safe, non-toxic, energy-saving, environmentally friendly and recyclable, with high added value, good wear performance, and a wide range of applications. However, there are also issues such as insufficient color of luminescent materials and fibers, low luminous brightness, and limited clothing market. The research shows that the preparation technology of light storage luminescent materials and fibers can be improved in the future, the thermal-wet comfort of luminous clothing can be studied, and the product design can be carried out according to different needs.

Key words: light storage fabric, luminous, rare earth, luminescent properties, safety warning function

随着经济的发展和生活水平的不断提升,人们对服装功能和外观有了更高的要求。蓄光织物是一种兼具安全警示功能和特殊视觉效果的新型织物,只需可见光、紫外光照射 10 min,就可以在夜晚自行发光 10 h。蓄光织物利用电子的能级跃迁发光,即吸收一定可见光能量,从而在无光时实现持续发光^[1-2]。蓄光织物不仅具有安全警示功能,还有非常高的附加值,其在多个领域都有应用,如建筑装饰、交通运输、军事设施、家居生活等。为了梳理蓄光织物的优点和不足,探讨其未来发展空间,

文中总结了发光材料的发展历程、蓄光纤维和织物的制备过程,分析织物性能的研究现状及市场应用情况,以为蓄光织物的后期发展提供一定参考。

1 蓄光织物用发光材料及织物的制备

1.1 蓄光织物用发光材料

蓄光织物发光是源于其中的发光材料。发光材料经过多年技术更迭,已历经3代:第1代发光材料中含有镭元素,具有放射性,对人体有害;第2代

收稿日期:2023-07-13; 修订日期:2023-11-29。

基金项目:企事业委托科研项目[0239-E4-6000-19-0339(19)FZ-020]。

作者简介:邵月冰(1996—),女,硕士研究生。

*通信作者:宋晓霞(1972—),女,教授,硕士生导师。主要研究方向为针织服装设计与智能织造、服装舒适性与功能。

Email:songxiaoxiaivian@126.com

发光材料是硫化物,具有毒性、放射性,发光亮度较低,发光持续时间较短;第 3 代发光材料即现在广泛使用的蓄光型发光材料,发光性能得到了大幅提升^[3]。3 代发光材料对比情况见表 1。

表 1 3 代发光材料对比

Tab.1 Comparisons of luminescent materials between three generations

项目	第 1 代发光材料	第 2 代发光材料	第 3 代发光材料
组成成分	镭元素和硫化锌的混合物	稀土元素或铜盐激活的硫化物体系 ^[5]	稀土元素激活的铝酸盐、硅酸盐、镓酸盐、锡酸盐和钛酸盐等体系 ^[5]
优点	黄绿色光,发光亮度高 ^[4]	发光颜色多样且较鲜艳	光色较多,无放射性,无毒无害,发光亮度较高,持续时间长,稳定性好
缺点	有放射性,对人体和环境危害大	有毒害性、放射性,发光亮度低,持续时间短,稳定性低,易潮解	合成温度高,遇水不稳定,发光颜色不丰富,生产成本低 ^[6] ,发光亮度不是很高

1.2 蓄光织物的制备

依据制备方式的不同,蓄光织物可以分为蓄光纤维织物和蓄光涂层(印花)织物。蓄光纤维织物是以长余辉发光材料(稀土离子为激活剂,碱土铝酸盐为基体制备而成)^[7]为原料,以涤纶、锦纶等纤维为基材制成蓄光型光致纤维,再经过特种纺丝工艺加工而成^[8];蓄光涂层(印花)织物是在发光材料中加入成膜物质和助剂制备成涂料后,在织物表面进行整理制备而成^[9]。

2 蓄光织物的性能

2.1 发光性能

发光性能是指织物处于绝对黑暗的条件下持续发光的性能,也称为余辉性能。影响织物发光性能的因素可分为织物因素、光源因素和外界服用环境因素。这些因素均在不同程度上削弱了织物的发光性能,因此如何降低这些因素对织物发光性能的削弱作用值得探讨。

2.1.1 织物因素 影响织物发光性能的织物因素有发光材料、有色颜料(织物颜色)、荧光颜料、纤维基质、织物的组织结构和密度。

1)发光材料的影响。不同发光材料会产生不同的发光颜色,例如,掺杂镭和镉的铝酸锶($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$)为黄绿色;掺杂镭和钕的铝酸钙($\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Nd}^{3+}$)、掺杂镭和钕的铝酸钡($\text{BaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Nd}^{3+}$)、掺杂镭和镉的硅酸钙镁($\text{CaMgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$)、掺杂镭和镉的硅酸锶镁($\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$)均为蓝色;掺杂镭和镉的钠钙锡锆氧化物($\text{Na}_2\text{CaSn}_2\text{GeO}_{12}:\text{Eu}^{3+},\text{Dy}^{3+}$)为橙红色;掺杂镭的氧化硫化钇($\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{2+}$)、钙钛矿(CaTiO_3)、掺杂锰和钕的硅酸镁($\text{MgSiO}_3:\text{Mn}^{2+},\text{Nd}^{3+}$)均为红色;掺杂镭和镉的锶锌硅氧化物($\text{Sr}_2\text{ZnSiO}_7:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$)、掺杂镭和镉的锶铝氧化物($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$)与掺杂镭、镁、钛的氧化硫化

钇($\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{2+},\text{Mg}^{2+},\text{Ti}^{4+}$)混合为白色。

2)有色颜料、荧光颜料的影响。EBRA-HIMZADE A 等^[10]采用不同量的 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ 作为发光剂,熔纺了发光聚丙烯纤维,并制成针织物,分别用分散染料、酸性染料和碱性染料染色。结果表明,染料会影响染色蓄光织物的余辉强度,可染性的提高使发光强度减弱。闫彦红^[11]通过实验得出,有色颜料对蓄光纤维的发光亮度影响较大,颜料的添加降低了蓄光纤维的发光亮度,颜料颜色的明暗程度对蓄光纤维的发光亮度影响较大。ZHU Y N 等^[12]以稀土铝酸锶为稀土发光材料,以成纤聚合物为基体,制造了含有不同光转换剂的发光纤维,研究了光转换剂对纤维发光性能的影响。研究表明,制造过程没有破坏纤维中的 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$,聚合物基体也没有与 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ 反应,保证了纤维中 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ 的发光特性。LI J 等^[13]用稀土铝酸锶(SrAl_2O_4)制备了发光非织造布,使用印染技术用发出紫色光的光敏材料处理,结果显示,织物的发光特性在印刷过程中发生了变化。LI J 等^[14]还用多色荧光颜料和 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ 发光材料制备了发光涂层织物,结果显示,蓝色荧光颜料对涂层织物的亮度影响较大,使用黄绿色荧光颜料时,初始亮度较低,余辉亮度损失较大,但是涂层织物的初始亮度增加。

综上所述,不同种类、不同颜色的颜料会在不同程度上降低织物的发光性能,但是光转换剂对织物发光性能没有影响。因此,可以通过添加光转换剂等方法实现织物的颜色变换,降低颜料对织物发光性能的影响。

3)纤维基质、织物组织结构和密度的影响。闫彦红^[11]通过实验表明,纤维基质对蓄光纤维的发光亮度影响较大,相对锦纶 6 蓄光纤维而言,涤纶蓄光纤维的发光亮度明显下降。李婧等^[15]通过实验得出,采用白色蓄光绣线绣制的机绣织物发光亮度最

大,彩色绣线绣制的织物发光亮度相对较低,且发光亮度由高到低依次是黄色>绿色>蓝色>红色。郭雪峰等^[1]通过实验得出,在其他条件相同的情况下,罗纹组织蓄光织物的发光亮度比双反面组织和纬平针组织的蓄光织物强,且发光亮度随织物组织密度的增大而增大。于景超^[16]运用模糊数学综合评判的方法,得出 1+1 罗纹组织的综合性能最优。LI J 等^[17]采用计算机辅助绣花机制作蓄光面料,结果表明,针距的大小与织物的发光强度成反比,采用榻榻米针的织物具有最大的余辉强度,与不叠缝的织物相比,叠缝的发光织物亮度更高,发光时间更长,发光稳定性更好。

综上,可以拓宽纤维基质的研究种类,找到发光性能相对更优的纤维基质;不同组织结构织物的发光性能不同,组织结构越密集、越厚实,织物的发光性能越好,因此可以挖掘更多组织结构的蓄光织物,在保证发光性能的前提下,尽可能提升织物的美观性。

2.1.2 光源因素 影响织物发光性能的光源因素有光源种类和激发时间。袁志磊等^[18]通过实验得出,光源、激发时间和水洗都对织物的发光性能有影响,在相同光照强度下,用 D65 光源激发的初始亮度最大,其次为 CWF 光源、A 光源,F 光源激发的初始亮度最低;初始亮度随着激发时间的延长逐渐增强,20 min 后达到饱和。由此得出,在进行织物发光性能实验时,要注意光源种类和激发时间这两个变量,保证光源种类不变,光源激发时间保持在 20 min 左右即可。

2.1.3 外界服用环境因素 影响织物发光性能的外界服用环境因素有摩擦、酸碱处理、紫外辐射、水洗和皂洗。蓄光涂层织物经过干摩擦处理后,发光材料会不同程度地从织物上脱落,使其发光性能变差^[19];YAN R S 等^[20]制备的发光浸涂织物经过穿着、储存、光能释放、皂洗、晾干反复循环后,发光亮度略有下降。袁志磊等^[18]通过实验发现,经过洗涤的蓄光纤维织物和涂层织物的发光性能都有不同程度的下降。闫彦红^[11]通过实验发现,酸碱处理、紫外辐射及水洗对蓄光纤维的发光亮度稍有影响。

因此,应深入探讨如何降低摩擦等外界环境因素对蓄光织物发光性能的影响。此外,在使用蓄光织物产品的时候,需要注意产品的养护,尽量减少摩擦和洗涤。

2.2 光色性能

影响织物光色性能的因素有纤维颜色、有色颜

料颜色的色相和光转换剂。江南大学^[21]研制出 11 种不同颜色的稀土蓄光纤维发光纺织面料,以及发光毛绒玩具等蓄光纤维发光制品。孙理等^[22]研究了蓄光材料在不同织物上的发光性能,将蓝色涂料 blue K-BC、黄色涂料 yellow K-RC、荧光绿 G 以及荧光橙 F-GRN 加入夜光粉中获得光色效果。闫彦红^[11]研究了蓄光纤维颜色与光色的关系,分析了有色颜料的添加对蓄光纤维光色性能的影响。结果表明,蓄光纤维的色相由所添加有色颜料颜色的色相决定;有色颜料的添加量影响蓄光纤维颜色的纯度;蓄光纤维的光色均落于人眼比较敏感的黄绿光区域,人眼对白色蓄光纤维敏感程度最高,其次是黄色、绿色、蓝色和红色。ZHU Y N 等^[12]研究表明,通过掺入不同的光转换剂,蓄光纤维的发射颜色可以很容易地从黄绿色调到橙红色。然而蓄光织物的光色性能还存在一定的局限性。李松坤等^[23]介绍了绿、蓝、红、白色长余辉发光材料的成分和制备,指出为扩大长余辉发光材料的应用范围,需进一步丰富材料的发光颜色。吕艳玲^[7]指出,目前绿光和蓝光的长余辉发光材料可达商用的要求,但红色长余辉发光材料的发光性能有待提高。芦博慧等^[24]指出,绿光和蓝光蓄光纤维的制备已经比较成熟,但余辉性能较好的红光蓄光纤维的制备技术还不成熟。汤晔^[25]提到,目前绿色长余辉材料的综合性能可达到商用要求,但其余发射波段的长余辉发光材料(特别是红色长余辉材料)均未能达到大规模商业要求,事实上即便是绿色长余辉发光材料,其性能也有待改进。综上得出,目前能够大规模商业化的蓄光纤维光色较为单一,多色蓄光纤维和多色发光材料的制备技术还不够成熟。因此,需开发光色更丰富且可大规模商业化的蓄光纤维,提高制备蓄光纤维和多色发光材料的技术。

2.3 环保性能

蓄光型发光材料十分珍贵,目前已经研究出很好的回收方案,实现蓄光织物的高可回收性。ZHU Y N 等^[26]采用醇解法从发光聚酯织物中回收了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 发光材料,结果表明,在一定条件下聚酯发光织物可基本降解,通过在回收的发光材料中加入乙二醇和 $\text{Zn}(\text{AC})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,再放入氮气中加热,可获得高纯度的发光材料。蓄光纤维的制作过程非常环保,无需进行染色,避免了染色废水的污染。

目前应用最广泛的是稀土铝酸盐的蓄光型发光材料,以此制备的蓄光织物没有辐射,没有放射性,没有毒性,对环境友好,对人体无害,且蓄光织

物可无限循环使用,可储存太阳能实现夜晚发光。太阳能是清洁能源,无需用电,可节约能源,符合国家倡导的可持续发展要求^[27]。

2.4 服用性能

消费者对蓄光织物服用性能和热湿舒适性的要求较高。宋烁莹^[28]对夜跑服的产品需求进行了问卷调查,得出消费者对夜跑服的需求依次是吸湿透气、易洗快干。

蓄光织物的服用性能较好。传统蓄光织物涂层不透气^[29],对服装的热湿舒适性有较大影响。于景超^[16]设计并开发出 6 种蓄光纤维针织面料,并对染色后的面料进行测试,测试结果表明,面料具有优异的服用性能和发光性能,适宜开发针织面料。高雪妮等^[30]通过实验得出,蓄光纤维的单纤强力比较高,有利于其纱线的加工和生产,也利于混纺加工;蓄光纤维纱线既耐酸也耐碱,但不耐强碱,所开发的空气层组织面料厚实挺括,适合针织时装内衣及毛衫的开发。王伟等^[31]制备的 PET 蓄光纤维不仅具有较强的发光亮度,也具有较大的断裂强度。陆艳等^[32]设计制作了蓄光机织面料,测试了面料的性能,结果显示,稀土夜光颗粒的加入可有效提高织物的抗紫外线性能和发光亮度,但略微降低了纤维的力学性能。陈嘉毅等^[33]制作了两种蓄光双层机织面料,结果显示,纯蓄光纤维面料的耐摩擦性能、拉伸性能及抗褶皱性相较于混纺面料稍差,但发光亮度明显更高。孙理等^[22]将多种颜色的涂料加入夜光粉中,制备成色浆后在织物表面进行印刷,测试结果表明,织物的色牢度能满足基本服用要求。

综上,蓄光织物可以较好满足服用性能的要求,但是当前对蓄光型发光材料和蓄光纤维的研究较多,对其所制夜光服装的研究较少,且消费者对夜光服装热湿舒适性的要求较高,因此可围绕夜光服装的热湿舒适性,研发舒适性良好的夜光服装。

3 蓄光织物及材料的应用

蓄光织物及材料的应用领域非常广泛,它所具备的夜光性能可以在诸多场景上得到应用,如夜间工作、家居娱乐等。虽然蓄光织物存在一定的局限性,在较强光照条件下,发光效果较差,但是它在特殊场景下仍具有很强的功能性,且它附加值高,未来的发展空间广阔。

3.1 服装领域的应用

蓄光织物具有很强的安全警示功能,在服装领域有广阔的发展空间,可以应用于宠物服装与配

饰、潮流服装、演出服、消防服、户外运动服、航空航天服等。

李佳玉^[34]使用蓄光纱线、普通棉、涤纶纱线等制作了夜光宠物服装与配饰(见图 1),方便主人及时找到爱宠。蓄光织物夜晚发光的性能可以呈现出新奇的效果,如夜光鞋带、夜光针织帽、夜光 T 恤等(见图 2),引起消费者尤其是年轻人的兴趣。蓄光织物还可以应用在舞台表演者的演出服上,呈现出特别的舞台效果,为舞蹈、小品、话剧等艺术创作提供了更多的可能性,丰富其艺术表达。在夜间救援、消防过程中,救援者更容易发现穿着夜光服装的求救者,从而快速实施救援,保障人员安全。此外,蓄光织物还可以应用于航海员的工作服上,一旦发生海难,发光的工作服可以使航海员更容易被救援人员发现。国际海事局曾作出相关规定,凡是在远洋轮上的工作服必须有夜光标记^[35]。



图 1 夜光宠物服装与配饰

Fig. 1 Luminous pet clothing and accessories



图 2 夜光潮流 T 恤

Fig. 2 Luminous fashion T-shirt

然而分析服装市场现状,发现蓄光材料大多以涂层的方式实现,可能是因为涂层操作简单;另外,蓄光织物主要应用于潮流服装和户外儿童服装上,在高端服装领域极少见,在服装市场存在一定局限性,分析原因如下。

1) 稀土资源大部分分布在中国^[36],因此相对而言,国外研发人员缺乏对稀土的了解。欧美地区在

全球时尚领域有较高的话语权,蓄光织物缺少欧美研发人员的关注,因而其在国际服装市场上存在局限性。

2)蓄光织物虽然在夜晚无需光源就可以自行发光,但是在有光照的情况下,发光亮度难以被肉眼察觉。蓄光织物在夜晚都市街道的灯光下发光效果较差,远不如反光材料的效果好。反光材料在交通运输领域应用广泛,因为夜晚的车灯光照强度非常大,经反光材料反射后的光线非常醒目,而蓄光材料在强光下发光亮度低;但是在较为黑暗的条件下,蓄光织物可以发光,反光条则不行,因此在进行夜跑服等服装设计时,可以将蓄光织物和反光条相结合。

3)蓄光织物的光色较为单一,制造商没有掌握较为成熟的制备多色蓄光织物的技术,因此蓄光织物没有受到商家和设计师的青睐。

3.2 家居领域的应用

蓄光织物可以应用在家居领域,如夜光儿童窗帘(见图 3),通过夜间发光营造趣味性及氛围感,并能起到夜间寻物的作用。蓄光织物在毛绒玩具上也有很好的应用(见图 4),能为怕黑的儿童在夜晚睡觉时提供一点光亮,使儿童更有安全感。2010 年上海世界博览会吉祥物——海宝就是由蓄光织物制作而成,受到了国内外游客的广泛关注。

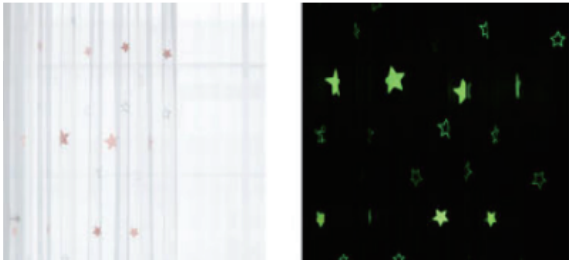


图 3 夜光儿童窗帘

Fig. 3 Luminous curtains for children



图 4 夜光毛绒玩具

Fig. 4 Luminous plush toys

3.3 工业产品的应用

蓄光织物可以应用在夜间军事训练的降落伞等军事装备上,提升训练安全性^[35];应用在野战部队中,如卫生包上,以便卫生员在无光的环境中快

速实施卫勤保障^[37];还可以应用到夜间救援领域,如救援绳索(见图 5)、消防器材等,以更好地保障人员安全。在日本等渔业发达的国家,蓄光纤维已经被制作成夜光渔网投入实际生产中^[38],中国也有很多用蓄光材料制备的产品,如诱鱼夜光珠、夜光鱼漂、钓鱼夜光棒、夜光假饵等(见图 6),这些产品都是利用鱼类、蚯蚓等生物的趋光性,达到提高捕捞量的目的。



图 5 夜光救援绳索

Fig. 5 Luminous rescue ropes



图 6 夜光假饵

Fig. 6 Luminous decoy

蓄光型发光材料还可以应用在室内外装潢、公路工程方面。蓄光陶瓷的发光颜色多种多样,可适用于室内外装饰材料^[39],如地砖、条砖、腰线砖、墙砖等,既美化家居环境,又方便人们夜晚时在房间内活动,避免发生意外伤害。蓄光人造石材也可以应用于建筑物的内外装修上^[40],它属于节能、环保、低碳的新型建材,在商业步行街、小区绿地步道、楼梯发光踏步台阶、池塘边缘等场景中都可以大量使用^[41]。蓄光道路标识材料能在雨夜、烟雾等环境中弥补发光材料的不足^[42],具有夜间行车视线诱导的作用,也能为行人起到引导作用^[43]。

4 结 语

目前,对蓄光织物的研究已经取得了较大的进展,然而在实际应用中,蓄光织物的发光性能、光色性能还是稍显不足,并且缺少研发人员的关注,导致在服装市场上的应用并不广泛。后续可以从以

下方向展开研究。

1)提升制备蓄光型发光材料和纤维的技术。如今第3代发光材料的发光性能较好,但仍有较大的发展空间,需探究如何降低织物颜色、纤维基质、洗涤等因素对发光强度的影响;在光色性能上,可以开发光色种类更加丰富的材料,并实现大规模商业化生产。

2)着重研究蓄光织物所制夜光服装的热湿舒适性。热湿舒适性是评判夜光服装能否被市场接受的重要指标,目前研究多是针对蓄光纤维的热湿舒适性,而针对夜光服装的相对较少,因此可以开发穿着舒适性良好的服装。

3)针对不同需求进行设计。在光照强度较低的场景,蓄光织物有较好的发光效果。可以寻找更多光照强度低的场景,结合使用者需求,增加产品的附加值,使产品具有舞台发光、安全警示、安抚心灵等功能;在光照强度较高的场景,可以在蓄光织物上添加反光材料,使服装的安全警示功能达到最大。

参考文献:

- [1] 郭雪峰,杨静芳,葛明桥. 发光针织面料的设计开发及应用[J]. 针织工业, 2015(10): 20-23.
GUO Xuefeng, YANG Jingfang, GE Mingqiao. Design and development of photoluminescent knitted fabric[J]. Knitting Industries, 2015(10): 20-23. (in Chinese)
- [2] 赵菊梅,高小亮. 稀土长余辉发光材料在纺织上的应用[J]. 轻纺工业与技术, 2010, 39(6): 38-40.
ZHAO Jumei, GAO Xiaoliang. Application of rare earth long afterglow luminescent materials in textile industry [J]. Light and Textile Industry and Technology, 2010, 39(6): 38-40. (in Chinese)
- [3] 高晗,迟祥,宋晓雪,等. 发光纤维的研究进展[J]. 功能材料, 2021, 52(2): 2085-2097.
GAO Han, CHI Xiang, SONG Xiaoxue, et al. Research progress of luminescent fiber[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(2): 2085-2097. (in Chinese)
- [4] 胡丽云. 20 世纪初“镭姑娘事件”研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [5] 张丽,胡建伟,冯蒙丽,等. 掺杂长余辉发光材料的研究概况[J]. 化工新型材料, 2022, 50(3): 54-59.
ZHANG Li, HU Jianwei, FENG Mengli, et al. Research status of doped long afterglow luminescent material[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(3): 54-59. (in Chinese)
- [6] 徐艺嘉. 浅谈蓄光型发光材料[J]. 四川水泥, 2017(1): 258.
XU Yijia. Discussion on light storage luminescent

materials[J]. Sichuan Cement, 2017(1): 258. (in Chinese)

- [7] 吕艳玲. 长余辉发光材料研究进展[J]. 广州化工, 2017, 45(18): 6-7.
LYU Yanling. Research progress on long afterglow phosphors [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(18): 6-7. (in Chinese)
- [8] 赵菊梅,郭雪峰,徐燕娜,等. 稀土铝酸锶夜光纤维的发光性质[J]. 纺织学报, 2008, 29(11): 1-5.
ZHAO Jumei, GUO Xuefeng, XU Yanna, et al. Luminescence properties of rare-earth strontium aluminate luminescent fiber[J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(11): 1-5. (in Chinese)
- [9] 赵奇,何利万,皮红. 蓄能型发光涂料的研究进展[J]. 涂料工业, 2017, 47(8): 70-75.
ZHAO Qi, HE Liwan, PI Hong. Progress in energy storage luminescent coatings [J]. Paint and Coatings Industry, 2017, 47(8): 70-75. (in Chinese)
- [10] EBRAHIMZADE A, RAHBAR R S, MOJTAHEDI M R M, et al. Probing the photoluminescence characteristics and dyeability of dyed luminous polypropylene fabric[J]. Fibers and Polymers, 2019, 20(12): 2529-2539.
- [11] 闫彦红. 夜光纤维用发光材料与纤维光色性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [12] ZHU Y N, GE M Q. Effect of light conversion agent on the luminous properties of rare earth strontium aluminate luminous fiber [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27(1): 580-586.
- [13] LI J, LI Y G, SONG X L, et al. Photochromic printing and spectral properties of luminous polyester non-woven fabric[J]. Surface Innovations, 2020, 8(3): 138-144.
- [14] LI J, ZHU Y N, GE M Q. Influence of fluorescent pigments on the spectral characteristics of luminous coated fabrics [J]. Materials Research Express, 2021, 8(11): 115703.
- [15] 李婧,葛明桥. 蓄能型夜光机绣织物的余辉亮度研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(9): 150-152.
LI Jing, GE Mingqiao. Study on afterglow brightness of accumulating luminous computer-embroidery fabric [J]. New Chemical Materials, 2015, 43(9): 150-152. (in Chinese)
- [16] 于景超. 夜光纤维针织面料的研究与开发[D]. 西安: 西安工程大学, 2011.
- [17] LI J, CHEN Z, GE M Q. Computer-aided design of luminous fiber embroidered fabric and characterization of afterglow performance [J]. Textile Research Journal, 2016, 86(11): 1162-1170.
- [18] 袁志磊,张薇薇,沈波,等. 纺织品蓄光性能评价的影响因素[J]. 印染助剂, 2020, 37(1): 62-64.
YUAN Zhilei, ZHANG Weiwei, SHEN Bo, et al. Influ-

- encial factors of textile light-storing performances evaluation[J]. Textile Auxiliaries, 2020, 37(1): 62-64. (in Chinese)
- [19] 朱亚楠, 吴敏, 葛明桥, 等. 夜光涂层织物发光性能[J]. 印染, 2011, 37(5): 13-15.
ZHU Yanan, WU Min, GE Mingqiao, et al. Luminous property of the coatings[J]. Dyeing and Finishing, 2011, 37(5): 13-15. (in Chinese)
- [20] YAN R S, LI Y, ZHANG W, et al. Preparation and long-persistent luminescence study on strontium aluminate particles dip-coated compound textile [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5228-5240.
- [21] 郑宁来. 江南大学推出稀土夜光纤维[J]. 合成纤维工业, 2015, 38(2): 56.
ZHENG Ninglai. Jiangnan University launched rare earth luminous fiber [J]. China Synthetic Fiber Industry, 2015, 38(2): 56. (in Chinese)
- [22] 孙理, 杨梅, 夏建明. 夜光材料在织物上的发光性能研究[J]. 印染助剂, 2022, 39(6): 41-45.
SUN Li, YANG Mei, XIA Jianming. Luminescent property of luminous material on textile fabrics [J]. Textile Auxiliaries, 2022, 39(6): 41-45. (in Chinese)
- [23] 李松坤, 王小平, 王丽军, 等. 长余辉发光材料的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(5): 63-67, 84.
LI Songkun, WANG Xiaoping, WANG Lijun, et al. Research progress on long persistence luminescent materials[J]. Materials Review, 2014, 28(5): 63-67, 84. (in Chinese)
- [24] 芦博慧, 魏新, 朱亚楠, 等. 稀土夜光纤维光色的研究与进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(12): 210-214.
LU Bohui, WEI Xin, ZHU Yanan, et al. Research and development on light color property of rare earth luminous fiber[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(12): 210-214. (in Chinese)
- [25] 汤晔. Eu 激发的三基色长余辉材料的制备与发光性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [26] ZHU Y N, YU Q C, ZHENG L B, et al. Luminous properties of recycling luminous materials $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$, Dy^{3+} based on luminous polyester fabric [J]. Materials Research Express, 2020, 7(9): 095309.
- [27] SARKISOV P D, POPOVICH N V, ZHELNIN A G. Luminophores based on strontium aluminates produced by the sol-gel method [J]. Glass and Ceramics, 2003, 60(9): 309-312.
- [28] 宋烁莹. 夜跑服产品需求状况调查[J]. 纺织报告, 2019(10): 33-35, 38.
SONG Shuoying. Survey on the demand of night running suit products [J]. Textile Reports, 2019(10): 33-35, 38. (in Chinese)
- [29] 周谨. 稀土发光纤维发展现状及趋势[J]. 四川丝绸, 2003(2): 12-13.
ZHOU Jin. Development status and trend of rare earth luminescent fiber [J]. Sichuan Silk, 2003(2): 12-13. (in Chinese)
- [30] 高雪妮, 孟家光, 于景超. 夜光纤维及纱线的性能研究与面料开发[J]. 针织工业, 2013(2): 26-29.
GAO Xueni, MENG Jiaguang, YU Jingchao. Study of luminescent fiber and yarn properties and its fabric development [J]. Knitting Industries, 2013(2): 26-29. (in Chinese)
- [31] 王伟, 刘传生, 严岩, 等. 稀土 PET 夜光纤维的研制及性能研究[J]. 合成技术及应用, 2020, 35(2): 14-18.
WANG Wei, LIU Chuansheng, YAN Yan, et al. Development and properties of rare-earth PET luminous fiber [J]. Synthetic Technology and Application, 2020, 35(2): 14-18. (in Chinese)
- [32] 陆艳, 莫晨良, 金智奇, 等. 稀土夜光小提花机织面料的开发及性能测试[J]. 上海纺织科技, 2020, 48(12): 31-33.
LU Yan, MO Chenliang, JIN Zhiqi, et al. Development and performance testing of small jacquard woven rare earths luminous fabric [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2020, 48(12): 31-33. (in Chinese)
- [33] 陈嘉毅, 陈爱华, 赵磊, 等. 夜光双层机织面料的开发与性能研究[J]. 上海纺织科技, 2015, 43(9): 56-58.
CHEN Jiayi, CHEN Aihua, ZHAO Lei, et al. The development and properties of double woven luminous fabric [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2015, 43(9): 56-58. (in Chinese)
- [34] 李佳玉. 发光织物的创新设计与应用研究[D]. 北京: 北京服装学院, 2021.
- [35] 徐燃霞, 葛明桥. 蓄能型夜光织物的开发及应用[J]. 江南大学学报, 2004(2): 184-187.
XU Ranxia, GE Mingqiao. Exploitation and application of accumulating luminous fabrics [J]. Journal of Southern Yangtze University, 2004(2): 184-187. (in Chinese)
- [36] 罗翔, 李政, 赖丹. 全球稀土新材料的技术演进及中国稀土产业链延伸的方向选择[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(5): 734-746.
LUO Xiang, LI Zheng, LAI Dan. Research on the technology evolution of global rare earth new materials and direction choice of China's rare earth industrial chain extension [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(5): 734-746. (in Chinese)
- [37] 张文龙, 张志伟, 李国余, 等. 一种新型夜光多功能卫生包的研发[J]. 医疗卫生装备, 2010, 31(6): 60-61.