

成膜完整性对纯物理防晒 SPF 值的影响

高媛媛, 高敏, 陆锦平, 曲向华, 亓丰伟
(山东花物堂化妆品股份有限公司, 山东济南, 250101)
DOI:10.61369/CDCST.2026020015

摘 要: 研究纯物理防晒的防晒效能影响因素, 制备3种复配不同氧化锌、二氧化钛含量的纯物理防晒乳样品, 采用人体实验法检测不同浓度物理防晒剂对样品 SPF 值的影响, 发现样品的 SPF 值并未随防晒剂浓度的增加而显著提升, 通过 VISIA 皮肤分析仪进一步进行防晒成膜完整性的检测。实验结果表明, SPF 值到一定范围后, 即使不断增加粉体用量, SPF 值也较难提升, 通过 VISIA 结果看出涂布工艺对防晒成膜有影响, 规范涂布工艺后, 成膜完整, 体内 SPF 值得到突破, 可以看到成膜完整性才是关键。通过这一发现, 对提升纯物理防晒效能及减少物理防晒剂添加有重要意义, 希望为未来纯物理防晒开发提供方向。

关 键 词: 纯物理防晒; 成膜完整性; SPF 值; 涂布工艺

作者简介: 高媛媛, 硕士研究生, 配方工程师。研究方向: 化妆品原料、配方开发及功效评价等。E-mail: gyy_628@163.com。



高媛媛

随着社会的发展, 人们的防晒意识日渐增强, 对防晒产品的需求也越来越多, 防晒霜是减轻太阳光谱对皮肤影响的重要工具, 包括光毒性反应、光老化、光致癌作用以及光致皮肤病和色素性疾病的加重。防晒指数是评判防晒产品效力的关键因素^[1]。根据紫外防晒剂的作用机理, 可分为有机防晒剂和无机防晒剂。有机(化学)防晒剂主要通过特定化学结构吸收紫外线, 并将吸收到的能量转化为无害的热能等释放出去, 抵御紫外线。无机(物理)防晒剂包括氧化锌和二氧化钛, 通过吸收和反射/散射光线发挥作用^[1]。此外, 物理防晒剂可以在皮肤表面构建一层屏障膜来反射紫外线, 减少紫外线照射到皮肤上。化学防晒剂刺激性较大, 并且光稳定性不佳, 易分解, 还可能导致皮肤过敏、炎症等副作用^[2]。人们对防晒产品安全意识提高, 市面上出现了单用物理防晒剂的纯物理防晒配方, 使用纯物理防晒剂逐渐成为一种趋势^[3]。

本研究后续基于纯物理防晒体系进行探索。通常防晒产品达到高防晒指数的解决方法是增加防晒剂含量, 但高含量的防晒剂会带来许多问题, 例如皮肤刺激性增加、产品肤感油腻厚重、环境问题等^[4]。对于纯物理体系来说, 仅使用物理防晒剂, 在防晒剂有限添加量的前提下, 想提高防晒效果, 可通过优化成膜完整性实现。发挥防晒效能的重点是在皮肤上形成连续均匀的膜, 膜越厚、连续性越好, 防晒效果越好^[5]。当物理防晒剂在配方中分散时, 防晒剂初级颗粒可形成30~150 nm的聚集体, 进一步聚集至大于1 μ m, 聚集颗粒还可以通过范德华相互作用进一步结合, 这给紫外线防护均匀性带来了挑战^[6]。纯物理配方中高浓度粉体易发生微观团聚, 进而导致宏观涂布不均

与成膜破裂。本研究制备3种复配不同氧化锌、二氧化钛含量的物理防晒乳样品, 探究不同浓度物理防晒剂对样品的 SPF 值的影响, 接着采用 VISIA 皮肤分析仪探究成膜状态与涂布情况差异。最后证实了成膜完整性对纯物理防晒 SPF 值的重要性。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

材料: 二氧化钛, 上海奥麟材料科技有限公司; 氧化锌, SUNJIN BEAUTY SCIENCE CO.,LTD.; 二硬脂二甲氨锂蒙脱石, 上海蔻泮生物科技有限公司; 丁基辛醇水杨酸酯, HALLSTAR BEAUTY AND PERSONAL CARE SOLUTIONS COMPANY; 丁二醇, DAICEL CORPORATION; 氯化钠, 西陇科学股份有限公司; 泛醇, 安徽华恒生物科技股份有限公司; β -葡聚糖, 巴斯夫(中国)有限公司; 甘油, 丰益油脂科技(东莞)有限公司; 三甲基硅烷氧基硅酸酯, 迈图生物科技有限公司。

仪器: 均质机, IKA T25 digital ULTRA TURRAX; 搅拌机, IKA RW20 digital; JJ1000型电子天平, 常熟市双杰测试仪器厂; HH-2型数显恒温水浴锅, 上海力辰邦西仪器科技有限公司。

1.2 实验方法

制备3种复配不同氧化锌、二氧化钛含量的纯物理防晒乳测试样品, 按照2015年版《化妆品安全技术规范》(防晒化妆品防晒指数(SPF值)测定方法)要求, 小样本量测试样品1、样品2和样品3的 SPF 值, 通过 VISIA 皮肤分

析仪进一步进行防晒成膜完整性的检测。

1.2.1 3种纯物理防晒乳的制备

纯物理防晒的防晒体系通常是二氧化钛和氧化锌，它们通过反射、散射紫外线来起到防护作用，由于粉体含量较多，适当加入悬浮剂和增稠剂可以使其稳定地分散，油脂更多使用肤感轻盈的挥发性硅油来提升清爽度，加入一些肤感调节剂改善肤感，添加成膜剂保障防水防汗效果。根据表1、表2、表3配方分别制备纯物理防晒乳样品1、样品2、样品3，具体操作步骤如下：

制备工艺：将A相用三辊研磨机预先研磨2~3遍，备用。将C相原料升温到80~85℃，搅拌至料体分散均匀，降温至40℃，备用。加入A相原料，均质5~10min至料体分散均匀，再加入B相原料，均质5~10min至料体分散均匀，在中低速均质搅拌下缓慢加入C相原料，中高速均质8~10min，中低速均质加入D相原料，搅拌混合均匀后出料。

表1 防晒乳1配方表		
类别	原料名称	w/ %
A相	二氧化钛（纯含量）	5
	氧化锌	13.5
	乳化剂 ^[a]	2
	油脂 ^[b]	3
	油相悬浮剂 ^[c]	0.5
B相	油脂 ^[d]	28
	二硬脂二甲氨锂蒙脱石	3
	丁基辛醇水杨酸酯	4
	去离子水	To 100
C相	丁二醇	4
	氯化钠	0.5
	泛醇	0.5
	β-葡聚糖	0.5
	甘油	2
	防腐体系 ^[e]	0.2
	肤感调节剂 ^[f]	2~4
D相	三甲基硅烷氧基硅酸酯	1~1.5

表2 防晒乳2配方表		
类别	原料名称	w/ %
A相	二氧化钛（纯含量）	5
	氧化锌	15.5
	乳化剂 ^[a]	2
	油脂 ^[b]	3
	油相悬浮剂 ^[c]	0.5
B相	油脂 ^[d]	28
	二硬脂二甲氨锂蒙脱石	3
	丁基辛醇水杨酸酯	4
	去离子水	To 100
C相	丁二醇	4
	氯化钠	0.5
	泛醇	0.5
	β-葡聚糖	0.5
	甘油	2
	防腐体系 ^[e]	0.2
	肤感调节剂 ^[f]	2~4
D相	三甲基硅烷氧基硅酸酯	1~1.5

续表2 防晒乳2配方表		
类别	原料名称	w/ %
C相	去离子水	To 100
	丁二醇	4
	氯化钠	0.5
	泛醇	0.5
	β-葡聚糖	0.5
	甘油	2
	防腐体系 ^[e]	0.2
D相	肤感调节剂 ^[f]	2~4
	三甲基硅烷氧基硅酸酯	1~1.5

表3 防晒乳3配方表		
类别	原料名称	w/ %
A相	二氧化钛（纯含量）	6
	氧化锌	15.5
	乳化剂 ^[a]	2
	油脂 ^[b]	3
B相	油相悬浮剂 ^[c]	0.5
	油脂 ^[d]	28
	二硬脂二甲氨锂蒙脱石	3
	丁基辛醇水杨酸酯	4
	去离子水	To 100
C相	丁二醇	4
	氯化钠	0.5
	泛醇	0.5
	β-葡聚糖	0.5
	甘油	2
	防腐体系 ^[e]	0.2
	肤感调节剂 ^[f]	2~4
D相	三甲基硅烷氧基硅酸酯	1~1.5

注：[a]指 PEG-9 聚二甲基硅氧乙基聚二甲基硅氧烷、PEG-10聚二甲基硅氧烷；[b]指环五聚二甲基硅氧烷；[c]指聚羟基硬脂酸、聚甘油-3二异硬脂酸酯；[d]指异十六烷、异壬酸异壬酯、环五聚二甲基硅氧烷、2粘硅油；[e]指1、2-己二醇、对羟基苯乙酮、乙基己基甘油；[f]指乙烯基聚二甲基硅氧烷/聚甲基硅氧烷倍半硅氧烷交联聚合物、硅石、150H。

1.2.2 人体法测试样品 SPF 值

在防晒产品防晒系数 SPF 的紫外线防护能力评估中，目前主要采用需要人体背部接受紫外线照射的体内实验方法^[7]。样品委托第三方检测机构，参照《化妆品安全技术规范》（2015年版）防晒化妆品防晒指数（SPF 值）的测定方法，每次测试按标准筛选受试者，所有受试者均已签署知情同意书，因是研发初期的内部初步筛选实验，故每组 SPF 测试仅纳入5名受试者。光源采用日光模拟器氙弧灯，各项性能指标符合测定规范要求。最小红斑量（MED）：引起皮肤清晰可见的红斑，其范围达到照射点大部分区域所需要的紫外线照射最低剂量（J/m²）或最短时间（s）。

SPF 值计算方法：样品或标准品防护单个受试者的 SPF 值用下式表示：

个体SPF= $\frac{\text{样品防护皮肤的MED值}}{\text{未防护皮肤的MED值}}$

1.2.3 VISIA 皮肤分析仪检测防晒成膜完整性

VISIA 皮肤分析仪运用光学成像和软件科技进行图像分析，能够精准得出人体皮肤的各项参数^[8]。使用 VISIA 皮肤分析仪检测防晒乳在皮肤表面形成的膜层均匀性，分为两组，为原涂布工艺（长时间反复揉搓）与改进涂布工艺（20s内单向或少量次数均匀推开），提高成膜均匀性，每组检测 A 为即刻效果，B 为成膜 15min 后效果。

1.2.4 成膜完整后样品 3 SPF 值复测

采用人体法对样品 3 进行 SPF 值复测，测试方法同 1.2.2，采用新涂布方式按（2.00±0.05）mg/cm²的样品用量将待检样品均匀涂抹，20s 内单向或少量次数均匀推开，其它操作不变，重新检测样品 3 SPF 值。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度防晒剂对纯物理防晒体系 SPF 值的影响

在防晒化妆品中，中国、欧盟和美国二氧化钛允许使用最高量为 25%，氧化锌用作 UVB 和 UVA 防晒剂，最大允许浓度为 25%。由配方表可以看到，样品 1 物理防晒剂含量为氧化锌 13.5%、二氧化钛 5.0%，样品 2 为氧化锌 15.5%、二氧化钛 5.0%，样品 3 为氧化锌 15.5%、二氧化钛 6.0%。样品 1、样品 2 和样品 3 物理防晒剂浓度逐步提高，随着物理防晒剂含量的提高，样品 1、样品 2、样品 3 的 SPF 值如表 4、表 5 和表 6 所示，依次为 47，46，47，可以看出仅提高防晒剂用量 SPF 值并未有显著变化。

表 4 样品 1 SPF 值

编号	性别	年龄	皮肤类型	标准品 SPF 值	待检样品 SPF 值
01	女	26	II	17.5	44.8
02	女	40	III	17.5	50.4
03	女	52	II	17.5	50.4
04	女	40	II	14.0	40.1
05	女	21	II	17.5	50.4
平均值 $\bar{X}$		35.8		16.8	47.2
标准差 SD				1.6	4.7

注：该样品完成 5 例受试者试验的 SPF 值均值为 47。

表 5 样品 2 SPF 值

编号	性别	年龄	皮肤类型	标准品 SPF 值	待检样品 SPF 值
01	女	37	II	17.5	40.2
02	男	45	III	17.5	50.2
03	女	56	III	14.0	44.8
04	女	56	III	17.5	56.5
05	女	60	II	17.5	40.1
平均值 $\bar{X}$		50.8		16.8	46.4
标准差 SD				1.6	7.0

注：该样品完成 5 例受试者试验的 SPF 值均值为 46。

表 6 样品 3 SPF 值

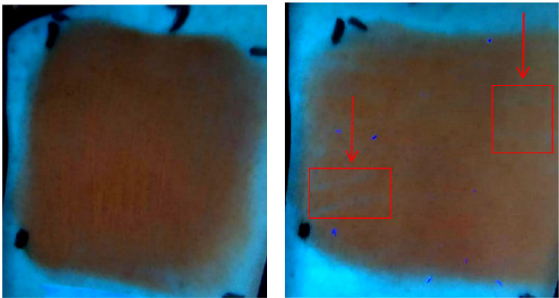
编号	性别	年龄	皮肤类型	标准品 SPF 值	待检样品 SPF 值
01	女	39	III	14.0	44.8
02	女	56	III	14.0	44.8
03	女	53	III	17.5	56.5
04	女	60	II	17.5	45.0
05	女	54	III	17.5	44.6
平均值 $\bar{X}$		52.4		16.1	47.1
标准差 SD				1.9	5.2

注：该样品完成 5 例受试者试验的 SPF 值均值为 47。

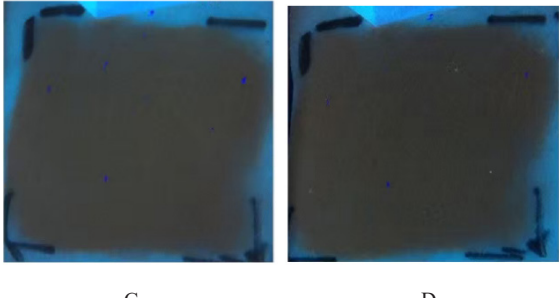
2.2 VISIA 图像检测

针对仅提高防晒剂用量对 SPF 值贡献无显著影响这一现象，回溯测量 SPF 值的过程，寻找可能影响 SPF 值测定的因素，运用 VISIA 皮肤分析仪进行防晒成膜图像检测。

在 UV 模式下，深色对应防晒窗口即有防晒膜，能有效保护，浅色对应防晒空窗，防晒膜断裂。结果显示，图 1 为原涂布工艺，15min 后 B 图明显出现涂抹不均的条纹，VISIA 显示出现“防晒空窗”，箭头所指即为空窗；图 2 为改善涂布工艺后的 VISIA 图片，15min 后 D 图 VISIA 显示均匀成膜，呈现出均匀、致密的防晒膜。通过对比 VISIA 图片，推测提高防晒剂用量对 SPF 值贡献无显著影响直接原因并非防晒剂浓度不足，而是“涂布工艺”导致的成膜缺陷，防晒乳未在皮肤表面形成完整均匀的防护膜。Kouichi Asakura^[7]等人研究推测任何导致防晒层空间不均匀的因素，都会改变防晒剂的体外紫外线防护能力值。



注：A 为即刻，B 为 15min 后，箭头所指即为“防晒空窗”。
图 1 原涂布工艺 VISIA



注：C 为即刻，D 为 15min 后。
图 2 改进涂布工艺 VISIA

2.3 均匀成膜对纯物理防晒体系防晒效果的影响

高施压、长铺展时间、配方低黏度和 / 或缺乏增稠剂会显著降低紫外线防护效果^[9]。利用 VISIA 发现以往涂布方式出现防晒窗口，改进涂布方式，20s 内单向或少量次数均匀推开，成膜更加均匀完整，未发现防晒窗口出现。除了防晒剂的吸收性能和应用产品的量外，防晒霜分布的均匀性对于人体测试 SPF 起着重要作用^[9]。对改善涂布工艺，成膜均匀完整后的样品 3 SPF 值进行复测，复测后结果如表 7 所示，结果显示采用原涂布方式，长时间反复揉搓，SPF 值不达标；采用新涂布方式后，20s 内单向或少量次数均匀推开，SPF 值达标，达到了 52。改善成膜后测试 SPF 值，SPF 值上升，超越 50，突破瓶颈。

Marc Pissavini 等人模拟防晒霜均匀涂抹与粗暴涂抹对红斑发生程度的影响，当评估终点为明显红斑时，均匀涂抹其引发的红斑程度会低于粗暴、随意涂抹的情况，强调了“涂抹均匀性”对防护效果的重要性^[10]。研究发现防晒系数不仅取决于防晒剂的含量，更关键的是产品在皮肤中的表现。良好的成膜能力与物理机械性能相关，能实现更佳的皮肤覆盖效果，从而提升 SPF 值^[11]。这与我们的研究结果也是一致的。

表 7 样品 3 SPF 值复测

编号	性别	年龄	皮肤类型	标准品 SPF 值	待检样品 SPF 值
01	女	50	III	17.5	50.2
02	女	27	II	14.0	50.4
03	男	58	III	17.5	56.5
04	女	57	II	14.0	50.4
05	女	35	II	14.0	56.5
平均值 $\bar{X}$		45.4		15.4	52.8
标准差 SD				1.9	3.4

注：该样品完成 5 例受试者试验的 SPF 值均值为 52。

3 结论与展望

由于高 SPF 值纯物理防晒主要依赖物理防晒剂贡献防晒指数，产品粉体含量较高，膏体可能偏稠厚，导致延展性有挑战，过长的涂抹时间和反复揉搓，会造成粉体团聚，膏体“搓泥”无法均匀铺展，还会使已形成的初步膜层破裂，产生空隙和“空窗”，以及皮肤纹理嵌入不均。但纯物理防晒的防护力依赖于在皮肤表面形成一层连续、均匀、致密的防护膜，这是其发挥防晒作用的基础。

以往开发高倍纯物理防晒产品易陷入“唯浓度论”，但此次研究发现，“成膜完整性”比“粉体绝对浓度”更为重要，应关注防晒成膜均匀完整。未来高倍纯物理防晒产品开发，优化配方体系如乳化体系、流变改性剂，确保防晒成膜均匀完整。在保证 SPF 值的前提下，应重点优化配方的延展性、铺展性和抗絮凝性，可考虑使用合适成膜剂、流变调节剂，助膏体自动流平成膜，同时制定标准产品使用手法指南用于保证成膜的完整性，在减少防晒剂用量的同时使防晒产品发挥最大效能。

参考文献

[1]Ziglar J, Mohammad T F, Gilaberte Y, et al. Sunscreens: updates on sunscreen filters and formulations.[J]. Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine, 2025,41:e70026.

[2]陈晓宇, 王灿, 于佳, 等. 二氧化钛 / 氧化锌复合浆料在防晒配方中的应用 [J]. 日用化学工业, 2018,48(4):221-226.

[3]陆徐佳, 张浩洋, 郑中博, 等. 丁基辛醇水杨酸酯在物理防晒产品中的应用研究 [J]. 广东化工, 2022,49(23):112-113.

[4]王敬文, 李玉清, 马守伟, 等. 玻璃珠在防晒配方中的增效性能研究 [J]. 日用化学品科学, 2024,47(12):25-30.

[5]薛绘, 周浩森, 李欣航, 等. 不同抗水成膜剂在水包油防晒体系中的性能研究 [J]. 日用化学品科学, 2018,41(8):29-34.

[6]Addae A J, Weiss P S. Standardizing the white cast potential of sunscreens with metal oxide ultraviolet filters[J]. Accounts of Materials Research, 2024,5(4):392-399.

[7]Asakura K, Kuroda A, Fujishiro M, et al. In vitro evaluation method of UV protecting ability of sunscreens: clarifying and overcoming problems to develop new method.[J]. Journal of Oleo Science, 2024,73(2):14.

[8]李诚桐, 赵华, 王敏. 化妆品功效评价 (IX)——图像分析法在化妆品功效评价中的应用 [J]. 日用化学工业, 2018,048(010):551-557.

[9]Sohn M, Heche A, Herzog B, et al. Film thickness frequency distribution of different vehicles determines sunscreen efficacy[J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(11):115005.

[10]Pissavini M, Diffey B. The likelihood of sunburn in sunscreen users is disproportionate to the SPF[J]. Photodermatology Photoimmunology & Photomedicine, 2013,29:111-115.

[11]Infante V H P, Campos P M B G, Calixto L S, et al. Influence of physical-mechanical properties on SPF in sunscreen formulations on ex vivo and in vivo skin[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021,598.

Effect of Film-Forming Integrity on the SPF of Purely Physical Sunscreens

Gao Yuan-yuan, Gao Min, Lu Jin-ping, Qu Xiang-hua, Qi Feng-wei
(Shandong Huawutang Cosmetic Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101)

Abstract : This study investigates the factors affecting the sunscreen efficacy of purely physical sunscreens. Three samples of purely physical sunscreen lotions with different combinations of zinc oxide and titanium dioxide contents were prepared. In vivo human testing was employed to evaluate the effects of varying concentrations of physical sunscreen agents on the SPF values of the samples. It was found that the SPF values of the samples did not significantly increase with the increase in sunscreen agent concentration. Further testing was conducted using a VISIA skin analysis system to evaluate the integrity of the sunscreen film. The experimental results indicated that once the SPF value reached a certain range, it was difficult to further increase even with an increase in powder dosage. The VISIA results showed that the coating process had an impact on the integrity of the sunscreen film. After standardizing the application process, the film integrity was improved, and the in vivo SPF value was significantly increased. These findings indicate that film-forming integrity is the critical determinant of physical sunscreen efficacy. This discovery is of great significance for enhancing the efficacy of purely physical sunscreens and reducing the addition of inorganic sunscreen agents. It is hoped that this research will provide direction for the future development of purely physical sunscreens.

Keywords : pure physical sunscreen; film-forming integrity; SPF ; application process

