

DOI: 10. 12138/j. issn. 1671-9638. 20222678

· 论 著 ·

## 不同种类口罩防血液穿透性能研究

管晓宁<sup>1,2,3</sup>, 韩佳祥<sup>1,2,3</sup>, 林佳冰<sup>4</sup>, 王璐<sup>1,2,3</sup>, 林婧<sup>1,2,3</sup>, 高晓东<sup>4</sup>, 胡必杰<sup>4</sup>

(1. 东华大学纺织学院, 上海 201600; 2. 东华大学纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201600; 3. 东华大学纺织行业生物医用纺织材料及技术重点实验室, 上海 201600; 4. 复旦大学附属中山医院感染管理科, 上海 200030)

**[摘要]** 目的 探究不同种类口罩防血液穿透性能的差异, 研究口罩形状对血液穿透的影响, 评估口罩的防血液穿透性能。方法 选择三种类型口罩: 医用防护口罩(折叠式)、KN95 口罩(拱形)、一次性医用外科口罩(平面), 对口罩表面拒水层进行测试, 通过高速摄影分析血液喷射与流动的形态轨迹, 计算不同条件(压力、距离、时间)下口罩表面血液面积。结果 口罩表面均具有疏水性(接触角 $>130^\circ$ )。标准条件下(120 mmHg, 30 cm), 医用防护口罩(折叠式)、KN95 口罩(拱形)、一次性医用外科口罩(平面)血液附着面积分别为 1.79、2.53、4.72 cm<sup>2</sup>; 高压条件下(160 mmHg, 30 cm), 血液附着面积均上升; 短距离条件下(120 mmHg, 15 cm), 医用防护口罩(折叠式)、KN95 口罩(拱形)表面血液面积减少, 一次性医用外科口罩(平面)血液面积变大; 长时间的高压喷射下(60 s, 160 mmHg), KN95 口罩(拱形)内层出现血液穿透现象。结论 三种口罩合成血液穿透性能均达到国内外最高等级标准。KN95 口罩(拱形)排液能力与阻隔性能表现最优, 其次为医用防护口罩(折叠式), 但在极限条件下 KN95 口罩(拱形)因出现血液渗透而失效。

**[关键词]** 口罩; 种类; 医用外科口罩; 医用防护口罩; 血液穿透; 血液穿透性能; 防护

**[中图分类号]** R136

## Research on anti-blood penetration performance of different types of masks

GUAN Xiao-ning<sup>1,2,3</sup>, HAN Jia-xiang<sup>1,2,3</sup>, LIN Jia-bing<sup>4</sup>, WANG Lu<sup>1,2,3</sup>, LIN Jing<sup>1,2,3</sup>, GAO Xiao-dong<sup>4</sup>, HU Bi-jie<sup>4</sup> (1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201600, China; 2. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Donghua University, Ministry of Education, Shanghai 201600, China; 3. Key Laboratory of Biomedical Textile Materials and Technology in Textile Industry, Donghua University, Shanghai 201600, China; 4. Department of Infection Management, Zhongshan Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200030, China)

**[Abstract]** **Objective** To explore the differences in anti-blood penetration performance of different types of masks, study the influence of mask shape on blood penetration, and evaluate anti-blood penetration performance of masks.

**Methods** Three types of masks were selected: medical protective masks (folded), KN95 masks (arched), and disposable surgical masks (flat), the surfaces of water repellent layer of masks were tested, morphological tracks of blood ejection and flow were observed by high-speed photography, and blood areas on the surface of masks under different conditions (pressure, distance, time) were calculated. **Results** The surfaces of masks were all hydrophobic (contact angle  $>130^\circ$ ). Under standard conditions (120 mmHg, 30 cm), blood adhesion areas of medical protective masks (folded), KN95 masks (arched), and disposable surgical masks (flat) were 1.79, 2.53 and 4.72 cm<sup>2</sup> respectively; under high pressure conditions (160 mmHg, 30 cm), blood adhesion area increased; under short distance conditions (120 mmHg, 15 cm), blood adhesion areas of medical protective masks (folded) and KN95 masks

[收稿日期] 2022-03-22

[基金项目] 上海市科委项目(20411950104); 国家卫健委卫生发展研究中心项目

[作者简介] 管晓宁(1990-), 女(汉族), 山东省潍坊市人, 实验师, 主要从事生物医用纺织品研究。

[通信作者] 林婧 E-mail: jlin@dhu.edu.cn; 高晓东 E-mail: gaofd5@vip.sina.com

(arched) decreased, while disposable surgical masks (flat) increased; under high pressure ejection (60 seconds, 160 mmHg), the inner layer of KN95 mask (arched) appeared blood penetration. **Conclusion** Blood penetration performance of three types of masks all meet the highest standards at home and abroad. KN95 mask (arched) has the best liquid discharge and barrier performance, followed by medical protective masks (folded), however, under extreme conditions, KN95 mask (arched) failed due to blood penetration.

**[Key words]** mask; type; surgical mask; medical protective mask; blood penetration; blood penetration performance; protection

二十一世纪,冠状病毒引起多次暴发,包括严重急性呼吸综合征冠状病毒(SARS-CoV)<sup>[1]</sup>、中东呼吸综合征冠状病毒(MERS-CoV)<sup>[2]</sup>和猪流感<sup>[3]</sup>,是严重危害公共健康的病原体<sup>[4]</sup>。2019年由新型冠状病毒(SARS-CoV-2)引起的新型冠状病毒肺炎(COVID-19)更是在世界范围传播<sup>[5]</sup>,其传播方式有接触传播、飞沫传播、气溶胶传播<sup>[6-7]</sup>。由于医务人员职业特点,在给患者做医学检查或治疗的过程中,血管一旦发生穿透可能导致高速血流喷射到医务人员面部,当携带有病毒血液、体液或分泌物接触到人体的鼻黏膜、口腔黏膜等时,存在罹患感染性疾病的风险。国际职工健康安全中心对46所医院的调查显示,在481例发生血液接触的医务人员中外科医生占55%,护士占25%<sup>[8]</sup>,不同外科医生面临血液飞溅的风险存在差异<sup>[9-10]</sup>。口罩作为医务人员的保护屏障,其防血液渗透能力是重要指标,以定量血液在特定压力喷射口罩,内侧是否会发生血液渗

透作为评价标准,可能存在肉眼无法观测到的血液喷溅现象<sup>[11]</sup>。医务人员佩戴口罩时,不同使用场合下对口罩防血液穿透要求不同,特别是高危血液喷溅风险场景标准更高。不同国家和地区对口罩抗血液渗透性能评价标准不同<sup>[12-19]</sup>,但均是单一条件下对血液穿透情况进行视觉观察,缺乏对血液喷射压力、距离、时间等影响因素的定量评估。本研究通过模拟不同血液喷射参数,探究不同口罩防血液穿透能力,并实现血液面积定量,为医护人员合理佩戴口罩提供建议,为口罩生产企业改进口罩设计提供思路,为奋战在一线的医护人员提供切实保障。

1 对象与方法

1.1 研究对象

1.1.1 口罩 本试验选取医务人员常用的三个品牌的三种类型口罩作为样品研究,口罩具体信息见表1。

表1 口罩样品基本信息

Table 1 Basic information of mask samples

编号	样品 A	样品 B	样品 C
产品类型	医用防护口罩	KN95 口罩	一次性医用外科口罩
符合标准	GB 19083—2010 医用防护口罩	GB 2626—2006 呼吸防护用品自吸过滤式防颗粒物呼吸器	YY 0469—2011 医用外科口罩
厂家型号	3M 9132	Honeywell H801	Tiger Medical FMT505
形状	折叠式	拱形	平面

实物图



1.1.2 合成血液 人工合成血液[pH = 7.3 ± 0.1, 表面张力(0.042 ± 0.002) N/m],符合标准 YY 0469—2011。见图1。

1.2 测试方法

1.2.1 SEM 扫描 使用仪器为纤维原位拉伸形貌

表征仪(Phenom XL,上海东松医疗科技股份有限公司)。首先将三种口罩样品进行拆解,选取最外侧无纺布进行扫描观察,观察口罩拒水层无纺布的微观结构。

1.2.2 接触角测量 使用仪器为接触角测量仪



图 1 试验用合成血液实物图

Figure 1 Physical diagram of synthetic blood for experiment

(OCA15EC, 北京奥德利诺仪器有限公司)。首先对三种口罩进行拆解,选取最外层无纺布作为研究对象,对平整处的无纺布进行裁剪,规格为  $1\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 。将裁剪好的样品贴伏于表面光滑的载物台上,轻轻按压样品,使其与载物台面无缝隙,便于之后的测量与观察,防止样品中间隆起影响测试结果。

1.2.3 高速摄影仪观察 使用仪器为高速摄影仪(i-SPEED5, iX Cameras Ltd)。设置拍摄速率为 4000 FPS,即每两张照片的时间间隔为  $0.00025\text{ s}$ 。从侧面与正面观察血液喷射到口罩表面的运动过程以及血液的喷射流动轨迹。

1.2.4 血液喷射表面观察及血液面积测量

1.2.4.1 血液穿透测试 使用仪器为医用口罩合成血液穿透测试仪(JYF-247X,上海际发仪器设备有限公司)。参考国家标准《医用防护口罩》GB 19083,以标准中规定的参数(喷射压力  $120$

mmHg、喷射距离  $30\text{ cm}$ 、喷射量  $2\text{ mL}$ )作为对照样品。在此基础上,改变喷射参数探究口罩对于合成血液的防护效果,如高压喷射( $160\text{ mmHg}$ )、近距离喷射( $15\text{ cm}$ )、长时间喷射( $60\text{ s}$ )。

1.2.4.2 拍摄取样 首先将喷射血液后的口罩样品平行放置于桌面上,放置过程轻拿轻放,防止血液在移动过程中发生洒落。然后将拍摄仪器固定同一高度(距桌面  $24\text{ cm}$ ),拍摄时需将直尺放置于口罩表面进行拍摄,目的是设置相同的比例尺规格,确保后续计算血液面积的准确科学。

1.2.4.3 血液面积计算 运用 Image J 软件计算血液面积,通过调节图像的 Hue、Saturation、Brightness 值框选出血液区域,即可计算获得不同口罩表面的血液面积。

## 2 结果

2.1 SEM 扫描结果 对口罩最外层无纺布进行 SEM 扫描观察,见图 2。经血液喷射后的口罩表面形态见图 3。外侧拒水层无纺布的电镜照片观察可以看出三种口罩均采用了纺黏热轧点黏合的结合方式。对比发现,样品 A 口罩黏合点附近的纤维明显多于其他两种,而样品 C 黏合点周围的纤维较少。样品 A 黏合点周围的纤维呈现凸起状,黏合点具有一定深度,其他两种样品的黏合点与纤维几乎处于同一平面。

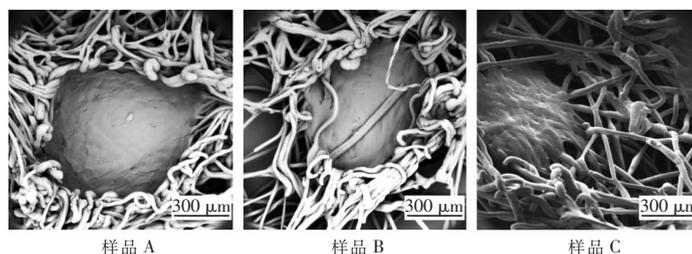


图 2 口罩表层无纺布 SEM 扫描图

Figure 2 SEM scanning of non-woven fabric on the surface of mask

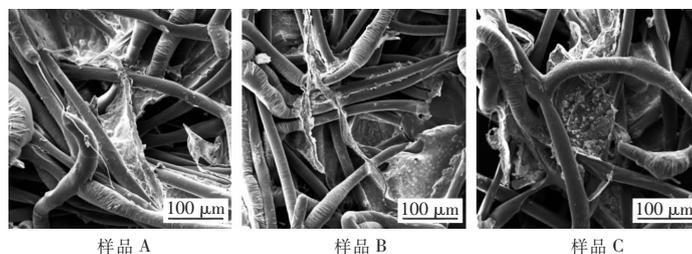


图 3 血液喷射后口罩表层无纺布 SEM 扫描图

Figure 3 SEM scanning of non-woven fabric on the surface of masks after blood ejection

血液干涸后以固体形式存留在表面无纺布的孔洞之中,如图 3 样品 C;还会以连续片状物附着在黏合点表面,如图 3 样品 A、B。血液喷射对纤维的影响较小,纤维的形态结构几乎没有发现改变,未观察到断裂、溶胀等现象。

2.2 表面接触角测量结果 对三种口罩最外层无纺布的表面接触角测量结果见图 4,可以看到三种口罩表面接触角均大于 130°,均具有很好的疏水性。

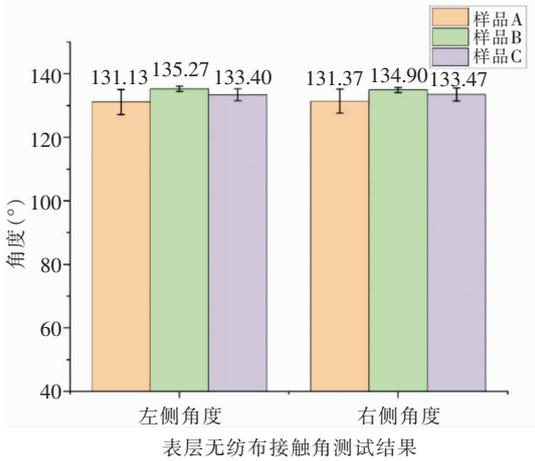


图 4 表层无纺布接触角测量结果

Figure 4 Measurement results of contact angle of surface of non-woven fabric

通过对比发现,样品 A 的接触角略小,由其特殊表面处理造成。样品 A 表面存在均匀的压点,见图 5(A)。当进行接触角测量时,表面会呈现出波浪状,如图中红色线条,而在计算时,则是以图 5(B)中蓝色线条进行,会导致测量角度减小。样品 A 口罩样品表面不光滑,纤网中的黏合点会使表面呈现凹凸状态,粗糙程度大于其他样品,粗糙度增加会增加表面疏水性。

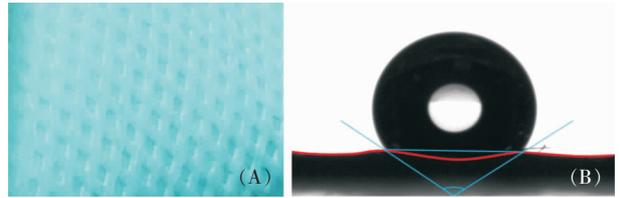


图 5 样品 A 表面结构图和接触角测量图

Figure 5 Structure diagram of surface and measurement diagram of contact angle of sample A

2.3 高速摄影仪拍摄分析 为进一步评价三种口罩的血液防护性能,通过高速摄影与软件处理技术,观察血液到达不同口罩表面的形态与运动轨迹。高速摄影观察血液喷射过程发现血液射流以球状液滴的形式呈散射状向前运动,运动状态类似动脉损伤的特征性喷射,喷射轨迹见图 6。

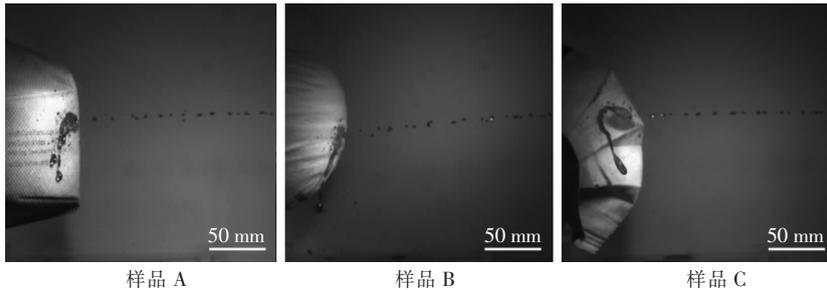


图 6 血液喷射轨迹高速摄影仪拍摄图像

Figure 6 High-speed photography of blood ejection tracks

每隔 0.025 s 截取一张图片,计算各个时间点下的不同种类口罩附着血液面积,可以得到各个口罩表面血液面积随时间增长的变化情况,见图 7。样品 A 整体血液面积随时间波动幅度最小,血液面积较为稳定。样品 B 最终血液面积最小。样品 C 最终血液面积最大,但在前 0.1 s 内血液面积增长速率最慢。

三种口罩经血液喷射后形态示意图见图 8。样品 A 为折叠型口罩,外侧为互呈一定角度的两个平面,且口罩表面粗糙程度大,当血液撞击时,因自身

重力向下流动,起到一定的排液作用,使口罩表面聚集的液体减少。但口罩表面的压点会将血液液滴固定,导致较小的液滴不易滚落,血液面积增大。样品 B 为拱形口罩,具有波浪状结构,血液撞击到口罩表面后会形成大小不一的液滴,液滴由于自身重力滴落与滚动,在滚落过程中遇到波浪状结构会改变运动方向,口罩下部呈现内凹,因此液滴不会顺势接触口罩下部,导致停留在口罩表面的血液较少,血液在样品 B 表面增长速率较低。样品 C 为平面口罩,在前 0.1 s 内血液上升速率最慢,因为血液易穿透表层

无纺布,导致血液的喷射能力较差。样品 A 与样品 B 在前 0.1 s 内均呈现出不规则的喷射状形态,而样品 C 为较规则的圆形,面积相对较小。但由于样品 C

不能及时进行排液,仅以少量液滴的形式滴落,其血液面积逐渐上升。

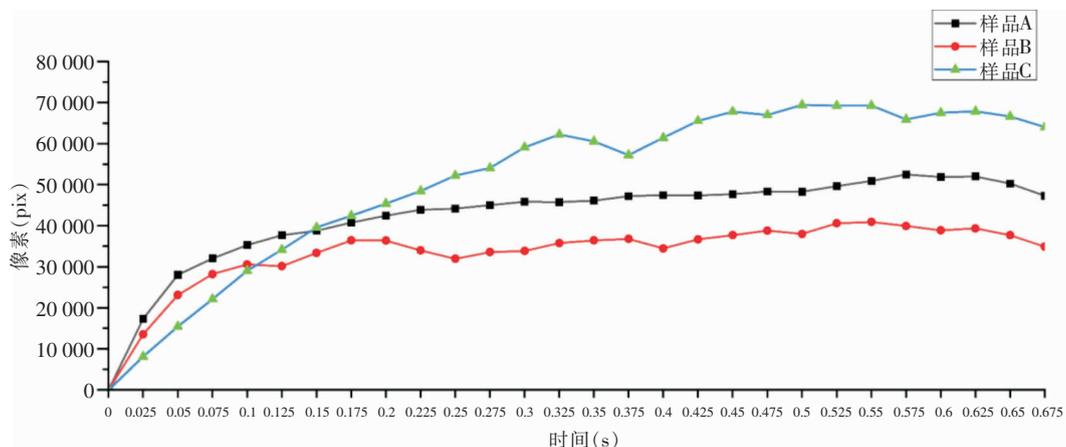


图 7 不同口罩血液喷射面积随时间变化曲线

Figure 7 Curves of blood ejection area of different masks changing with time

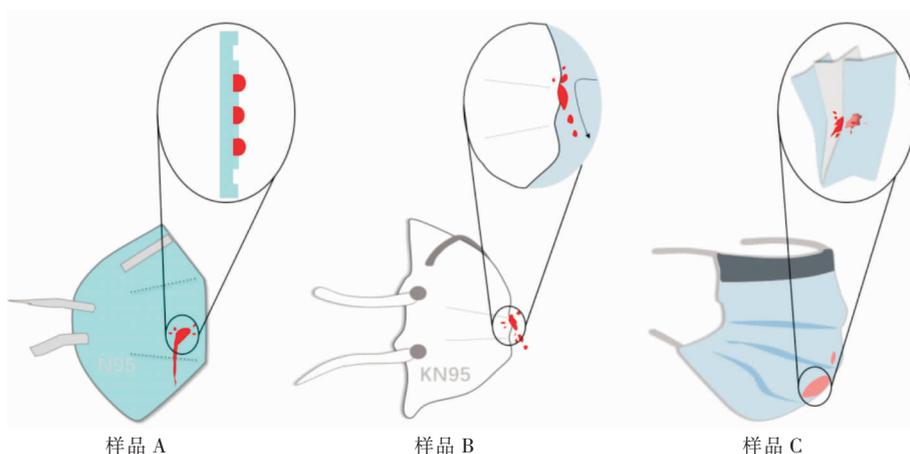


图 8 不同口罩血液喷射表面示意图

Figure 8 Schematic diagram of blood ejection surface of different masks

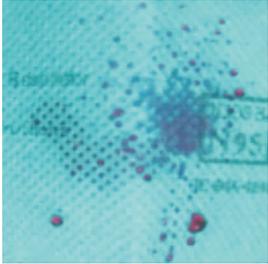
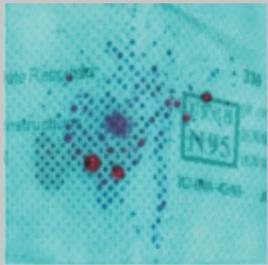
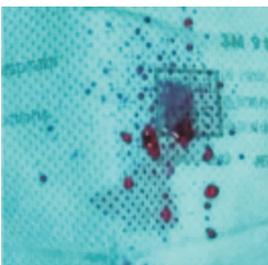
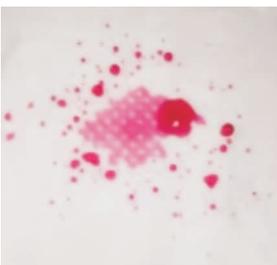
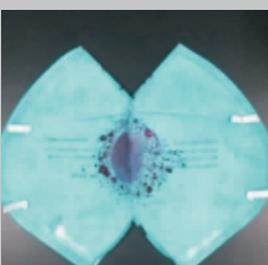
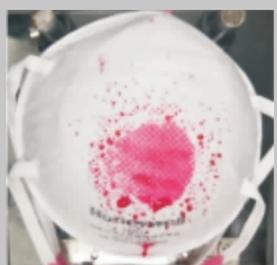
2.4 不同测试条件下口罩抗血液穿透能力 人体平均血压在 10.6~16.0 kPa(80 mmHg~120 mmHg) 范围内变化,《YY 0469—2011 医用外科口罩》要求口罩需抵抗 120 mmHg 的血液压力,为满足医用口罩特殊应用的需要,对血液渗透要求更为严格的外国标准中,Level 3 级别口罩需要抵抗 160 mmHg 压力。为进一步探究不同种类口罩的抵抗能力,进行了不同喷射压力、喷射距离及喷射时间下血液穿透试验,口罩表面血液形态见表 2。

三种类型的口罩样品在不同压力、距离下,喷射相同体积的合成血液内层均未出现血液穿透现象,性能远超国家标准。当在高压下对三个样品进行 60 s 长时间的血液喷射时,由于血液体积增大,样品 B 在三次平行试验中存在一次内层血液穿透,拆解如图 9。

运用 Image J 软件对口罩表面血液区域进行选取与计算,如图 10 所示。不同条件下喷射血液的面积计算结果见图 11。

表 2 不同条件下口罩血液穿透结果

Table 2 Blood penetration results of mask under different conditions

测试条件	样品 A	样品 B	样品 C
压力:120 mmHg 距离:30 cm	 无穿透	 无穿透	 无穿透
压力:120 mmHg 距离:15 cm	 无穿透	 无穿透	 无穿透
压力:160 mmHg 距离:30 cm	 无穿透	 无穿透	 无穿透
高压长时间喷射 压力:160 mmHg 距离:30 cm 时间:60 s	 无穿透	 一个样品出现穿透	 无穿透

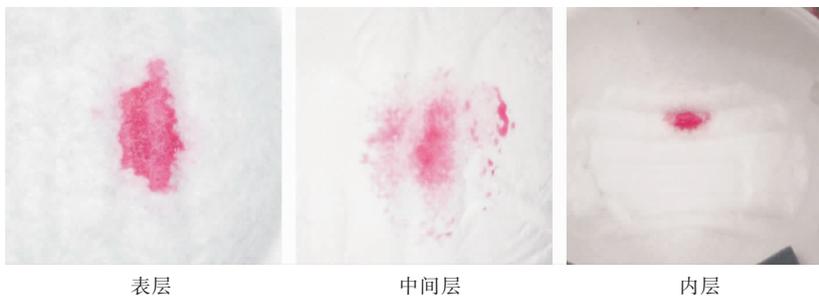


图 9 160 mmHg 压力下喷射 60 s 口罩表面血液形态图

Figure 9 Blood morphology diagram of mask surface after ejection for 60 seconds under 160 mmHg pressure

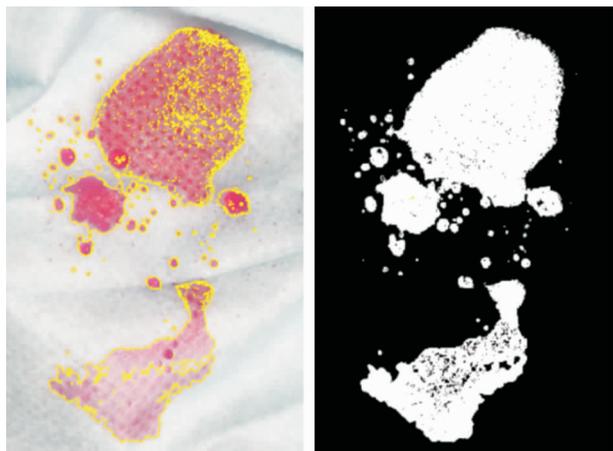


图 10 血液区域的选取与计算

Figure 10 Selection and calculation of blood area

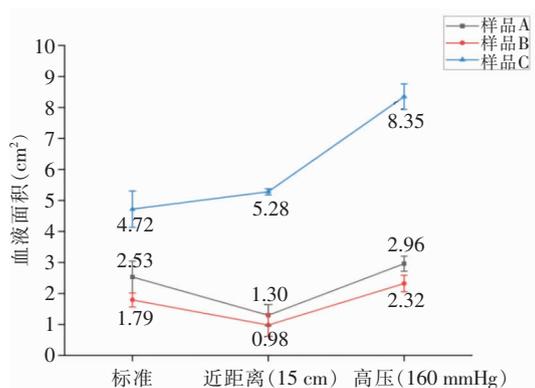


图 11 不同条件下口罩表面血液面积图

Figure 11 Blood area on mask surface under different conditions

可以看到样品 B 在三种条件下的血液面积最小, 样品 C 的血液面积最大。当压力达到 160 mmHg 时, 样品 A/B/C 的血液面积相对于标准测试分别升高了 17.0%、29.6%、76.9%, 但仅样品 C 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。当喷射距离缩短为 15 cm 时, 样品 A 与样品 B 的血液面积相比标准有所降低 ( $P$  值分别为 0.036、0.016), 分别降低了 48.6%、45.3%。

### 3 讨论

口罩表面层无纺布大多采用点黏合加固方式, 具有一定的疏水性与防液体穿透性, 但不同种类口罩的加工工艺不同, 导致无纺布纤维的数量、细度以及孔隙大小与数量存在差异, 一定程度上影响了口罩防止血液穿透的能力。

#### 3.1 口罩成型工艺影响血液的流动性与液滴的附

着能力 口罩的形状与表层无纺布的粗糙度都会影响血液的流动性与液滴的附着能力<sup>[20]</sup>。三种口罩血液喷射后的血液轨迹分析表明, 医用防护口罩(折叠式)与 KN95 口罩(拱形)具备良好的排液能力, 0.2 s 之后血液量趋于稳定, KN95 口罩(拱形)由于特殊的波浪状结构使液滴滚落的路径发生改变, 其排液能力与阻隔性能表现最优, 其次为医用防护口罩(折叠式)。而平面形一次性医用外科口罩, 由于液体阻隔性较差导致血液聚集在拒水层与过滤层之间, 且具有流动性, 其在 0.5 s 内血液量均呈现上升趋势, 若口罩在使用过程中中间层发生破损, 流动的血液可能会发生渗透, 存在一定污染风险。除此之外, 医用防护口罩(折叠式)和 KN95 口罩(拱形)均存在支撑层, 使其具有外凸的形状, 更加硬挺, 可抵抗一定的血液冲击力。

#### 3.2 加工工艺会影响口罩抵抗血液冲击力能力

口罩表面的疏水性增强血液阻隔作用。根据 Aydin 等<sup>[21]</sup>的研究, 液滴在穿透织物缝隙时会产生形变, 需要克服表面张力, 通常用静态接触角来表征液滴对于光滑物体表面的浸润能力<sup>[22]</sup>。接触角指液滴在一个平坦的平面上, 在没有周围气体运动的情况下, 液滴处于平衡状态时的角度<sup>[23]</sup>。有关粗糙固体表面接触角的大量研究<sup>[24-26]</sup>中, 最经典的有 Wenzel 模型和 Cassie Batex 模型。Wenzel 模型中提到, 对于疏水表面, 粗糙程度的增加会增加表面的疏水性能, 纤维之间的纠缠抱合也会影响其粗糙程度。

口罩无纺布纤维数量及制备工艺影响血液穿透。热黏合工艺中, 通过将纤维网输送到两个热压辊之间, 利用热压辊的压力与温度作用, 使得纤网中的部分纤维发生热熔, 产生黏合力, 冷却之后形成黏合点<sup>[27]</sup>。纤维数量的多少影响到口罩无纺布的单位面积质量, 从而导致其孔隙率具有一定差异。孔隙的大小与数量的多少一定程度上影响非织造布血液穿透与渗透的能力。

#### 3.3 医务人员根据实际使用场景合理选择口罩防护

调查<sup>[28]</sup>显示, 204 名被调查者中, 97.5% 知道受到血液或体液飞溅时需要佩戴口罩。在重症监护病房(ICU)、手术室等进行有创操作或患者呼吸道有喷溅物的时候, 正确合理的选择和使用口罩直接关系到医护人员的生命健康安全<sup>[29]</sup>。血液喷射过程是以大小不一的球状液滴呈散射状飞行, 相互独立, 彼此发生碰撞的概率极低, 符合人体动脉出血特征<sup>[30]</sup>。血液到达口罩表面会造成液滴的铺展与飞溅, 不同条件下液滴的速度、角度、落点均存在差异, 飞溅的

程度也跟血液黏度相关<sup>[31]</sup>。当血液的喷射距离缩短时,近距离 15 cm 喷射下,液滴的运动轨迹会更加集中重合,由于液滴在运动过程中会受到空气阻力与自身重力影响,所以运动距离越长,液滴的落点范围就更大,当缩短喷射距离后,液滴的落点更加聚集,这样其穿透与浸润能力会更强。当血液的喷射压力增大时,在 160 mmHg 压力血液喷射下,血液液滴到达口罩表面的速度增大,液滴具有的动能增大,当撞击时液滴的扩散能力更强,沿喷射方向的液滴边缘刺状突起越多,且卫星状血迹逐渐增多,拖尾更拉长<sup>[32]</sup>,血液喷射面积也增大。尤其对于一次性医用外科口罩,血液在口罩内的流动性更大,受到连续不断的液滴冲击迫使其向不同方向进行扩散。测试结果表明,在增大压力、缩短距离条件下,医用防护口罩(折叠式)、KN95 口罩(拱形)及一次性医用外科口罩,均可抵抗血液穿透,内层无血液渗透。在长时间 60 s(标准 0.57 s)高压喷射极端条件下,KN95 口罩(拱形)一个样品内层出现渗透而失效,考虑是由于工艺的缺陷或者长时间喷射导致液体在某点发生了穿透,由于毛细效应<sup>[33]</sup>,最终导致血液在内层发生扩散。经研究,本文中三种类型的口罩抗血液渗透能力超出国家标准要求。

本文通过采用高速摄影技术及图像处理技术,模拟血液喷溅条件,对喷溅血迹进行形态学研究。通过将国家标准中的定性观测转化为定量计算血液面积,实现了不同种类、不同形状、不同使用场景下口罩抗合成血液能力的区分与对比,优化了口罩抗合成血液穿透能力的表征方法。本研究为医务人员不同场景下口罩的选择提供了科学依据,同时也对改进口罩设计及质量稳定性提出新的思路。但由于本研究仅纳入了 3 个常用品牌的 3 种不同类型的口罩,所得结论不能完全推及所有品牌口罩的防血液穿透性能,所以本研究亦存在一定的局限性。后续可通过增加样本种类进一步验证证实。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

#### [参考文献]

- [1] Petersen E, Koopmans M, Go U, et al. Comparing SARS-CoV-2 with SARS-CoV and influenza pandemics[J]. *Lancet Infect Dis*, 2020, 20(9): e238 - e244.
- [2] Chertow DS, Kleine C, Edwards JK, et al. Ebola virus disease in West Africa - clinical manifestations and management [J]. *N Engl J Med*, 2014, 371(22): 2054 - 2057.
- [3] Shrestha SS, Swerdlow DL, Borse RH, et al. Estimating the burden of 2009 pandemic influenza A (H1N1) in the United States (April 2009 - April 2010)[J]. *Clin Infect Dis*, 2011, 52(Suppl 1): S75 - S82.
- [4] Rothan HA, Byrareddy SN. The epidemiology and pathogenesis of coronavirus disease (COVID-19) outbreak[J]. *J Autoimmun*, 2020, 109: 102433.
- [5] Mallakpour S, Azadi E, Hussain CM. Recent breakthroughs of antibacterial and antiviral protective polymeric materials during COVID-19 pandemic and after pandemic: coating, packaging, and textile applications[J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2021, 55: 101480.
- [6] Liao MR, Liu HY, Wang X, et al. A technical review of face mask wearing in preventing respiratory COVID-19 transmission[J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2021, 52: 101417.
- [7] 胡国庆, 陆焯, 李晔. 医务人员个人防护用品的选择和使用 [J]. *预防医学*, 2020, 32(12): 1189 - 1194.  
Hu GQ, Lu Y, Li Y. Personal protective equipment selection and usage for healthcare workers[J]. *Preventive Medicine*, 2020, 32(12): 1189 - 1194.
- [8] 王春丽, 王淑芬, 柴红, 等. 手术室护士对外科医生安全防护的监督作用及措施 [J]. *解放军护理杂志*, 2003, 20(2): 79 - 80.  
Wang CL, Wang SF, Chai H, et al. The supervisory function and measures of operating room nurse to surgeon's safety protection[J]. *Nursing Journal of Chinese People's Liberation Army*, 2003, 20(2): 79 - 80.
- [9] Stacey AW, Czyn CN, Kondapalli SSA, et al. Risk of ocular blood splatter during oculofacial plastic surgery[J]. *Ophthalmic Plast Reconstr Surg*, 2015, 31(3): 182 - 186.
- [10] Hirpara KM, O'Halloran E, O'Sullivan M. A quantitative assessment of facial protection systems in elective hip arthroplasty[J]. *Acta Orthop Belg*, 2011, 77(3): 375 - 380.
- [11] Ansari A, Ramaiah P, Collazo L, et al. Comparison of visual versus microscopic methods to detect blood splatter from an intravascular catheter with engineered sharps injury protection [J]. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 2013, 34(11): 1174 - 1180.
- [12] Al-Eid RA, Ramalingam S, Sundar C, et al. Detection of visually imperceptible blood contamination in the oral surgical clinic using forensic luminol blood detection agent[J]. *J Int Soc Prev Community Dent*, 2018, 8(4): 327 - 332.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 医用防护口罩技术要求: GB 19083—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Technical requirements for protective face mask for medical use: GB 19083 - 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [14] 国家食品药品监督管理局. 医用外科口罩: YY 0469—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

- State Food and Drug Administration. Surgical mask; YY 0469 - 2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [15] ASTM International. Standard specification for performance of materials used in medical face masks; ASTM F2100 - 19[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2020.
- [16] Standards Australia. Single-use face masks for use in health care; AS 4381; 2015 [S]. Australia: Standards Australia, 2015.
- [17] Japanese Industrial Standard, Japanese Standards Association. Clothing for protection against infectious agents - face masks - test method for resistance against penetration by synthetic blood (fixed volume, horizontally projected); JIS T 8062; 2010[S]. Tokyo, Japan: Japanese Industrial Standard, 2010.
- [18] 台湾经济部标准检验局. 医用面罩: CNS 14774—2018[S]. 中国台湾:台湾经济部标准检验局, 2018.  
BSMI. Medical face mask; CNS 14774 - 2018[S]. Taiwan, China; Bureau of Standards, Metrology and Inspection, 2018.
- [19] BSI Standards. Medical face masks-requirements and test methods; BS EN 14683; 2019[S]. UK: BSI Standards, 2019.
- [20] 谭德坤, 刘莹. 壁面粗糙度效应对微流体流动特性的影响[J]. 中国机械工程, 2015, 26(9): 1210 - 1214.  
Tan DK, Liu Y. Effects of wall roughness on pressure-driven liquid flow in microchannels[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(9): 1210 - 1214.
- [21] Aydin O, Emon B, Cheng S, et al. Performance of fabrics for home-made masks against the spread of COVID-19 through droplets; a quantitative mechanistic study[J]. Extreme Mech Lett, 2020, 40: 100924.
- [22] 王丹. 大网孔超疏水全棉水刺非织造材料的制备及应用[D]. 上海: 东华大学, 2018.  
Wang D. The fabrication and application of super-hydrophobic meshed cotton spunlaced materials[D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [23] Zhang XQ, Qin YZ. Contact angle hysteresis of a water droplet on a hydrophobic fuel cell surface[J]. J Colloid Interface Sci, 2019, 545: 231 - 241.
- [24] 张泓筠. 超疏水表面微结构对其疏水性能的影响及应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.  
Zhang HY. Influence of microstructure for superhydrophobic surfaces on superhydrophobicity and its application[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [25] 赵宁, 卢晓英, 张晓艳, 等. 超疏水表面的研究进展[J]. 化学进展, 2007, 19(6): 860 - 871.  
Zhao N, Lu XY, Zhang XY, et al. Progress in superhydrophobic surfaces[J]. Progress in Chemistry, 2007, 19(6): 860 - 871.
- [26] Nosonovsky M. Multiscale roughness and stability of superhydrophobic biomimetic interfaces[J]. Langmuir, 2007, 23(6): 3157 - 3161.
- [27] 李泰坤. 纺粘热轧点粘非织造材料力学性能有限元分析[D]. 上海: 东华大学, 2013.  
Li TK. Mechanical properties of spun-thermal-bonded nonwoven materials by finite element analysis[D]. Shanghai: Donghua University, 2013.
- [28] 李良辰. 护士使用一次性口罩现状调查分析[J]. 世界最新医学信息文摘, 2018, 18(A5): 271 - 273.  
Li LC. Investigation and analysis on the current situation of nurses using disposable masks[J]. World Latest Medicine Information, 2018, 18(A5): 271 - 273.
- [29] 唐舟, 王成学, 胡丽君. 各类型口罩在疫情防控期间的临床应用场景[N]. 中国医药报, 2020 - 02 - 25(002).  
Tang Z, Wang CX, Hu LJ. Clinical application scenarios of various types of masks during epidemic prevention and control [N]. China Pharmaceutical News, 2020 - 02 - 25(002).
- [30] Byard RW, Veldhoen D, Manock C, et al. Blood stain pattern interpretation in cases of fatal haemorrhage from ruptured varicose veins[J]. J Forensic Leg Med, 2007, 14(3): 155 - 158.
- [31] Zhang HX, Zhang XW, Yi X, et al. Reversed role of liquid viscosity on drop splash [J]. Phys Fluids, 2021, 33(5): 052103.
- [32] 高振, 袁自闯, 游盛中, 等. 动脉喷溅血迹动力学及形态学的模拟实验观察[J]. 中国法医学杂志, 2013, 28(3): 199 - 202, 后插 2.  
Gao Z, Yuan ZC, You SZ, et al. The experimental study of arterial bloodstain in dynamics and morphology[J]. Chinese Journal of Forensic Medicine, 2013, 28(3): 199 - 202.
- [33] Kanamori H, Weber DJ, DiBiase LM, et al. Impact of safety-engineered devices on the incidence of occupational blood and body fluid exposures among healthcare personnel in an academic facility, 2000 - 2014[J]. Infect Control Hosp Epidemiol, 2016, 37(5): 497 - 504.

(本文编辑:左双燕)

**本文引用格式:**管晓宁, 韩佳祥, 林佳冰, 等. 不同种类口罩防血液穿透性能研究[J]. 中国感染控制杂志, 2022, 21(9): 861 - 869. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20222678.

**Cite this article as:** GUAN Xiao-ning, HAN Jia-xiang, LIN Jia-bing, et al. Research on anti-blood penetration performance of different types of masks[J]. Chin J Infect Control, 2022, 21(9): 861 - 869. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20222678.