

按需粘附聚合物皮肤贴片 ——智能临床沟通创新实验设计

曾乾坤¹, 张闽^{1,2,*}

¹华东师范大学化学与分子工程学院, 上海 200241

²上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241

摘要: 本实验设计了一种新型双层皮肤贴片, 结合温敏聚合物底层和感应压力的离子聚合物顶层, 实现定制化粘着性能与高灵敏度反应性。基于此技术, 开发了一套先进的非言语临床通讯系统, 能够识别并翻译患者的手势语言, 并能发送远程警报信号。通过这些研究, 学生将初步建立科研思维框架, 为其未来的研究或职业生涯奠定坚实基础。

关键词: 按需粘附; 聚合物; 皮肤贴片; 临床沟通; 智能传感

中图分类号: G64; O6

On-Demand Adhesive Polymer Skin Patch: An Innovative Experimental Design for Intelligent Clinical Communication

Qiankun Zeng¹, Min Zhang^{1,2,*}

¹ School of Chemistry and Molecular Engineering, East China Normal University, Shanghai 200241, China.

² Shanghai Key Laboratory of Urbanization Ecological Process and Ecological Restoration, Shanghai 200241, China.

Abstract: This experiment designs a novel dual-layer skin patch, combining a temperature-sensitive polymer base layer and a pressure-responsive ion polymer top layer, to achieve customized adhesion properties and high sensitivity reactivity. Utilizing this technology, an advanced non-verbal clinical communication system has been developed, which can recognize and translate patients' sign language while sending remote alarm signals. Through these studies, students will initially establish a scientific research thinking framework, laying a solid foundation for their future research or career development.

Key Words: Adhesion on demand; Polymer; Skin patch; Clinical communication; Intelligent sensing

1 引言

在全球言语、视觉、听力障碍及身体残疾广泛存在的背景下, 为受影响的患者提供迅速且有效的非言语临床沟通手段已经成为一个突出的挑战^[1,2]。近年来, 具有导电特性和按需粘附能力的皮肤贴片已在运动监测、信息传递和人机交互等领域取得显著进展, 这为提高非语言临床沟通的效率提供了新的可能性^[3]。通过调整聚合物材料的成分和掺杂导电材料, 已成功开发出具有按需粘附和导电性的多功能皮肤贴片^[4,5]。这些聚合物贴片因其低成本、简单的合成技术、安全的制备过程和良好的重复性, 成为本科生实验教学的理想选择, 不但提升学生的实验技能, 也促进他们对前沿科技的认知和理解^[6,7]。

收稿: 2024-04-15; 录用: 2024-07-22; 网络发表: 2024-11-20

*通讯作者, Email: mzhang@chem.ecnu.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金项目(22274053); 华东师范大学教学改革与研究项目(2023HSJG036)

在本实验中，我们设计了一种新型的双层皮肤贴片，其底层为温敏粘附层，顶层为高效导电层，旨在开发适用于临床的智能非语言沟通平台。该平台致力于实现手语识别和远程警报信号的有效传输，综合了简便与高效制造方法，确保贴片的优异粘附性和灵敏的传感特性。底层的粘附材料在体温下保持柔软并具有良好的粘性，而在冷却后变得坚硬和非粘性，这种温度响应行为允许用户根据需要轻松地粘贴或移除贴片。顶层的导电层能迅速响应手指的弯曲动作，建立了高效的临床通讯系统。我们的手语识别系统利用机器学习技术，通过检测电阻值的变化独立识别不同的手势，帮助消除手语用户与非手语用户之间的沟通障碍。构建的远程临床报警系统包含装配在手指上的双层皮肤贴片、智能手机和蓝牙连接的数字万用表，能在紧急情况下迅速通知医生或家人。

本实验教学计划专为化学专业大三学生设计，作为“科研训练”综合实验课程的重要组成部分，旨在让学生理解和掌握聚合物材料的性质、合成与测试方法，以及学习实验仪器的使用和维护。从而培养学生的科学实验观察、操作和分析能力，提高运用科学方法解决实际问题的能力，并增强实验设计与创新能力。

2 实验内容

2.1 实验设计

本项创新实验的核心宗旨，在于将科学研究的趣味性与实际应用紧密结合。我们旨在通过这一实验设计，不仅加深学生对科学原理的透彻理解，而且更重要的是，锻炼和提升他们动手操作、解决现实问题的能力。如图1所示，我们展示了本实验设计的总体构想。实验的关键部分包括设计并合成一种具有特殊功能的聚合物双层皮肤贴片。该贴片不仅拥有传统的医疗敷料功能，还能作为一种先进的通信工具。我们将这种双功能皮肤贴片集成到一套非语言临床沟通平台上，从而创造出一款能够识别手语动作，并进行远程警报信号传输的通信系统，这对患者尤其是有语言障碍的患者来说，是一个突破性的辅助设备。在实验的操作过程中，学生们首先对双功能皮肤贴片进行详细的表征。他们将通过一系列粘附力学测试，来检验底层贴片是否具备根据不同需要而变化的粘附能力。随后，当引入导电层后，学生们会进一步验证其在实现手势识别以及远程报警功能方面的实际应用性能。整个实验不仅要求学生深入理解相关的科学原理，还要求他们运用这些知识来解决具体问题，如怎样确保贴片的粘附性既足够强大以保持固定，又能在必要时轻易移除，以免对皮肤造成不必要的伤害。此外，他们还需考虑如何设计电路和编写算法，以使贴片能准确识别不同的手语动作，并将这些动作转化为可以被远程接收的电信号。通过这样的实验设计，我们期望学生们能够在享受科研带来的乐趣的同时，也能获得宝贵的实践经验，为将来在科学或工程领域解决更加复杂的实际问题打下坚实的基础。

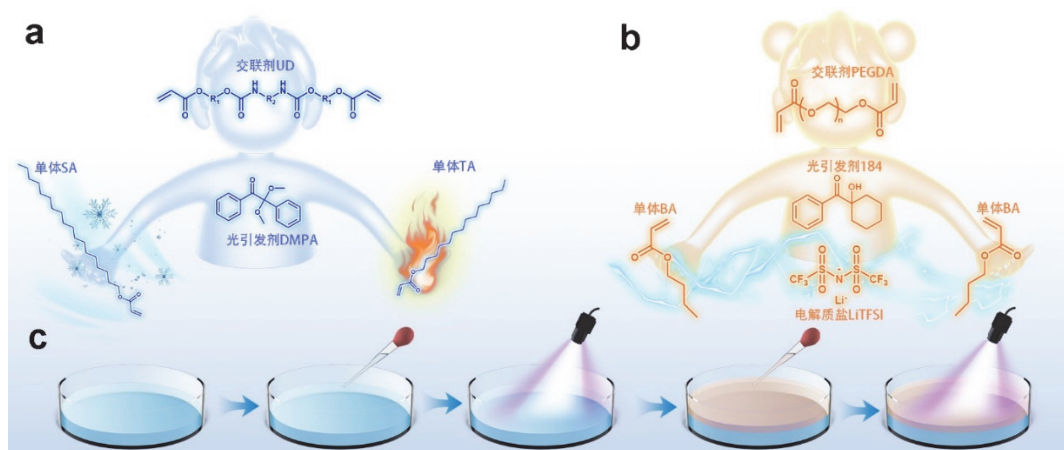


图1 底层粘附层(a)和顶层导电层(b)的组成成分及双层皮肤贴片的合成过程(c)

2.2 试剂与仪器

2.2.1 试剂

为了确保实验的精准度和高品质成果，我们精心挑选了多种优质化学试剂。从上海阿拉丁有限公司采购的化学品包括：丙烯酸硬脂酯(SA)，一种在化妆品行业中具有重要用途的饱和脂肪酸；丙烯酸丁酯(BA)，在聚合物制备过程中发挥关键作用；双(三氟甲烷磺酰亚胺)锂(LiTFSI)，一种高效能的离子液体电解质；聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA)和2,2-二甲氧基-2-苯基丙酮(DMPA)，分别作为交联剂和光引发剂，在光固化和生物材料合成中发挥重要作用。同时，从日本东京化学工业株式会社采购了丙烯酸十四烷基酯(TA)，一种高级聚合物合成材料。此外，1-羟基环己基苯基酮(光引发剂184)，由Damas Beta(中国上海)供应，以其在光固化领域的卓越性能而著称，能有效促进光聚合反应。

2.2.2 仪器

拉伸测试机(HY-0580, 上海恒益测试仪器有限公司, 中国), 电子天平, 紫外灯(400 W, 365 nm), 超声波清洗机, 带蓝牙的数字万用表。

2.3 实验步骤

2.3.1 底层按需粘附层的制备

按需粘附层由SA、TA和UD的混合物通过光聚合共聚制备。首先，将一定量的SA (1.6 g)、TA (2.4 g)、UD (1g)和DMPA (30 mg)在10 mL烧瓶中混合。然后，将混合物超声处理1 min并倒入玻璃模具。最后通过紫外灯(400 W, 365 nm)交联10 min获得按需粘附层。

2.3.2 顶层导电层的制备

光引发剂184、PEGDA、BA和LiTFSI分别用作光引发剂、交联剂、单体和电解质盐。首先，将光引发剂184、PEGDA和LiTFSI加入BA液体中，随后完全搅拌和超声处理。接下来，将混合溶液加入到含有底层粘附层的模具中。然后通过紫外灯(400 W, 365 nm)交联10 min获得具有双层结构的皮肤贴片。

2.4 测试方法

2.4.1 机械性能测试

在拉伸机上对样品(厚度1.5 mm, 宽度12 mm, 长度35 mm)进行机械测试。拉伸速率被设定为40 mm·min⁻¹, 并且使用50 N的传感器进行测量。

2.4.2 粘附能力测试

为了测量剥离强度，首先制备粘附样品(厚度1.5 mm, 宽度12 mm, 长度35 mm)，并使用拉伸试验机通过标准90°剥离试验进行测试。将剥离速度设定为40 mm·min⁻¹，并使用50 N的传感器进行测量。

2.4.3 手势识别

在实验中，参与者需执行共计10种不同的手势，包括5种单独手指的弯曲和伸直动作，以及5种常用的交流手势。每种手势重复进行17次，以积累充足的训练样本。电阻信号沿时间坐标进行分段处理，并从每个手势动作产生的信号中提取两个特征值：均方根(RMS)和平均绝对值(MAV)，以表征双层贴片阵列对各手指运动的识别能力。随后，将提取的特征值划分为五个子集，进行五折交叉验证。具体操作如下：选择一个子集建立训练模型并进行测试，其余子集则作为训练集。这一过程循环进行五次。同时，采用K均值聚类输出预测分类的百分比，作为相应手势识别精度的指标，无需进行后处理。

2.4.4 远程报警系统

远程报警系统由双层皮肤贴片、智能手机以及具备蓝牙功能的数字万用表组成，其主要功能是实现伤员与医生之间的远程通信。该系统通过数字万用表实时监测双层皮肤贴片的电阻信号，该信号会随手指弯曲动作而变化。在手指伸直的正常状态下，电阻保持较低水平。当患者遇到紧急情况或需要援助时，可通过弯曲手指发出信号，此时电阻信号将显著上升。一旦信号超过预设阈值，数字万用表便会将信号发送至智能手机，迅速激活手机震动以警告医生或家属。

2.5 实验安全及预防措施

1) 个人防护措施: 实验前, 务必穿戴整洁的实验服, 并佩戴防护手套及口罩; 长发学生应将头发扎起, 以免影响视线或卷入实验设备。

2) 化学品安全管理: 实验过程中所用化学品应存放至药品柜中, 禁止随意摆放; 在取用化学品时, 请使用专用工具, 避免直接用手触摸; 使用完毕后, 请及时盖紧容器, 防止泄漏。禁止将化学品带出实验室, 也不得将食品和饮料带入实验室。

3) 安全操作规程: 在使用紫外灯过程中必须佩戴防护墨镜, 以避免对眼睛造成伤害; 若实验过程中出现异常情况, 如溶液溢出、设备故障等, 请立即停止实验并报告给教师或实验员; 实验结束后, 请按照规定的程序清理实验现场, 将废弃物放入指定的垃圾桶内。

4) 应急响应指导: 熟悉实验室内的紧急出口和安全设施, 在紧急情况下, 请保持冷静, 迅速撤离现场; 若发生化学品泄漏或人员受伤等事故, 请立即报告给教师或实验员, 并按照应急预案进行处理。

3 结果与讨论

3.1 按需粘附机理探究

在进行实验前, 学生需要深入理解粘附与脱粘附的机理, 并利用实验数据对理论进行验证。以下为可供参考的机理解释及相应实验数据: 底层材料的粘附与脱粘附性能, 主要受其结构在皮肤温度影响下, 由半结晶状态向无定形状态转变的影响。其中, SA具有较长的烷基侧链, 其熔融温度介于 47°C 与 50°C 之间^[8]。添加短烷基链的TA后, 相变温度降至人体皮肤温度以下。TA和SA的结晶集体起到硬链段的作用, 在室温条件下形成无粘附能力的刚性相。当半结晶态的SA在皮肤温度下融化时, 原本刚性的聚合物变得粘稠柔软, 从而能够粘附于皮肤之上(图2a–2c)。与在半结晶状态(室温

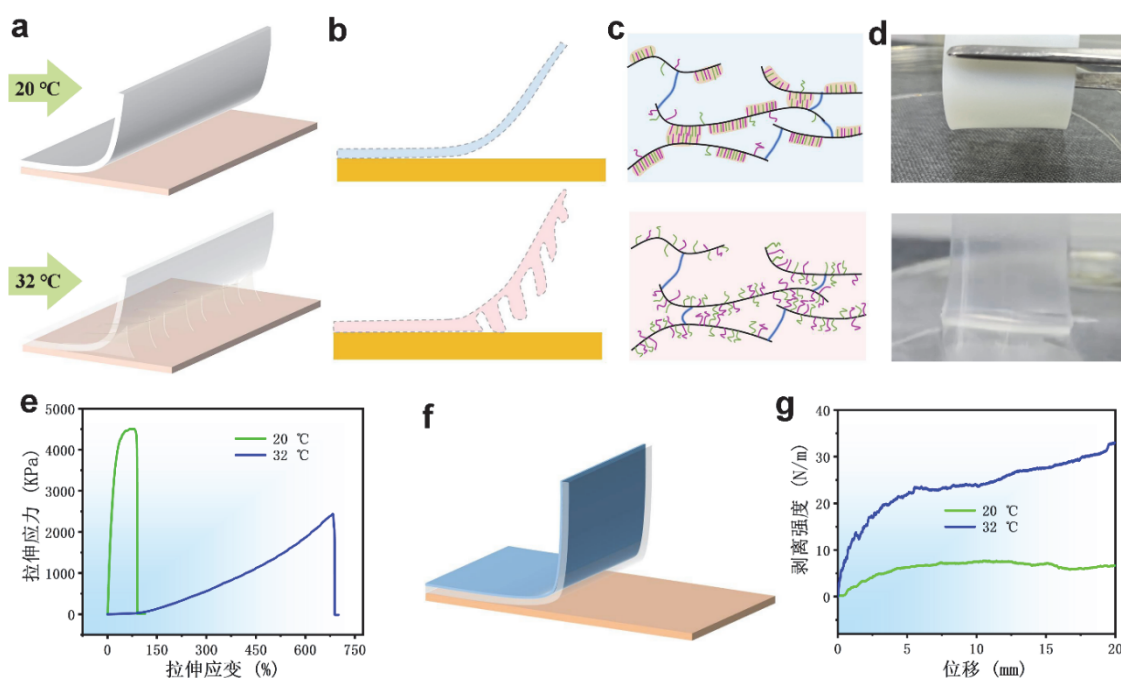


图2 粘附层剥离过程中宏观(a)和微观(b)界面行为示意图; (c) 处于半结晶相(20°C)和无定形相(32°C)时粘附层的直链烷基链的示意图; (d) 在不同温度下从被粘物上剥离粘附层的照片; (e) 粘附层在 20°C 和 32°C 时的拉伸应力-应变曲线; 粘附层在标准 90° 剥离测试的示意图(f)及在不同温度下的剥离强度(g)

20 °C)相比, 无定形态(人体温度32 °C)展现出高流动性, 易于附着于皮肤表面。单轴拉伸试验揭示了典型的拉伸应力-应变曲线, 并用于测量材料机械强度(图2e)。在室温(20 °C)条件下, 底层粘附层在最大拉伸应变(81.7%)时的拉伸应力达到4504.3 KPa。而在32 °C时, 粘附层更易于弯曲和拉伸, 在应变为683.7%时的极限拉伸应力为2434.6 KPa。这些结果证实了粘附层具有良好的拉伸性, 适合应用于变形较大的皮肤部位。此外, 采用90°剥离测试对其在皮肤上的粘附性能进行了检验(图2f)。使用冰袋冷却后, 粘附层的粘合强度从 $33.1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 骤降至 $7.5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ (图2g), 确保在去除时减少对皮肤的损伤。学生应将自行测定的实验数据与上述参考数据进行对比, 分析并整理数据间的一致性与差异性。

3.2 皮肤粘附表现

为了更直观地理解底层粘附层在皮肤表面的按需粘附、去除以及二次粘附过程, 学生有必要对整个皮肤粘附过程进行拍照记录(图3a)。首先, 粘附层在室温下相对坚硬且不透明; 一旦与手接触, 它会在10 s内粘附到皮肤上, 并因皮肤温度触发的半晶态向非晶态转变而变为透明状态; 即便经过揉捏, 仍能紧密贴合于皮肤, 且不易被剥离。经冰袋冷却10 s后, 皮肤上的粘附层会转变为半结晶状态, 随后再次硬化, 此时可轻松无残留地从皮肤上移除; 待皮肤恢复至正常温度后, 已移除的粘附层能够重新粘附并重复使用。为探究其按需粘合/去除的稳定性, 在20 °C及32 °C条件下各进行六次剥离强度测量。结果显示, 在32 °C时剥离强度在循环间略有变动, 但总体保持较高水平; 而在20 °C, 剥离强度则相对较低(图3b)。粘附测试完成后, 学生还需借助红外热成像仪监测温度触发的按需粘附/去除过程(图3c)。粘附层与皮肤接触后, 在5 s内即达到半晶态向非晶态转变的临界点, 随后温度继续上升, 在20 s内与皮肤温度持平。经冰袋处理10 s后, 粘附层温度迅速下降至12.7 °C, 完成状态转换(图3d)。在室温(20 °C)条件下, 材料保持刚性, 维持原始平面形态, 与凹槽表面存在显著间隙。然而, 在高温(32 °C)环境下, 材料能顺滑、紧密地贴合于凹槽表面, 且界面无气泡产生(图3e)。该粘附层具有由皮肤温度或冰袋触发的按需粘附/去除功能、可调节的转变温度及较窄的温度转变范围, 展现出理想皮肤贴片的特性。在皮肤温度环境下, 其剥离强度足以保证日常活动中与人体皮肤的密切接触和粘附, 使其成为高效的皮肤贴片。冷却后, 贴片易于脱落, 避免更换时伤害皮肤。更为重要的是, 其在常温可控环境下的状态转变能力保证了材料的重复粘贴性, 有助于纠正实际应用中可能的操作误差^[9,10]。

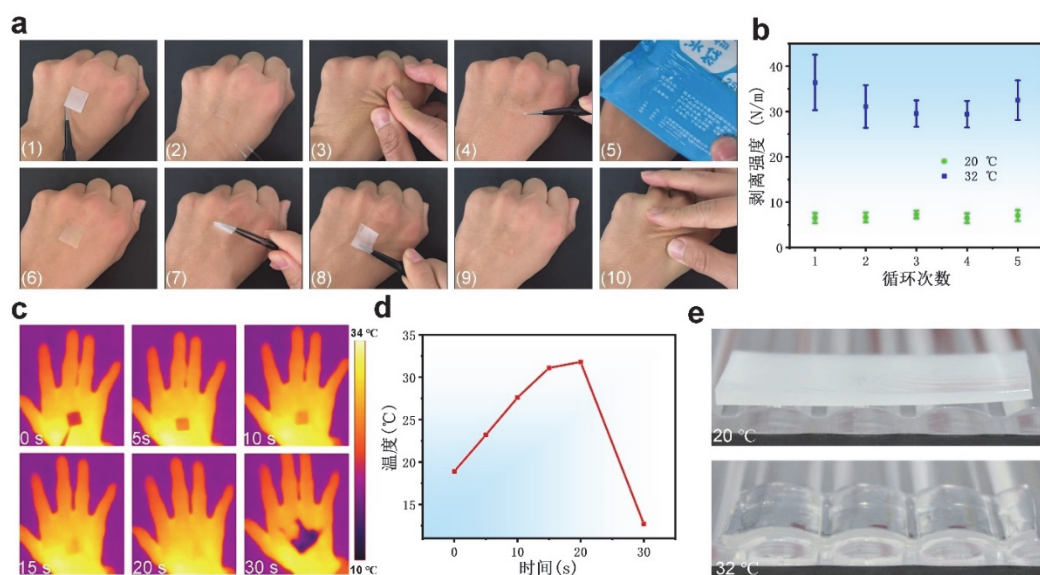


图3 (a) 粘附层在手部皮肤上的按需粘附/去除和二次粘附的详细过程; (b) 粘附层在20 °C和32 °C下的循环剥离强度($n = 3$); 粘附层在手背上的实时红外热图像(c)和温度曲线(d); (e) 粘附层处于20 °C和32 °C时在凹槽表面上的照片

3.3 手势识别

借助于底层粘附层的卓越特性，我们在其表面引入了导电性功能聚合物，从而将其扩展为一个双层的粘附/导电平台，以辅助患者进行手势通信和远程报警。底层粘附层在不同温度下的结晶相变实现了按需粘附/去除，这有利于双层皮肤贴片的使用和更换。由于顶层导电层是在粘附层表面原位合成的，因此结合较为紧密，防止了表面导电层在使用过程中脱落。作为生物医学护理的一部分，手语识别对于消除无法使用口语进行交流的医生和伤员之间的沟通障碍至关重要。在机器学习的支持下(图4a)，我们构建了一个基于双层皮肤贴片的手语识别平台，可以按需粘附/移除，旨在降低医生和伤员之间的沟通障碍。所有学生被分为10组，每组3-5人，随后分别按组执行10种不同的手势(图4b)，包括5种单独手指的弯曲和伸直，以及5种常见的交流手势。每个手势重复17次以积累足够的训练样本。电阻信号沿时间坐标进行分段，并从每个手势运动生成的信号中提取两个特征(均方根(RMS)和平均绝对值(MAV))，以表示双层贴片阵列对每个手指的识别。由每个组的小组长将提取的特征值分为五个子集后，进行交叉验证。具体方法是用其中一个子集建立训练模型进行测试，其他子集作为训练集，整个过程重复5次。同时，使用K均值聚类给出预测分类的百分比作为相应手势识别的准确性，而无需进行后处理。然后机器学习识别所有阻力信号并逆向重构并输出相应的预测。经过五重交叉验证后，得到的混淆矩阵显示，手势预测与实际手势匹配，准确率达到100% (图4c和d)，这证明了机器学习辅助的双层皮肤阵列感知和分类人类手势的可行性。此外，这种机器学习只需要一个简单的算法来分析数据，不需要复杂的数据分析过程和算法。因此，这种手势识别系统有望成为手语感知的辅助平台，并且在非语言临床信息传输中也将更加重要。

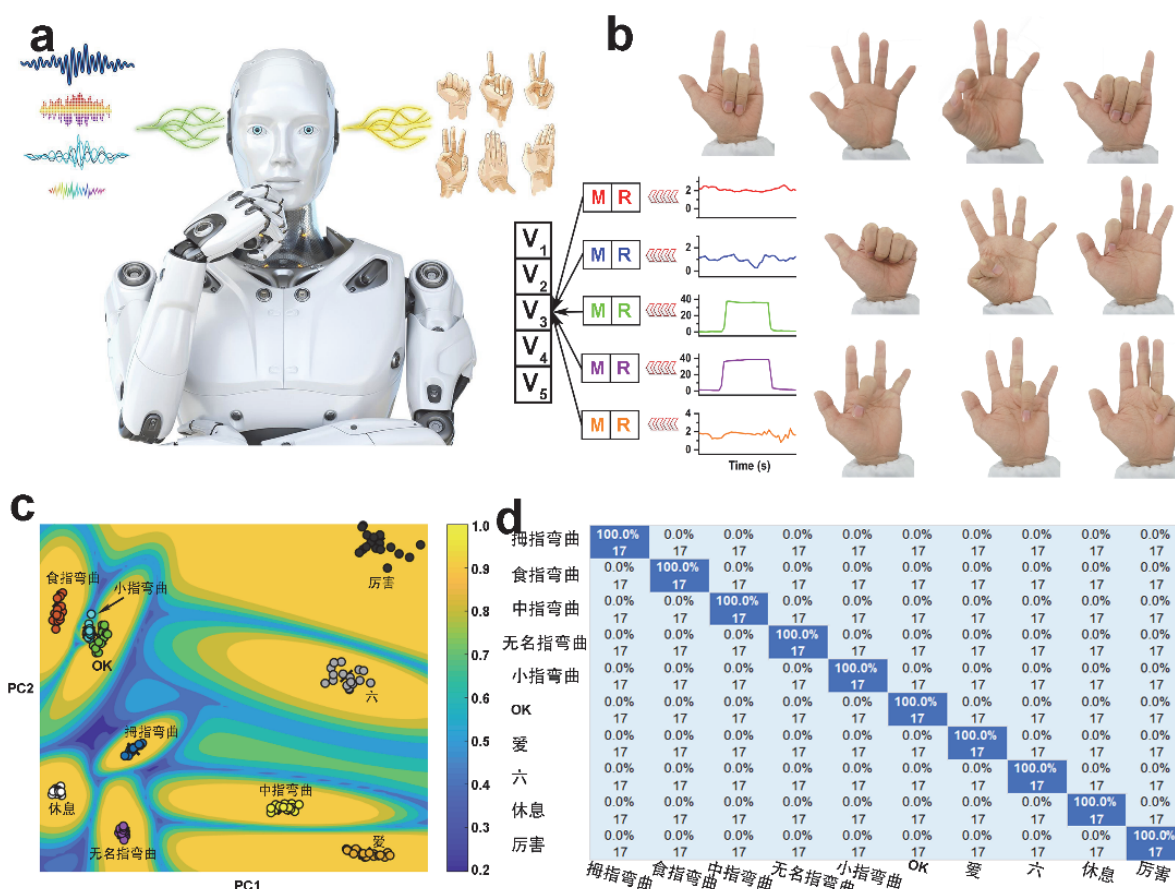


图4 用于手势识别的机器学习算法的示意图(a)及用于识别的十种不同手势的照片(b); K均值聚类(c)和十个手势的分类混淆矩阵(d)

3.4 远程报警

为了激发学生对科研的热情及提升其实践技能，建议引导学生更深入探索手语识别技术。特别是，研究双层皮肤贴片在实时报警系统中的应用价值。该系统由双层皮肤贴片、具备蓝牙功能的数字万用表和智能手机组成，能够与智能手机实时传输信号，极大地便利了医疗诊断和救护操作(见图5a)。以手指运动为例，数字万用表能够实时采集双层皮肤贴片在运动过程中的电阻变化，并通过蓝牙技术将数据传输至手机App，从而实现对手指运动的实时监测(见图5b, c)。系统根据预设的贴片电阻变化阈值进行反应，当病人食指正常伸直时，系统表现出稳定性，表示病人暂无需援助。在紧急状况或需要帮助时，病人仅需轻微弯曲手指，贴片的电阻信号便会急剧上升并超过设定阈值，随即手机振动提醒医生或家人(见图5d)。这种基于非语言的远程报警系统，不仅为病人与他人间的沟通搭建了桥梁，而且在传递关键的临床信息方面发挥了至关重要的作用。

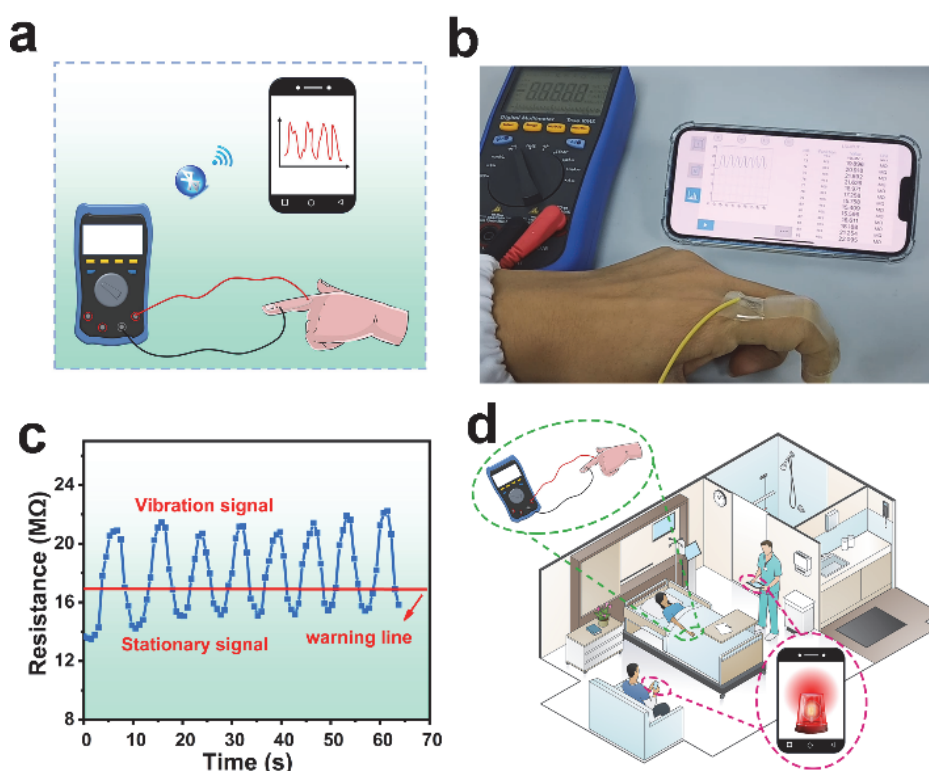


图5 远程报警系统外部连接示意图(a)和照片(b); (c) 实时记录通过蓝牙接收到的手指弯曲动作以及相应的警告线; (d) 用于为语言障碍病人传输临床信息的系统示意图

4 实验实施与考核

4.1 实验实施

4.1.1 实验前准备:

- 1) 文献资料搜集: 学生通过学校数据库平台或图书馆查找有关高分子聚合物智能材料的合成及应用的文献和书籍。
- 2) 资料共享: 利用微信或QQ群等工具进行资料共享, 便于团队协作与信息交流。
- 3) 分组合作: 将学生分为4人一组, 每组成员分别负责不同的实验部分。
- 4) 课题讲解: 每位同学向组内其他成员讲解所负责实验部分的注意事项, 促进学生之间的互动与学习。
- 5) 实验准备: 提前一周准备好所需的药品、耗材、表征仪器, 并进行分析研讨以确保规范、安

全、顺利实施实验。

4.1.2 实验中操作与指导:

- 1) 单人单套实施: 学生按小组进行对应主题的平行实验, 确保个人责任与团队合作相结合。
- 2) 互助合作: 组内成员在完成自己负责的部分的同时, 需在其他同学遇到困难时提供帮助与指导。
- 3) 课时分配: 根据难易程度分配不同课时量给以下实验内容:
皮肤贴片合成(2课时)
粘附力学等基础表征(2课时)
手势识别(3课时)
远程报警系统(3课时)
- 4) 教师角色: 教师在巡查过程中及时解答问题, 鼓励学生根据实验现象做出判断并给出解释, 培养探索精神与问题解决能力。

4.1.3 实验后讨论与总结:

- 1) 实验报告撰写: 学生整理实验步骤、现象、结果, 并完成实验报告。
 - 2) PPT汇报: 每个小组派代表进行约10 min的PPT汇报, 并对全班其他同学的疑问进行解答。
 - 3) 时间安排: 此环节预计使用3课时完成。
- 通过上述的教学设计, 学生不仅能获得理论知识, 还能通过实践操作加深理解, 并在团队合作中锻炼沟通与解决问题的能力。同时, 教师的即时反馈和指导能确保学生在正确的路径上探索和学习。

4.2 实验考核

教师将综合学生在多个维度的表现来评估其实验学习成果, 并制定相应的评价体系。基于产出导向的教育理念, 以下为详细的考核细则:

- 1) 实验预习(20%): 学生需提交预习报告, 其中应详细阐述实验目的、原理和步骤的理解, 以及对实验仪器设备的熟悉程度。这反映了学生对实验内容的初步把握和准备工作的充分性。
- 2) 实验操作(30%): 评价学生在实验过程中的操作技能, 包括仪器使用的熟练度、步骤执行的准确性、数据记录的精准性, 以及面对实验中出现的实际问题时的应对策略和解决问题的能力。
- 3) 实验报告(40%): 学生的实验报告应展现数据处理的完整性、对结果的深入理论分析。这部分评价重点在于学生对实验数据的理解和分析能力, 以及他们将知识传达给他人的能力。
- 4) 实验态度和纪律(10%): 学生的实验态度和遵守实验室纪律也是评估的关键部分。包括守时、保持实验室整洁、正确使用设备等行为规范。任何违反规定的行为都将影响最终的实验成绩。

通过上述细致的考核机制, 教师能够全面而公正地评价学生的实验表现和学习效果, 确保实验教学的目标得到有效实现。

4.3 课后拓展

为了加强学生对科学概念的深层理解、培育创新思维、增强团队合作能力, 并激发他们对科学的热爱, 教师可采取以下策略进行实验课后的拓展活动:

- 1) 材料研究探索: 学生小组在教师的指导下探讨使用不同原料合成粘附性聚合物皮肤贴片的可能性。他们需要阐述新材料的合成原理、详细实验步骤, 并与本实验所用材料进行性能和应用范围的对比分析, 以识别各自的优势和局限性。
- 2) 实验设计反思: 学生将回顾本次实验的设计, 总结其亮点和不足之处, 并针对识别出的问题提出切实可行的改进措施, 从而提升实验设计的严密性和科学性。
- 3) 临床沟通解决方案研究: 通过深入研究我国目前用于辅助语言障碍患者沟通的技术和方法, 学生需批判性地分析现有解决方案的挑战和潜在的改进空间, 并对未来发展趋势提出见解。
- 4) 高分子聚合物应用讨论: 利用已有化学知识, 学生团队进一步探讨高分子聚合物如塑料、橡胶、涂料、胶粘剂等在生产与日常生活中的应用价值。他们将提出如何扩展这些材料的应用领

域、提高产品的附加值及资源利用效率的创新思路。

通过这些精心设计的课后拓展任务，学生可以在实验课程之外继续探究和实践，不仅加深了对课堂所学知识的理解，而且培养了独立研究和团队协作的能力。

4.4 教学理念与预期效果

科研教学设计的精髓在于激发学生的积极参与意识和探求精神，通过一系列精心策划的实验活动，不仅增强学生的学习兴趣，还在实际操作中培育其对科学的热情。本设计旨在提供一个合理而高效的实验平台，让学生在亲身实践中体验到科研的乐趣，并通过这一过程加深对科学知识的理解和运用。

在实验的各个阶段，学生将锻炼并显著提高他们的动手实践能力。这不仅为他们带来直观感受和启发，而且有助于他们摆脱应试教育的束缚，培养出批判性和创造性思维，以及解决现实问题的实际技能。此外，实验的完成依赖于团队成员间的紧密合作，这一过程无疑将大幅强化学生的协作精神、沟通技巧和领导才能。

综合来看，通过本通信系统创新实验的精心设计与实施，我们不仅促进了学生在实验技巧、科学研究知识及思维方式上的成长，还深化了他们的团队合作精神和协作能力。这些全面提升了学生的综合素质，为他们未来在学术和职业道路上的成功打下坚实的基础。

5 结语

在本次教学实验中，我们成功研发了一款具有按需脱粘特性的创新型双层皮肤贴片，它适用于手语识别和远程报警信号传输。该贴片的底层粘合材料能在20 °C至32 °C间发生从半结晶态到无定形态的相转变，实现理想的按需粘附与移除机制。此外，引入的顶层导电层不仅提升了其在传感器领域的应用潜力，还促进了基于手势的非语言临床交流系统的开发。

实验结果显示，该系统在手势预测准确性方面取得了显著成果，匹配率高达100%，从而证明了我们的机器学习算法驱动的双层皮肤贴片在人类手势感知和分类方面的高效性。进一步地，我们构建的远程紧急报警系统通过结合皮肤贴片、智能手机及蓝牙数字万用表，为受伤者提供了一种长距离非语言紧急通讯手段。

鉴于这款双层皮肤贴片所展现出来的卓越性能和广泛的应用前景，它极有可能突破现有功能性材料与技术的限制，成为医疗环境中非语言临床交流的重要工具。通过本次实验，学生们全面经历了从合成、表征到应用的研究过程，并展现了对整个实验设计和实施流程的熟练掌握，这极大地提高了他们的科研素质，为他们未来的学术追求和职业发展奠定了坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] Xiao, X.; Fang, Y. S.; Xu, J.; Chen, J. *ACS Nano* **2021**, *15*, 18633.
- [2] Wen, F.; Zhang, Z. X.; He, T.; Lee, C. K. *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 5378.
- [3] Wang, X.; Sun, X. T.; Gan, D. L.; Soubrier, M.; Chiang, H. Y.; Yan, L. W.; Li, Y. Q.; Li, J. J.; Yu, S.; Xia, Y.; *et al.* *Matter* **2022**, *5*, 1204.
- [4] Zhang, Y. F.; Gong, M.; Wan, P. B. *Matter* **2021**, *4*, 2655.
- [5] Liang, Y. Q.; Li, Z. L.; Huang, Y.; Yu, R.; Guo, B. L. *ACS nano* **2021**, *15*, 7078.
- [6] Lin, M. Z.; Zheng, Z. J.; Yang, L.; Luo, M. S.; Fu, L. H.; Lin B. F.; Xu, C. H. *Adv. Mater.* **2022**, *34*, 2107309.
- [7] Wu, S. J.; Yuk, H.; Wu, J. J.; Nabzdyk C. S.; Zhao, X. H. *Adv. Mater.* **2021**, *33*, 2007667.
- [8] Ren, Z.; Hu, W.; Liu, C.; Li, S. S.; Niu, X. F.; Pei, I. *Macromolecules* **2016**, *49*, 134.
- [9] Gao, Y.; Wu, K. L.; Suo, Z. G. *Adv. Mater.* **2019**, *31*, 1806948.
- [10] Zhou, L.; Dai, C.; Fan, L.; Jiang, Y. H.; Liu, C.; Zhou, Z. N.; Guan, P. F.; Tian, Y.; Xing, J.; Li, X. J.; *et al.* *Adv. Funct. Mater.* **2021**, *31*, 2007457.