

柔软却坚强，可在1200°C环境中工作

柔性温度传感器实现高温测量新突破

◎陈科

近年来，各大品牌的折叠屏手机、柔性可穿戴电子等智能设备层出不穷，成为行业热点。作为柔性电子设备的重要组成部分，柔性传感器用以测量温度，反映人体的各项指标。现有的柔性薄膜温度传感器受柔性衬底、敏感材料等限制，难以实现高温物理场的温度测量。因此，如何继承柔性薄膜传感器优势，实现柔性薄膜传感器在高温环境下的应用是一个值得关注的问题。

近日，来自微纳制造领域的一项最新研究成果，为柔性传感器突破高温应用瓶颈提供了新思路。西安交通大学机械工程学院精密工程研究所的刘兆钧博士、田边教授、蒋庄德院士及其合作团队首次制备出了具有良好温度敏感性的高温柔性温度传感器。相关成果发表于工程制造领域期刊《极端制造》。

传统柔性温度传感器难以实现高温无损监测

柔性传感器是指采用柔性材料制成的传感器，具有良好的柔韧性、延展性，甚至可自由弯曲、折叠，而且结构形式灵活多样，可根据测量条件的要求任意布置，能够非常方便地对复杂表面进行检测。

在可穿戴方面，柔性的电子产品适合“人体不是平面”的生理特性，因此更易于测试皮肤的相关参数，其可将外界的受力或受热情况转换为电信号，传递给机器人的电脑进行信号处理，从而实时精准地监测出人体各项指标。

“柔性薄膜温度传感器能变形、易附着、轻薄等优点受到了研究人员的广泛关注。”田边说，“热电偶式传感器以结构简单、动态响应快、便于集中控制等优点脱颖而出。”

结合二者优势，热电偶式柔性薄膜温度传感器应运而生。“温度传感器主要由两部分组成，由两种不同材料制成的温度敏感层和柔性基板。温度敏感层常由金属以及金属化合物组成，柔性基材则选择已经商业化的聚二甲基硅氧烷、聚酰亚胺等高分子聚合物材料。”田边表示。

实际上，柔性传感器的优势使其能运用到多个领域当中，除了可穿戴设备，柔性传感器还在医疗电子、环境监测等领域显示出很好的应用前景。然而，现有的柔性薄膜温度传感器受柔性衬底、温度敏感材料等限制，难以在高温环境场中工作，更无

法实现功能化应用。“因为柔性基板的熔点通常低于400°C，在高温环境中发生碳化后会变脆、变硬，因此，很难在高温环境下使用现有的柔性温度传感器。这一点也限制了它们在航空航天、钢铁冶金和爆炸损伤检测等极端环境中的应用。”田边解释道。

“现有的高温温度测量手段受限于设备尺寸大、需要破坏结构、破坏气流场、受环境干扰等，难以实现对温度场的无损实时温度监测。”博士生刘兆钧补充道。因此，如何继承柔性薄膜传感器的优势，实现柔性薄膜传感器在高温环境下的安装与应用是亟须解决的关键问题。

突破多项柔性温度传感器测量瓶颈

为了突破柔性温度传感器的温度测量瓶颈，田边教授团队创新性地选择了具有宽温域的铝硅氧凝胶毡作为温度传感器的柔性基板。由于柔性基板表面不均匀、粗糙度较大，难以通过传统的微纳制造工艺实现薄膜沉积与功能化，因此团队选用了丝网印刷技术制备厚膜以克服上述困难。

在制备传感器的实际操作中，田边、刘兆钧等人使用有机黏合剂混合功能粉末完成浆料配置，利用高温热处理的方法去除薄膜中的多余有机物，如环氧树脂、松油醇等。同时，团队还针对不同应用表面，基于柔性材料可变形、可共形的优势，实现了功能薄膜的特定曲面化制备。“就像球鞋设计者根据球星脚底的尺寸大小来制定码数一样，这种‘独家订制’能有效解决一些问题。”田边表示，这样制备好的柔性温度传感器能够贴附于不同曲率曲面，例如叶片等。同时，其也具有超薄、超轻等优点。这项研究首次实现柔性传感器在零下190°C至零上1200°C这一极广的温度范围内工作，测试灵敏度也达到了可观的226.7微伏每摄氏度($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)。这是现有所有柔性温度传感器难以实现的。扩大柔性传感器的工作温域，为柔性传感开拓了更广阔的应用领域，它在探险排难、航空航天、钢铁冶金等领域将呈现出巨大的应用潜力。

在被问及新型柔性传感器何时能够实现实际应用时，蒋庄德表示：“我们团队的研究人员对制备的柔性温度传感器已经进行了多种实验室级测试与实际测试。其中，包括对航模发动机的尾喷温度进行实时监控，小型物理爆炸场爆炸瞬时温度测量以及对坩埚中金属熔化过程进行温度监测等。传感器在整个测试过程都表现出了优异的测温能力。”

在蒋庄德看来，科技发展的目标始终围绕造福人类。他指出：“我们根据柔性温度传感器极轻、极薄的特点，创新性地将其应用于智能穿戴设备，如传感器与环保透明面罩相结合设计出的智能口罩，实现对人体呼吸状态的实时监测，有望惠及长期独居旅行者和慢性病患者。我们的科研成果可以给人们的生活带来便捷，这也让科

研有了‘温度’。”

目前，柔性传感器许多技术仍停留在研究阶段，柔性传感器产业链整体能力亟待增强。就技术本身而言，传感器本身的稳定性、耐磨损性等还需要进一步提高。而从整个产业链的配套来说，柔性电路、柔性存储，以及软硬连接等环节也需要跟进步伐。在未来，团队也期望将制备的柔性传感器进一步优化，实现飞机表面、涡轮叶片等国之重器上的温度测量，为我国科技进步添砖加瓦。

来源：科技日报