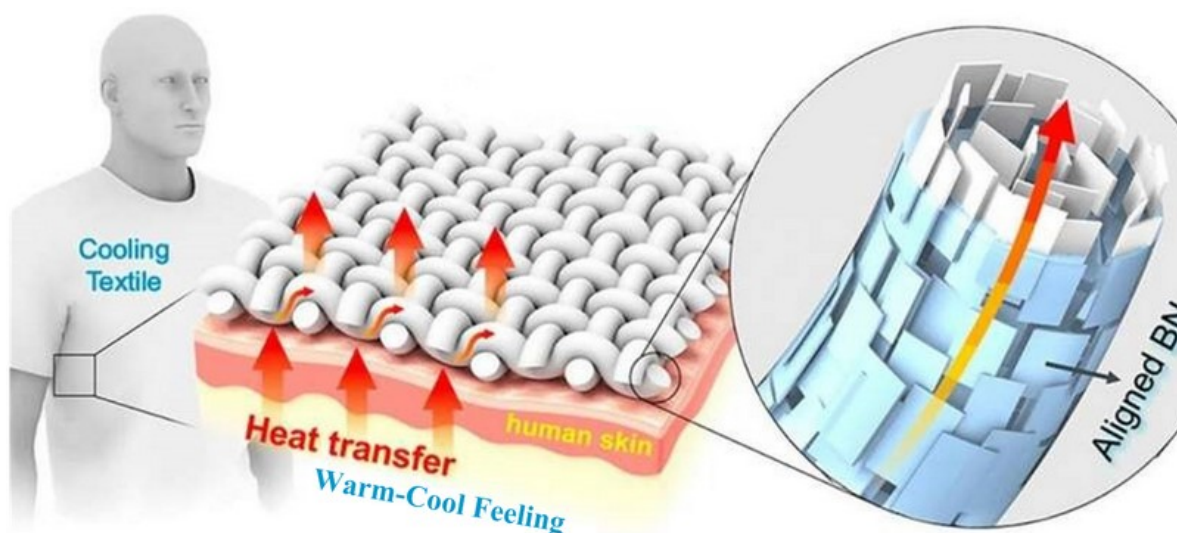


织物接触冷暖感测试评价技术研究现状

Research Status of Evaluation Methods for Fabric Contact Warm-Cold Feeling



摘要：本文对目前织物冷暖感测试方法的研究现状进行综述，介绍了最大热流和吸热系数测试方法和仪器，分析各种测试方法的特点，并提出改进意见，以开展相应国产化测试仪器的研究和开发。

关键词：冷暖感、导热系数、吸热系数、织物、蓄热系数、热逸散系数

1. 引言

织物冷暖感（或热舒适）是织物与人体皮肤接触后织物给皮肤的温度刺激在人大脑中形成的关于冷和暖的判断。当织物与皮肤接触瞬间，由于存在温差，织物与皮肤之间会发生热交换，使皮肤的温度升高或降低。织物与皮肤之间的热交换形式主要为热传导，织物内部的热辐射和自然对流影响很小，可忽略不计。通常情况下（除环境温度高于皮肤温度外），皮肤温度高于环境温度，因此织物与皮肤接触后往往使皮肤温度下降，如果温度下降（或上升）的量超过一定限度，就会使人产生不舒适感。从物理意义而言，冷暖感的强弱，取决于织物和人体接触过程中织物导走或保有人体热量的多少。

织物与皮肤接触瞬间，二者之间存在温差，有明显的传热传质变化[21, 23]。影响皮肤温度及其变化的物理参数主要有：皮肤温度、温度变化速率、温度变化量、环境时间和时间等。织物的冷暖感可以用不同的物理参数进行描述，常用的有导热系数、吸热系数、人体与织物接触时由人体通过织物流向环境的最大瞬态热流。

本文对目前织物冷暖感测试技术的研究现状进行综述，分析各种测试方法的特点，并提出改进意见，以开展相应国产化测试仪器的研究和开发。

2. 测试方法

织物的冷暖感常用最大瞬态热流法、吸热系数法和导热系数法来进行评价，但最大瞬态热流和吸热系数测试中都包含了导热系数这个参数。因此目前冷暖感的各种测试评价方法主要集中在最大瞬态热流和吸热系数的测试方面。

2.1. 最大热流法 (Q-max Method)

最大热流法是日本学者 Kawabata 根据瞬态热传导理论提出的一种织物接触冷暖感测试评价方法，最大热流法的基本原理是在模拟人体皮肤接触织物的瞬态传热过程中对热流变化曲线进行实时测量。如图 2-1 所示，在测量之前，首先将样品放在温度保持恒定的样品座上，并将由良导热体制成的热板温度升高到比样品高约 5~10℃。测量时将热板放置在样品的上表面，热量从温度高的热板流向样品，记录和测量热板温度和接触面上热流密度 $q(t)$ 随时间的变化曲线。

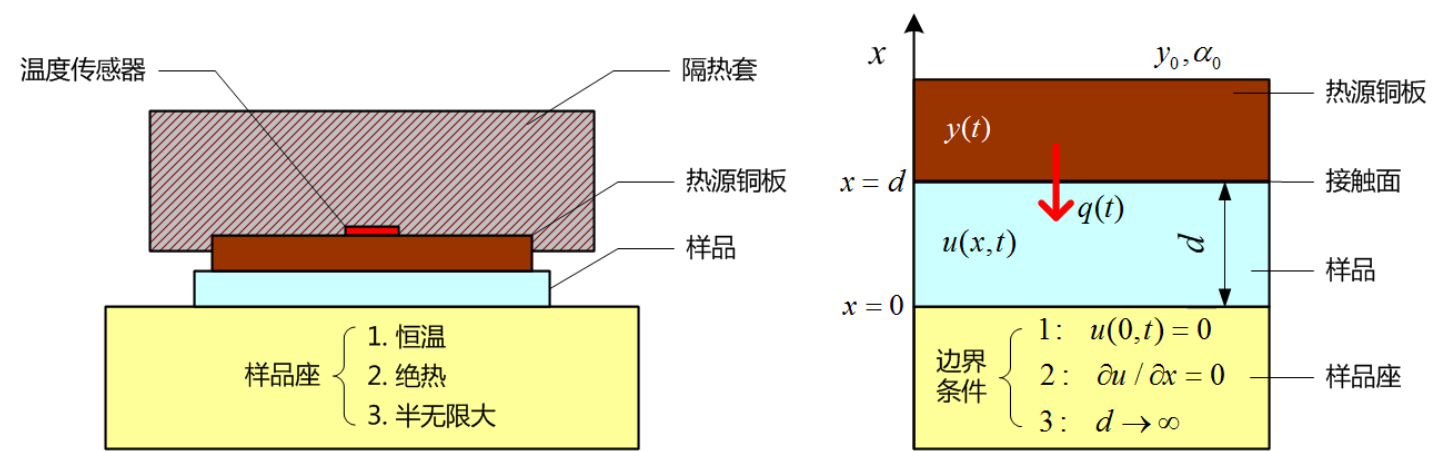


图 2-1 最大热流法测量原理和测试模型



图 2-2 KES-F7 型热物理性能测试仪

目前国内外普遍用来测量织物热性能的仪器是日本 KATO TEKKO 公司生产的 KES-F7 Thermo LABO 型热性能测试仪器，如图 2-2 所示。对于织物接触冷暖感的测试，此仪器所采用的方法就是上述最大热流法。由于 KES-F7 型测试仪只考虑热板初始温度比样品表面温度高的情况，因此测出的最大热流密度实际上是相对冷暖感，大的热流密度值对应冷感，小的热流密度值对应暖感。

如图 2-3 所示, KES-F7 型冷暖感测试仪由以下三个基本部分及其控制系统构成：

- (1) T. Box (Temperature Detecting Box, 温度测试以及蓄热板)
- (2) B. T. Box (Bottom Temperature Box, 热源台)
- (3) Thermo Cool (恒温台)

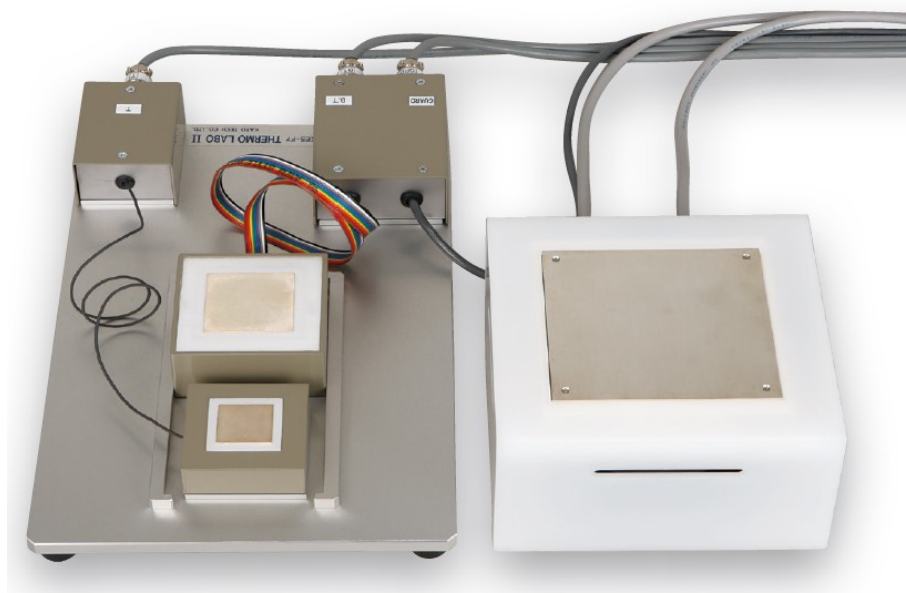


图 2-3 KES-F7 Thermo LABO 接触冷暖感测试仪

KES-F7 型热性能测试仪具有以下三种测试能力：

2.1.1. Q-max 测试（冷暖感测试）

如图 2-4 (a) 所示，将样品放置在恒温台上，并将蓄热板放置在热源台上进行蓄热，然后将蓄热板快速放置在样品表面上。蓄积的热量立即移动至低温侧的样品上，此时测试出的热流峰值为 Q-max 值，测试过程可在 1 分以内完成。

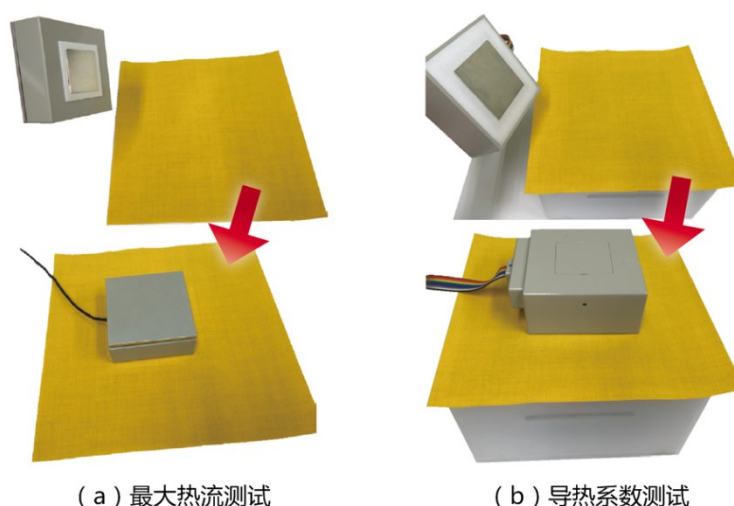


图 2-4 冷暖感测试仪操作示意图

2.1.2. 稳态导热系数和热扩散系数测试

如图 2-4 (b) 所示，首先将恒温台设置为室温，将 50 mm×50 mm 的样品放置在上面，再将热源台的热板紧贴试样放置在上面。在热源台以及护环的温度达到稳定后，通过测量稳态热流既可得到稳态导热系数，测试过程可在 2~3 分以内完成。

通过达到稳定前的动态热流和温度变化曲线，并结合特定边界条件，还可以实现对热扩散系数的测量。

通过上述测量的导热系数和热扩散系数，如果知道样品的密度，则可以计算得到样品的比热容。

由此可见，KES-F7 型热性能测试仪是一个非常经典的瞬态热物理性能测试仪器，通过测试模型和相应的边界条件，可以对样品厚度方向的热物理性能参数进行测量，即 KES-F7 型热性能测试仪的热性能测试带有明确的方向性。

2.1.3. 保温性能测试

将上述冷暖感测试仪结合风洞来进行织物的保温性能测试，如图 2-5 所示。

将样品（100 mm×100 mm 以上、最大 200 mm×20 mm）和样品安装框一起固定至 100 mm×100 mm 热源台上进行测试。通常风洞内的空气温度与室温相同，热源台温度为比室温高 10℃。当热源台温度以及热流值稳定时，测量热流值就可计算

得到保温性能，测试通常在 2~5 分钟内完成。在具体测试中，还可使用各种测试方法，例如 Wet 法、Space 法和 Wet Space 法等。



图 2-5 织物保温性能测试仪

2.1.4. 测试标准

尽管最大热流法测试技术已经开发了近 30 年，但一直没有形成国际化的标准测试方法，具体原因将在后续进行分析。基于最大热流法，目前已经建立了相应标准测试方法的国家和地区只有大陆和台湾，如国家标准 GB/T 35263-2017《纺织品接触瞬间凉感性能的检测和评价》，以及台湾纺织产业综合研究所制定的《织物瞬间凉感验证规范》(FTTS-FA-019)产业标准。

2.2. 吸热系数法 (Thermal Absorptivity Method)

由于人体皮肤在接触织物时的瞬态传热过程中，动态热传递会受到织物的导热系数、比热容和密度的影响。类似上述最大热流法原理和基于瞬态热传递，捷克学者 Hes 提出了另外一种表征织物冷暖感的参数——吸热系数。吸热系数的定义为：

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C} \quad (2.2.1)$$

式中： λ 代表织物的导热系数； ρ 代表织物的密度； C 代表织物的比热容。由此可知，织物的热吸收能力与其导热系数、密度和比热容有关，反映织物和人体接触时织物从人体吸收热量的能力。

为了测试织物的吸热系数，Hes 基于瞬态热传导理论开发了相应的测试仪器 Alambeta，Alambeta 仪器可快速测量瞬态和稳态热物理特性（隔热和热接触特性），也能测量样品厚度。该仪器由两个测量头组成，测试样品放置在两个测量头之间，如图 2-6 所示，两个测量头都配有热电偶和热流传感器。通过合适的冷却装置将底部测量头调节到环境温度，将顶部测量头调节到受控的恒定温差，热流传感器作用在两个测量头的接触面上。当顶部测量头下降接触被测样品时，可以测量流经样品的上下表面热流。Alambeta 仪器可测量多个参数，主要包括导热系数、热扩散系数、吸热系数、热阻、最大热流与静态热流密度之比以及接触点处的静态热流密度，该仪器还可以用来测定织物的厚度。

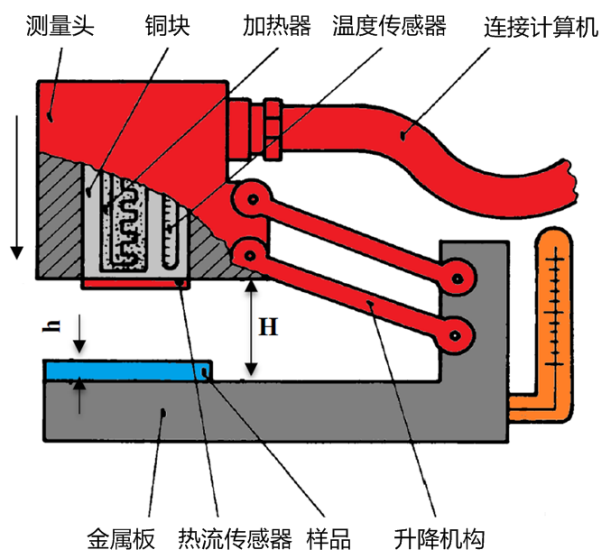


图 2-6 Alambeta 测试仪结构示意图

吸热系数（thermal absorptivity）也常称之为蓄热系数或热逸散系数（thermal effusivity），针对织物的吸热系数等热物理性能参数，2016 年美国推出了 ASTM D7984“采用改进型瞬态平面热源(MTPS)仪器测量织物吸热系数的标准试验方法”。

ASTM D7984 改进型瞬态平面热源法是基于经典的瞬态平面热源法，将瞬态平面热源法中双样品夹持薄膜探头的测试结构改变为单样品测试形式，将另外一个样

品用已知热物理性能的材料代替，并与薄膜探头集成为一个测试探头，同样可以实现瞬态平面热源法的大部分测试功能，可以实现对吸热系数和导热系数的测量，但无法直接测量最大热流密度。

执行 ASTM D7984 标准的典型测试仪器为加拿大 C-Therm 公司的 TCi 仪器，如图 2-7 所示。与瞬态平面热源法一样，TCi 仪器测试过程中是给探头中的加热元件施加固定量的热能（已知电流），给被测样品提供少量热量。该热量导致样品表面温度升高 $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ ，接触面处的温度升高引起传感器元件的电压变化，根据温度升高的多少和快慢来测量吸热系数和导热系数。

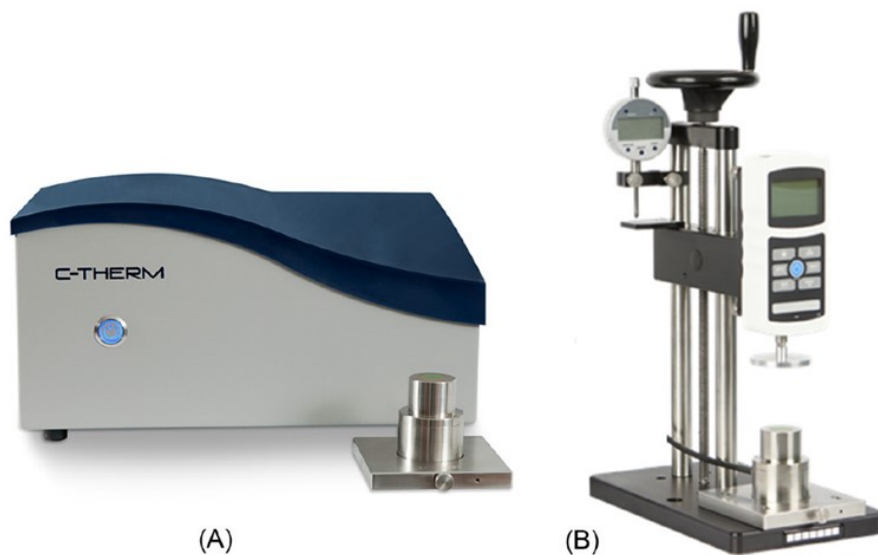


图 2-7 改进型瞬态平面热源仪器。(A) TCi 仪器和测量探头，(B) 压缩测试附件

3. 分析和结论

综上所述，上述各种测试方法具有以下特点：

(1) KES-F7 和 Alambeta 仪器中的最大热流法测量实际上都是非常主观的相对测试仪器，织物冷暖感的最大热流取决于测试仪器和设定参数，最典型的如蓄热板的材质和尺寸，不同材质和尺寸的蓄热板代表不同的蓄热量，相应的就会得出不同的最大热流值。另外，热源台和恒温台的不同温度设定也会得到不同的测量结果。这也就是说最大热流值并不能代表织物自身的热物理性能，这也是造成三十多年来最大热流法一直无法形成标准测试方法的主要原因。

(2) KES-F7 和 Alambeta 仪器都是瞬态热物理性能测试方法的典型应用，其最大特点就是通过一维传热测试模型和相应的边界条件，可以对样品厚度方向的热物理性能参数进行测量。改进型瞬态平面热源法是基于三维传热模型，测试的是样品整体的热物理性能，因此无法进行方向性的测试评价，而织物的各向异性特征非常明显。

(3) KES-F7 和 Alambeta 仪器的测试模型都是基于等温或绝热边界条件，这与同样基于瞬态传热理论的闪光法非常相似，不同之处只是加载到样品前表面的热信号形状不同。在闪光法中，样品绝热边界条件通过空气或真空环境来实现，而在 KES-F7 和 Alambeta 仪器对织物的测试则只能采用低导热隔热材料，由此给导热系数和热扩散系数测量带来了较大测量误差(10%)，而闪光法测量误差一般小于 3%。这种较大的测量误差很容易将织物结构和纤维等的变化所带来的影响掩盖掉，不利于织物的研究、生产和评价。因此，如何使得测量装置更准确的符合测试模型边界条件要求，提供更准确的测试评价，将是下一步研究工作的重点。

(4) 与其他测试方法一样，ASTM D7984 标准方法也对边界条件有严格的要求，其中一个重要边界条件是加载到样品上的热量只能在样品内部传递，即瞬态平面热源法（包括改进型）测试模型中相对于加热量和加热时间而言要求样品是半无限大。对于很多较薄的织物则不能满足这种边界条件，由此使得测量结果的误差往往会非常巨大。因为这个原因，ASTM D7984 标准方法比较适合最大热流密度比较小的保暖性织物的测试评价，而对于最大热流密度较大的轻薄凉爽型织物的测量则会误差较大。为了尝试解决使用 ASTM D7984 标准方法中存在的这个问题，TCi 仪器采用将样品放置在探头之上，依靠样品另一侧的空气作为绝热边界条件，但这又带来了织物样品与探头表面接触不良的问题，测试结果中会包含很大的接触热阻。总之，对于织物这类较薄的材料，采用改进型的瞬态平面热源法进行测试非常勉强，这与经典的瞬态平面热源法一样，对薄膜热物性测试的可靠性很低。正因为如此，瞬态平面热源法测试仪器厂家 HOT DISK 公司为了解决较薄材料的测试，专门又开发了新的测试方法。

(5) ASTM D7984 标准方法的最大问题是无法直接测量最大热流，需要测量

一系列其他热性能参数并进行复杂的计算才能得到最大热流。但无论是瞬态平面热源法还是改进型的瞬态平面热源法，在热扩散系数和比热容测试中都存在较大的系统误差，这势必会对最大热流的计算结果带来较大的误差积累。

(6) 对于织物热性能的上述测试方法，都存在的一个问题就是测量准确性的考核评价，缺乏稳定可靠的标准材料。在这方面美国 ASTM 已经开始着手开始进行相应的工作，并组织进行多个实验室的对比测试。

通过对上述两种织物接触冷暖感测试评价方法的介绍和分析，可以看出这两种测试方法都是基于人体皮肤接触织物时的瞬态传热进行测量。尽管两种方法测试的参数和物理意义都不同，但基于瞬态传热方式，最大热流密度和吸热系数这两个参数具有内在的关联性。后续我们将对这种内在关联性进行分析研究，并研究相应的测试方法和仪器，来同时满足上述两种测试方法。

下一步的研究重点还包括以下两方面内容：

(1) 测试边界条件的保证：在最大热流法和吸热系数法测试中，边界条件包括等温边界条件和绝热边界条件两种。下一步工作重点是在硬件上如何更完美的实现这些边界条件要求，从而保证测量准确性和可靠性。

(2) 仪器测量准确性考核：测量准确性考核从三方面进行，首先是采用数值模拟计算的方法对最大热流法测量准确性进行检验考核，第二是与其他热物性测试方法进行对比来考核导热系数、热扩散系数和吸热系数测量的准确性，第三是采用已知热性能的固体薄片材料（或标准材料）来进行考核。

4. 参考文献

略