

瞬态平面热源法热导率测试中的 各种参考材料

Reference Materials in the Thermal Conductivity
Measurement of Transient Plane Source Method



摘要：瞬态平面热源法是一种准确、快速的材料热物理性能测试方法，其热导率测试范围可以覆盖从绝热材料到高导热材料。为了验证和考核瞬态平面热源法的测量准确性，对美国 ANTER 公司提供的各种热导率数值的参考材料进行测试。本文罗列出所有这些参考材料以及相应的热导率数据以供在具体测试中的应用。

1. 前言

瞬态平面热源法作为一种绝对测量方法，在理论上可以达到很高的测量精度。在试样尺寸满足测试方法规定的边界条件基础上，热导率的测量范围可以没有限制。因此，对于均质材料，采用 HOTDISK 瞬态平面热源法不失为一种操作简便和测量精度高的有效方法，在温度不高的范围内（200℃以下），这种方法可以作为一种标准方法来使用，并与其它热导率测试方法一起形成有效的补充和相互比对，甚至可以用于校准其它测试方法。

瞬态平面热源法是一种绝对测试方法，自身并不需要进行校准。但为了验证和考核瞬态平面热源法的测量准确性和测试范围，我们为瞬态平面热源法配置了各个不同热导率数值范围的参考材料，这些参考材料的直径都在 50mm 以上以便各种瞬态平面热源法热导率测试探头使用。本文罗列出所有这些参考材料以及相应的热导率数据以供在具体测试中的应用。

2. 参考材料清单

按照热导率数据从小达到的顺序，以下是各种参考材料的名称和实物照片。

(1) 美国 NIST 标准参考材料：SRM 1453 (发泡聚苯乙烯板)，尺寸 $100 \times 100 \times 10\text{mm}$ ，热导率范围为 0.03W/mK 以下。标准参考材料实物如图 1 所示。

(2) 美国 ANTER 公司参考材料：Vespel (纯聚酰亚胺)，尺寸 $\phi 50.8 \times 25.4\text{mm}$ ，热导率范围为 0.3W/mK 以下。参考材料实物如图 2 所示。

(3) 美国 ANTER 公司参考材料：Pyroceram 9606 (高温陶瓷)，尺寸 $\phi 50.8 \times 25.4\text{mm}$ ，热导率范围为 4W/mK 以下。参考材料实物如图 3 所示。

(4) 美国 ANTER 公司参考材料：304 不锈钢，尺寸 $\phi 50.8 \times 25.4\text{mm}$ ，热导率范围为 14W/mK 以下。参考材料实物如图 4 所示。

(5) 瑞典 HOTDISK 公司参考材料：304 不锈钢，尺寸 $\phi 50 \times 30\text{mm}$ ，热导率范围为 14W/mK 以下。参考材料实物如图 5 所示。

(6) 美国 ANTER 公司参考材料：氧化铝，尺寸 $\phi 50.8 \times 25.4\text{mm}$ ，热导率范围为 35W/mK 以下。参考材料实物如图 6 所示。

(7) 美国 ANTER 公司参考材料：电解纯铁，尺寸 $\phi 50.8 \times 25.4\text{mm}$ ，热导率范围为 60W/mK 以下。参考材料实物如图 7 所示。

(8) 美国 ANTER 公司参考材料：纯镍，尺寸 $\phi 50.8 \times 50.8\text{mm}$ ，热导率范围为 60W/mK 以下。参考材料实物如图 8 所示。

(9) 美国 ANTER 公司参考材料：AXM-5Q 石墨，尺寸 $\phi 50.8 \times 50.8\text{mm}$ ，热导率范围为 110W/mK 以下。参考材料实物如图 9 所示。

通过以上列表可以看出，所配置的参考材料覆盖了 0.03 至 110W/mK 五个数量级范围的热导率，基本能满足绝大多数材料热导率性能测试的校对和验证。

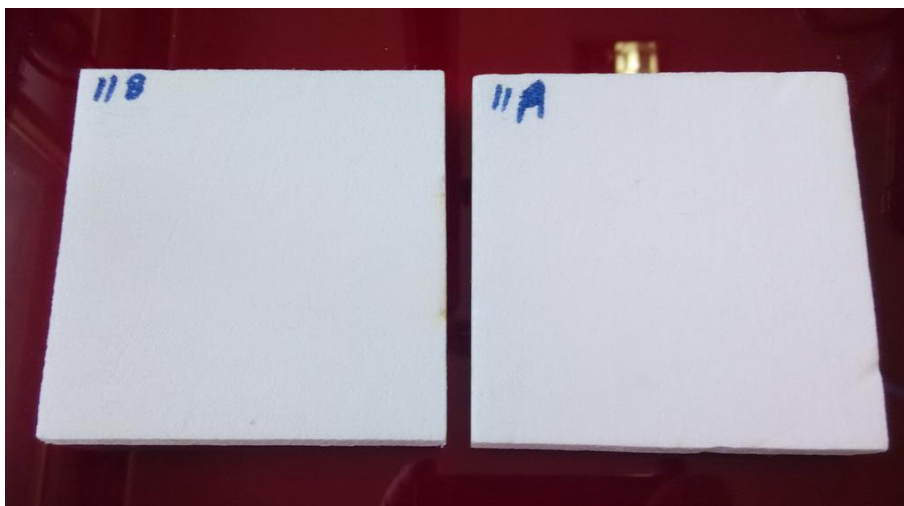


图 1 美国 NIST 标准参考材料 SRM 1453

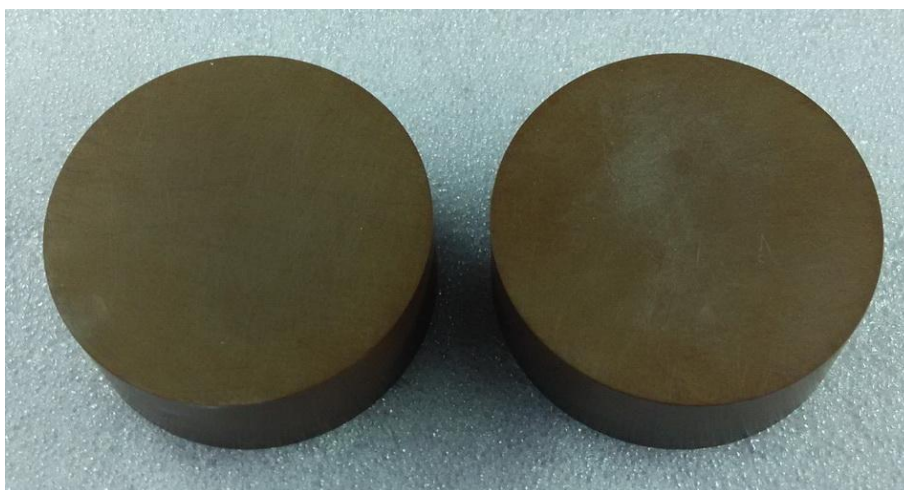


图 2 美国 ANTER 公司参考材料 纯聚酰亚胺 Vespel



图 3 美国 ANTER 公司参考材料 Pyroceram 9606 (高温陶瓷)



图 4 美国 ANTER 公司参考材料 304 不锈钢

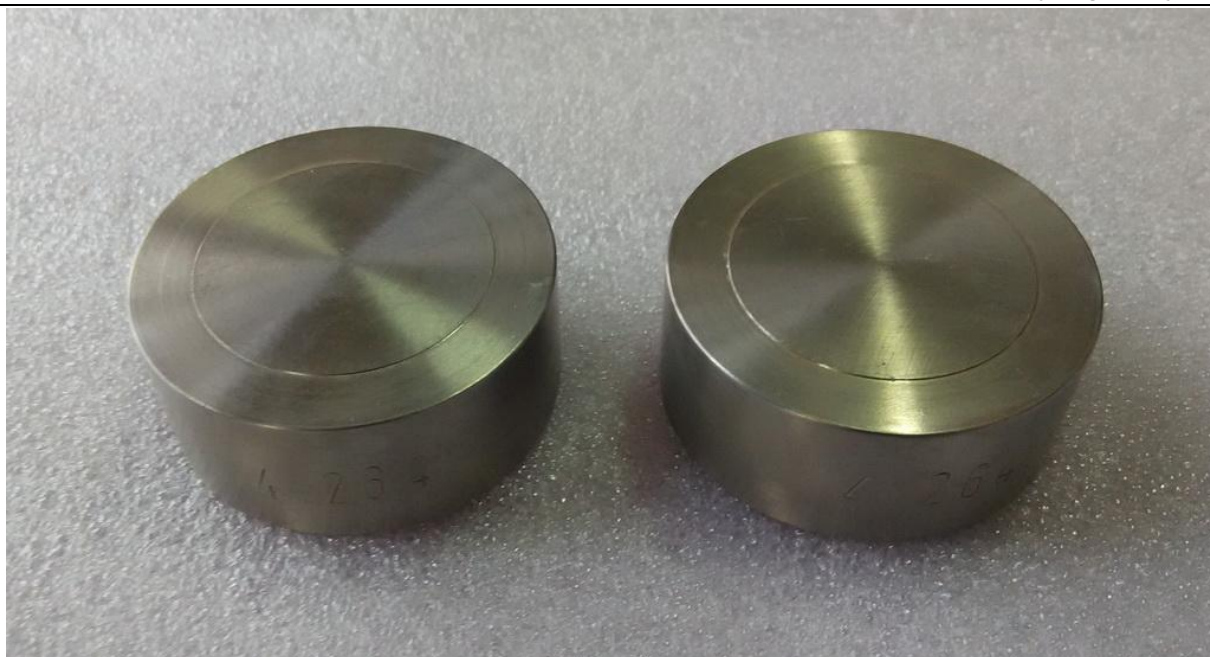


图 5 瑞典 HOTDISK 公司参考材料 304 不锈钢



图 6 美国 ANTER 公司参考材料 氧化铝



图 7 美国 ANTER 公司参考材料 电解纯铁



图 8 美国 ANTER 公司参考材料 纯镍



图 9 美国 ANTER 公司参考材料 AXM-5Q 石墨

3. 参考材料热导率数据

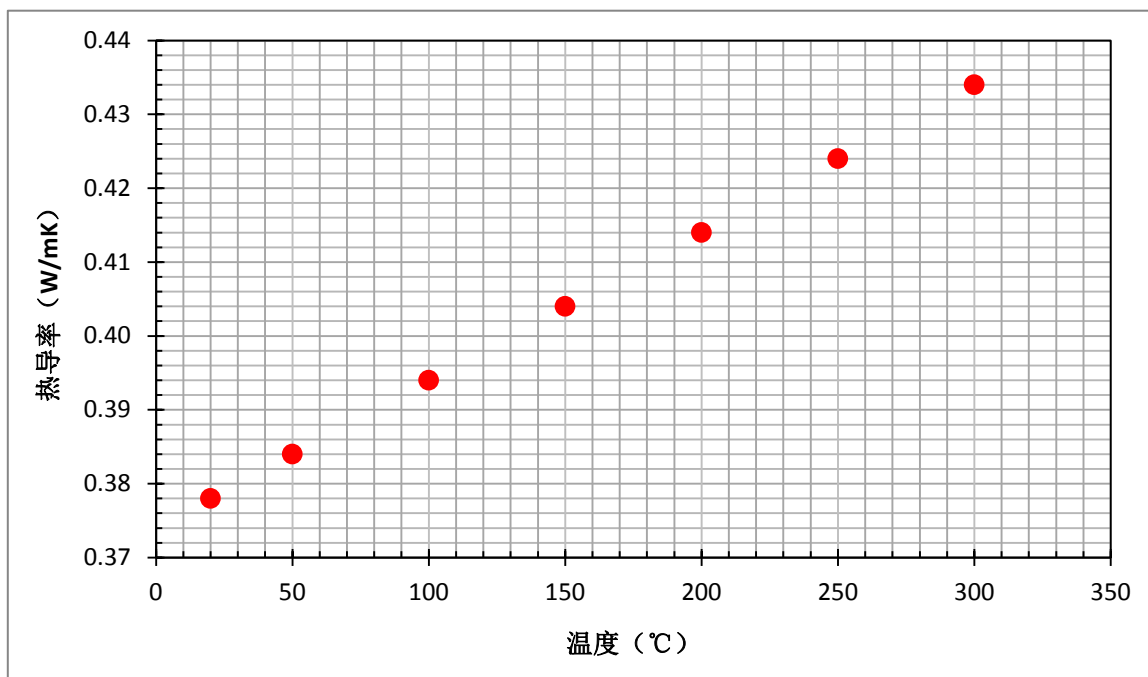
3.1. 美国 NIST 标准参考材料 SRM 1453 热导率数据

美国 NIST 标准参考材料 SRM 1453（发泡聚苯乙烯板）热导率数据不仅与温度有关，而且会随材料的密度发生变化，这里仅给出热导率与温度和密度的关系式，详细内容请到网址 <http://www.eyoungindustry.com/2013/1024/39.html> 上下载。

$$\lambda = 0.00111 - 0.0000424\rho + 0.000115T_m$$

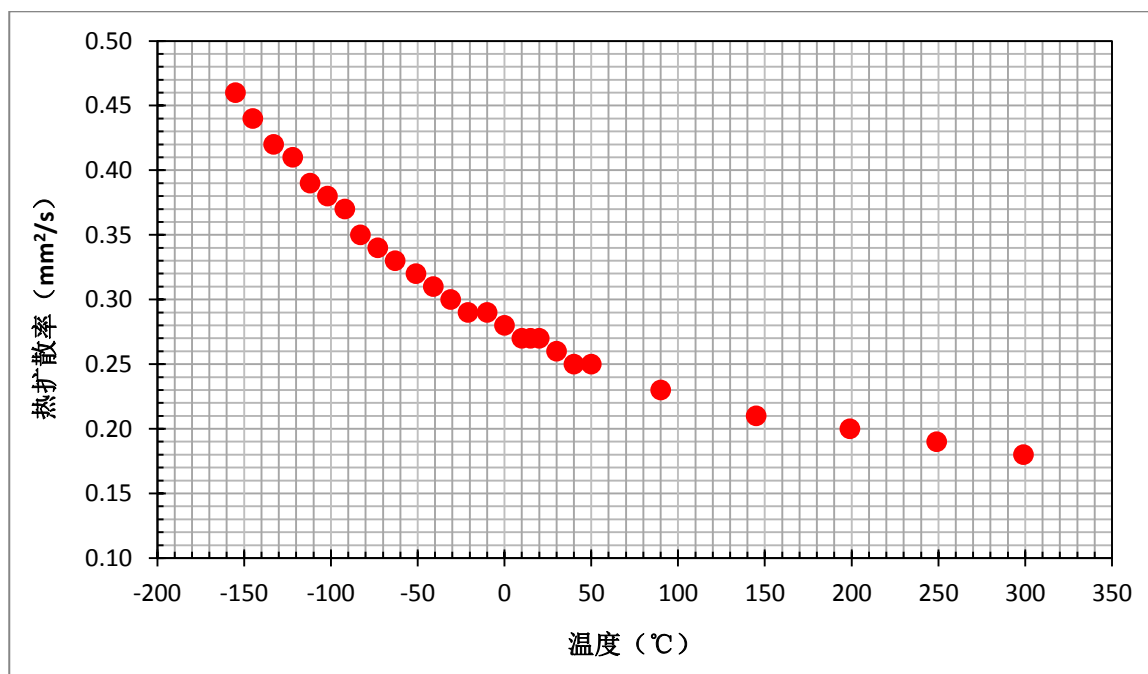
式中： ρ 表示体积密度，单位 kg/m^3 ； T_m 表示整个体积密度和温度范围内的测试平均温度，密度范围为 $37 \sim 46\text{kg}/\text{m}^3$ ，温度范围为 $281 \sim 313\text{K}$ 。

3.2. 美国 ANTER 公司参考材料 Vespel（纯聚酰亚胺）热导率数据



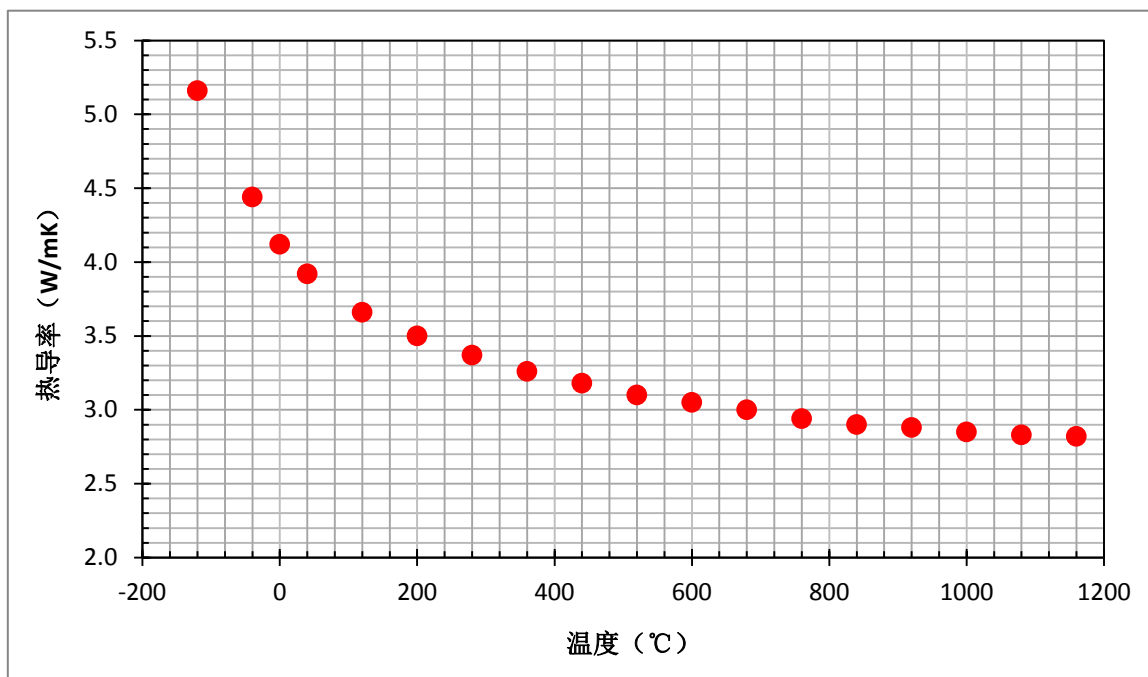
热导率随温度变化的拟合公式为： $\lambda = 0.374 + 2.000 \times 10^{-4}T$ 。式中 T 表示温度，温度范围为 $20 \sim 300^\circ\text{C}$ 。

纯聚酰亚胺 Vespel 也可以做为热扩散率测试参考材料，这里一并给出相应的热扩散率数据， $\alpha = -3.5582 \times 10^{-9}T^3 + 2.3368 \times 10^{-7}T^2 - 7.1139 \times 10^{-5}T + 2.7782 \times 10^{-3}$ 。式中 T 表示温度，温度范围为 $-155^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$ 。



纯聚酰亚胺 Vespel 参考材料所具有的低温数据非常有助于进行瞬态平面热源法和激光脉冲法在低温范围内的测试应用。

3.3. 美国 ANTER 公司参考材料 Pyroceram 9606（高温陶瓷）热导率数据

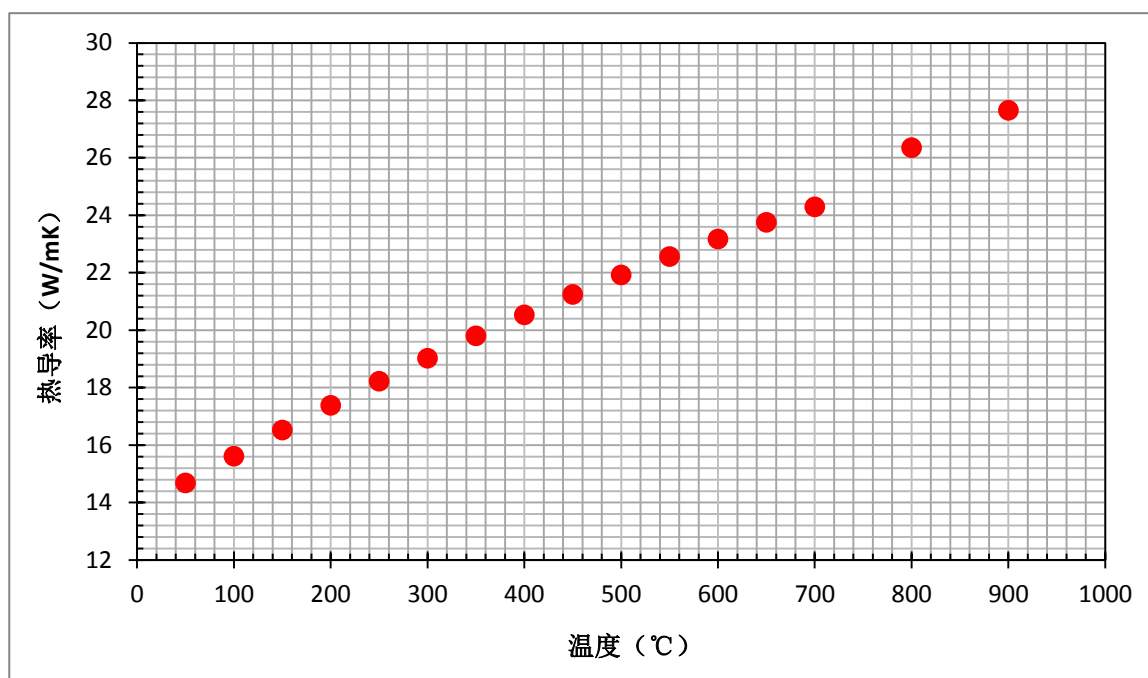


高温陶瓷 Pyroceram 9606 参考材料具有低温-120℃和高温 1200℃的热导率数据，这有助于瞬态平面热源法中采用云母探测器测试 3 至 5W/mK 范围内高温条件下的材料热导率，有助于采用聚酰亚胺探测器测试达到-120℃的低温条件下材料热导率。热导率拟合公式为：

$$\lambda = 6.5855 \times 10^{-18} T^6 - 2.7348 \times 10^{-14} T^5 + 4.5313 \times 10^{-11} T^4 - 3.8368 \times 10^{-8} T^3 \\ + 1.8248 \times 10^{-5} T^2 - 5.7208 \times 10^{-3} T + 4.1417$$

式中 T 表示温度，温度范围为 -120 ~ 1160℃。

3.4. 美国 ANTER 公司参考材料 304 不锈钢热导率数据

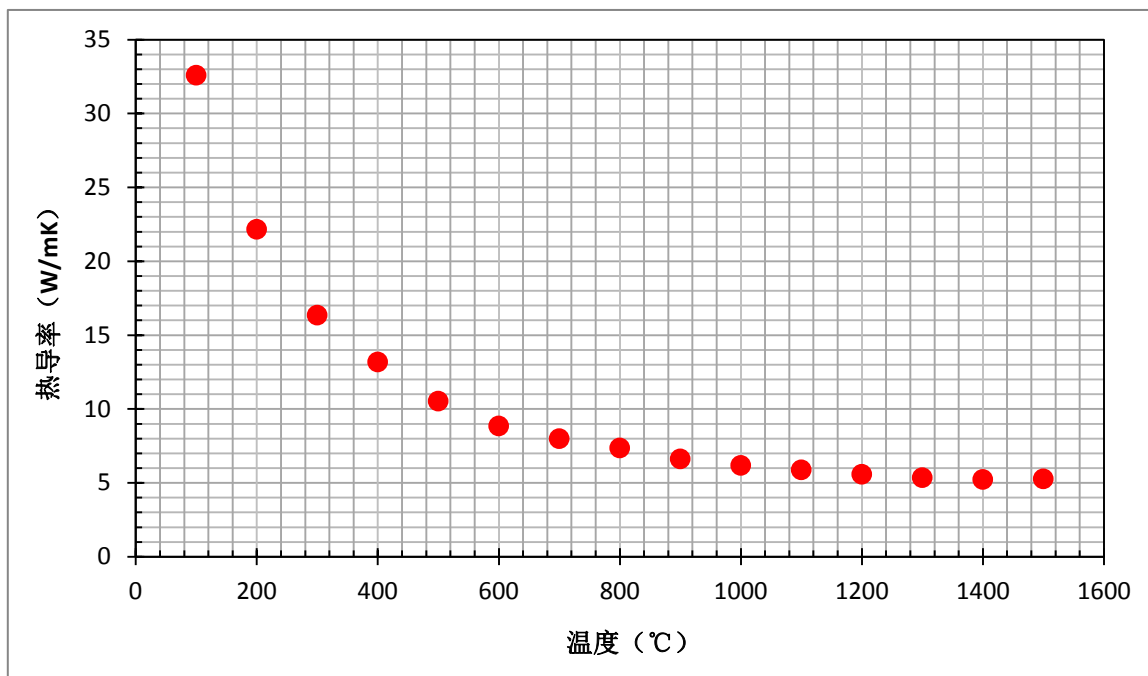


304 不锈钢参考材料具有室温至 900℃范围内热导率数据，这有助于瞬态平面热源法中采用云母探测器测试 14 至 28W/mK 范围内高温条件下热导率较高的材料。由于 304 不锈钢在

700℃至 800℃之间有相变，因此热导率拟合公式只给出 700℃前的拟合公式，热导率随温度变化的拟合公式为： $\lambda = -6.4643 \times 10^{-6} T^2 + 1.9638 \times 10^{-2} T + 1.3714 \times 10^{-1}$ 。

式中 T 表示温度，温度范围为 50~900℃。

3.5. 美国 ANTER 公司参考材料氧化铝热导率数据

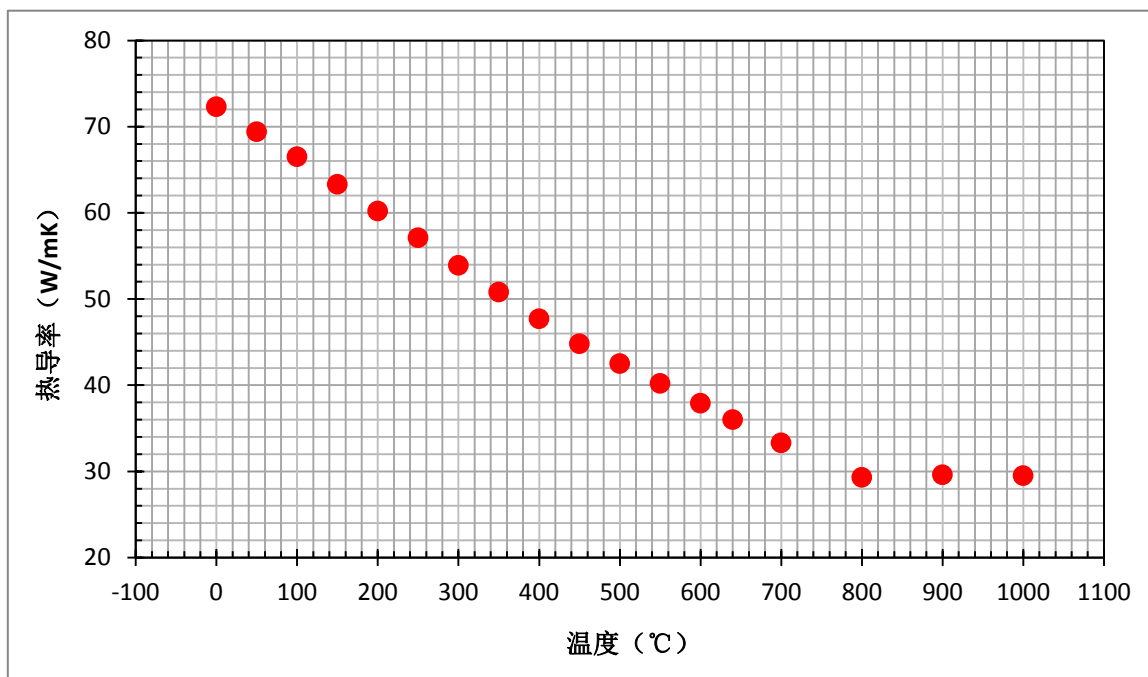


氧化铝参考材料具有 100℃至 1500℃范围内热导率数据，这有助于瞬态平面热源法中采用云母探测器测试 5 至 32W/mK 范围内高温条件下热导率较高的材料。热导率拟合公式为：

$$\lambda = 5.3709 \times 10^{-17} T^6 - 2.9713 \times 10^{-13} T^5 + 6.7152 \times 10^{-10} T^4 - 8.0334 \times 10^{-7} T^3 + 5.5243 \times 10^{-4} T^2 - 2.2084 \times 10^{-1} T + 4.9832 \times 10^1$$

式中 T 表示温度，温度范围为 100~1500℃。

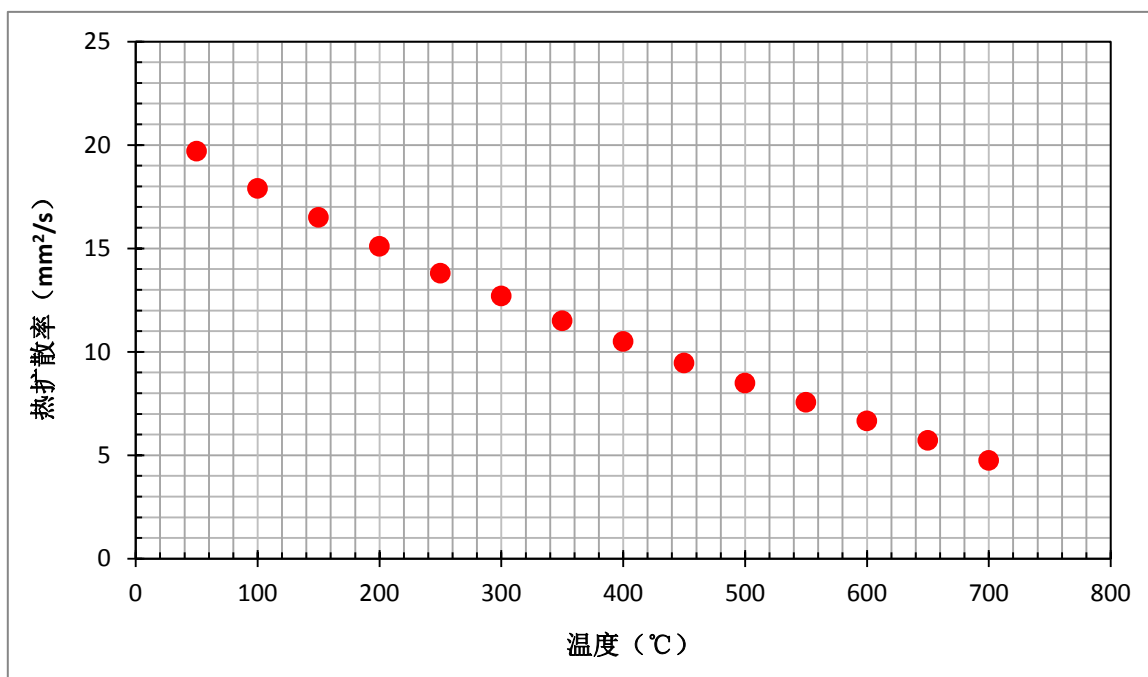
3.6. 美国 ANTER 公司参考材料电解纯铁热导率数据



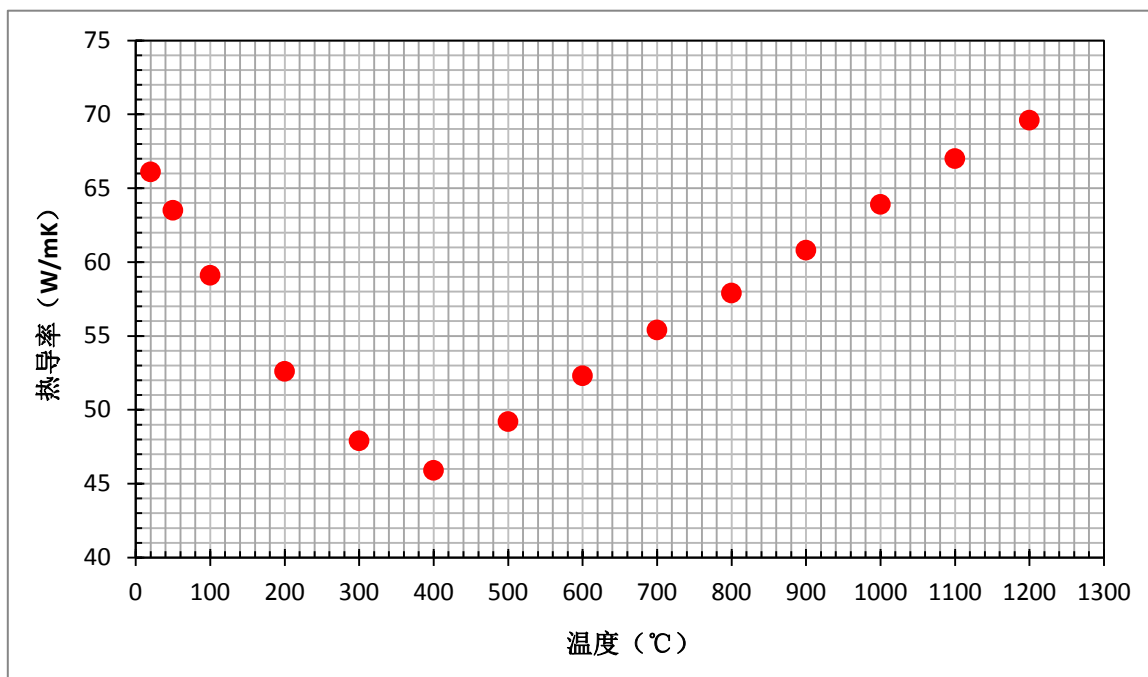
电解纯铁参考材料具有室温至 1000℃ 范围内热导率数据，这有助于瞬态平面热源法中采用云母探测器测试 30 至 70W/mK 范围内高温条件下热导率较高的材料。由于电解纯铁在 800℃ 附近有相变，因此热导率拟合公式只给出 700℃ 前的拟合公式，热导率随温度变化的拟合公式为： $\lambda = 1.7104 \times 10^{-5} T^2 - 6.8796 \times 10^{-2} T + 7.2881 \times 10^1$ 。

式中 T 表示温度，温度范围为 0~1000℃。

电解纯铁也可以做为热扩散率测试参考材料，这里一并给出相应的热扩散率数据， $\alpha = 1.1434 \times 10^{-5} T^2 - 3.0859 \times 10^{-2} T + 2.0952 \times 10^1$ 。式中 T 表示温度，温度范围为 50℃~700℃。



3.7. 美国 ANTER 公司参考材料纯镍热导率数据

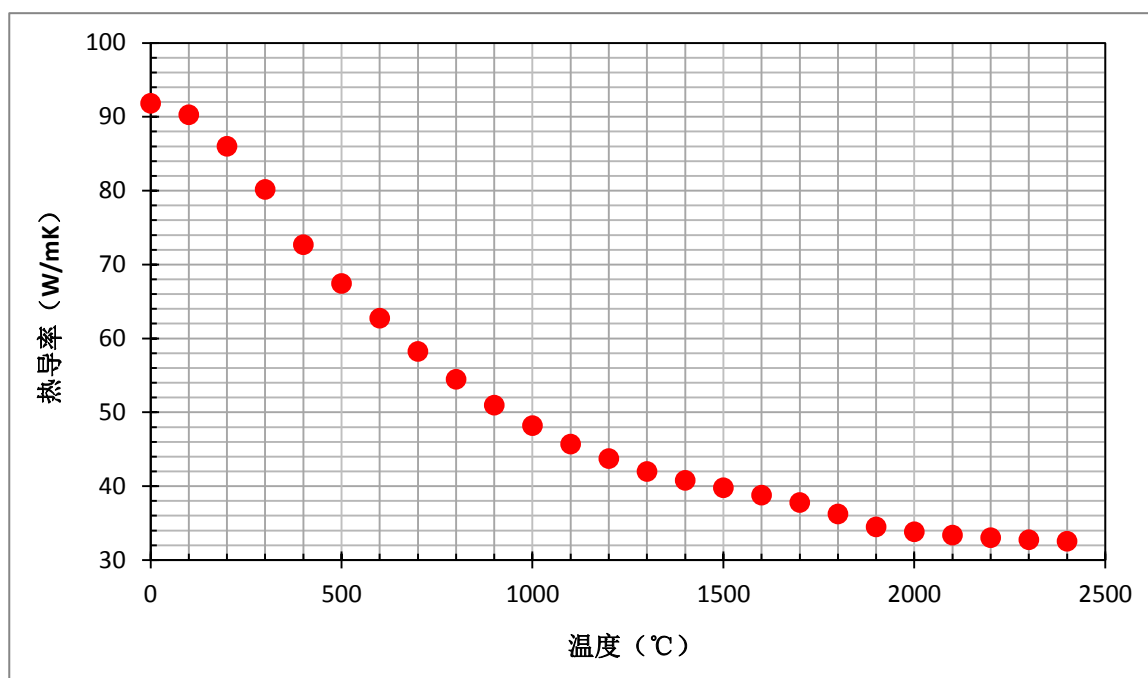


纯镍参考材料具有室温至 1200℃ 范围内热导率数据，这有助于瞬态平面热源法中采用云母探测器测试 45 至 70W/mK 范围内高温条件下热导率较高的材料。热导率随温度变化的拟合公式为：

$$\lambda = -4.7236 \times 10^{-16} T^6 + 1.8575 \times 10^{-12} T^5 - 2.7324 \times 10^{-9} T^4 + 1.7671 \times 10^{-6} T^3 - 3.7040 \times 10^{-4} T^2 - 5.2752 \times 10^{-2} T + 6.7034 \times 10^{-1}$$

式中 T 表示温度，温度范围为 20~1200℃。

3.8. 美国 ANTER 公司参考材料 AXM-5Q 石墨热导率数据



AXM-5Q 石墨参考材料具有室温至 2400℃ 范围内热导率数据，这有助于瞬态平面热源法中采用云母探测器测试 30 至 90W/mK 范围内高温条件下热导率较高的材料。热导率随温度

变化的拟合公式为：

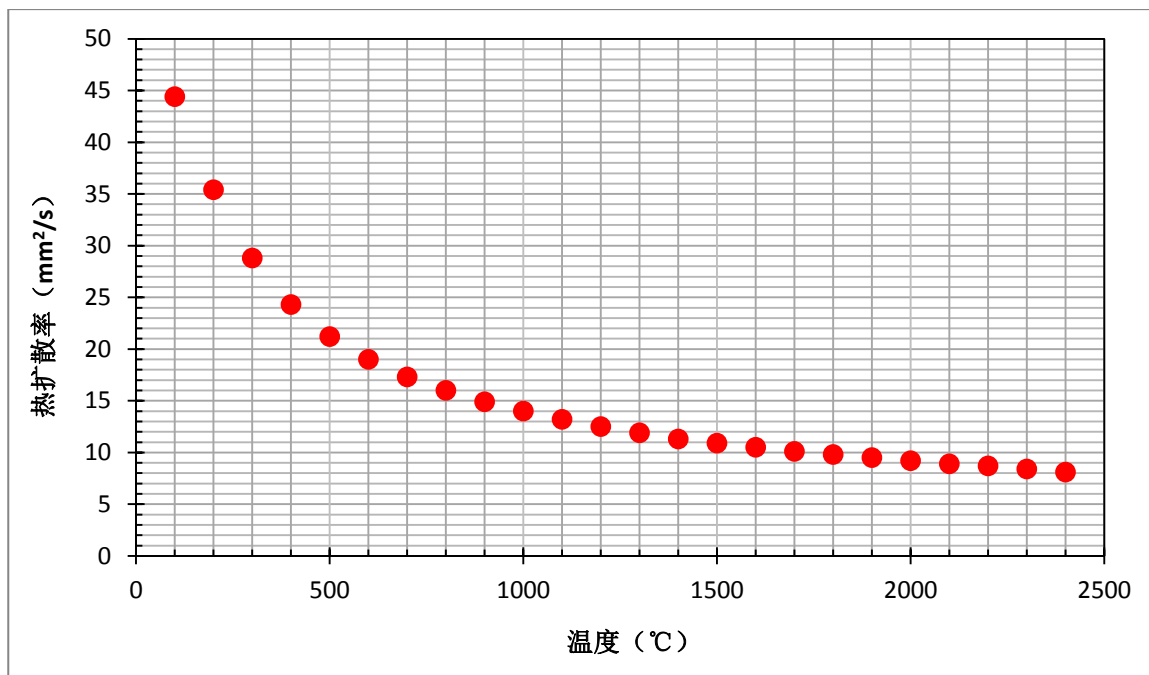
$$\lambda = -6.0516 \times 10^{-18} T^6 + 5.2579 \times 10^{-14} T^5 - 1.7559 \times 10^{-10} T^4 + 2.7613 \times 10^{-7} T^3 - 1.8529 \times 10^{-4} T^2 - 5.2752 \times 10^{-3} T + 9.2123 \times 10^{-1}$$

式中 T 表示温度，温度范围为 $0 \sim 2400^\circ\text{C}$ 。

AXM-5Q 石墨也可以做为热扩散率测试参考材料，这里一并给出相应的热扩散率数据：

$$\alpha = 3.2311 \times 10^{-18} T^6 - 2.9870 \times 10^{-14} T^5 + 1.1180 \times 10^{-10} T^4 - 2.1818 \times 10^{-7} T^3 + 2.3894 \times 10^{-4} T^2 - 1.4904 \times 10^{-1} T + 5.7139 \times 10^{-1}$$

式中 T 表示温度，温度范围为 $1000^\circ\text{C} \sim 2400^\circ\text{C}$ 。



4. 结论

综上所述，以上所配置的所有参考材料覆盖了 0.03 至 110W/mK 五个数量级范围的热导率，基本能满足绝大多数材料热导率性能测试的校对和验证。

这些参考材料在瞬态平面热源法中的实际应用中，还要根据热导率的大小确定被测试样的尺寸。采用瞬态平面热源法可以直接对热导率在 40W/mK 以下的块状材料进行测试，但对于热导率大于 40W/mK 的材料，则适合采用瞬态平面热源法中的薄板法进行测试，这样更能保证测量的准确性。