(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101571428 B
(45)授权公告日 2010.12.08

(21)申请号 200910085367.7

(22)申请日 2009.05.21

(73)专利权人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72)发明人 李龙 范学军 仲峰泉 王晶

(74)专利代理机构 北京中创阳光知识产权代理有限责任公司 11003
代理人 尹振启

(51)Int.Cl.
G01K 17/08(2006.01)
G01K 7/04(2006.01)

(56)对比文件
FR 2706610 A1,1994.12.23, 全文.
CN 88100339 A,1988.09.21, 全文.
CN 101403638 A,2009.04.08, 全文.
由富恩. 热流测试方法与圆箔热流计. 宇航计测技术.1984,(4),71-78.

审查员 李慧子

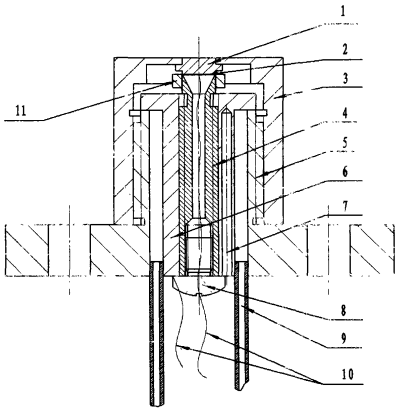
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 5 页

(54)发明名称

测量热流和温度的传感器及高温下测量热流与温度的方法

(57)摘要

本发明公开了一种多功能传感器及高温下测量热流与温度的方法,其中多功能传感器包括外壳和热流测头,外壳上设置热流测头,热流测头包括热流探头和热沉,热沉与热流探头相连容置在外壳内部与热流探头组成热电偶,所述外壳内还设置有用于冷却热流测头的冷却装置和用于测量热沉温度的另一热电偶,两热电偶与检测仪相连,通过测量出两热电偶的电压信号实现热流和温度的检测。本发明公开的测量方法通过测量低温的温度,建立数学模型推导得出高温处的所测温度。本发明的多功能热传感器能够在高温环境下测量热流和温度,弥补了原有热电偶在 2000K 以上高温环境下无法测量温度的问题,既能够测量出热流,又能够保证热电偶在高温环境下可以正常工作,有效测量温度。



CN 101571428 B

1. 一种测量热流和温度的传感器，其特征在于，包括外壳和热流测头，外壳上设置热流测头，热流测头包括热流探头和热沉，热流探头设置在外壳外部，热沉与热流探头相连容置在外壳内部与热流探头组成热电偶，所述外壳内还设置有用于冷却热流测头的冷却装置和用于测量热沉温度的另一热电偶，所述热沉装配在所述外壳内设置的基体上，基体与外壳焊接，所述冷却装置为基体与外壳之间设置的水槽，所述另一热电偶设置在基体上或者热沉上，两热电偶与检测仪相连，通过测量出两热电偶的电压信号实现热流和温度的检测。

2. 如权利要求 1 所述的测量热流和温度的传感器，其特征在于，所述热流探头为康铜片，所述热沉为截面为环形的铜柱体，康铜片的边缘与铜热沉的环形端面焊接，康铜片的中心引出一根铜导线，铜柱体上引出另一根铜导线，所述检测仪连接在两根铜导线之间。

3. 如权利要求 2 所述的测量热流和温度的传感器，其特征在于，所述热流探头与热沉的材料为镍铬－镍硅或铂铑 13- 铂或铂铑 10- 铂或铂铑 30- 铂铑 6 能够组成热电偶的材料。

4. 如权利要求 1 所述的测量热流和温度的传感器，其特征在于，所述水槽内容置冷却水管，冷却水管一端焊接在所述基体上，另一端设置的转接头与供水装置相连。

5. 如权利要求 1 所述的测量热流和温度的传感器，其特征在于，所述热流探头顶部设置有隔热陶瓷，隔热陶瓷与热流探头的接触面上涂抹导热硅脂。

6. 一种如权利要求 5 所述的传感器高温环境下测量热流与温度的方法：包括以下步骤：1) 采用上述装置测量热流探头与热沉组成的热电偶的电压信号，通过公式 $\frac{E}{q}=4.37\times10^{-4}\cdot\frac{R^2}{S}$，可得热流，其中 E 为电压、q 为热流、R 为热流探头的半径、S 为热流探头的厚度；2) 测量导热元件热沉处的低温区温度，通过热传导公式 $T_h-T_1=\Delta T$，$\Delta T=\Delta T_1+\Delta T_2=qR_1+qR_2=q\cdot\frac{l_1}{k_1A_1}+q\cdot\frac{1}{2\pi d_2k_2}$ 得到热流探头高温区的温度，其中 T_h 为热流探头的温度，T_1 为基体或者热沉温度，ΔT_1 为隔热陶瓷两端的温度差，ΔT_2 为热流探头中心与边缘处的温差，q 为热流探头处的热流，R_1 为隔热陶瓷的热阻，R_2 为热流探头的热阻，l_1 为隔热陶瓷的厚度，k_1 为热流探头的导热系数，A_1 为热流探头截面面积，d_2 为热流探头的厚度，k_2 为热流探头的导热系数。

测量热流和温度的传感器及高温下测量热流与温度的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种壁面热流与温度同时测量的装置及方法。

背景技术

[0002] 目前热流测量的方法主要有薄膜热电偶、Smith 型热流传感器等。薄膜热电偶响应时间短，适合测量瞬时热传导过程，但是它所能测量的温度范围有限，高温时容易烧坏。Smith 型热流传感器信号较强，能够耐高温，但是响应时间较长，并且制作工艺复杂，需要在陶瓷板上镀铜和康铜电路，设备比较昂贵。温度测量通常用的是热电偶，但是热电偶的工作温度范围通常在 1300K 以下，在更高温度的环境中，热电偶是无法生存的。对于高超声速飞机的超燃冲压发动机来说，燃烧室气流环境十分恶劣，温度通常在 2000K 以上，热流达到 $1MW/m^2$，在此环境下热电偶很容易损坏，无法测量壁面热流与温度。

发明内容

[0003] 针对现有技术存在的问题，本发明的目的之一在于提供一种耐高温、能够同时测量热流与温度的传感器。

[0004] 本发明的另一目的在于提供一种高温环境下测量热流与温度的方 法。

[0005] 本发明的多功能传感器，包括外壳和热流测头，外壳上设置热流测头，热流测头包括热流探头和热沉，热流探头设置在外壳外部，热沉与热流探头相连容置在外壳内部与热流探头组成热电偶，所述外壳内还设置有用于冷却热流测头的冷却装置和用于测量热沉温度的另一热电偶，两热电偶与检测仪相连，通过测量出两热电偶的电压信号实现热流和温度的检测。

[0006] 进一步，所述热流探头为康铜片，所述热沉为截面为环形的铜柱体，康铜片的边缘与铜热沉的环形端面焊接，康铜片的中心引出一根铜导线，铜柱体上引出另一根铜导线，所述检测仪连接在两根铜导线之间。

[0007] 进一步，所述热流探头与热沉材料为镍铬 - 镍硅或铂铑 13- 铂或铂铑 10- 铂或铂铑 30- 铂铑 6 能够组成热电偶的材料。

[0008] 进一步，所述热沉装配在所述外壳内设置的基体上，基体与外壳焊接，所述冷却装置为基体与外壳之间设置的水槽，所述另一热电偶设置在基体上或者热沉上。

[0009] 进一步，所述水槽内容置冷却水管，冷却水管一端焊接在所述基体上，另一端设置的转接头与供水装置相连。

[0010] 进一步，所述热流探头顶部设置有隔热陶瓷，隔热陶瓷与热流探头的接触面上涂抹导热硅脂。

[0011] 本发明的高温环境下测量热流与温度的方法：包括以下步骤：1) 采用上述装置测量热流探头与热沉组成的热电偶的电压信号，通过公 式 $\frac{E}{q}=4.37\times10^{-4}\cdot\frac{R^2}{S}$，可得热流，其中 E 为电压、q 为热流、R 为热流探头的半径、S 为热流探头的厚度；2) 测量导热元件热沉处

的低温区温度通过热传导公式 $T_h-T_1 = \Delta T$，$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = q \cdot \frac{l_1}{k_1 A_1} + q \cdot \frac{1}{2\pi d_2 k_2}$ 得到热流探头高温区的温度，其中 T_h 为热流探头的温度，T_1 为基体或者热沉温度，ΔT_1 为隔热陶瓷两端的温度差，ΔT_2 为热流探头中心与边缘处的温差，q 为热流探头处的热流，R_1 为隔热陶瓷的热阻，R_2 为热流探头的热阻，l_1 为隔热陶瓷的厚度，k_1 为热流探头的导热系数，A_1 为热流探头截面面积，d_2 为热流探头的厚度，k_2 为热流探头的导热系数。

[0012] 本发明的多功能热传感器能够在高温环境下测量热流和温度，弥补了原有热电偶在 2000K 以上高温环境下无法测量温度的问题，既能够测量出热流，又能够保证热电偶在高温环境下可以正常工作，有效测量温度。本发明可用于超燃冲压发动机燃烧室内壁面热流与壁面温度的测量，冶金、锅炉等行业加热炉内壁面的热流与温度的测量以及各种小功率加热设备的热流、温度测量等。

附图说明

[0013] 图 1 为本发明的热流探头的结构示意图；

[0014] 图 2 为本发明多功能传感器的主视图；

[0015] 图 3 为本发明多功能传感器的俯视图；

[0016] 图 4 为本发明多功能传感器的热流、温度测量说明图；

[0017] 图 5a 为康铜片与铜热沉连接方式示意图；

[0018] 图 5b 为康铜片锻压在铜热沉上构成的本发明的热流探头的示意图；

[0019] 图 6 为实验测得热流－温度响应曲线；

[0020] 图 7 为处理得到的热流－温差关系曲线；

[0021] 图 8a 为冷却槽道沿周向的展开图；

[0022] 图 8b 为为冷却槽道示意图。

具体实施方式

[0023] 如图 1 和 2 所示，本发明的多功能传感器，包括不锈钢外壳 3，不锈钢外壳 3 上设置热流测头，热流测头包括设置在不锈钢外壳 3 外部的康铜片 2 和设置在不锈钢外壳 3 内的铜热沉 4，如图 5a 所示，康铜片 2 压制成帽状，扣紧在铜热沉 4 的边缘再用铜圈 11 箍紧，得到如图 5b 所示的热流测头，康铜片 2 和铜热沉 4 相连构成铜－康铜热电偶，康铜片 2 的中心焊接一根铜导线 10，并保证铜导线 10 垂直于康铜片 2，且和康铜片 2 中心为点接触，焊点接触良好，强度足够。铜导线 10 穿过铜热沉 4 的中心孔，铜热沉 4 安装到铜基体 6 上，在铜基体 6 尾部安装一枚 M4 的铜螺丝 8，铜螺丝 8 中心钻一个 Φ2 的通孔，使得中心铜导线 10 能够从孔中接出来，中心铜导线 10 为热流传感器的正极。从铜螺丝 8 根部引出另一根铜导线，作为热流传感器的负极。

[0024] 另外，用于测量热流的铜－康铜热电偶，可以使用其它任何能够组成热电偶的材料，例如镍铬－镍硅、铂铑 13- 铂、铂铑 10- 铂、铂铑 30- 铂铑 6 等。

[0025] 本发明的多功能传感器热流测量原理如下：均匀热流垂直于康铜片入射时，由于康铜片非常薄，前后端面的温度差基本上可以忽略，采用一维热传导理论进行分析，热流在康铜片内部由中心向边缘流动，这样使得中心处和边缘处产生了一个温度差；中心

处和边缘处分别为一个铜－康铜热电偶，这样就构成了一对温差热电偶，当康铜片中心和边缘产生温度差时，就能在两级之间差生电势差。因此，通过测量这个电势差，就能够得到康铜片表面的热流值。Gardon 在他的文献里推导出的热流计的电压－热流关系如下：

$$\frac{E}{q}=4.37\times10^{-4}\cdot\frac{R^2}{S}\text{①}$$

[0026] 其中，E 为电压，q 为热流，R 为康铜片的半径，S 为厚度，均采用国际单位制。由①式可以看出，热流计的输出电压 E 与待测热流 q 成线性关系，而且线性系数只与康铜片的尺寸有关。

[0027] 经过理论分析，在一定的温度范围内（300K ～ 800K 之间），Gardon 热流计的线性度非常好。因此，只要保证 Gardon 热流计的工作环境温度在允许的范围内，就能够测量出热流的准确值。

[0028] Gardon 热流计的响应时间关系式为：

[0029] $\tau_0 = 3.7R^2$ ②

[0030] 其中，τ_0 为时间特征常数，R 为康铜片的半径。由②式可以看出，Gardon 热流计的响应时间与康铜片半径的平方成正比。通常情况下，半径越小，响应时间越短；但是，根据①式，热流计的输出信号强度又与半径的平方成正比，半径越大，信号越强。因此，为了达到优化设计的目的，在保证热流计具有一定的信号强度及制作工艺允许的情 况下，应该尽可能的减小康铜片的半径。

[0031] 如图 8a 和 8b 所示，在铜基体 6 上铣出 2mm×2mm 的矩形槽，作为冷却水槽道。将铜基体 6 与外壳 3 焊接，焊接工艺为银焊，尾部焊接两根直径 3mm 的冷却水管 9，保证密封。在冷却水管 9 端部安装转接头，以便与 6mm 的塑料冷却水管相连，向冷却水管 9 中注水。从康铜片 2 中心处引出的铜导线和铜螺丝根部引出的铜导线固定于冷却水管 9 上，防止松断。

[0032] 如图 1 所示，为了防止高温时康铜片 2 被烧蚀，康铜片 2 的迎流面上设置有氮化硼隔热陶瓷 1，氮化硼隔热陶瓷 1 与康铜片 2 的接触面上涂抹导热硅脂，起提高导热速率作用，还能起到一定的固定作用。采用陶瓷的目的是起到绝缘作用，这里使用氮化硼可加工陶瓷，它的硬度小，能够进行机械加工，导热系数高，所以热传导的响应时间短。

[0033] 如图 2 所示，本发明的多功能传感器的铜基体 6 内部还设置有容置 K 型热电偶的热电偶孔 7，用于测量冷却的铜基体 6 的温度，另外热电偶孔 7 也可以设置在铜热沉 4 内，K 型热电偶放置在铜热沉 4 内用于测量铜热沉 4 的温度。通过测量铜基体 6 或者铜热沉 4 的低温，反推出康铜片 2 处的高温，如此可以保证 K 型热电偶不会在高温下损坏。

[0034] 本发明的多功能传感器温度测量原理如下：

[0035] 温度测量是根据傅里叶一维导热定律。头部高温区的热流经过氮化硼隔热陶瓷与康铜片到达热流传感器基体，热传导公式如下：

[0036] $T_h - T_1 = \Delta T$ ③

[0037] $$\Delta T=\Delta T_1+\Delta T_2=qR_1+qR_2=q\cdot\frac{l_1}{k_1A_1}+q\cdot\frac{1}{2\pi d_2k_2}\text{④}$$

[0038] ③、④两式中，T_h 为传感器头部高温，T_1 为铜基体 6 低温，ΔT_1 为隔热氮化硼陶瓷 1 两端的温度差，ΔT_2 为康铜片 2 中心与边缘处的温差，q 为热流测头的头部热流，R_1 为隔热陶瓷 1 的热阻，R_2 为康铜片 2 的热阻，l_1 为隔热陶瓷 1 的厚度，k_1 为隔热陶瓷 1 的导热系

数，A_1 为隔热陶瓷 1 的面积，d_2 为康铜片 2 的厚度，k_2 为康铜片 2 的导热系数。由于 R_1、R_2 的组成参数都可以查阅物性参数得出，可视为已知，因此可以根据测量热流 q 与基体温度 T_1 来反推头部温度 T_h。

[0039] 热流测头头部热阻匹配计算，目的是确定 Gardon 热流测头的头部尺寸以及氮化硼隔热陶瓷 1 的半径和厚度。设轴向热阻为 R_1，径向热阻为 R_2，为了保证水冷效果对热流信号造成的影响尽量小，应当让两个方向的热阻尽可能相同。轴向热阻和径向热阻的计算公式分别如下：

[0040] $$R_1 = R_1' + R_1'' = \frac{l_1'}{k_1' A_1'} + \frac{1}{2\pi S_1'' k_1''} \quad ⑤$$

[0041] $$R_2 = R_2' + R_2'' + R_2''' = \frac{1}{2\pi S_2' k_2'} + \frac{l_2''}{k_2'' A_2''} + \frac{l_2'''}{k_2''' A_2'''} \quad ⑥$$

[0042] ③④两式中：R_1' 为氮化硼陶瓷 1 的热阻，R_1'' 为康铜片 2 的热阻，R_2' 为不锈钢外壳 3 的头部圆心处热阻，R_2'' 与 R_2''' 均为不锈钢外壳 3 的部分热阻，其他参数分别为这些结构热阻的物性参数，可以通过查表得出。

[0043] 带入数值优化计算，最终确定各个部件结构尺寸为：康铜片 2 半径为 6mm，隔热陶瓷半径为 6mm，厚度为 2mm。

[0044] 如图 6 和 7 所示，标定热流温差关系曲线。将热流传感器头部与高温铜块紧密接触，同时测量头部、热流、冷却基体温度，然后将热流与温差绘制成曲线，可以看到热流－温差关系基本上成线性关系。图 6 为记录的热流 q，温度 T_1、T_2 的随时间的相应曲线，图 7 为热流 q 与温度差 $\Delta T = T_1 - T_2$ 之间的关系曲线。关系表达式如下：

[0045] $$q = C(T_1 - T_2) \quad ⑦$$

[0046] 曲线的斜率就是标定系数 C，推导后得到：

[0047] $$T_1 = T_2 + \frac{q}{C} \quad ⑧$$

[0048] 因此可以根据这个关系式，再对系数 C 进行标定之后，就能够通过同时测量铜基体或者铜热沉温度与热流来推导头部温度。

[0049] 热流信号由铜导线 10 输出，信号强度为毫伏量级。热电偶孔 7 中的热电偶输出的也是毫伏量级的电压信号。因此本发明的多功能传感器还应该配有两个毫伏检测仪，例如万用表、信号采集仪表等。

[0050] 需要指出的是根据本发明的具体实施方式所做出的任何变形，均不脱离本发明的精神以及权利要求的保护范围。

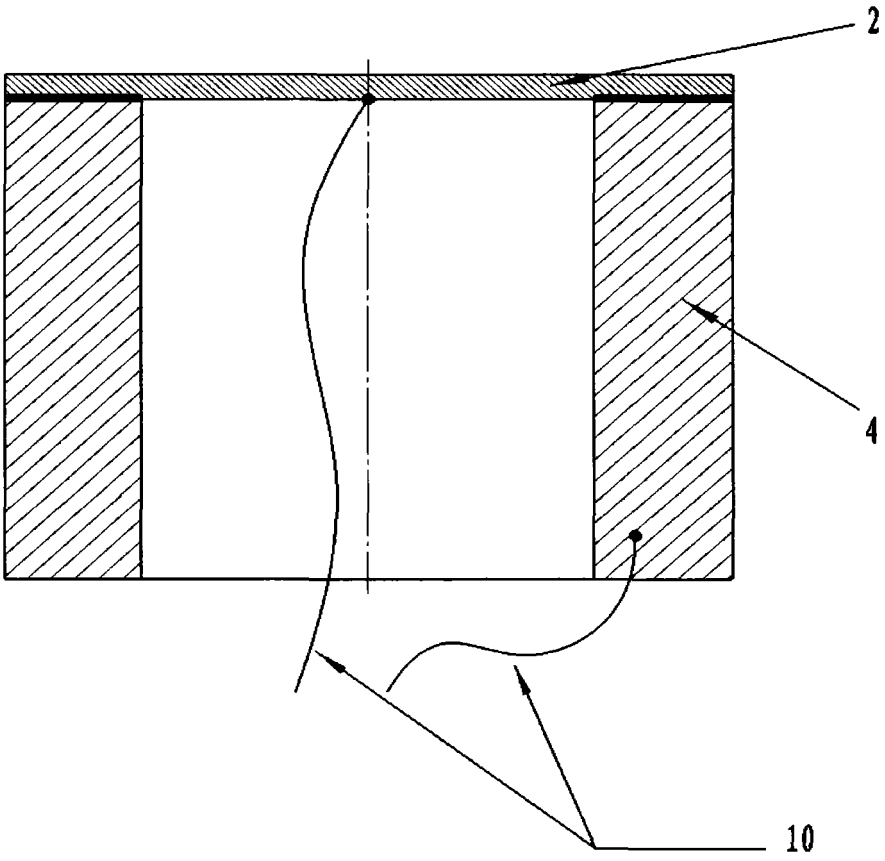


图 1

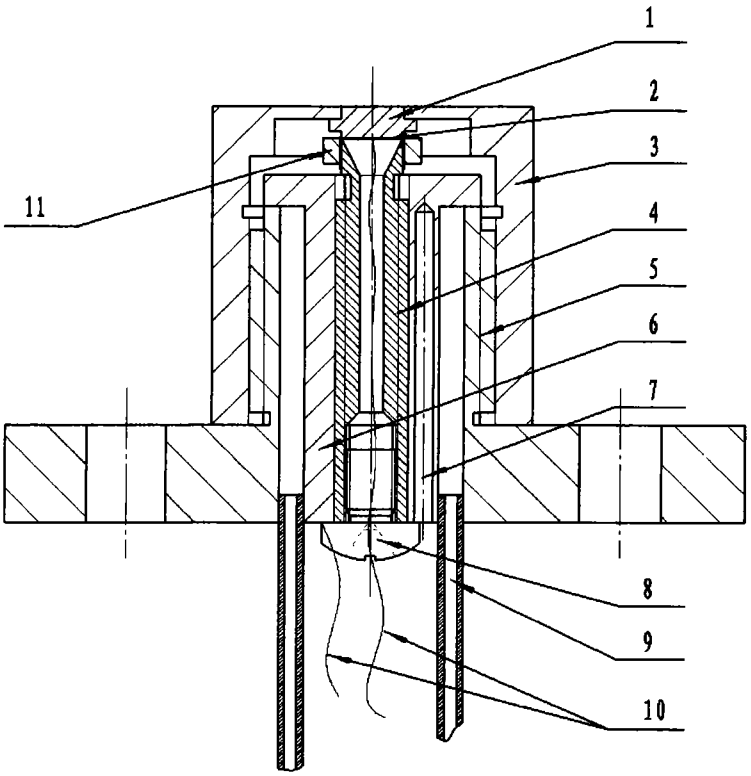


图 2

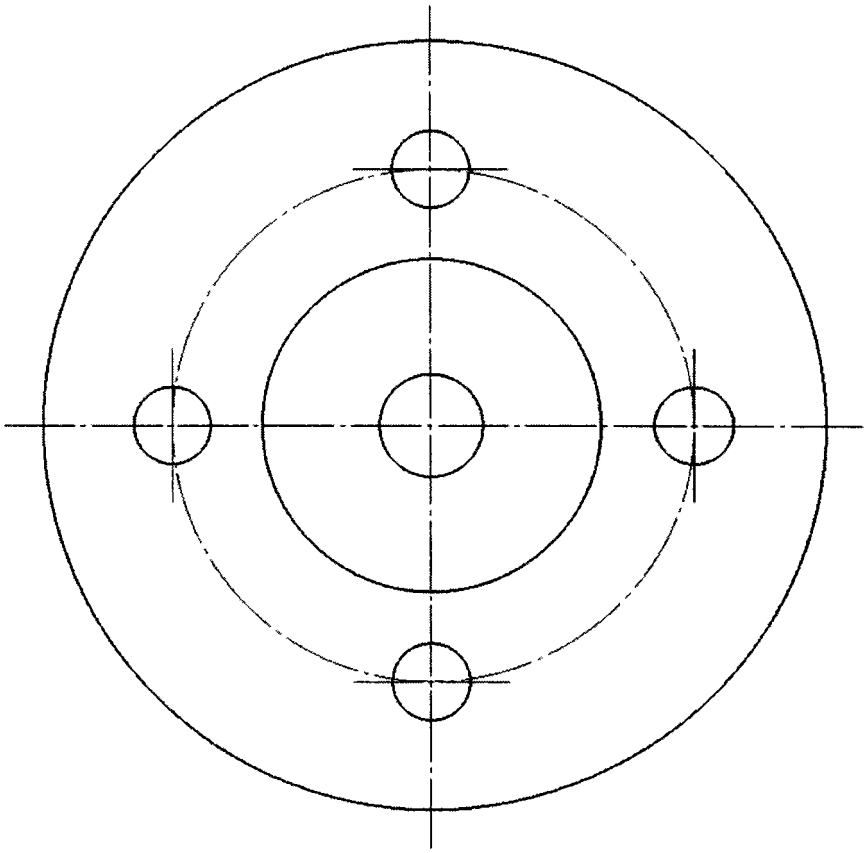


图 3

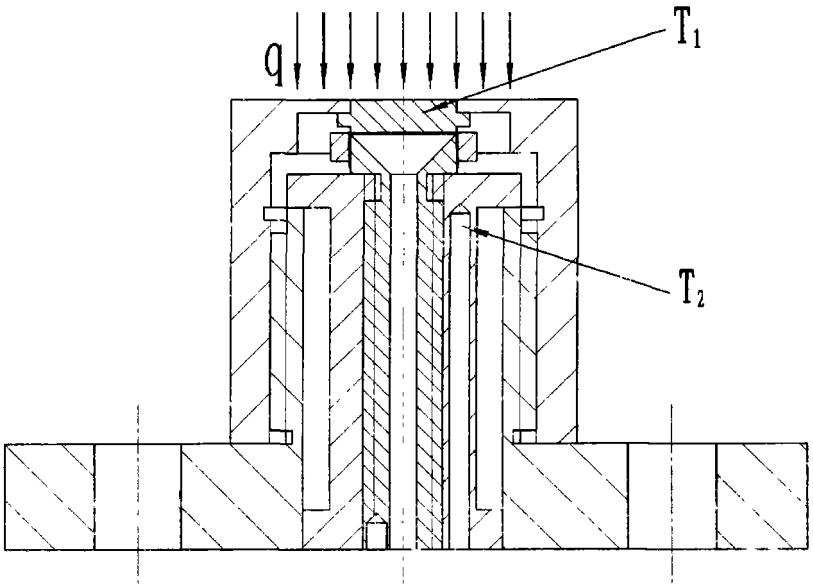


图 4

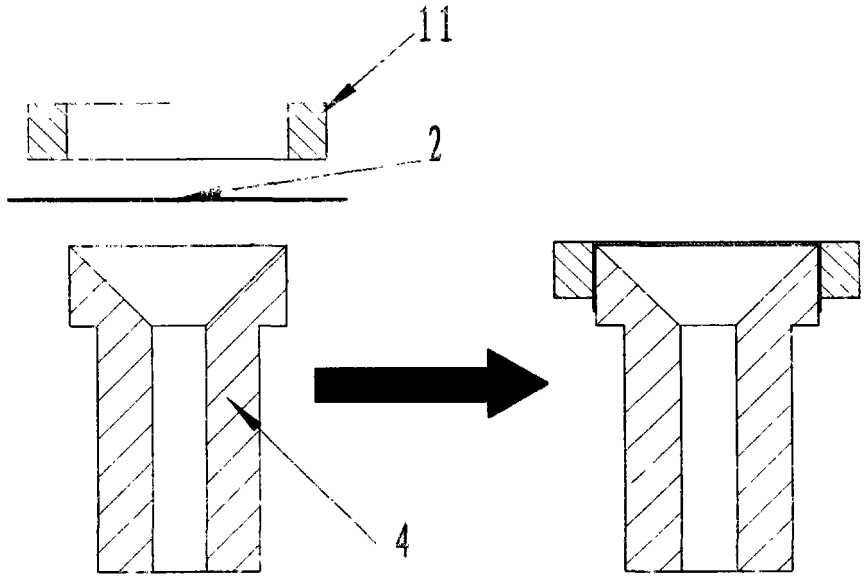

11
2
4

图 5a 图 5b

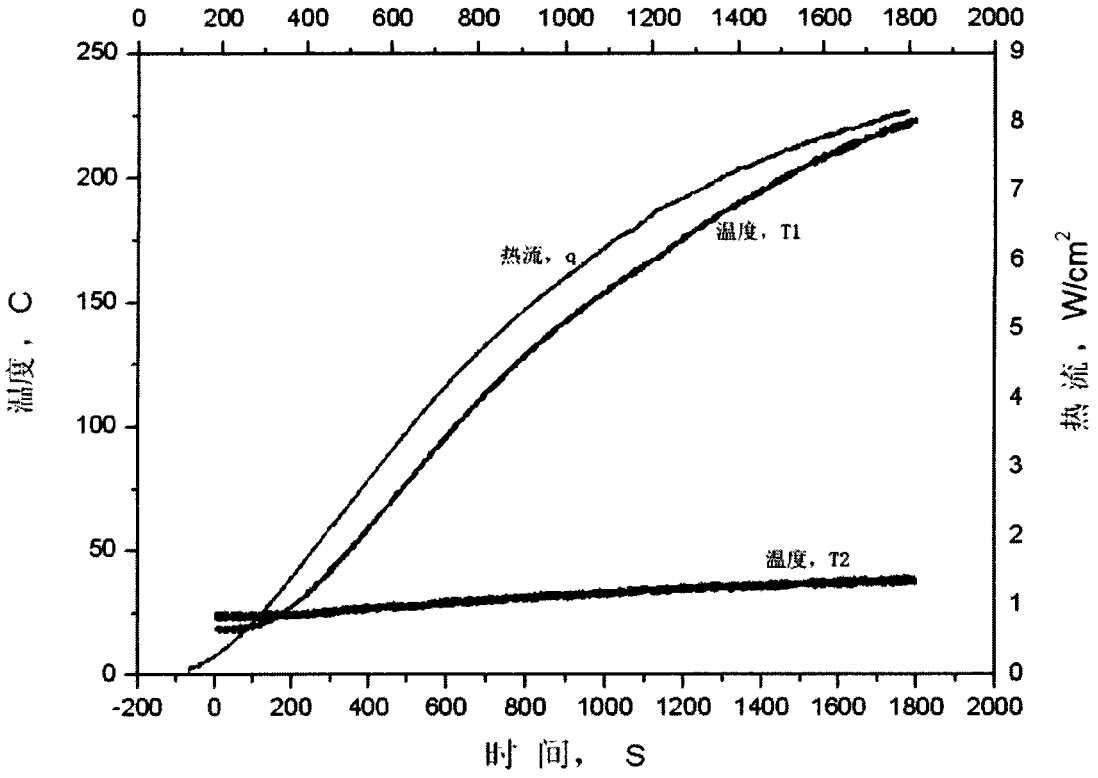

0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000
250 200 150 100 50 0
9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
温度，C
热流，W/cm2
热流，q
温度，T1
温度，T2
-200 0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000
时间， S

图 6

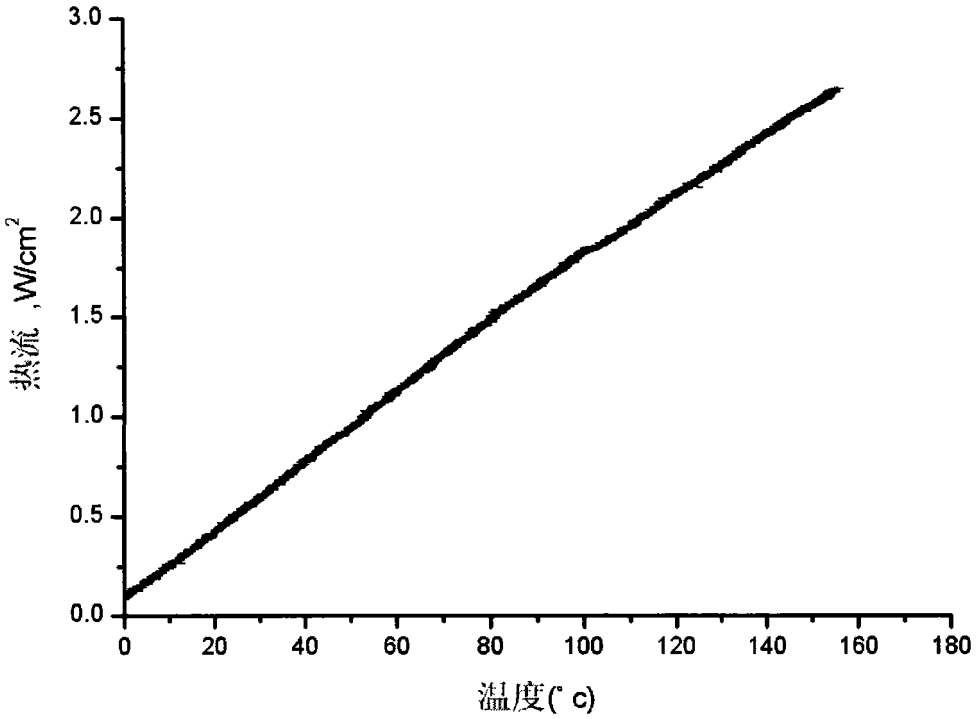

3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
热流 ,W/cm2
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
温度(° c)

图 7

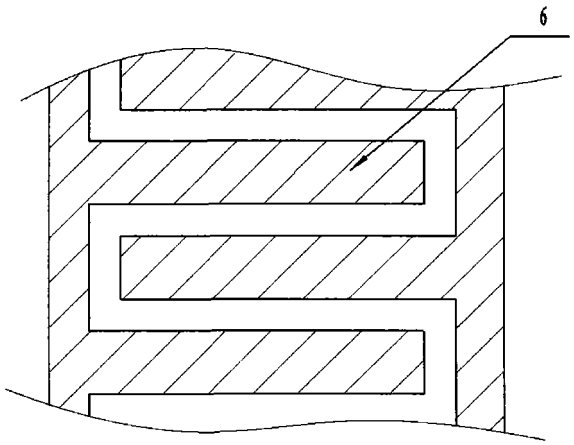

6

图 8a

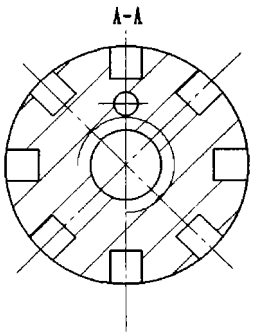

A-A

图 8b