

一种气缸盖激光热负荷试验方法

申请号：[201110139147.5](#)

申请日：2011-05-27

申请(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
发明(设计)人 [虞钢](#) [聂树真](#) [郑彩云](#) [宁伟健](#) [何秀丽](#)
主分类号 [G01M13/00\(2006.01\)I](#)
分类号 [G01M13/00\(2006.01\)I](#)
公开(公告)号 102798518A
公开(公告)日 2012-11-28
专利代理机构 [北京和信华成知识产权代理事务所\(普通合伙\)](#) 11390
代理人 [胡剑辉](#) [王艺](#)



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102798518 A

(43) 申请公布日 2012. 11. 28

(21) 申请号 201110139147. 5

(22) 申请日 2011. 05. 27

(71) 申请人 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 虞钢 聂树真 郑彩云 宁伟健
何秀丽

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390

代理人 胡剑辉 王艺

(51) Int. Cl.

G01M 13/00(2006. 01)

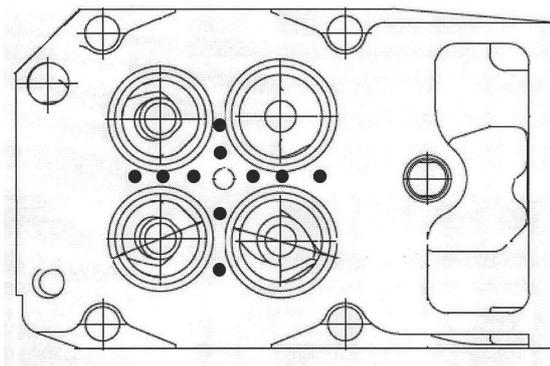
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 9 页

(54) 发明名称

一种气缸盖激光热负荷试验方法

(57) 摘要

本发明公开了一种气缸盖激光热负荷试验方法,此方法采用光束整形器将原始激光束整形为具有特定光强分布的非均匀光束,将此非均匀光束加载到气缸盖火力面上,能够模拟实际工况下气缸盖火力面的整体温度分布情况,借助冷却装置及测温系统可开展激光热负荷试验。此方法和规范具有成本低、效率高、模拟可靠性高的特点。



1. 一种气缸盖激光热负荷试验方法,包括步骤如下:

1) 根据实际工况下实测的气缸盖火力面温度分布,通过建立三维有限元分析模型,进行不同光强分布光束加载下的火力面温度分布计算,最终确定所需加载光束的特定光强分布,使数值模拟温度场与实况实测温度场一致;

2) 利用光束整形器将原始入射激光束整形为步骤 1) 所得的加载光束,计算整形元件位相,并制作光束整形器;

3) 将制作完成的光束整形器放入激光头中,采用光束分析检测装置测试整形后光束光强分布;

4) 光束整形器用于实际气缸盖激光热负荷试验中,通过时间和温度控制模式,结合自然冷却及风冷方式,进行高低周热负荷试验。

2. 根据权利要求 1 所述的气缸盖激光热负荷试验方法,其特征在于,所述步骤 1) 具体包括如下步骤:

所述步骤 1) 具体包括如下步骤:

i) 当气缸盖工作在实际工况时,通过热电偶对气缸盖火力面进行多点温度值测量,测量点主要分布在鼻梁区区域,以此多点温度值来反映气缸盖火力面的温度分布;

ii) 根据气缸盖结构设计模型,建立三维有限元分析模型,进行网格划分,对气缸盖火力面细化以提高计算精度;温度场计算是基于傅立叶热传导定律,表达式为:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

式中, q 为热流密度向量, λ 为材料导热系数, dT/dx 表征温度梯度;非定常热传导情况下的微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_d}{\rho c_p}$$

q_d 是单位时间内单位体积产生的热量; c_p 为材料的比热; ρ 为密度;

边界条件设定为:表面激光作用区域考虑了热源的加载及作用区域与外界的自然对流换热,对称面采用绝热边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = 0$$

其它面与外界的自然对流换热为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h_1 (T - T_a)$$

其中 k 为导热系数, n 为边界的外法线量, h_1 为表面与外界的对流换热系数, T_a 为初始温度, Γ 为物体边界,方向为逆时针方向。

3. 根据权利要求 2 所述气缸盖激光热负荷试验方法,其特征在于,还包括如下步骤:

iii) 为了更准确的模拟气缸盖在激光作用下的温度场,在给定气缸盖材料参数的基础上,通过测温实验对气缸盖模型相关参数进行校正;即在气缸盖火力面不同位置处加载激光,记录温度和时间的关系,通过对相应实验参数进行温度场模拟计算,确定一组使实测温度结果与计算结果相吻合的气缸盖模型参数值;

iv) 利用校正后气缸盖模型参数和实际工况下实测火力面温度分布,进行不同光强分

布激光束加载火力面的温度场分布计算,最终确定一种光强分布的加载光束,使得数值模拟温度场与实况实测温度场一致。

4. 根据权利要求1所述气缸盖激光热负荷试验方法,其特征在于,所述步骤2) 具体包括:

i) 采用G-S算法计算光束整形器的位相;

ii) 将光束整形器的相位量化为多组数据,每组数据对应制作一块模板,画出模板加工需要的相位图,并在每个模板上画上对准标记,以确保模板在后续的套刻时对准,然后根据加工相位图,利用电子束直写的方法来制作模板;

iii) 利用制作完成的模板,采用减法工艺来完成刻蚀;其中,光刻阶段包括表面清洁处理、甩胶、前烘、曝光、显影五部分,其中清洁处理后进行烘干基片处理,以易于上胶;光刻结束后,将表面带有光刻胶图形的基片放到离子束刻蚀装置中,利用反应气体对石英基片进行刻蚀。

5. 根据权利要求1所述气缸盖激光热负荷试验方法,其特征在于,所述步骤3) 具体包括:将制作完成的光束整形器放入激光头中,采用原始激光束入射,使整形后光束投射到一个接收屏上,接收屏后利用CCD进行接收,并在分析软件上对成像进行光强分布检测;

其中,接收屏采用纸、毛玻璃或者四氟乙烯等材料制作。

6. 根据权利要求1所述气缸盖激光热负荷试验方法,其特征在于,所述步骤4) 具体包括:

i) 在气缸盖激光热负荷试验中,将光束整形器放入激光头中,调节整形器的方位和激光头与气缸盖火力面的距离,使照射到火力面的光斑尺寸和分布满足预先设定的条件;

ii) 设定激光功率进行加载,通过红外测温仪对气缸盖火力面上多测点位置进行温度实时观测,当火力面的温度分布与实况实测温度分布一致时,进行激光热负荷试验;

iii) 采用时间和温度控制模式进行高低周热负荷试验;时间控制模式是通过设定温度循环的时间来实现,即设定每个加载周期的加载持续时间和卸载持续时间;而温度控制模式是通过设定某一监控点温度波动的上限温度 T_{\max} 和下限温度 T_{\min} 来实现的;在一个温度循环中,激光保持高功率进行加载直到温度达到 T_{\max} ,然后停止激光加载或降低激光加载功率直到温度低于 T_{\min} ,如此反复检测测点处的温度即可控制在 $T_{\min} \sim T_{\max}$ 间波动,温度波动稳定控制为 $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ 。

一种气缸盖激光热负荷试验方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种以激光为热源的气缸盖热负荷试验方法。

背景技术

[0002] 目前对气缸盖热负荷试验的研究主要是热模拟系统的零部件试验,具有经济性好、周期性短、针对性强等优点。目前国内外热模拟系统主要有红外线加热系统、燃气加热系统、高频感应加热系统、石英灯加热系统以及激光加热系统等。而红外线加热系统、燃气加热系统、高频感应加热系统等,都不能有效的模拟气缸盖火力面温度分布。而激光具有功率密度高、时空分布可控性好的特点,已经在热负荷试验中具有较明显优势。

[0003] 国内外也利用激光开展了其它材料的热疲劳研究,如德国 Ruhr 大学的 Schaus 教授和 Pohl 教授两人共同开发了一套热疲劳模拟系统用以对火车轨道材料进行研究。日本的 KUTSUNA 等几位学者也设计了一台采用 Nd-YAG 激光器加热的热模拟试验系统,用以研究涡轮机材料的热疲劳状况。98 年前后,NASA 的 Zhu Dongming 等人对热障陶瓷涂层 (TBCs) 在激光加载条件下的热疲劳破坏行为开展了广泛的研究,之后他们还建立了一套用于研究高性能发动机材料的热疲劳过程的实验系统,该系统采用脉冲式 CO₂ 激光器对试样进行加载。我国湘潭大学的龙士国和周益春采用实验及数值模拟的方法,对激光引发的颗粒增强金属基复合材料的热疲劳行为进行了深入分析。以上这些激光加载热疲劳模拟试验系统的研究对象主要以块状试件为主,并没有涉及整个零件结构。

[0004] 目前以本实验室为主要研究机构,采用高功率密度的激光束作为热源,借助机器人系统和反求方法设计的激光光束整形器,对活塞激光热负荷试验进行了研究,但是只能模拟活塞顶面特定三个圆环区域的温度分布,不能实现模拟活塞顶面实际工况下的整体温度分布情况。

[0005] 因此,现有技术的不足就需要提供一种以激光作为热源的气缸盖激光热负荷试验方法,能够模拟实际工况下气缸盖火力面的整体温度分布情况。

发明内容

[0006] 本发明的目的是克服上述现有技术的不能模拟实际工况下零部件顶面整体温度分布的缺点,提供一种以激光作为热源的气缸盖激光热负荷试验方法,能够模拟实际工况下气缸盖火力面的整体温度分布情况。

[0007] 本发明的一种气缸盖激光热负荷试验方法,具体步骤如下:

[0008] 1) 根据实际工况下实测的气缸盖火力面温度分布,通过建立三维有限元分析模型,进行不同光强分布光束加载下的火力面温度分布计算,最终确定所需加载光束的特定光强分布,使数值模拟温度场与实况实测温度场一致;

[0009] 2) 利用光束整形器将原始入射激光束整形为步骤 1) 所得的加载光束,计算整形元件位相,并制作光束整形器;

[0010] 3) 将制作完成的光束整形器放入激光头中,采用光束分析检测装置测试整形后光

束光强分布；

[0011] 4) 光束整形器用于实际气缸盖激光热负荷试验中,通过时间和温度控制模式,结合自然冷却及风冷方式,进行高低周热负荷试验。

[0012] 进一步,所述步骤 1) 具体包括如下步骤:

[0013] i) 当气缸盖工作在实际工况时,通过热电偶对气缸盖火力面进行多点温度值测量,测量点主要分布在鼻梁区区域,以此多点温度值来反映气缸盖火力面的温度分布;

[0014] ii) 根据气缸盖结构设计模型,建立三维有限元分析模型,进行网格划分,对气缸盖火力面细化以提高计算精度;温度场计算是基于傅立叶热传导定律,表达式为:

$$[0015] \quad q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

[0016] 式中, q 为热流密度向量, λ 为材料导热系数, dT/dx 表征温度梯度;

[0017] 非定常热传导情况下的微分方程为:

$$[0018] \quad \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_d}{\rho c_p}$$

[0019] q_d 是单位时间内单位体积产生的热量; c_p 为材料的比热; ρ 为密度;

[0020] 边界条件设定为:表面激光作用区域考虑了热源的加载及作用区域与外界的自然对流换热,对称面采用绝热边界条件:

$$[0021] \quad -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = 0$$

[0022] 其它面与外界的自然对流换热为

$$[0023] \quad -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_1 (T - T_a)$$

[0024] 其中 k 为导热系数, n 为边界的外法线量, h_1 为表面与外界的对流换热系数, T_a 为初始温度, Γ 为物体边界,方向为逆时针方向。

[0025] 进一步,还包括如下步骤:

[0026] iii) 为了更准确的模拟气缸盖在激光作用下的温度场,在给定气缸盖材料参数的基础上,通过测温实验对气缸盖模型相关参数进行校正;即在气缸盖火力面不同位置处加载激光,记录温度和时间关系,通过对相应实验参数进行温度场模拟计算,确定一组使实测温度结果与计算结果相吻合的气缸盖模型参数值;

[0027] iv) 利用校正后气缸盖模型参数和实际工况下实测火力面温度分布,进行不同光强分布激光束加载火力面的温度场分布计算,最终确定一种光强分布的加载光束,使得数值模拟温度场与实况实测温度场一致。

[0028] 进一步,所述步骤 2) 具体包括:

[0029] i) 采用 G-S 算法计算光束整形器的位相;

[0030] ii) 将光束整形器的相位量化为多组数据,每组数据对应制作一块模板,画出模板加工需要的相位图,并在每个模板上画上对准标记,以确保模板在后续的套刻时对准,然后根据加工相位图,利用电子束直写的方法来制作模板;

[0031] iii) 利用制作完成的模板,采用减法工艺来完成刻蚀;其中,光刻阶段包括表面清洁处理、甩胶、前烘、曝光、显影五部分,其中清洁处理后进行烘干基片处理,以易于上胶;

光刻结束后,将表面带有光刻胶图形的基片放到离子束刻蚀装置中,利用反应气体对石英基片进行刻蚀。

[0032] 进一步,所述步骤 3) 具体包括:将制作完成的光束整形器放入激光头中,采用原始激光束入射,使整形后光束投射到一个接收屏上,接收屏后利用 CCD 进行接收,并在分析软件上对成像进行光强分布检测;

[0033] 其中,接收屏采用纸、毛玻璃或者四氟乙烯等材料制作。

[0034] 进一步,所述步骤 4) 具体包括:

[0035] i) 在气缸盖激光热负荷试验中,将光束整形器放入激光头中,调节整形器的方位和激光头与气缸盖火力面的距离,使照射到火力面的光斑尺寸和分布满足预先设定的条件;

[0036] ii) 设定激光功率进行加载,通过红外测温仪对气缸盖火力面上多测点位置进行温度实时观测,当火力面的温度分布与实况实测温度分布一致时,进行激光热负荷试验;

[0037] iii) 采用时间和温度控制模式进行高低周热负荷试验;时间控制模式是通过设定温度循环的时间来实现,即设定每个加载周期的加载持续时间和卸载持续时间;而温度控制模式是通过设定某一监控点温度波动的上限温度 T_{\max} 和下限温度 T_{\min} 来实现的;在一个温度循环中,激光保持高功率进行加载直到温度达到 T_{\max} ,然后停止激光加载或降低激光加载功率直到温度低于 T_{\min} ,如此反复检测测点处的温度即可控制在 $T_{\min} \sim T_{\max}$ 间波动,温度波动稳定控制为 $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ 。

[0038] 本发明采用光束整形器将原始激光束整形为具有特定光强分布的非均匀光束,将此非均匀光束加载到气缸盖火力面上,能够模拟实际工况下气缸盖火力面的整体温度分布情况,借助冷却装置及测温系统可开展激光热负荷试验。此外,本发明具有成本低、效率高、模拟可靠性高的特点。

附图说明

[0039] 图 1 是气缸盖火力面测点分布示意图;

[0040] 图 2 是实况实测下气缸盖火力面整体温度分布云图;

[0041] 图 3a 是 132 气缸盖结构设计模型图;

[0042] 图 3b 是 132 气缸盖三维有限元分析模型图;

[0043] 图 4 是模型参数校正实验加载光束示意图;

[0044] 图 5a、5b、5c、5d 是加载测温实验与模拟计算结果对比;

[0045] 图 6 是计算所得的加载光束光强分布;

[0046] 图 7a、7b 是整形光束加载后计算所得气缸盖火力面的温度场分布与实况实测结果的对比;

[0047] 图 8 是光束整形器位相设计流程图;

[0048] 图 9a、9b 是所得位相计算输出光束光强分布图;

[0049] 图 10 是加工位相示意图;

[0050] 图 11 是元件制作流程图;

[0051] 图 12 是整形光束检测系统示意图;

[0052] 图 13a、13b 是整形光束实测光强分布图;

- [0053] 图 14 是实测温度试验气缸盖火力面温度分布；
 [0054] 图 15 是时间控制模式下温度波动曲线图；
 [0055] 图 16a、16b 是温度控制模式下温度波动曲线图。

具体实施方式

[0056] 下面以 132 气缸盖为例，结合附图和示例方式对本发明作进一步详细描述，本发明提供了一种气缸盖激光热负荷试验方法，能够模拟实际工况下气缸盖火力面的整体温度分布情况。

[0057] 一、所需加载光束的光强分布计算

[0058] 1、当 132 气缸盖工作在实际工况时，利用热电偶对 132 气缸盖火力面进行多点温度值测量，测量点主要分布在鼻梁区区域，位置示意图如图 1 所示，以此多点温度值来反映气缸盖火力面的温度分布，如图 2 所示；

[0059] 2、132 气缸盖结构设计模型如图 3a 所示，将三维结构设计模型导入有限元计算软件中，建立三维有限元分析模型进行网格划分，如图 3b 所示，对气缸盖火力面细化以提高计算精度。

[0060] 温度场计算是基于傅立叶热传导定律，表达式为：

$$[0061] \quad q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

[0062] 式中， q 为热流密度向量， λ 为材料导热系数， dT/dx 表征温度梯度。非定常热传导情况下的微分方程为：

$$[0063] \quad \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_d}{\rho c_p}$$

[0064] q_d 是单位时间内单位体积产生的热量； c_p 为材料的比热； ρ 为密度。

[0065] 边界条件设定为：表面激光作用区域考虑了热源的加载及作用区域与外界的自然对流换热，对称面采用绝热边界条件：

$$[0066] \quad -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = 0$$

[0067] 其它面与外界的自然对流换热为

$$[0068] \quad -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_1 (T - T_a)$$

[0069] 其中 k 为导热系数， n 为边界的外法线量， h_1 为表面与外界的对流换热系数， T_a 为初始温度， Γ 为物体边界，方向为逆时针方向。

[0070] 3、为了更准确的模拟 132 气缸盖在激光作用下的温度场，在给定 132 气缸盖材料参数的基础上，通过测温实验对气缸盖模型相关参数进行校正。即在气缸盖火力面不同位置 1a、1b、1c 处加载不同功率及尺寸的光斑如图 4 所示，通过红外测温仪记录各位置 1a、1b、1c 特征点处温度和时间的关系，通过对相应实验参数进行温度场模拟计算，确定一组使实测温度结果与计算结果相吻合的气缸盖模型参数值，结果如图 5a、5b、5c、5d 所示。

[0071] 4、利用校正后气缸盖模型参数和实际工况下实测火力面温度分布，进行不同光强分布激光束加载火力面的温度场分布计算，最终确定一种光强分布的加载光束，使得数值

模拟温度场与实况实测温度场一致,其中,计算所得的加载光束光强分布如图 6 所示,其中半径为 R3 的圆区域 (R3 为 10mm,rr0 为 30mm) 称为区域 3,半径为 R2 (40mm) 的圆区域除去半径为 R3 的圆区域剩余区域称为区域 2,半径 R2 到 R1 (66mm) 之间的圆环区域成为区域 1,三个区域的光强之比:

[0072] $I(\text{区域 } 1) : I(\text{区域 } 2) : I(\text{区域 } 3) = 35 : 5 : 60$

[0073] 此光束加载后计算所得气缸盖火力面的温度场分布与实况实测结果的对比结果如图 7a、7b 所示。

[0074] 二、利用光束整形器将原始入射激光束整形为步骤 1) 所得的加载光束,计算整形元件位相,并制作光束整形器:

[0075] 1、采用 G-S 算法计算光束整形器的位相,主要设计思想如图 8 所示:首先以初始位相和已知输入面光场的振幅分布开始,做傅里叶变换;接着引入输出面限制条件,即以已知或要求的振幅分布取代原振幅部分,同时保持位相不变;然后做反傅里叶变换,对结果做输入面光场限制,即以已知输入光强振幅分布取代其振幅部分,仍保持位相不变,再做傅里叶变换,如此循环直至得到满意结果,最后模拟计算输出光束如图 9 所示。

[0076] 2、将光束整形器的相位量化为三组数据,每组数据对应制作一块模板,画出模板加工需要的相位图,位相示意图如图 10 所示,并在每个模板上画上对准标记,以确保模板在后续的套刻时对准,然后根据加工相位图,利用电子束直写的方法来制作模板。

[0077] 3) 利用制作完成的模板,采用减法工艺并利用掩模版 1、2、3 来完成三次套刻过程,最终光束整形器制作完成,流程图如图 11 所示;其中,光刻阶段包括表面清洁处理、甩胶、前烘、曝光、显影五部分,其中清洁处理后也需要一步烘干基片的处理,以易于上胶。光刻结束后,将表面带有光刻胶图形的基片放到离子束刻蚀装置中,利用反应气体对石英基片进行刻蚀。

[0078] 三、将制作完成的光束整形器放入激光头中,采用光束分析检测装置测试整形后光束光强分布:

[0079] 采用原始激光束 11 入射,经光束整形器 12 后的整形光束投射到距离 1m 处的一个接收屏 13 上,接收屏 13 之后利用 CCD14 进行接收,并在分析软件上对成像进行光强分布检测,整个光路示意图如图 12 所示。其中,接收屏 13 采用纸、毛玻璃或者四氟乙烯等材料制作。原始激光经过光束整形器 12 后的光束在 CCD14 中的成像如图 13a、b 所示,光强分布也满足设计要求。

[0080] 四、光束整形器用于实际气缸盖激光热负荷试验中,通过时间和温度控制模式,结合自然冷却及风冷方式,进行高低周热负荷试验:

[0081] 1) 调节整形器的方位,并使激光头与气缸盖火力面的距离为 1m,使照射到火力面的光斑尺寸和分布满足设计要求。

[0082] 2) 设定激光功率 3000w 进行加载,通过红外测温仪对气缸盖火力面上多测点位置进行温度实时观测,当火力面的温度分布与实况实测温度分布一致时如图 14,即可开展激光热负荷试验。

[0083] 3) 采用时间和温度控制模式进行高低周热负荷试验。时间控制模式是通过设定温度循环的时间来实现,即设定每个加载周期的加载持续时间和卸载持续时间;如图 15 所示为加载 S,卸载 S 的实验数据。

[0084] 温度控制模式是通过设定某一监控点温度波动的上限温度 T_{\max} 和下限温度 T_{\min} 来实现的。在一个温度循环中,激光保持高功率进行加载直到温度达到 T_{\max} ,然后停止激光加载或降低激光加载功率直到温度低于 T_{\min} ,如此反复检测测点处的温度即可控制在 $T_{\min} \sim T_{\max}$ 间波动,温度波动稳定控制为 $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$,如图 16a、b 所示。

[0085] 综上所述,本发明采用光束整形器将原始激光束整形为具有特定光强分布的非均匀光束,将此非均匀光束加载到气缸盖火力面上,能够模拟实际工况下气缸盖火力面的整体温度分布情况,借助冷却装置及测温系统可开展激光热负荷试验。

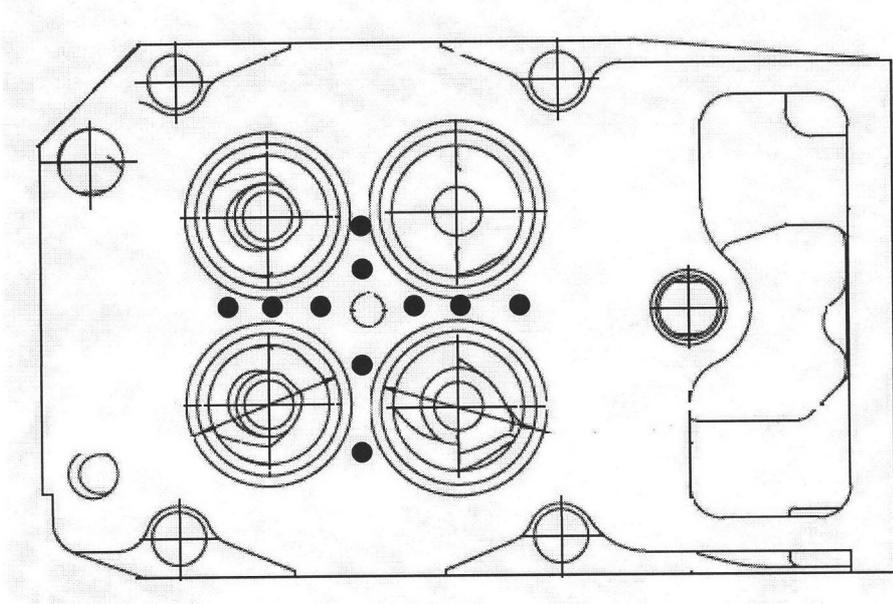


图 1

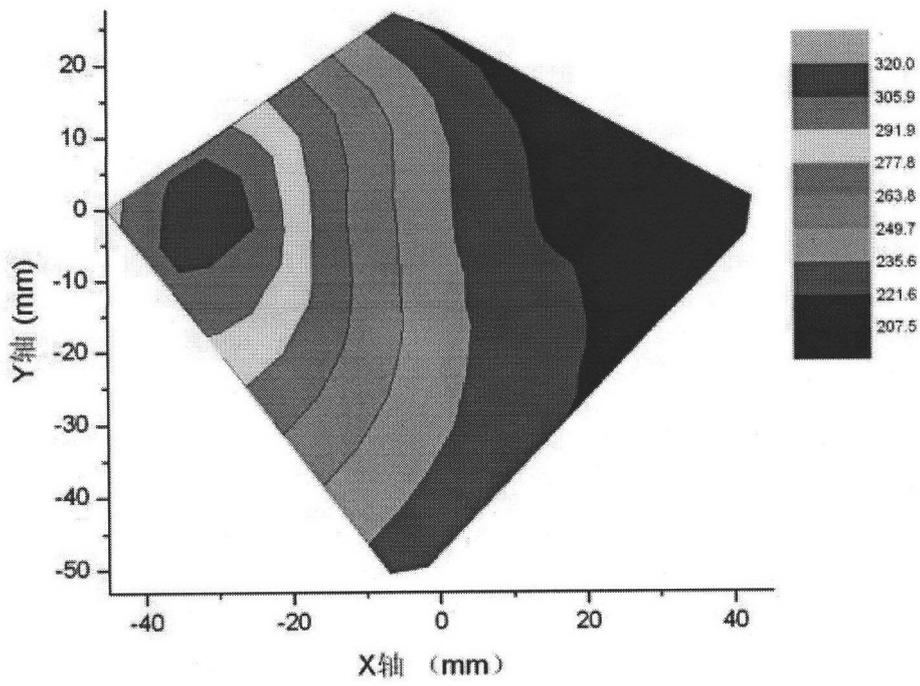


图 2

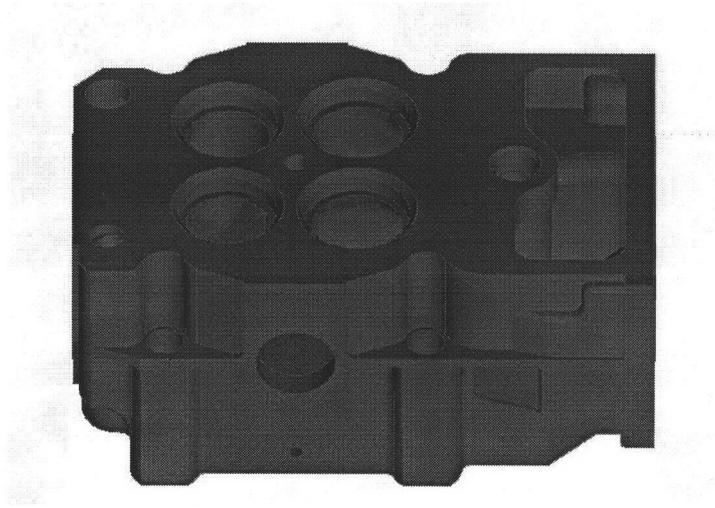


图 3a

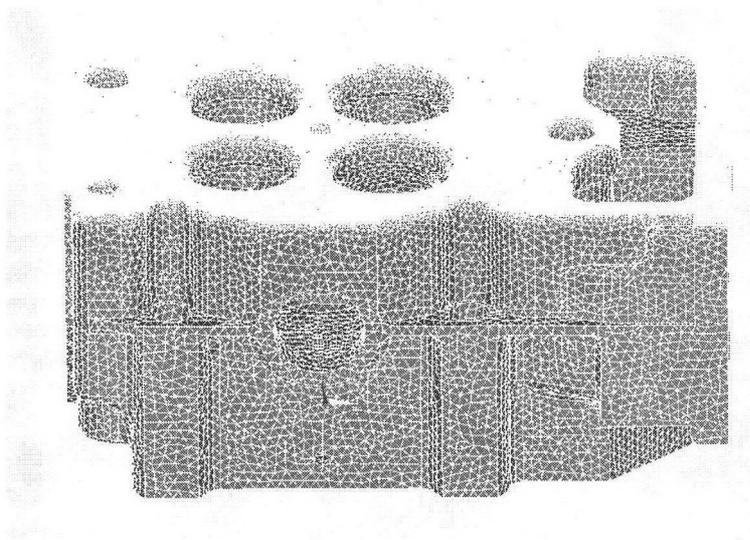


图 3b

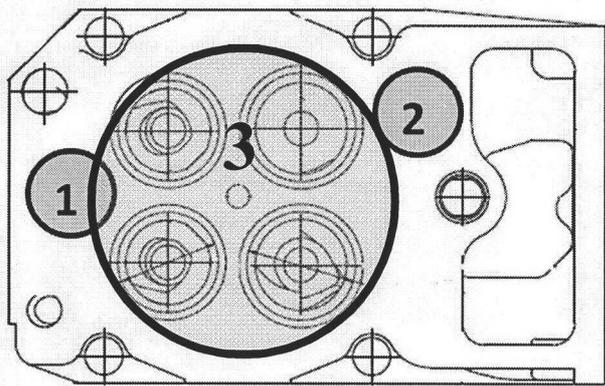


图 4

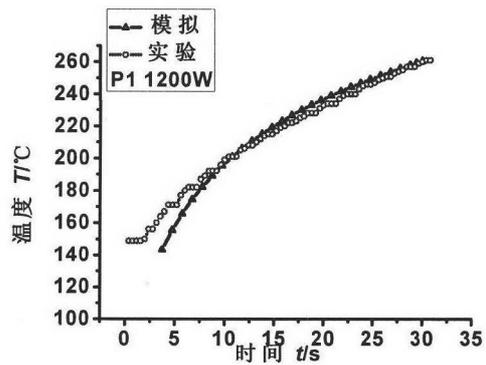


图 5a

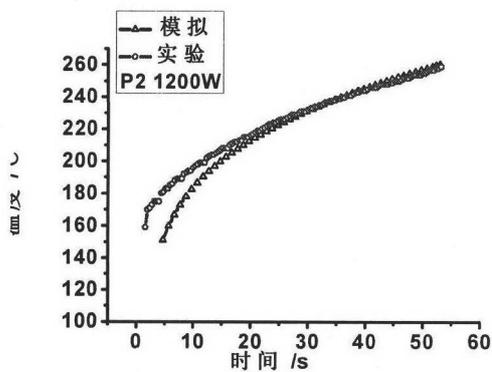


图 5b

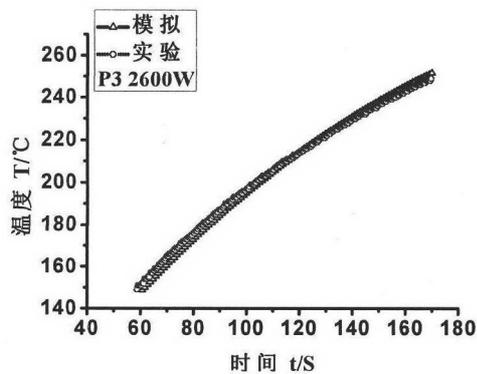


图 5c

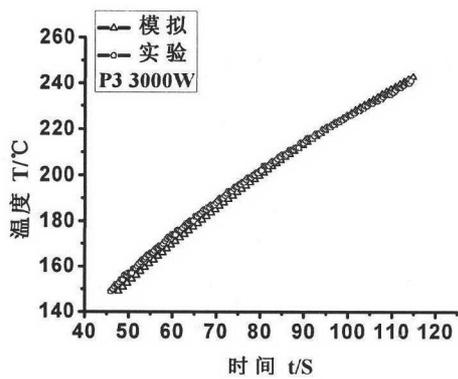


图 5d

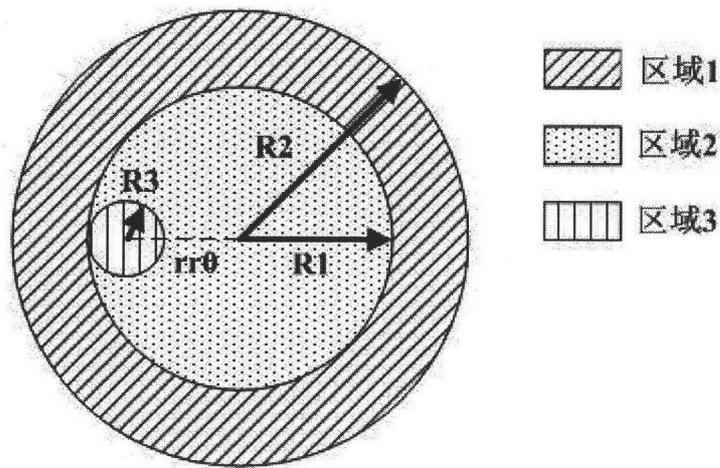


图 6

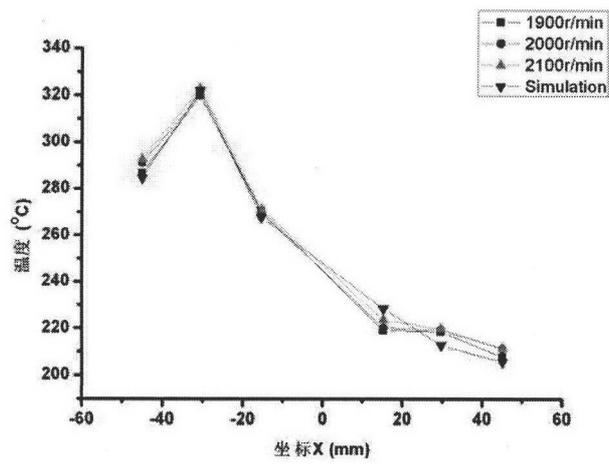


图 7a

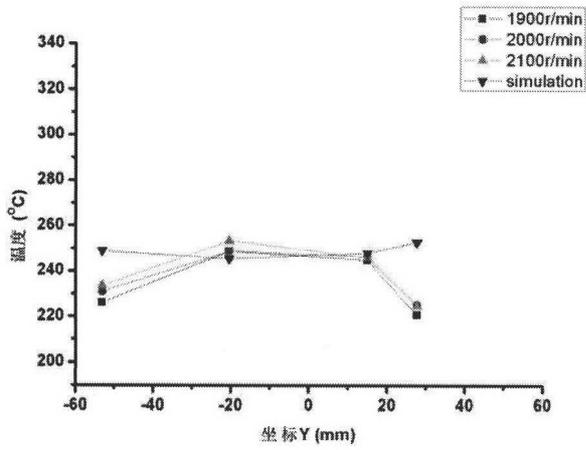


图 7b

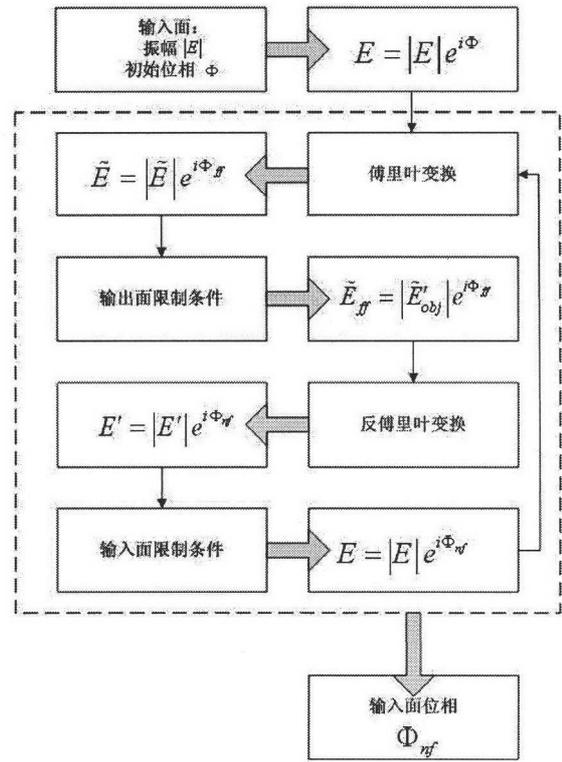


图 8

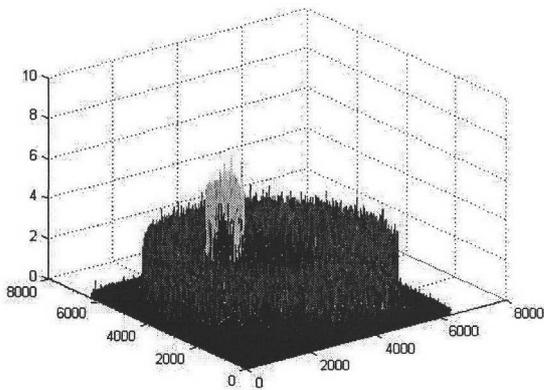


图 9a

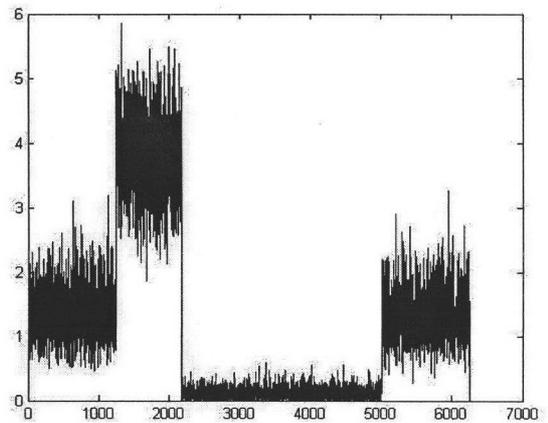


图 9b

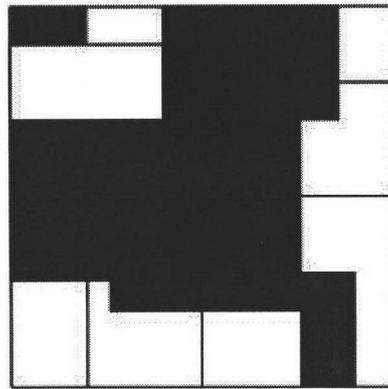


图 10

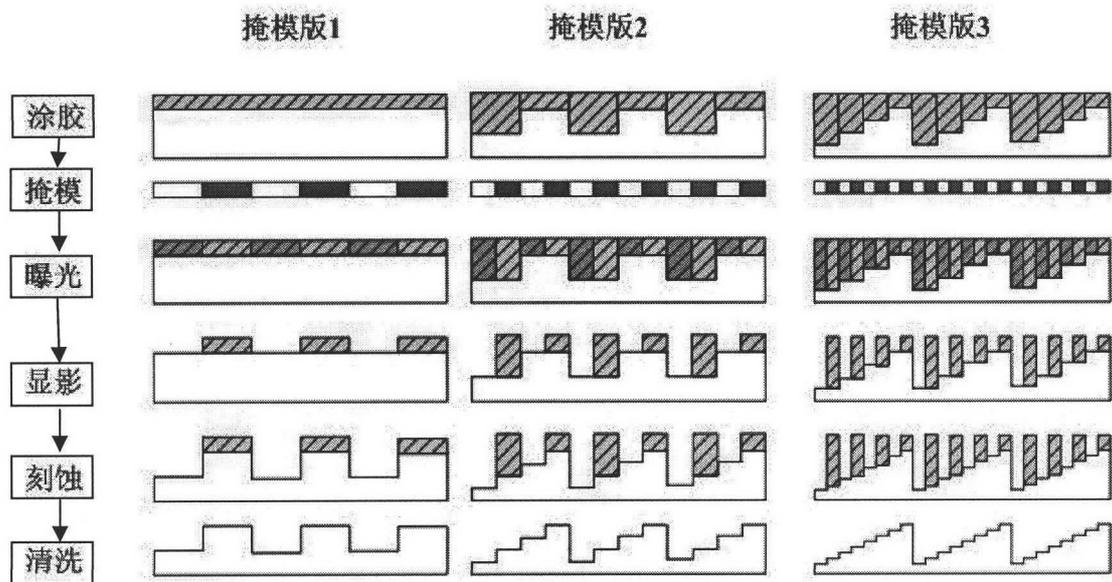


图 11

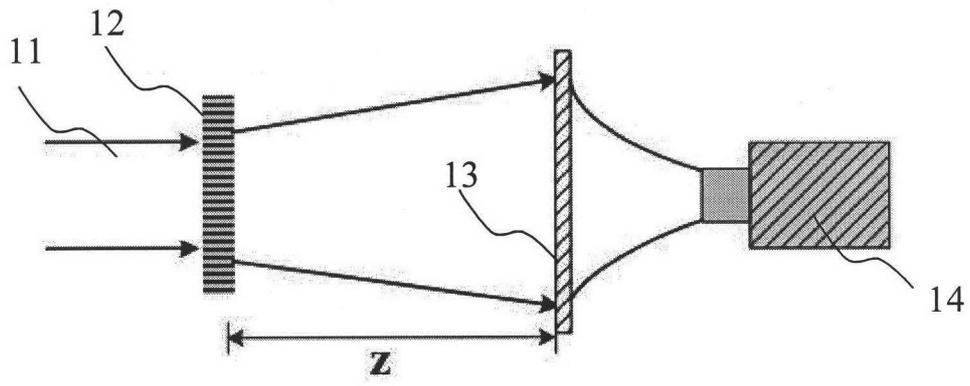


图 12

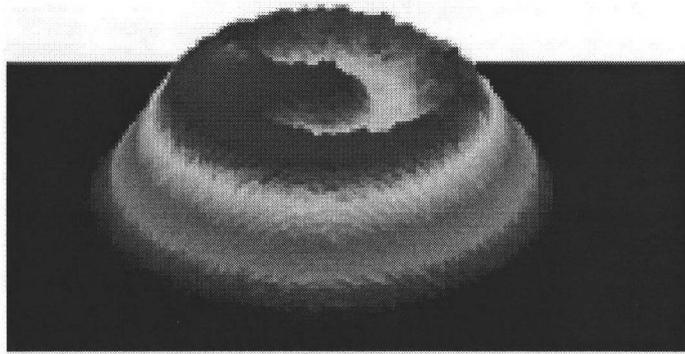


图 13a

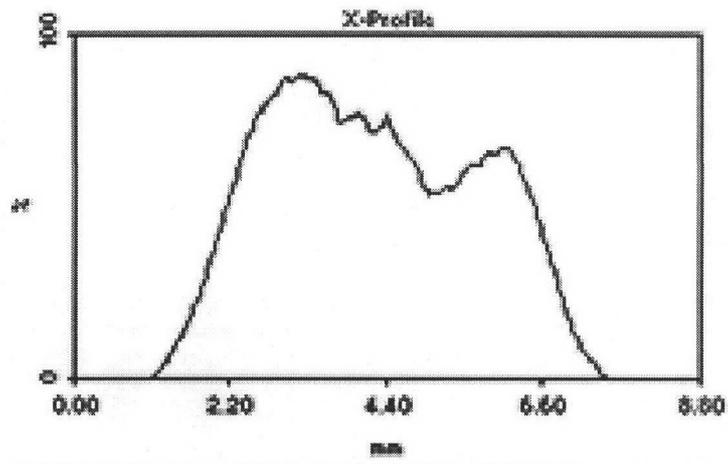


图 13b

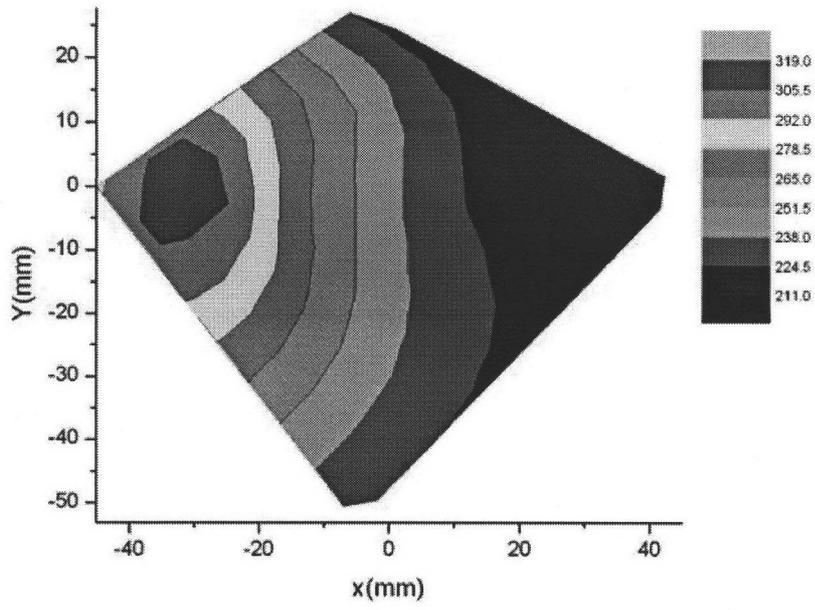


图 14

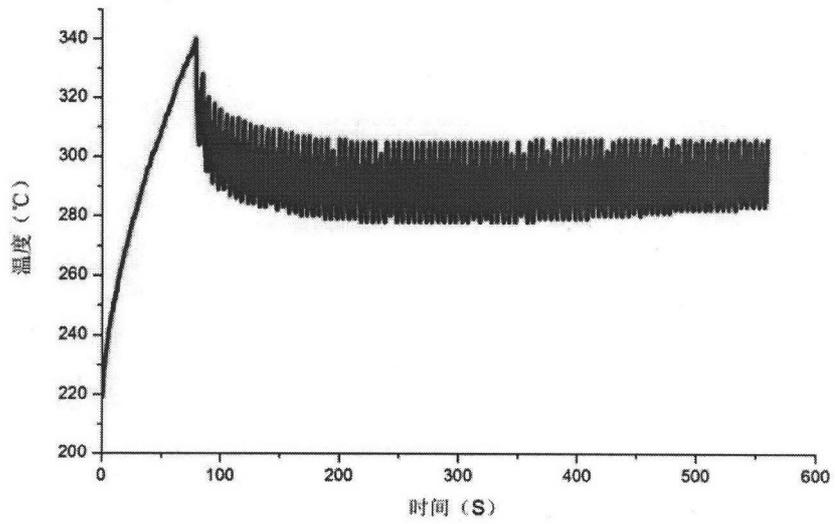


图 15

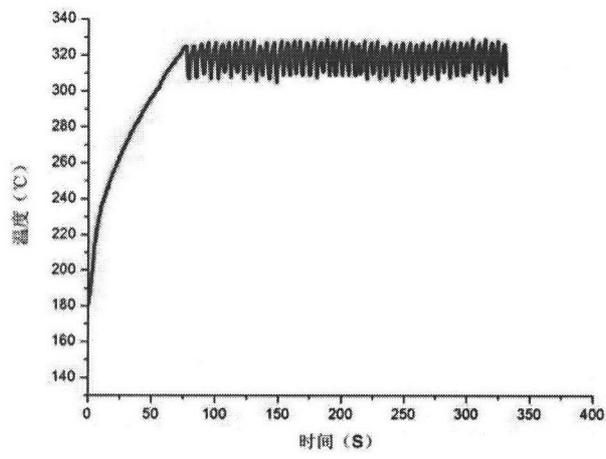


图 16a

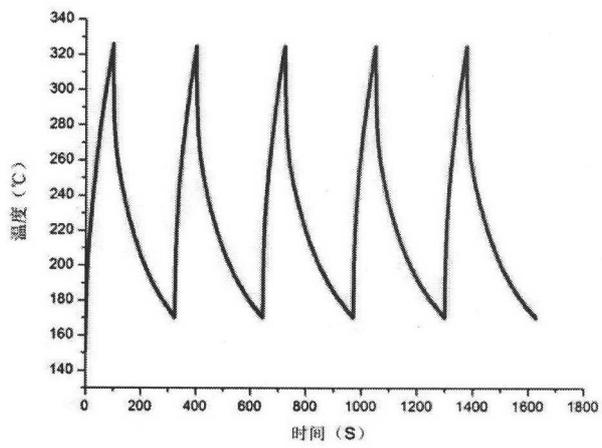


图 16b