

* 学术论文 *

脉冲激光加热下超急速爆发沸腾现象观测*

淮秀兰 董兆一 刘登瀛

中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080

张 兴

Institute of Advanced Material Study, Kyushu University Kasuga-koen 6-1, Kasuga-shi, Fukuoka 816-8580, Japan

摘要 以不同体积配比的纯丙酮/乙醇混合液体为实验工质, 进行了脉冲激光加热下超急速爆发沸腾的实验研究. 采用快速瞬态温度检测系统测定了爆发沸腾过程中金属薄膜表面温度变化规律, 采用显微放大摄影系统观测与拍摄了液体工质产生爆发沸腾时气泡生成与运动的系列照片, 揭示了超急速爆发沸腾与常规沸腾的本质区别以及激光加热条件、混合工质体积配比及工质中加入纳米颗粒等因素对超急速爆发沸腾的影响规律.

关键词 脉冲激光加热 爆发沸腾 温度测量 现象观测

超急速爆发沸腾与诸如核反应堆、冶金、液化天然气、超导、造纸、激光清洗、激光医疗手术、喷墨打印机、微电子机械系统(MEMS)等传统与现代高新技术密切相关^[1~7], 相关研究对于控制或利用爆发沸腾现象是至关重要的. 因此, 开展爆发沸腾研究具有重要学术意义与很大实用价值.

进入20世纪90年代以来, 国内外一些学者, 先后对细金属丝和极微薄膜在水、乙醇和甲醇中的超急速沸腾进行了一系列实验研究, 发现了与常规沸腾不同的超常现象^[8~11]. 然而迄今为止, 人们对爆发沸腾现象的理解依然很不深刻, 例如爆发沸腾过程中温度与压力的变化, 爆发沸腾的产生条件和影响因素无法准确测定, 建立在经典热力学基础上的均相核沸腾理论与实验结果有较大差别等. 尽管已有的理论可以近似说明一些问题, 但是有效地控制核化沸腾仍是一个棘手、关键的问题. 中国科学院工程热物理研究所在中国科学院“九五”基础性研究重大项目: “超急速传热传质的基础研究”资助下, 建成了短脉冲激光作用下超急速爆发沸腾实

验装置, 拥有显微放大摄影与快速瞬态温度检测系统, 进行了常温环境下超急速爆发沸腾的探索性实验与理论研究, 拍摄到短脉冲激光加热下浸没于液体工质中的金属薄膜表面附近产生超急速爆发沸腾的系列照片, 发现气泡核化生成与动态规律异于常规过程^[12~14]. 但由于超急速爆发沸腾是个非常复杂的过程, 人们在爆发沸腾过程中温度变化、传热机理、气泡生长与运动等方面的知识还是非常有限的, 迫切需要进行大量系统深入的实验与理论研究. 为此, 本文较为系统地观测了脉冲激光照射下不同液体工质产生超急速爆发沸腾现象及各种因素的影响规律, 试图揭示超急速爆发沸腾与常规沸腾的本质区别.

1 实验装置与测试原理

1.1 实验装置

实验装置如图1所示, 热源为高强度NdYAG可编程脉冲激光器, 其波长为 $1.06\ \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 $1\sim 30\ \mu\text{s}$, 光斑直径为 $1\sim 10\ \text{mm}$, 一次脉冲的功

2002-10-09 收稿, 2002-12-30 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000026305)、国家自然科学基金(批准号: 50276060)及中国科学院工程热物理研究所所长基金资助项目

E-mail: hxl@mail.etp.ac.cn

率密度最高可达 $1.0 \sim 10^4 \text{ MW/m}^2$ ，通过计算机控制开关电源来调节其输出参数。试件为在 1.6 mm 直径石英玻璃柱的一个端面上用真空镀膜机镀一层厚度约为 $1 \mu\text{m}$ 的铂金而成，石英玻璃柱的两侧涂有银浆作为导线引线，试件浸没于盛有实验工质的液池内，其响应时间小于 $1 \mu\text{s}$ 。其他测量装置有数字示波器(采集速率为 500 MS/s)、计算机、高压电火花闪光装置(放电时间小于 $0.5 \mu\text{s}$)、显微放大观测照相系统。

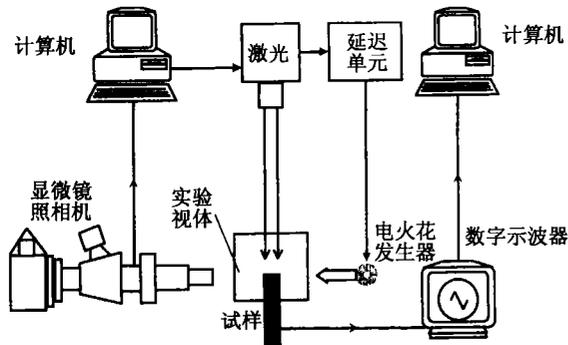


图1 实验装置示意图

1.2 测试原理

实验过程中，先在计算机上设置好激光器的输出参数，通过计算机来控制激光器的输出参数，并在高压电火花的时间延迟器上设置好闪光延迟时间。铂薄膜电阻浸没于工作液池中，激光穿过液体工质直接照射到铂薄膜电阻的表面，铂电阻受热升温后对液体工质进行加热，所以实验过程中铂薄膜电阻既是测温元件又是液体工质的加热元件。在激光器输出激光的同时，向数字示波器与高压电火花装置同时发出触发信号，数字示波器提前进行温度数据采集，高压电火花装置则根据设置的延迟时间引发 $0.5 \mu\text{s}$ 的闪光，此时照相机处于 T 门(实验室

为暗室状态)，摄影胶卷因电火花闪光而曝光，从而完成一次对脉冲激光照射下液体工质爆发式池沸腾的拍摄。在实验工况相对稳定的情况下，将一次在脉冲激光加热下爆发沸腾的全过程分成距激光照射起始时间不同时刻(通过改变高压电火花的延迟时间来实现)进行单次拍摄，然后用依次拍摄的系列照片来反映爆发沸腾的全过程。

2 结果与讨论

脉冲激光照射下超急速爆发沸腾过程极为复杂，它与脉冲激光加热条件(脉宽、功率密度、光斑直径)、工质种类、试件表面状况等因素密切相关。实验过程中分别测量了不同脉冲激光加热条件下，不同液体工质发生爆发沸腾过程中铂膜表面的温度变化，观察并拍摄了气泡生成与运动的系列照片。

2.1 温度测量

实验过程中，在不同激光照射参数下进行了一系列的温度测量。图2为试件表面温度随时间的变化曲线。脉冲激光加热前(约 $19 \mu\text{s}$)的微小温升是由于激光器的漏光造成的。激光脉冲作用期间，试件表面温度迅速升高到最大，温度迅速升高过程中其温升速率有一个突然降低，从而出现一个拐点；脉冲激光加热结束后，由于没有激光能量的进一步输入而气泡生长需要吸收热量致使温度快速下降，随后趋于平缓。激光功率密度越高，试件表面温度也越高。图2(b)为图2(a)的局部放大测量结果，可以清楚地看到，脉冲激光作用期间温度迅速升高到大约 385 与 360 K (远高于平衡沸点)时，出现了明显的拐点(如图中箭头所示)，对应温度称为名义沸腾核化温度。其主要原因是由于沸腾核化吸热与气泡对激光束的散射作用减少了铂电阻对激光能量的吸收所造成的。

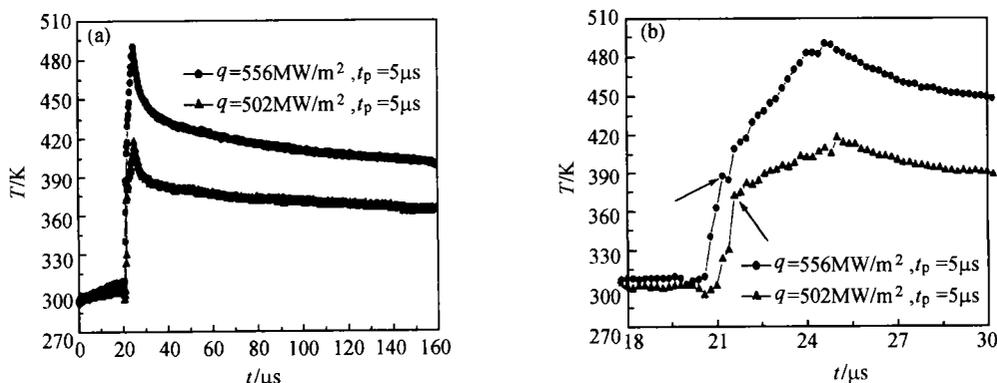


图2 脉冲激光作用下试件表面温度变化规律

2.2 气泡行为

为了观测高能脉冲激光作用下超急速爆发沸腾的气泡行为及混合工质体积配比等因素对爆发沸腾的影响, 实验过程中分别采用丙酮、不同体积配比的丙酮与乙醇混合液体为实验工质进行了较为详细的实验观测。

图3为纯丙酮液体在脉冲激光开始作用1~999 μs 时间段内超急速爆发沸腾的系列照片, 包括气泡的生成、长大、脱离和浮升的整个过程。其中, 激光脉冲宽度为5 μs , 能量密度为546 MW/m^2 。由于实验工质丙酮与乙醇对波长为1.06 μm 的激光束几乎不吸收, 激光光束穿过液体工质直接照射到

铂薄膜电阻的表面, 其中大部分能量被铂薄膜表面的金属电子反射, 少部分能量用于加热铂电阻, 铂电阻受热升温后对液体工质进行加热从而产生爆发沸腾。由图3(a)可以看出, 脉冲激光作用1 μs 后由于试件表面及周围液体被迅速加热积聚了大量能量而产生半球形细小气泡群, 发生了明显的均相核沸腾。脉冲激光加热结束后, 由于没有激光能量的进一步输入和热量向周围冷液体的传递, 气泡群外缘收缩变小。约40 μs 左右时, 气液界面处的气泡脱离上浮, 脱离直径远小于经典Fritz公式计算值^[11]。相对于常规沸腾, 气泡数量要大几个数量级, 气泡迁移速度较快。从50~999 μs , 细小气泡不断脱离

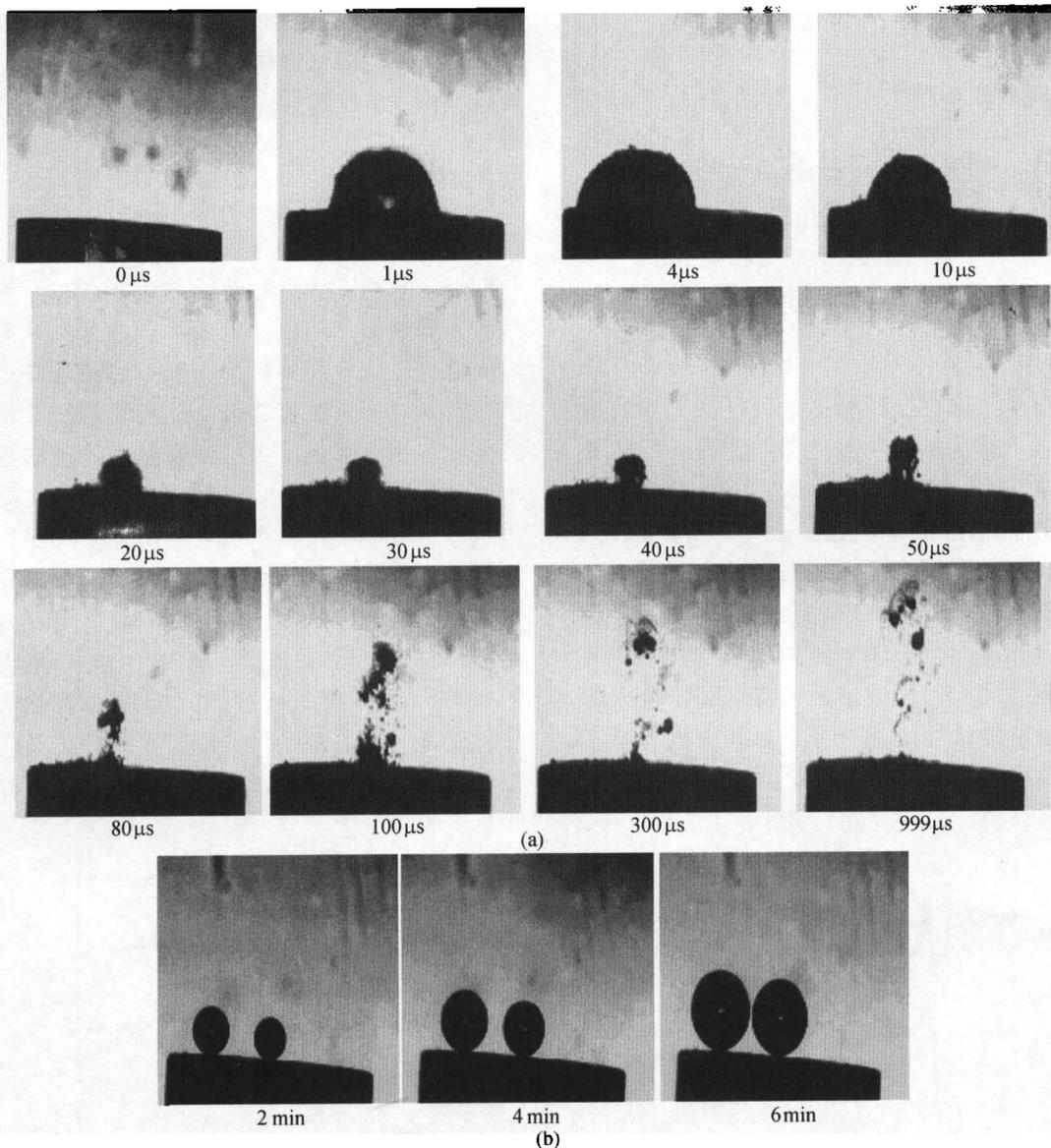


图3 脉冲激光加热下纯丙酮爆发沸腾气泡形貌的系列照片

激光脉冲宽度5 μs , 能量密度546 MW/m^2

(a) 加热作用的时间; (b) 当加热结束经不同较长时间后

上浮,上浮速度先快后慢,气泡直径变化不大.图3(b)为脉冲激光加热结束较长时间后典型的常规沸腾气泡变化行为,铂薄膜表面只有少数气泡生成,气泡在铂膜表面的停留时间较长,脱离直径较大.

图4~6分别为激光脉冲宽度为 $5\mu\text{s}$ 、功率密度基本不变时,不同体积配比的丙酮与乙醇混合工质超急速爆发沸腾过程中气泡变化行为的比较.由图可以看出,随丙酮中较高沸点工质乙醇体积配比的

增大,沸腾行为明显减弱,如气泡数量明显减少,气泡脱离上浮时间滞后,其主要原因是由于丙酮中乙醇的加入使混合液体的沸点高于纯丙酮的沸点.随着丙酮中乙醇体积配比的增大,混合物的沸点升高,起始核化沸腾温度升高,沸腾所需能量增多.因此,采用改变非共沸混合工质体积配比的办法可以控制或利用爆发沸腾现象.

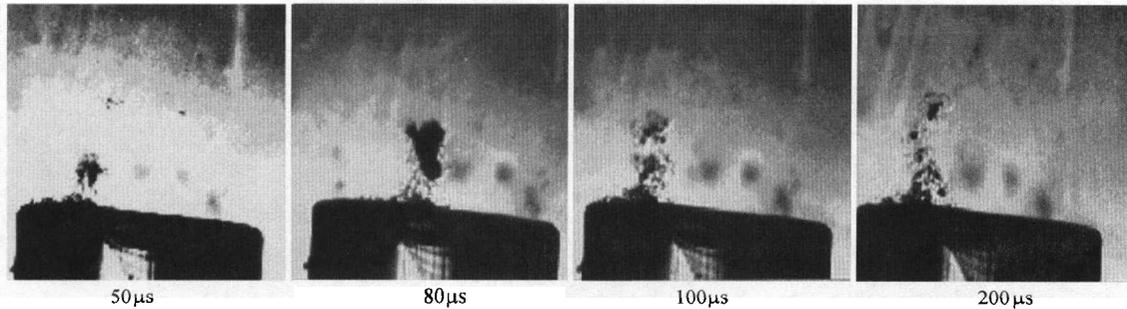


图4 90%丙酮与10%乙醇混合工质爆发沸腾照片
激光脉冲宽度 $5\mu\text{s}$,能量密度 $556\text{MW}/\text{m}^2$

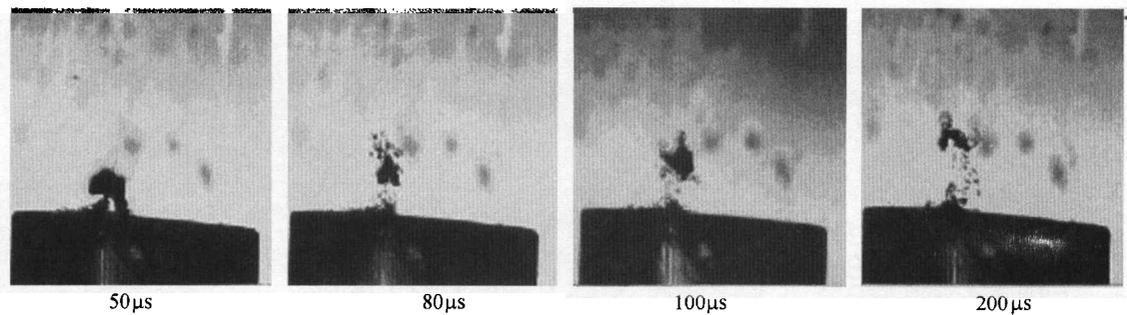


图5 50%丙酮与50%乙醇混合工质爆发沸腾照片
激光脉冲宽度 $5\mu\text{s}$,能量密度 $563\text{MW}/\text{m}^2$

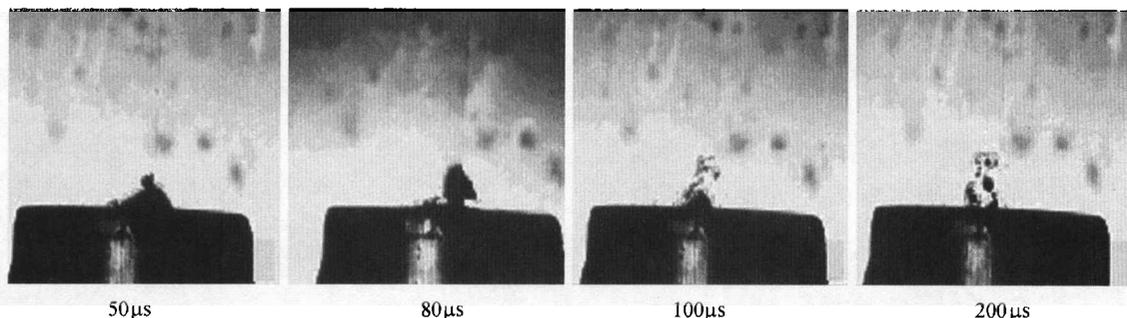


图6 20%丙酮与80%乙醇混合工质爆发沸腾照片
激光脉冲宽度 $5\mu\text{s}$,能量密度 $549\text{MW}/\text{m}^2$

此外,实验过程中通过显微放大摄影与观察发现,不同液体工质的沸腾行为与激光加热条件,工

质种类及试件表面状态等密切相关.当激光总能量比较小的时候,只发生异相核沸腾,即常规沸腾:

气泡只在壁面生成,且数量很少,主流液体温度较低.当激光总能量增大到一定程度时,某一时刻大量细小气泡在壁面与周围液体中同时生成,发生均相核沸腾,即超急速爆发沸腾.随着激光总能量的进一步增大,爆发沸腾行为加剧.具体表现为:气泡数量增多,气泡脱离与上浮时间提前、速度加快^[14,15].当液体工质中加入金属纳米颗粒(粒径约为80 nm的铜颗粒)后,由于液体的平均比热容增大、扰动与传热面积增大,从而强化沸腾传热.与液体中没有加入纳米颗粒相比,气泡直径减小,气泡迁移速度加快.因此,控制或利用爆发沸腾也可以通过在液体工质中加入纳米颗粒来实现.相关现象有待于进一步的实验研究与理论分析.

3 结论

通过采用脉冲激光加热不同液体工质产生爆发沸腾的实验研究,得出以下结论:

(1) 激光脉冲作用期间试件表面温度迅速升高到最大,脉冲结束后快速下降,随后趋于平缓.脉冲激光作用期间温度迅速升高过程中由于沸腾核化与气泡对激光束的反射作用使其温升速率有一个突然降低,称其为名义沸腾核化温度.激光功率密度越高,试件表面温度也越高.

(2) 在本实验条件下,激光脉冲开始作用大约 $1\mu\text{s}$ 后,大量细小气泡群在铂电阻壁面与其周围液体中同时生成,发生了明显的均相核沸腾,其液体温度远高于对应的沸点.

(3) 相对于常规沸腾,爆发沸腾的气泡数量大约要大几个数量级,气泡生成与迁移速度较快,气泡尺寸变化不大.

(4) 随丙酮液体中乙醇体积配比的增加,爆发沸腾行为明显减弱,具体表现为气泡数量明显减少,气泡脱离与上浮时间滞后等.液体工质中加入纳米颗粒可以强化沸腾换热.采用改变非共沸混合工质的体积配比或加入纳米颗粒的办法可以控制或利用爆发沸腾现象.

参 考 文 献

- 1 Blander M, et al. Bubble nucleation in liquids. *AIChE J*, 1975, 21: 833
- 2 Corradini M I, et al. Vapor explosions in light water reactors: A review of the theory and modeling. *Progress in Nuclear Energy*, 1988, 22: 1
- 3 Asai A. Application of the nucleation theory to the design of bubble jet printers. *Japan J Applied Physics*, 1989, 28: 909
- 4 Asai A. Three-dimensional calculation of bubble growth and drop ejection in a bubble jet printer. *ASME J Fluids Engineering*, 1992, 114: 638
- 5 Park H K, et al. Pressure generation and measurement in the rapid vaporization of water on a pulsed-laser-heated surface. *J Appl Phys*, 1996, 80: 4072
- 6 Park H K, et al. Transient temperature during the vaporization of liquid on a pulsed laser-heated solid surface. *ASME J Heat Transfer*, 1996, 118: 702
- 7 Park H K, et al. A practical excimer laser-based cleaning tool for removal of surface contaminants. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 1994, 17A: 631
- 8 Iida Y, et al. Boiling nucleation on a very small film heater subjected to extremely rapid heating: Effect of ambient pressure on bubble formation by fluctuation nucleation. *JSME Int J*, 1997, 40(B): 250
- 9 Asai A. Bubble Dynamics in boiling under high heat flux pulse heating. *J of Heat Transfer*, 1991, 113: 973
- 10 Zhao Z, et al. Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin-film microheater. *Int J of Heat Mass Transfer*, 2000, 43: 281
- 11 Aihara T. Rapid transient heat transfer and heat transfer control. *JSME*, 1993, 96(892): 41
- 12 Li Ji, et al. Experimental and theoretical study on the rapid transient nucleate boiling heat transfer. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(6): 529
- 13 Jin Renxi, et al. Transient observation on the acetone pool boiling behavior under short pulsed-laser heated. *Heat Transfer-Asia Research*, 2001, 30(4): 259
- 14 Jin Renxi, et al. A study of rapid transient explosive boiling under short-pulsed laser heating. 12th International Heat Transfer Conference, 2002, 8, Paris, Grenoble, France.
- 15 淮秀兰, 等. 脉冲激光作用下表面液膜相变行为的实验观测. *工程热物理论*, 2002, 23(2): 197