

文章编号: 1001-3806(2011)06-0844-05

瓷绝缘子表面激光损伤的数值模拟和实验研究

齐丽君¹, 朱晓^{1*}, 朱长虹¹, 郭飞¹, 朱广志¹, 谷山强²

(1. 华中科技大学 光电子科学与工程学院 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074; 2. 国网电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 为了防止输电线路激光除冰过程中激光损伤绝缘子等电力设备, 采用有限元分析软件 ANSYS 对激光与普通瓷、氧化铝瓷、氧化锆瓷、堇青石瓷作用后的温度场和应力场进行了数值模拟, 得到氧化铝瓷具有较好的抗热应力破坏性能, 并进行了 Nd:YAG 激光照射绝缘子表面实验, 得到绝缘子表面温度与照射时间和损伤类型的关系。结果表明, 激光功率密度和照射时间是影响绝缘子破坏的重要因素, 瓷绝缘子表面损伤包括热损伤和热应力破坏, 破坏类型与表面温度相关。提出了瞄准、控制、激光除冰与其它除冰方式相结合等保护措施。这一结果对输电线路激光除冰工程应用中保障电力设施的安全是有帮助的。

关键词: 激光技术; 激光损伤; 数值模拟和实验; 损伤形态; 瓷绝缘子; 激光除冰

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.032

Numerical simulation and experiment research of laser damage of porcelain insulator surface

QI Li-jun¹, ZHU Xiao¹, ZHU Chang-hong¹, GUO Fei¹, ZHU Guang-zhi¹, GU Shan-qiang²

(1. National Engineering Research Center for Laser Processing, College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: During the process of laser de-icing applied in the electric grid, the electrical equipment such as insulator should not be damaged by the laser. The temperature and stress field distributions of normal porcelain, alumina porcelain, zirconium oxide porcelain and cordierite porcelain after laser irradiating are obtained by using ANSYS software. The results show that alumina porcelain has advantages in characteristics of anti-damage of thermal induced stress. The experiments of surface damage of insulator with Nd:YAG laser irradiation are explored. The relations between surface temperature and irradiating time are obtained. So is the damage form. Numerical analysis and experiment results are both show that laser power density and irradiating time are considered as the important influence factors of laser damage of the insulator. Thermal damage and thermal-stress damage are the main types of laser damage of porcelain insulator, which are related to the surface temperature after laser irradiation. The anti-damage methods of aiming and controlling, combining laser de-icing with other de-icing methods to protect the insulator are also proposed.

Key words: laser technique; laser damage; numerical simulation and experiment; damage form; porcelain insulator; laser de-icing

引言

目前输电线路除冰技术分为机械除冰、热融冰、自然脱冰、混合方式除冰等^[1-2], 但任何一种均未达到高效的标准。激光具有方向性好、能量高、定向传输效率高等优点。随着激光技术的发展, 国内外相继开展了激光除冰的研究。1976年, 激光去除远处表面冰的可行性研究已经开展^[3]。目前, 一些激光除冰系统应用

于航空领域^[4-5]。中国工程物理研究院应用电子研究所提出了采用脉冲激光器去除架空高压输电线路覆冰的方法^[6]。华中科技大学激光加工国家工程研究中心与电力部门合作开展了激光除冰的系列工作^[7-10]: 进行了低功率的 CO₂ 激光和 1064nm/532nm 的 Nd:YAG 激光除冰实验^[7-8]; 采用高功率 CO₂ 激光和 Nd:YAG 激光进行激光除冰对比实验, 得到激光除冰系统的激光器参量选择原则^[9]; 提出应用于现场的激光除冰系统车载工程化样机设计方案^[10]。激光除冰需采用高功率激光器以提高除冰效率, 为保证电力设备的安全, 激光绝不能损伤绝缘子等电力设施, 需要进行绝缘子表面激光损伤的研究。

作者简介: 齐丽君 (1977-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事工业激光器和激光与材料相互作用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zx@hust.edu.cn

收稿日期: 2010-11-17; 收到修改稿日期: 2011-05-05

作者采用有限元分析软件 ANSYS 进行激光照射瓷绝缘子表面的数值模拟,得到4种绝缘子瓷材料温度和应力的分布与激光参量的关系,实验测得绝缘子表面温度与激光照射时间的关系曲线,观察绝缘子损伤形态与温度的关系,讨论分析绝缘子表面激光损伤机理和影响因素,提出预防激光除冰中绝缘子被破坏的方法和措施。

1 ANSYS 分析模型的建立

激光照射各向同性材料的瞬态热传导方程为^[11]:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{A(x, y, z, t)}{\rho c} \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \varepsilon I, (z = 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, T 为温度, t 为时间, ρ 为密度, κ 为热导率, c 为比热容, $A(x, y, z, t)$ 为内热源, 激光照射材料表面时, $A(x, y, z, t) = 0$, ε 为材料对激光的吸收系数, I 为照射激光的功率密度。

ANSYS 是有限元分析软件,它基于能量守恒原理的热平衡方程,采用有限元法计算物体内部各节点的温度,并且可以进行热-应力两个物理场的耦合分

析^[12]。作者采用 ANSYS 软件进行热分析和热-应力耦合的数值计算,得到激光作用瓷绝缘子表面后瞬态温度场和应力场分布。

假设激光能量被绝缘子表面完全吸收,即 $\varepsilon = 1$,忽略热传导的影响,则激光作为面热流密度施加到 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 20\text{mm}$ 绝缘子体上。设 P 为激光功率, w_0 为光斑半径,模式为基模,面热流密度的表达式为:

$$I(x, y) = [P/(\pi w_0^2)] \exp[-(x^2 + y^2)/w_0^2] \quad (2)$$

瓷绝缘子是电网常用设备之一,绝缘子用瓷是一种以石英、长石、粘土为原料基础的瓷。根据瓷成分不同分为普通瓷和特种瓷。普通瓷包括长石质瓷、含氧化铝瓷、方石英瓷。特种瓷是指高温绝缘用瓷、耐热冲击用瓷等,氧化铝瓷、氧化锆瓷、堇青石瓷等是代表性用瓷。其中特种氧化铝瓷是指含氧化铝的质量分数在 0.8 以上的高氧化瓷的总称,而普通含氧化铝瓷是指含氧化铝的质量分数为 0.1~0.4 的长石质瓷的变形^[13]。根据参考文献[13]中给出的普通瓷(1号)、氧化铝瓷(2号)、氧化锆瓷(3号)、堇青石瓷(4号)的特性参量,对其进行国际单位换算并取均值,得到 ANSYS 模拟中瓷绝缘子材料的密度、热容、热导率、线性膨胀系数、杨氏模量、泊松比等物理参量(如表1所示)。

Table 1 Physical characteristics of the four types of porcelains

four types of porcelains	density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	specific heat capacity/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	linear expansion coefficient/ (10^{-6}K^{-1})	Young's module/GPa	tensile threshold/ MPa	Poisson's ratio
1: normal porcelain	2400	816	1.86	5	76	29.4~58.8 (with enamel), 24.5~44.1 (without enamel), 58.8~63.7 (with alumina and enamel), 44.1~58.8 (with alumina and without enamel)	0.2
2: alumina porcelain	3550	942	15.41	7.3	270	98~176.4 (mass fraction of alumina: 0.8~0.9), 147~235.2 (mass fraction of alumina: 0.9~0.99)	0.2
3: zirconium oxide porcelain	3800	942	5.23	4.5	132	31.36~89.18	0.2
4: cordierite porcelain	2150	879	2.16	2.5	103	24.5~34.3	0.2

2 数值分析

图1是输出功率200W、光斑直径24mm的激光作用10s后,4种瓷绝缘子表面温度、第一主应力和第三主应力沿径向分布的曲线。

4种绝缘子瓷的温度分布呈近似高斯分布(见图1a)。照射10s后中心最高温度分别上升至764℃,

176℃, 321℃和685℃。普通瓷热导率最小,中心温度最高;氧化铝瓷热导率最大,中心温度最低。

瓷绝缘子属脆性材料,采用第一强度理论分析,即材料的最大抗拉强度作为其破坏阈值。光斑边缘处出现最大拉应力(见图1b),光斑中心处出现最大压应力(见图1c)。氧化铝瓷的杨氏模量数值最大,在较小温度差时产生的拉应力最大(20.5MPa)。普通瓷的杨氏

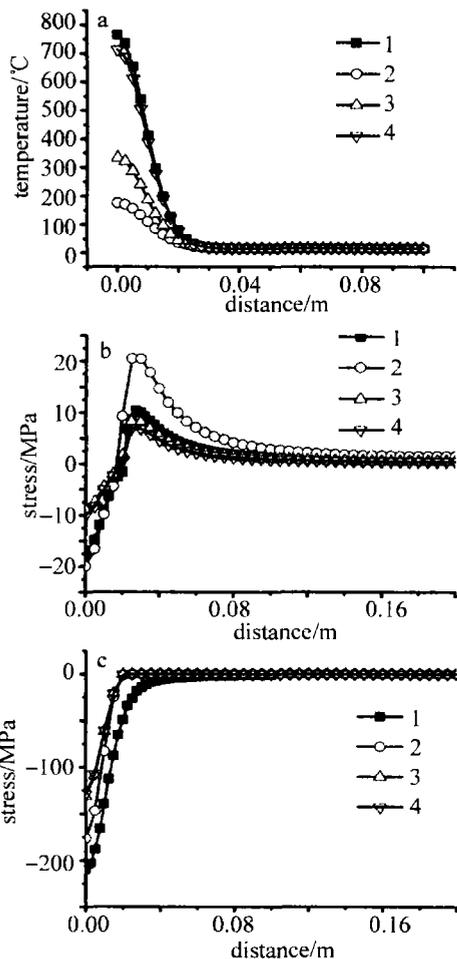


Fig. 1 Radial distribution of the temperature and stress of the four types of porcelains
a—temperature b—the first principle stress c—the third principle stress

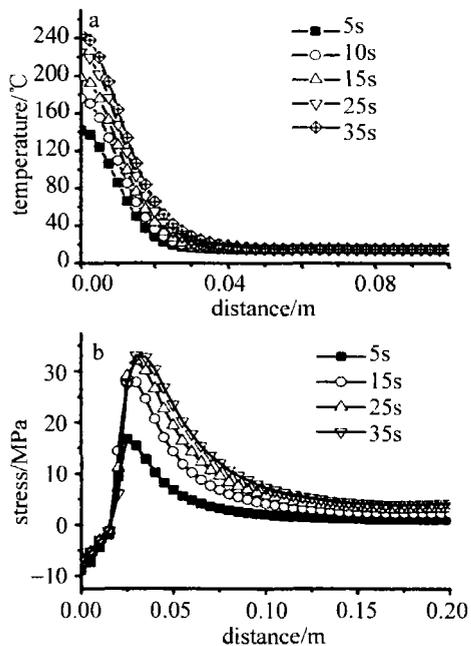


Fig. 2 Radial distribution of temperature and the first principle stress of alumina porcelain with different irradiating time
a—temperature b—the first principle stress

模量数值最小,但由于其线性膨胀系数大,温差导致的拉应力值(10MPa)大于氧化锆瓷(8.2MPa)和堇青石瓷(6.9MPa)。

综上所述,相同参量的激光照射下,氧化铝瓷中心温度上升最低,光斑边缘产生拉应力最大,而其抗拉阈值最高。因此,在4种绝缘子瓷中,氧化铝瓷有较好的抗热应力破坏的性能。

改变激光照射时间、激光功率和激光光斑大小等参量,氧化铝瓷绝缘子表面温度和第一主应力沿径向分布的曲线分别如图2~图4所示。增加激光照射时

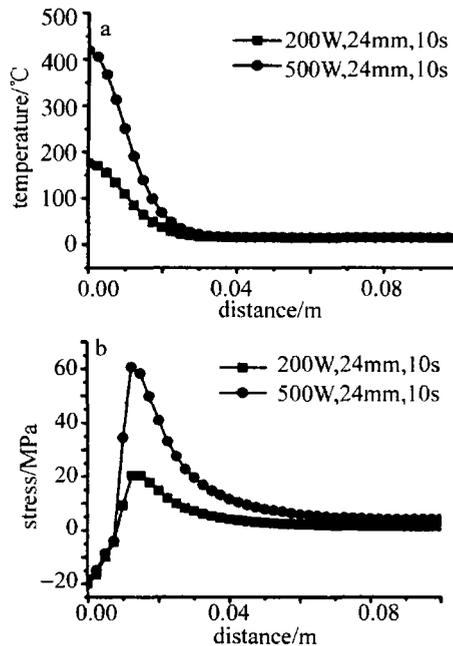


Fig. 3 Radial distribution of temperature and the first principle stress of alumina porcelain with different laser power
a—temperature b—the first principle stress

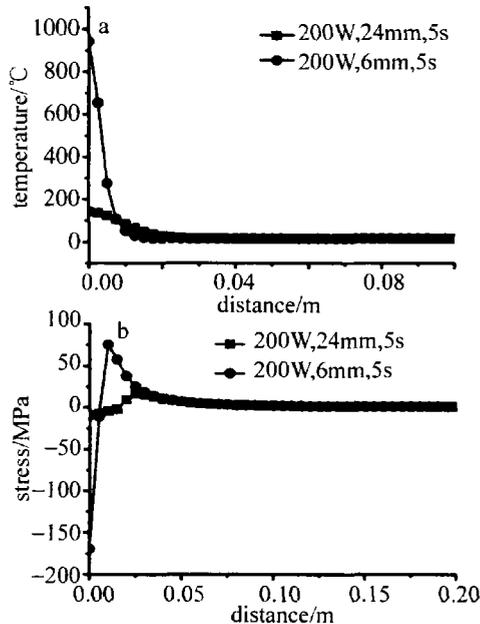


Fig. 4 Radial distribution of temperature and the first principle stress of alumina porcelain with different laser beam diameter
a—temperature b—the first principle stress

间和激光功率、减小激光光斑,作用区域的绝缘子表面中心温度会上升,最大拉应力数值会增加,并出现在光斑边缘处。中心温度和最大拉应力的数值与激光功率密度呈线性增长比例关系。

功率 200W、光斑直径 6mm 的激光作用氧化铝瓷 5s 后,最大拉应力为 75MPa,未达到氧化铝瓷抗拉阈值,而光斑中心绝缘子表面温度达到 900℃ 以上,远超过绝缘子瓷的抗热冲击能力。

因此,绝缘子的激光损伤需要综合考虑其抗热冲击能力和抗拉阈值,激光功率密度是绝缘子表面激光破坏的重要参量。

3 实验研究和分析

Nd:YAG 激光除冰同时具有熔冰和热应力除冰的效果,相同参量下 Nd:YAG 激光器比 CO₂ 激光器更适用于激光除冰系统^[9]。实验中采用长脉冲 Nd:YAG 激光系统进行绝缘子表面激光损伤实验。激光脉冲宽度 1ms,重复频率 60Hz,输出功率 268W,光斑直径 28mm。激光以斜入射的方式分别照射绝缘子样品 1、样品 2,以正入射方式照射绝缘子样品 3(如图 5 所示)。测量照射点的温度,得到绝缘子表面实时温度与激光照射时间的关系曲线(如图 6 所示)。



Fig. 5 Insulator with different irradiating modes of laser
a—sample 1 (oblique incidence) b—sample 2 (oblique incidence) c—sample 3 (normal incidence)

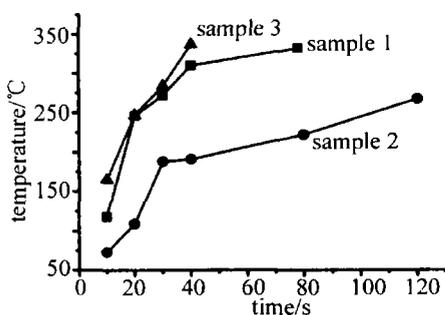


Fig. 6 Profiles of surface temperature of insulators versus laser irradiating time

绝缘子表面照射点的实时温度随着激光照射时间的增加而增加。激光以正入射方式照射,大部分能量被绝缘子表面吸收,表面实时温度与照射时间呈线性增长关系(sample 3),与数值模拟结果一致。激光以斜入射方式照射,一部分能量未被绝缘子表面吸收,表面温度随照射时间增长的趋势减缓(sample 1 和 sample 2)。

当 Nd:YAG 激光照射覆冰陶瓷绝缘子,激光能量首先被冰层吸收,表面覆冰由于温度升高而熔化,同时冰层内部形成应力分布,坚硬的冰块变得疏松,附着力降低。覆冰去除后,激光直接照射绝缘子表面,一段时间后,绝缘子会出现糊状痕迹、断裂等损伤形态。改变实验参量如照射时间、绝缘子材质等所得到的绝缘子各种损伤形态如图 7 所示。

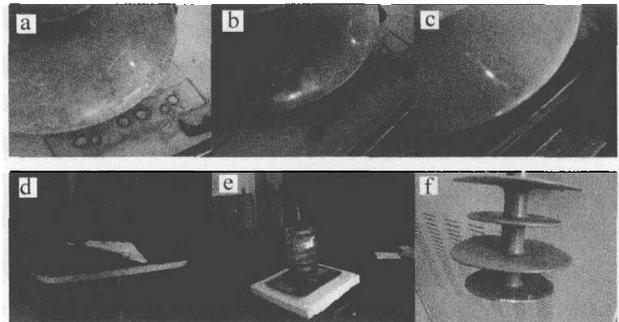


Fig. 7 Damage form of the insulator after laser irradiating

对于样品 1 和样品 2,当表面温度分别上升至 246℃ 和 267℃ 时,绝缘子表面激光照射区域出现糊状痕迹(见图 7a 和图 7c);随着照射时间的增加,样品 1 温度上升至 332℃,糊状变色痕迹更加明显,影响区域进一步扩大(见图 7b)。对于样品 3,激光照射 47s 后,绝缘子发生断裂(见图 7d),计算得到破坏阈值能量密度为 20.46J/mm²,此时,根据实验测得温度曲线推测绝缘子表面温度超过 400℃,根据数值模拟可以推测拉应力超过 50MPa。实验中激光照射表面是非自由边界,因此,绝缘子断裂是由于温差引起的拉应力超过了绝缘子抗拉阈值。当激光照射覆冰的复合材料绝缘子,冰层熔穿后,复合材料绝缘子的燃点低,受到激光照射时,易发生燃烧破坏(见图 7e),燃烧后的绝缘子部位呈现白色(见图 7f)。

瓷绝缘子材料抗热冲击能力范围 150℃ ~ 250℃^[13],激光照射时间增加,绝缘子表面温度增加,当其超过绝缘子瓷的抗热冲击能力范围时,绝缘子表面出现热损伤。当温度进一步增加,由温差引起的拉应力超过抗拉阈值,引起应力破坏,表现为绝缘子的断裂。

因此,瓷绝缘子表面激光损伤包括热损伤和热应力破坏,破坏类型与表面温度相关。激光功率密度和照射时间是影响绝缘子破坏的重要参量,这与数值模拟结果一致。

4 激光除冰中预防绝缘子被破坏的措施分析

根据实验测得的绝缘子样品 3 发生断裂的破坏阈值 20.46J/mm² 进行推算,若采用 500W/10mm 的激光除冰,除去覆冰后 3.2s 内使激光不照射绝缘子表面,

可以避免对绝缘子产生损伤。绝缘子表面损伤与激光功率密度和照射时间相关,除冰效率与激光功率密度呈正比,在激光除冰过程中,如何避免损伤是一个需要解决的问题。目前考虑的几个预防绝缘子被破坏的措施有以下几点:(1)采用破坏阈值以下的激光功率密度,但这是以牺牲除冰效率为代价,显然不可取;(2)采用瞄准系统进行定位,避免激光直接照射绝缘子表面;控制激光在适当时机输出合适的功率,例如,在即将熔穿冰层照射到设备表面时,减小激光功率;改连续照射为脉冲照射;改变光斑大小或者光斑照射的空间位置等;(3)实验研究表明,采用 Nd:YAG 激光照射后,透明坚硬的冰层会变得疏松,存在应力分布区,沿应力分布方向施加外力,冰层更易脱落^[9]。因此,当坚硬的冰层变得疏松后,辅以机械振动、滑轮刮铲等方式去除覆冰,避免激光直接照射绝缘子表面,同时可以提高除冰速度和效率。

5 结论

(1)采用激光作为表面热流密度施加到绝缘子表面的模型进行 ANSYS 数值模拟分析,比较了 4 种绝缘子瓷温度场和应力场分布,得到氧化铝瓷抗热应力破坏能力较强。(2)数值模拟和实验研究均表明激光功率密度和照射时间是影响绝缘子激光损伤的重要因素。(3)瓷绝缘子表面激光损伤包括热损伤和热应力破坏,破坏类型与表面温度相关。(4)激光除冰应用中,可以采取瞄准、控制、激光除冰与机械除冰方法相结合等措施防止绝缘子被破坏。

参考文献

- [1] JIANG X L, ZHANG L H. De-icing and anti-icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 73-76(in Chinese).
- [2] LAFORTE J L, ALLAIRE M A, LAFLAMME J. State-of-the-art on power line de-icing[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 143-158.
- [3] LANE J W, MARSHALL S J. De-icing using lasers[R]. Washington: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1976:1.
- [4] NUNNALLY W C. Onboard aircraft de-icing using lasers; US, 6206325[P]. 2001-03-27.
- [5] VEGA R, VEGA R M. Laser ice removal system; US,4900891[P]. 1990-02-13.
- [6] WAN M, YANG R, LU D J, et al. The method of removing ice of transmission lines by using lasers; China, 200810044590. 2[P]. 2008-12-17(in Chinese).
- [7] ZHU W H. Research on de-icing of power line using CO₂ laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007:1-3(in Chinese).
- [8] LIU L. The research of interaction between the pulse laser and the ice [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007:1-3(in Chinese).
- [9] QI L J, ZHU X, ZHU Ch H, et al. Deicing with Nd:YAG and CO₂ lasers[J]. Optical Engineering, 2010, 49(11):114301/1-114301/6.
- [10] GU Sh Q, CHEN J H, CAI W, et al. Experimental analysis and engineering designing of laser deicing technology for transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2243-2249(in Chinese).
- [11] JIAO J K, WANG X B, LU H. Analysis of temperature field and thermal stress field in quartz glass heated by laser beams[J]. Laser Technology, 2007, 31(4):427-430(in Chinese).
- [12] ZHANG Zh H. ANSYS thermal analysis and illustration[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007:10-11(in Chinese).
- [13] Institute of Electrical Communication Education Association of Japan. Insulator[M]. Beijing: China Machine Press,1990: 27-35(in Chinese).

(上接第 843 页)

4 结论

利用开发的实时数字全息再现系统软件,完成了对烙铁温度场观测、微小粒子速度测量、数字全息实时再现等工作,验证了该软件的可靠性,但是再现画面有延迟一直是该软件的缺陷,其原因主要由计算机硬件处理速度,算法优化程度造成。随着科学的进步,计算机处理速度不断提高,相信必能将此软件做到零延迟,达到实时的最终目的。

参考文献

- [1] ZHANG S M, CHEN L J. Hybrid-programming with MATLAB COM object in VB[J]. Microcomputer Applications, 2006, 22(4): 9-10(in Chinese).
- [2] SU W, YANG M. Using VB and MATLAB develop software of signal analysis and processing[J]. Modern Electronics Technique, 2004, 27(12):66-67(in Chinese).
- [3] WANG H Y, WANG D Y, XIE J J, et al. Study of the reconstructing methods of the digital off-axis lens-less Fourier transform hologram [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 288-290(in Chinese).
- [4] XIONG B H, WANG Zh R, ZHANG Y A. A real-time hologram recording method for obtaining high contrast of interference fringes[J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(8): 707-712(in Chinese).
- [5] KREIS T, ASWENDT P, HOFLING R. Hologram reconstruction using a digital micro mirror device[J]. Optical Engineering, 2001, 40(6): 926-933.
- [6] XIONG B H, LI J Ch. Holographic interference measurement—principles and methods[M]. Beijing: Science Press, 2009: 192-251(in Chinese).
- [7] WANG Zh L, ZHANG Y A, QIAN X F. The research of real-time observation of temperature field by using digital holography and DMD [J]. Laser Journal, 2009, 30(6): 256-261(in Chinese).
- [8] LI Y, XU F Y, JIN H Zh, et al. A fast computation method for fresnel hologram[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(3): 272-278(in Chinese).