

激光淬火过程中光的干涉和衍射结构的热作用研究*

李俊昌

(昆明工学院激光应用研究室, 昆明, 650093)

摘要: 为提高激光热处理的质量, 国内外利用光束分割再重新复合的方法, 研究成功不少光学系统。由于激光是高相干光, 光的干涉及衍射结构使复合光斑的功率密度分布复杂化, 严格研究热处理过程中光与材料的相互热作用变得非常困难。在文献[1]中, 我们从一个简单的光学系统研究出发, 从理论上证明, 当光的干涉和衍射条纹的间距相较于作用光斑的尺寸而言甚小时, 可以忽略这些条纹结构对金属材料热处理的影响, 并可以利用几何光学所预言的激光功率密度分布来进行有关的热学计算, 为使这个结论更具有一般性, 本文导出便于使用的判断光的干涉及衍射结构的热影响可否忽略的表达式, 同时给出实验结论。

关键词: 激光热处理 光干涉 衍射条纹

A study on the thermal effect of the interference and diffraction fringes of laser beam in the process of laser heat treatment

Li Junchang

(Laser Application Laboratory, Kunming Institute of Technology)

Abstract: To obtain desirable beam energy repartition and enhance the quality of laser heat treatment, many optical systems have been developed in different parts of the world by means of splitting an initial beam and recombining the resulted sub-beams in the interaction plane. Because of the high coherence nature of laser, the energy repartitions of the recombined beams are made much more complicated by the interference and diffraction fringe structures. A detailed analysis of the thermal interaction between laser beam and the target materials is thus becoming more difficult. In ref. [1], a theoretical calculation based on a simple optical system showed that the influence of the interference and diffraction fringes on the result of laser heat treatment can be neglected and provided that the intervals between these fringes are small relative to the size of the incident beam, and under such circumstances temperature field can be calculated using the energy repartition predicted by geometrical optics. To generalize this conclusion, the present paper gives mathematical expressions which can be conveniently

* 云南省应用基础研究基金资助。

used to determine whether or not the interference and diffraction fringes can be safely neglected. The results of experimental verifications are also presented.

Key words: laser heat treatment optical interference diffraction fringes

一、引言

为提高激光热处理的质量,国内外利用光束分割再重新复合的方法,研究成功许多光学系统^[2~6]。由于激光是高相干光,光的干涉及衍射结构使复合光斑的功率密度分布复杂化,严格研究热处理过程中光与材料的相互热作用变得非常困难。虽然,对于非熔融的金属材料热处理问题,原则上我们可以利用离散卷积的快速算法进行温度场的计算^[7],但是,由于光斑功率密度结构的空变化率很高,离散取样点的数量必须非常大才能充分反映光斑的分布结构,这使得通常的微机内存难于满足计算的需要。为此,在文献[1]中,我们从一个简单的光学系统研究出发,从理论上证明,当光的干涉和衍射条纹的间距相较于作用光斑的尺寸而言甚小时,可以忽略这些条纹结构对金属材料热处理的影响,并可以利用几何光学所预言的激光功率密度分布来进行有关的热学计算。为使这个结论更具有一般性,同时建立起一个可供实际使用的判断光的干涉及衍射结构的热影响可否忽略的判据,我们对此进行讨论。

二、理论分析

激光热处理中,由于激光与材料的相互作用时间甚短,热影响区局限于材料表层,我们可将被处理工件视为半无限大、导热性能不随温度变化的均匀介质。在材料表面建立 xy 直角坐标, z 轴指向材料内部。一束功率密度分布为 $P(x, y)$ 的激光以速度 $v = v_x I + v_y J$ (其中 I, J 分别为 x, y 方向的单位矢量)扫描材料表面时,在 τ 时刻于材料表面区域建立的温度增量场 ΔT (以下简称温度场)可以表示为^[1,7]:

$$\Delta T(x, y, z, \tau) = \int_0^\tau dt \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \frac{\rho P(x', y', y' - v_y t)}{4k\alpha^2 [\pi(\tau - t)]^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}{4\alpha(\tau - t)}\right] \quad (1)$$

式中, k, α 分别为材料的导热系数及热扩散系数, ρ 为材料表面对光能的吸收系数。为便于讨论光的干涉及衍射结构的热影响,我们对上式中的一些量作如下处理。

(1) 根据光斑上光的干涉或衍射结构的形式,从研究热影响的角度而言,我们可以将具有沿 x 方向干涉及衍射条纹的光斑的分布视为几何光学分布与具有一定幅度的余弦(或正弦)函数的叠加^[1]

$$P(x, y) = E(x, y) + E_m \cos(2\pi x/F) \quad (2)$$

式中, $E(x, y)$ 为由几何光学所规定的分布, E_m 为“条纹”结构的振幅,其数值为小于我们研究区域内 $E(x, y)$ 极大值的一正的常量,而 F 为模拟条纹的间距。

这里,我们将“条纹”存在的区域延拓到正负无穷主要基于以下三条很自然的理由:1. 数学上的这种延拓可使(1)式的积分解析运算成为可能;2. 对于我们所研究的情况,“条纹”结构的空变化率通常远大于(1)式中被积函数中高斯函数的变化率。这些延拓部分所产生的“积分求和”作用由于交替反号,在数值上相互抵消。因此不会对我们的估计运算带来实质上的影响;

3. 鉴于积分内高斯函数的特性,其结果基本上取决于观察点 (x, y) 为中心、 $\sqrt{8\alpha(\tau-t)}$ 为半径的圆形区域内被积函数的值。因此,延拓部分不会对计算结果带来明显影响。

这样,利用积分的线性性质,分别计算(2)式中这两项的热作用,比较它们之间相对值的大小,便可估计“条纹”结构所可能形成的热影响。

(2)由于扫描速度及材料表面对光能的吸收系数对这种相对比较不发生影响,我们令 $v=0$, $\rho=1$ 使问题简化。

(3)我们将问题的讨论局限于 $z=0$ 的材料表面,因为热扩散过程在本研究中是由表层向内部进行的,如果材料表面可以忽略“条纹”结构的热影响,材料内部的热影响亦可忽略。

从以上考虑出发,(1)式可以写为以下两个部分:

$$\Delta T(x, y, 0, \tau) = \Delta T_1(x, y, \tau) + \Delta T_2(x, y, \tau) \quad (3)$$

式中,

$$\Delta T_1(x, y, \tau) = \int_0^\tau dt \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \frac{E(x', y')}{4k\alpha^{3/2}[\pi(\tau-t)]^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\alpha(\tau-t)}\right]$$

$$\Delta T_2(x, y, \tau) = \int_0^\tau dt \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \frac{E_m \cos(2\pi x'/F)}{4k\alpha^{3/2}[\pi(\tau-t)]^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\alpha(\tau-t)}\right]$$

数学上不难证明, ΔT_2 可以简化为:

$$\Delta T_2(x, y, \tau) = \frac{E_m F \cos(2\pi x/F)}{2k\pi} \operatorname{erf}\left(\frac{2\pi \sqrt{\alpha\tau}}{F}\right) \quad (4)$$

在通常情况下,由于没有具体给出 $E(x, y)$ 的形式, ΔT_1 的表达式不能进一步简化,但分析 ΔT_1 的表达式可知,式中积分值主要取决于以 (x, y) 为中心、 $\sqrt{8\alpha(\tau-t)}$ 为半径的圆形区域内被积函数的值。由于金属材料的激光热处理(例如激光淬火)通常是一个短暂的物理过程,当 τ 甚小时, $\sqrt{8\alpha(\tau-t)}$ 甚小,为简化积分运算,可以对 $E(x, y)$ 采取线性近似,即将 $E(x', y')$ 在 (x, y) 点按台劳级数展开,并仅取前三项:

$$E(x', y') = E(x, y) + \frac{\partial E}{\partial x'} \Big|_{x,y} (x' - x) + \frac{\partial E}{\partial y'} \Big|_{x,y} (y' - y) \quad (5)$$

将上式代入 ΔT_1 的表达式,经运算整理我们得到:

$$\Delta T_1(x, y, \tau) = \frac{E(x, y)}{k \sqrt{\pi}} \sqrt{\alpha\tau} \quad (6)$$

显然,只要我们记住上式是“ τ 甚小”时的结论,如果以下的讨论不违反 τ 甚小这个原则,其讨论结果可以成立。利用(4),(6)两个表达式,我们可以立即求得以模拟条纹结构的热作用与光斑几何光学分布的热作用之比DF:

$$DF = \frac{\Delta T_2(x, y, \tau)}{\Delta T_1(x, y, \tau)} = \frac{E_m F \cos(2\pi x/F)}{2 \sqrt{\pi\alpha\tau} E(x, y)} \operatorname{erf}\left(\frac{2\pi \sqrt{\alpha\tau}}{F}\right)$$

为估计通常遇到的条纹结构对热作用的影响,我们令条纹结构的振幅与光斑几何光学分布的比为 $E_m/E(x, y) = P_m(x, y)$,显然,根据物理意义,在光斑内 P_m 将始终满足 $0 < P_m < 1$ 。此外,由于表达式中误差函数及余弦函数的最大值均为1,我们可以得到该式取绝对值后的极大值 DF_{\max} :

$$DF_{\max} = \frac{P_m F}{2 \sqrt{\pi\alpha\tau}} \quad (7)$$

该表达式表明,光斑“条纹结构”的热影响大小与条纹的宽度及辐度成正比,与工程上所述的 τ

时间内的热扩散距离 $\sqrt{\alpha\tau}$ 成反比。这是一个有物理意义的结论。因为若在 τ 的时间间隔内热扩散距离大于条纹的宽度,则在材料表面对应于光斑条纹与条纹之间区域的温度场是邻近条纹区域之间相互热扩散的叠加结果。从温度分布的角度来看必然“模糊”了与作用光束相对应的“条纹”结构。当 τ 时间内的热扩散距离 $\sqrt{\alpha\tau} \gg F$ 时,观察点的温度值是观察点周围甚大区域材料吸收光能后相互热扩散的结果。其数值主要取决于在 τ 时间内该区域吸收的激光总能量,与作用激光功率密度的具体结构无关。反之,若 $\sqrt{\alpha\tau} \ll F$,则激光作用下材料表面的温度分布将较好地保持了作用光斑的功率密度分布结构,我们必须考虑光斑的“条纹”结构对温度场的影响。

至此,(7)式成为一个比较简明的判断“条纹结构”是否会对热作用结果发生明显影响的判据。由于该式是在“ τ 甚小”或光斑的几何光学分布在 $\sqrt{8\alpha\tau}$ 为半径的区域内可以用(5)式的线性近似描述的条件下求得的。我们只要遵照这个条件,便可对实际上遇到的光斑的热作用研究提供方便。以下,我们以一种矩形光斑变换装置为例,来说明该式的应用,并给出相应的实验结论。

三、光斑干涉及衍射结构热作用的估计及实验验证

文献[5,6]分别提出了性能相似但结构不同的两种矩形光斑变换装置,利用傅里叶光学理论,我们非常满意地描述了合成光斑的功率密度分布。在图1中,我们给出了对文献[6]描述的

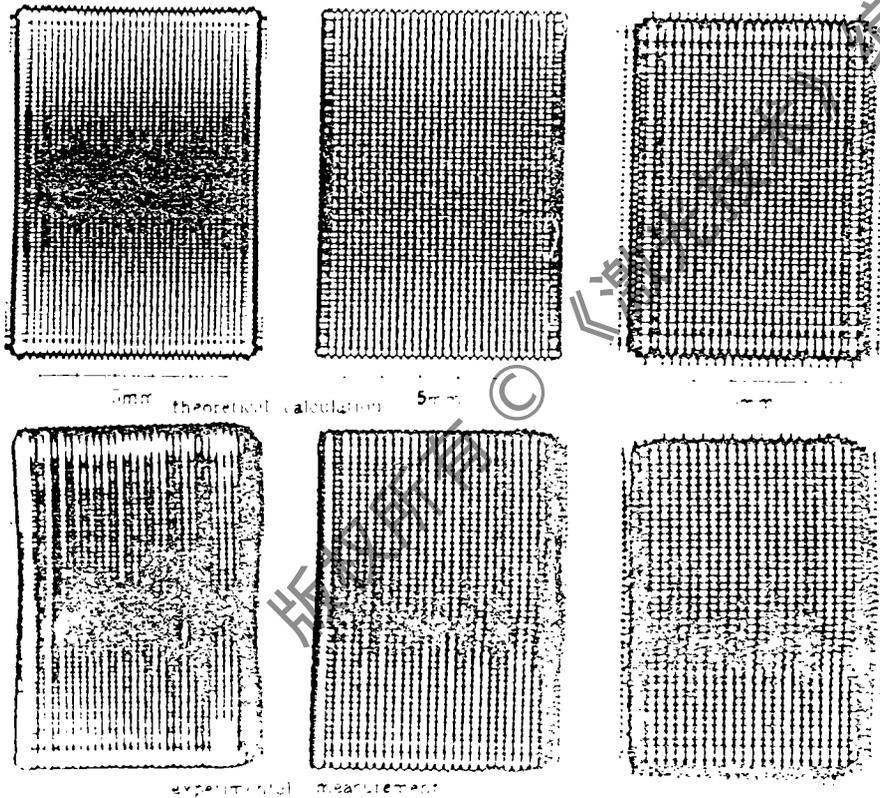


Fig. 1 A comparison between experimental measurement and theoretical calculation of the optical transformation for the square source modification device described in ref. [6]

反射式矩形光斑变换装置的几组理论计算与实验测量相对比的例子。由图可见,光的干涉和衍射结构使合成光斑的功率密度分布变得非常复杂。为表明几何光学计算与傅里叶光学计算的区别,同时对于我们在热作用计算中是采取了怎样的功率密度分布近似有一个明晰的概念,我们在图 2 中给出了某观察平面上用傅里叶光学计算结果绘出的光斑及光斑在两个相互垂直的轴线方向上用两种光学理论计算的功率密度分布曲线^[6]。

根据理论分析及实际测量,这种矩形光斑变换系统象平面附近光斑的衍射作用可以忽略,但四瓣光束的叠加形成了强烈的干涉条纹,其条纹间距约为 0.2mm, P_m 约为 1/2,光斑尺寸约为 6mm×9mm。对于常用金属材料,热扩散系数 $\alpha \approx 10\text{mm}^2/\text{s}$,若令(7)式中 $DF_{\text{max}} = 10\%$,我们可以求得 $\tau \approx 0.01\text{s}$ 。该结论表明,当激光与材料相互作用的时间大于百分之一秒时,在材料表面光的干涉结构的热作用影响相较于我们利用几何光学近似所求得温度值已下降到 10% 以下。当 $\tau = 0.01\text{s}$ 时我们求得 $\sqrt{8\alpha\tau} \approx 1\text{mm}$ 。考察光斑几何光学分布可知(见图 2),合成光斑的功率密度分布在光斑内变化平缓,在光斑内 1mm 为半径的尺度范围内激光功率密度变化甚小,利用(5)式表述的线性近似可以足够好地反映光斑的几何光学分布,满足使用上判据的条件。而对于一个实际的激光热处理,激光与材料的等效作用时间通常在 1s 的量级,其数值甚大于百分之一秒。虽然在 τ 较大时光斑的“条纹”结构对热作用的影响不能再由(6)式描述,但由于热量的进一步扩散,

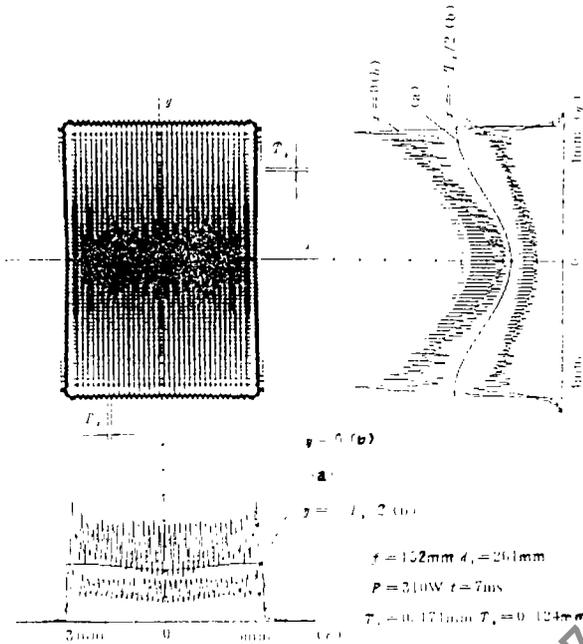


Fig. 2 A comparison of the beam profiles calculated by (a) geometrical optics and (b) Fourier optics

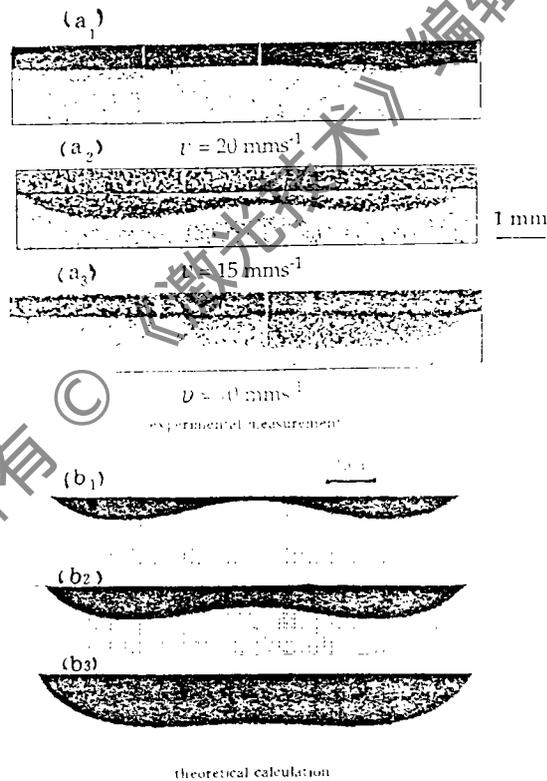


Fig. 3 A comparison of experimental results (a₁, a₂, a₃) with the theoretical predictions of geometrical optical treatment (b₁, b₂, b₃)

DF_{max} 将进一步减小的趋势是肯定的,这时光斑的“条纹”分布对热作用的影响将下降到很小的数值。因此,我们完全可以忽略光斑干涉结构对热作用的影响,直接利用几何光学近似来处理有关热作用问题。

根据几何光学理论,我们在文献[8]中重新求出了光学系统后合成光斑的功率密度分布,导出了激光与材料热作用的表达式,并且利用以 AC_1 为界的简易相变模型,研究成功预测相变硬化带形貌的应用软件,其计算结果与实际测量的误差仅在 10% 左右^[8],为优化热处理工艺提供了很大的方便。作为实例,图 3 给出了三组相变硬化带形貌的理论预测与实验测试比较的结果^[8,9]。

四、讨 论

在激光热处理的应用研究中,国内通常使用复杂高阶模组合输出的激光设备(例如上海光机所产 HJ-3 型千瓦 CO_2 激光器),让光束通过简单聚焦系统后便进行热处理。由于不存在光束的叠加及分割问题,光的干涉及衍射对光束功率密度分布的畸变不明显,但是,根据对激光功率密度分布的检测^[10]可知,在光斑内部可以找到多个分布无规的能量极大值,给有关热学计算带来不便。利用本文的研究结果,在一定条件下我们可将激光功率密度分布作进一步简化,利用经过平滑化^[11]的分布来进行热作用分析,无疑将为热处理工艺的优化研究提供方便。

参 考 文 献

- 1 Li J, Merlin J. *Journal de physique* ■, 1991;1:331~348
- 2 Kawamura Y, Itagaki Y, Toyoda K *et al.* *Opt Commun*, 1983;48:44
- 3 Dagenais D M, Woodroffe J A, Itzkan I. *Appl Opt*, 1985;24:671
- 4 李俊昌. *中国激光*, 1989;16(10):598~602
- 5 李俊昌. *光学学报*, 1992;12(6):540~544
- 6 Li J, Merlin J, Renard C. *J Opt*, 1993;24(2):55~64
- 7 Li J, Yuan L. *Chinese Journal of Lasers*, 1992;1(3):277~282
- 8 Li J, Merlin J, Renard C. *Journal de physique* ■, 1993;3:1479~1508
- 9 Renard C, Li J. *Revue de Metallurgie*, Juin, 1991;341~354
- 10 李俊昌. *中国激光*, 1993;A20(2):93~97
- 11 [日]田村秀行等著,赫荣威等编译. *计算机图象处理技术*. 北京:北京师范大学出版社,1988

作者简介:李俊昌,男,1946年出生。研究员,室主任。1984年10月至1985年10月赴法国里昂应用科技学院学习,接受大功率激光功率密度分布均匀化的课题研究,理论上提出利用“分束叠象”的方法获得均匀方形激光斑的两种光学系统,研究成果引起国外积极关注。先后于1988年,1991年及1992年应邀赴法进行光学系统的合作研制和工业应用研究。参加法方撰写激光热处理专著及指导博士研究生,并成为昆明工学院与法国里昂应用科技学院合作培养博士研究生的导师。一直从事与激光热处理相关的光学变换及热作用研究。作为项目负责人,先后完成云南省科学技术委员会、中国有色金属工业总公司以及国家教委优秀年轻教师基金在该领域的应用基础研究课题。在国内外重要学术刊物上发表过30余篇论文,有多篇文章被美国《工程索引》、《物理文摘》、《电气与电子学文摘》以及俄国《物理文摘》等国外重要检索机构和学术杂志摘录。