

激光热处理 优化控制研究

李俊昌 著

冶金工业出版社

激光热处理优化控制研究

李俊昌 著

北 京
冶金工业出版社
1995

责任编辑 谭学余
版式设计

图书在版编目(CIP)数据

激光热处理优化控制研究/李俊昌著. —北京:冶金工业出版社, 1995. 12

ISBN 7-5024-1752-4

I. 激… II. 李… III. 激光热处理-控制, 最佳化-数学模型-研究 IV. TG156.99

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 12692 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

国防工业出版社印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1995 年 12 月第 1 版, 1995 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.625 印张; 224 千字; 266 页; 1-1000 册

30.50 元

序 言

李俊昌教授是我在 1985 年访问法国里昂应用科学技术学院时认识的，那时他作为访问学者在那里工作。据介绍他在激光物理方面作出了很出色的工作，特别在激光光束质量方面有独到的见解。因为国内这些基础性的研究工作开展不够，影响激光器的制造和激光器的应用，所以我鼓励他回国后在这方面发挥更大的作用。

李俊昌教授于 1990 年回国后，又回到昆明工学院（现昆明理工大学），承担了国家教委优秀年轻教师基金项目“激光热处理优化控制理论与实践”的研究课题，经过数年的努力，取得了富有创造性的成果。在多年研究与实践的基础上，李俊昌教授撰写了这本近 30 万字的著作《激光热处理优化控制研究》，由冶金工业出版社出版。这本书不但对激光热处理的理论与实践进行了阐述与分析，如激光热处理优化控制数学模型的建立、金属激光热处理中的热作用和相变硬化带的计算及热应力的研究等，这无疑对应用激光进行热处理有指导意义，而且对激光及激光器的测量与光学系统也作了深入的介绍，从而为从事激光热处理的工作人员提供了有益的借鉴。最后在附录中列出有关激光光学所涉及的公式与定理以及常用函数等，都是很有用处的。

总之，李俊昌教授的这本书不但对激光热处理工作者有很高的参考价值，对激光焊接与激光器设计也有一定的指导意义。希望通过这本书的广泛发行，对我国激光器的制造与激光器的应用产生较大影响，改变当前低水平重复的现象。

师昌绪

1995 年 5 月 14 日于北京

目 录

1 引论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 激光功率密度分布对热处理结果的影响	(2)
1.3 激光光束的优化变换	(6)
1.4 光束扫描速度对激光淬火结果的影响	(8)
1.5 工件边界对热作用的影响及作用光束的 实时变换	(8)
1.6 激光热处理实时控制系统探析	(10)
参考文献	(11)
2 激光热处理优化控制的数学模型	(13)
2.1 激光热处理优化控制的简易模型	(13)
2.1.1 具有表面热源的半无限大材料热传 导方程的解及其快速计算	(14)
2.1.2 激光热处理工艺优化的数学原则	(15)
2.1.3 数值计算实例	(16)
2.1.4 以 A_{C1} 为界的相变模型	(19)
2.1.5 常规热处理和激光热处理的区别	(20)
2.1.6 激光热处理优化的简易模型	(21)
2.2 碳钢球化体的激光相变硬化数学模拟	(24)
2.2.1 数学模型	(25)
2.2.2 数值分析	(29)
2.2.3 温度场计算及潜热校正问题	(31)
2.3 碳钢球化体激光相变硬化模型的实验验证	(32)
2.3.1 实验方法与输入参数	(33)
2.3.2 实验结果与分析	(34)
2.4 片状珠光体碳钢的激光相变硬化的理论计 算及实验验证	(39)

2.4.1	理论分析	(39)
2.4.2	数值计算与实验结果的比较	(40)
2.4.3	实验结果分析	(42)
	参考文献	(45)
3	红外大功率激光的测量	(47)
3.1	直边衍射条纹的间距公式及其在激光测量中的应用	(47)
3.1.1	平面波菲涅耳直边衍射条纹的间距公式	(47)
3.1.2	球面波菲涅耳直边衍射条纹的间距公式	(52)
3.1.3	菲涅耳直边衍射条纹的间距公式在光学测量中的应用	(52)
3.2	激光功率密度实时测量系统 LBA 的研究	(57)
3.2.1	“LBA”检测仪的测量原理	(57)
3.2.2	直接来自 LBA 探测仪的测试信号特征分析	(58)
3.2.3	测量信息处理实例	(65)
3.3	红外大功率激光功率密度分布的简易测试	(66)
3.3.1	测量方法简介	(68)
3.3.2	理论证明	(69)
3.3.3	减小测量误差的简单讨论及测试实例	(72)
3.4	二氧化碳激光功率密度分布测量的数据处理	(74)
3.4.1	热敏纸及常用复印白纸的热敏特性	(74)
3.4.2	图像取样及数据处理	(75)
3.4.3	测试数据的定标	(78)
3.4.4	对衍射影响的补偿	(79)
3.5	图像叠加法测量大功率激光功率密度分布	(79)
3.5.1	图像叠加法测量原理	(80)
3.5.2	激光束功率密度的实际测量	(82)
3.5.3	图像叠加法的测量误差	(84)
3.6	大功率红外激光功率密度分布的实时检测	(85)
3.6.1	实时采样装置简介	(85)

3.6.2 理论研究	(86)
3.6.3 讨论	(90)
参考文献	(92)
4 激光变换光学系统	(93)
4.1 简单分割叠加变换系统	(93)
4.1.1 高斯光带变换系统	(94)
4.1.2 矩形光斑变换装置	(104)
4.1.3 简单分割叠加变换系统小结	(106)
4.2 分束叠像光学变换系统	(108)
4.2.1 分束叠像变换与简单叠加变换的理论比较	(108)
4.2.2 反射式方形激光斑叠像器	(118)
4.2.3 衍射计算在光学设计中的应用	(130)
4.3 激光热处理实时变换系统	(134)
4.3.1 光学系统结构简介	(134)
4.3.2 理论研究	(135)
4.3.3 理论与实验结果的比较	(140)
参考文献	(141)
5 金属非熔凝激光热处理中的热作用及相变硬化	
带计算	(143)
5.1 热传导方程及激光热作用分析方法	(143)
5.1.1 热传导方程	(144)
5.1.2 金属非熔凝激光热处理的热作用求解方法	(145)
5.1.3 热传导方程的解析解	(146)
5.2 热传导方程解析解的讨论	(149)
5.2.1 利用“像光源”处理简单边界问题	(149)
5.2.2 热传导方程的解析解与数值计算的比较	(150)
5.2.3 几个常用的温度场计算公式	(155)
5.3 相变硬化带的理论计算	(160)
5.3.1 利用温度场解析公式及 A_{c1} 为界的相变 模型直接计算	(160)

5.3.2 相变硬化带的快速估计	(164)
参考文献	(168)
6 几种光学变换系统的热作用研究	(169)
6.1 非熔凝激光热处理中光的干涉和衍射结构的 热作用研究	(169)
6.2 矩形光斑叠像器的热作用研究	(174)
6.2.1 光斑功率密度分布的几何光学描述	(174)
6.2.2 温度场计算公式的建立	(177)
6.2.3 数值计算和实验测量的比较	(178)
6.3 激光宽带聚焦系统及其热作用研究	(182)
6.3.1 光学系统简介	(182)
6.3.2 光学系统的几何光学讨论	(182)
6.3.3 温度场计算公式及实验研究	(184)
6.4 激光热处理光束实时变换系统的热作用	(185)
6.4.1 实时变换系统的几何光学讨论	(185)
6.4.2 光学系统热作用公式的建立及热作用的实 时模拟	(187)
参考文献	(190)
7 激光热处理热应力研究	(191)
7.1 铁基材料热处理后表面的残余热应力 形成分析	(194)
7.2 激光热处理热应力计算	(194)
7.2.1 热弹性理论的基本方程	(195)
7.2.2 半无限大介质表面有移动面热源时的准定 常热应力	(208)
7.2.3 激光热处理中的热冲击问题	(208)
7.3 利用 X 射线衍射法测量残余应力	(212)
7.3.1 晶体 X 射线衍射的布拉格方程	(213)
7.3.2 残余应力的 X 射线衍射测量	(214)
参考文献	(220)

8 激光热处理实验与应用实例	(221)
8.1 简单聚焦光束热处理	(221)
8.1.1 实验装置及材料	(221)
8.1.2 热处理参数的选择原则	(224)
8.1.3 实验结论与应用实例	(225)
8.2 矩形光斑叠像器对硬化带形貌的控制研究	(228)
8.2.1 实验装置及材料	(228)
8.2.2 热处理工艺参数的设计	(228)
8.2.3 实验结论及讨论	(229)
8.3 矩形光斑叠像器用于沟槽表面相变硬化	(232)
8.3.1 实验装置及材料	(232)
8.3.2 热处理工艺参数的设计	(232)
8.3.3 实验结论	(236)
参考文献	(240)
附录 A 光波衍射的非涅耳近似	(241)
A.1 基尔霍夫积分定律	(241)
A.2 平面衍射物的基尔霍夫衍射公式及瑞利- 索末菲公式	(244)
A.3 衍射计算的非涅耳近似	(248)
附录 B 二维傅里叶变换	(252)
B.1 定义和存在条件	(252)
B.2 傅里叶变换定理	(253)
B.2.1 线性定理	(253)
B.2.2 相似性定理	(253)
B.2.3 相移定理	(253)
B.2.4 帕色伏定理	(253)
B.2.5 卷积定理	(253)
B.2.6 自相关定理	(254)
B.2.7 傅里叶积分定理	(254)
附录 C 几个常用函数	(255)

C.1	矩形函数	(255)
C.2	sinc 函数	(255)
C.3	符号函数	(256)
C.4	阶跃函数	(256)
C.5	三角函数	(256)
C.6	园域函数	(257)
C.7	狄拉克 δ 函数	(257)
C.7.1	δ 函数的定义	(257)
C.7.2	δ 函数的主要性质	(259)
C.8	梳状函数	(260)
附录 D	常用函数的傅里叶变换对	(261)
附录 E	热物性系数为常量的无限大连续介质中热 传导方程的解	(262)
作者后记		(266)

1 引 论

自从本世纪 60 年代激光问世以后,激光技术作为一门举世瞩目的高新技术,几乎在各行各业都获得了重要的应用。二十多年前,利用大功率激光实现材料表面相变硬化的可能性便在实验室里得到证实,很快,美国通用汽车公司将这项技术第一个用于工业生产。我国自 70 年代末研制成功千瓦级二氧化碳激光器之后,激光热处理的工业应用亦取得了重要的成就,从此,人们始终未中断对这项技术的应用研究。但是,时至今日,激光热处理在工业上的应用情况显得远远低于最初的估计,即使是在汽车工业,激光热处理在国内外也未广泛用于工业生产。因此,本章将对这个问题进行简单讨论。

1.1 概 述

激光热处理中,金属材料的激光淬火是一项最重要的内容。实验研究表明,如果不对激光淬火提出过高的要求,利用连续输出功率在千瓦级的二氧化碳激光设备进行铁基材料表面的热处理并不困难。然而,不同激光设备之间的工艺移植并非易事。即使是使用同一台激光设备,采用同一个热处理工艺,对同类工件进行同样的处理,也会得到有时是不能忽视的热处理差别。工业生产中,维护激光淬火工艺的可重复性是保证产品质量的需要。但是,对激光淬火的深入研究表明,这是一个涉及光束质量、工件的热物理特性、工件的几何形状以及光作用方式等众多因素的复杂技术,对设备的配置以及操作人员的素质都有较高的要求。设备昂贵和技术复杂的问题较大幅度地提高了工件热处理的成本,降低了这项技术对传统热处理工艺的竞争力。也许,这就是这项技术未能迅速推广的主要原因。

但是,激光淬火和其它传统的热处理工艺相比(例如工件整

体的盐浴淬火、工件表面的感应淬火),它具有可以精确控制热处理区域及工件热变形小等一系列优点。只要能够较好地控制激光淬火的工艺过程,原则上可以用价格便宜、易于加工的材料制造工件的基体,在工件的关键部位用激光进行处理,便能显著提高产品的质量,简化工件的生产工艺,降低工件的成本,增强激光淬火对其它传统热处理工艺的竞争能力。

为控制激光淬火工艺,必须研究激光淬火的物理过程。根据材料的相变理论(例如铁基材料的马氏体相变),同类材料经热处理后得到不同的淬火组织主要是观察区域经历了不同的热循环所引起的。所谓激光淬火工艺的可重复性及可移植性较差,是热处理的过程中实际上未能准确控制工艺条件的结果。因此,找出影响被处理区域热循环的主要因素,建立控制这些因素的实际手段,是这项技术可以在工业上推广应用的重要环节。

理论及实验研究表明,材料被处理区域热循环的变化取决于作用光束、作用时间(或光束对材料表面的扫描速度)、被处理工件材料的导热性能以及工件的几何形状等多重因素。因此,对热循环的控制事实上是对这些因素的综合控制。但是,在这众多的因素中,保证工件的几何形状、导热性能以及作用时间等参数的一致性相对于保证作用光束参数的一致性而言比较容易。因此,本书将侧重于对热处理中作用光束以及光束与金属材料的相互热作用进行研究。下面从激光与材料相互热作用的观点出发,逐一対光束质量对激光淬火的影响进行讨论。

1.2 激光功率密度分布对热处理结果的影响

激光光束的功率密度分布是由光束的横模(通常简称“模式”)决定的。根据激光理论,激光光束的模式主要取决于激光谐振腔的结构形式^[1]。由于不同型号激光设备谐振腔的结构通常不相同,因此,输出光束的模式也不相同。作为实例,图 1-1 分别给出国产 HJ-3 型千瓦二氧化碳激光设备(图 1-1a)以及法国 CILAS CI4000 二氧化碳激光设备(图 1-1b)在几种不同功率输出时由热敏纸采

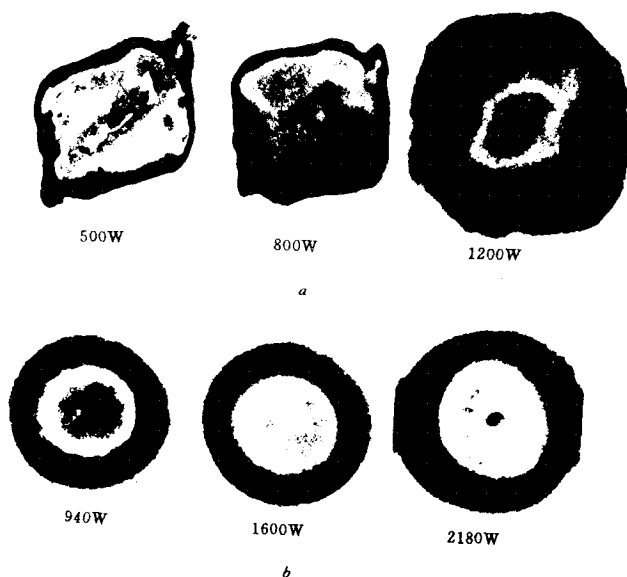


图 1-1 两种不同型号的激光设备输出光束功率密度分布比较

样获得的光斑图样。比较光斑图样可以看出，HJ-3 型二氧化碳激光设备输出的光束呈复杂的高阶模式，在光斑截面上有多个能量极大值，而 CILAS CI4000 二氧化碳激光设备在输出功率较低时，光斑中央区域为光斑能量分布的极大值，可以将其分布近似为基模高斯分布。但是两种激光设备在不同输出功率时光束的模式均在变化，例如，CILAS CI4000 二氧化碳激光器的输出光束随着功率的增加，光束中央功率密度逐渐降低，最后衍变成为中央功率密度分布极小的环状分布。而 HJ-3 型二氧化碳激光器的光束在功率由 800W 至 1200W 变化时，无论功率密度或是光斑外轮廓均在发生明显变化。在激光对金属材料进行热处理的情况下，激光模式结构的差异必然引起热作用的差异。因此，不但这两种激光设备之间热处理工艺很难存在一种简单的移植关系，甚至对

于同一台设备, 由于作用光束的功率密度分布在形式及范围上都随光束功率发生变化, 这必然对工艺制定带来极大的不便。

鉴于事实上激光淬火通常采用激光对材料表面进行扫描的方式, 现进一步讨论在扫描作用方式下光束功率密度分布的变化对热处理的影响。为简明起见, 图 1-2a 绘出了三种功率相同但功率

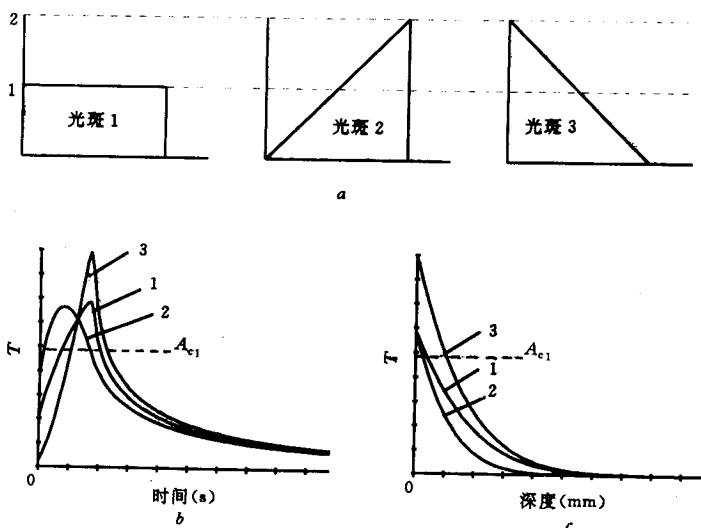


图 1-2 三种功率相同但功率密度分布不同的光束
在同一热处理工艺条件下的热作用比较

密度不同的光斑能量分布剖面曲线^[2]。其中, 光斑 1 为功率密度分布均匀的矩形光斑; 光斑 2 为右端有能量极大而左端极小的光斑; 而光斑 3 为能量分布与光斑 2 镜向对称的另一种形式。假设让这三种光斑均沿右方对同种铁基材料进行扫描淬火热处理, 理论分析不难求得在同一观察位置的热循环曲线(图 1-2b), 以及某一时刻材料热影响区温度沿深度方向的变化曲线(图 1-2c)。如果假设热循环曲线中三种曲线的峰值均超过了马氏体相变的临界温度 A_{c1} , 比较三条曲线可以看出, 光斑 2 对保证碳的扩散时间优于其

余两种光斑。但是,如果逐步降低作用激光的输出功率,光斑3则可以相对于其余两种光斑在较小功率的条件下实现材料表面的相变硬化。

虽然,这个简单讨论是在三种人为的理想化假设下进行的,但对问题的研究不失一般意义。因为在激光设备的实际使用过程中,激光谐振腔通常不可能保持在理想状态,轻微的失调不但降低了激光设备的电光转换效率,同时会破坏光斑功率密度分布对称性。作为实例,图1-3分别给出图1-1涉及的两台激光设备在谐振腔轻微失调时测得的另外两个光斑图样。



图1-3 激光谐振腔轻微失调时两种激光设备的畸变分布光斑实例

a—国产 HJ-3 型(900W); b—法国 CILAS CI4000(24000W)

与图1-1比较可以看出,谐振腔轻微失调将导致光束功率密度分布的非对称,在同一激光输出功率段完全有可能从同一设备获得功率密度分布差异甚大的光束。根据上述分析,利用这种光束进行热处理时,工件表面的处理结果与光束的扫描方向有关。因此,如果没有一个对激光光束功率密度分布较好的监测手段,简单地依靠光束输出功率的监测来控制工艺过程,则有可能出现不能重复原工艺的危险。本书对激光功率密度分布的检测进行了认真的研究。研究成功一种方便适用的检测方法^[3~5]。第3章将对此进行详细介绍。

1.3 激光光束的优化变换

对激光相变硬化带进行分析可以发现,经同一功率,而功率密度分布不同的光束作用后,相变硬化带形貌及力学性能可能有明显的差别。一般来说,利用直接来自激光器的或者通过简单聚焦系统的光束,材料经热处理后相变硬化带的形貌为中央较深的月牙形(图 1-4),与通常情况下希望经过热处理后获得一个均匀硬化带的愿望有较大的距离。

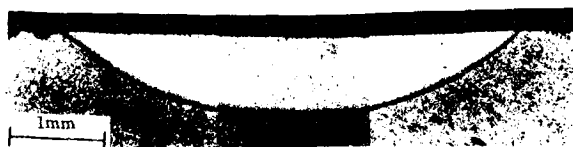


图 1-4 直接利用未经变换光束处理后相变硬化带形貌

进一步研究表明,由于不同工件的形状及使用环境的千差万别,一种工件有可能对应于一种优化的硬化带要求。理论上可以证明^[6],每种优化的热处理期待值事实上对应于作用光束的一种特定的功率密度分布。换言之,如果不只满足于激光淬火过程的实现,而期望获得一个优化的热处理结果,存在一个对作用光束功率密度分布进行优化变换的问题。那么,什么样的光束是优化的呢?通常,人们认为在激光热处理时作用光束在材料表面形成截面为方形或矩形的均匀光斑是一种较理想的光束结构。为此,近十多年来,国内外研制出了不少光束变换系统(例如文献[7,8,9])。从准确控制激光作用区域的观点而言,具有整齐边界的光束无疑是一种较好的光束。很容易证实,即便是一个简单的平面边界工件,如果期望获得一个均匀的淬火带,事实上需要的是在作用光斑边沿有能量突起的光束^[6]。如果考虑到被处理工件的特殊形状,理想的矩形均匀光斑事实上可能导致很不理想的热作用结

果。为说明这个问题,图 1-5a 给出一个在应用研究中碰到的实例。图中,工件期望被处理部位的截面具有形状为半圆形但两侧是相交成一定角度的直线边界,当功率密度分布为矩形的均匀光斑以图示方式照射在工件表面时,如果忽略光的偏振效应以及二次反射光对材料的照射问题,实际热作用区域吸收光能的量值可由图 1-5c 给出。很明显,如果期望被处理区域具有一个均匀的硬化带,矩形均匀光斑并不是一种可取的优化形式。

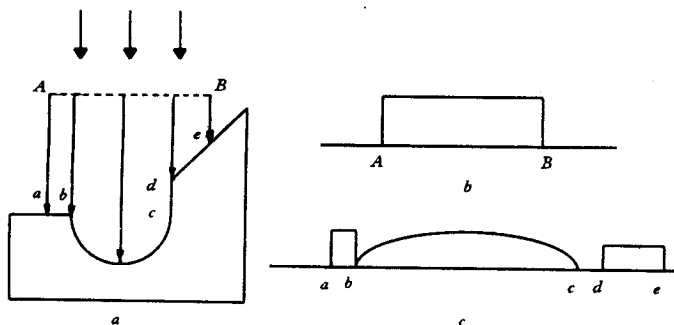


图 1-5 被处理工件的表面形状为非平面时对理想矩形分布光束的热吸收情况

a—入射光束与工件剖面的位置关系; b—入射光束的理想矩形分布;
c—材料表面吸收能量展开图

根据上述分析可以看出,为实现激光淬火的优化,必须变换作用光束的功率密度分布。并且,由于实际热处理问题的千变万化,不存在一种固定的普遍适用的光束功率密度分布的优化形式,一个理想的光束变换系统,必须具有根据实际需要变换出不同形式的光束功率密度分布的能力。

在变换光束的研究领域中,作者曾经从理论上提出过不少光学系统^[10~15]。其中,反射式矩形光斑变换装置是一种性能较好的光学系统^[12,15]。利用这种光学系统,不但获得了边界十分整齐且