

文章编号: 1001-3806(2003)02-0130-04

脉冲激光熔凝和相变硬化的研究现状*

黄开金^{1,2} 谢长生¹ 许德胜²

(¹华中科技大学模具国家重点实验室, 武汉, 430074) (²华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 综述了脉冲激光熔凝和相变硬化的国内外研究现状, 就目前该领域中存在的问题及其发展方向提出了自己的看法。

关键词: 脉冲激光; 激光熔凝; 激光相变硬化

中图分类号: TN249 文献标识码: A

State of the arts of pulsed laser remelting and pulsed laser phase transformation

Huang Kaijin^{1,2}, Xie Changsheng¹, Xu Desheng²

(¹ National Laboratory of Plastic Forming Simulation and Mould Technology, HUST, Wuhan, 430074)

(² National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: This paper summarizes the state of the arts of pulsed laser remelting and pulsed laser phase transformation. Finally, the existent problems and the developing trend of pulsed laser remelting and pulsed laser phase transformation are introduced in this paper.

Key words: pulsed laser; laser remelting; laser phase transformation

引 言

目前, 国内外激光热处理主要采用连续大功率 CO₂ 激光器, 其次是连续 YAG 激光器, 其优点是能处理较大面积的工件。而脉冲固体激光用于局部小面积热处理, 与连续 CO₂, YAG 激光器相比, 可获得更好的热处理性能。这是由于脉冲固体激光功率密度高、加热速度更快、工件基体受热量很小、自冷却速度也更快、组织细化、可获得更高的硬度、工件变形小。而且由于脉冲激光加热和冷却时间极短, 因此表面不会产生氧化和脱碳现象。下面就脉冲激光熔凝和相变硬化的研究现状进行综述。

1 脉冲激光熔凝和相变硬化所用激光器的种类

目前, 用于激光熔凝和相变硬化的脉冲激光器

* 湖北省自然科学基金、华中科技大学模具国家重点实验室及激光技术国家重点实验室开放基金联合资助项目。

作者简介: 黄开金, 男, 1968 年 10 月出生。博士, 副教授。从事激光技术应用和纳米材料应用方面的研究工作。

收稿日期: 2002-05-20; 收到修改稿日期: 2002-09-04

主要有脉冲钕玻璃激光器、脉冲红宝石激光器、脉冲 Nd: YAG 激光器(包括毫秒、纳秒、皮秒和双倍频等)、脉冲 Nd: YLF 激光器、脉冲准分子激光器(包括 XeCl, KrF 等)、脉冲 Ar⁺ 激光器、脉冲碘激光器和脉冲 TEA CO₂ 激光器等几类。

2 脉冲激光熔凝和脉冲相变硬化所研究的材料种类及其重要内容

2.1 材料种类

脉冲激光熔凝和相变硬化所研究的材料种类见表 1。可见, 所有材料种类均涉及到。

2.2 脉冲激光熔凝后熔凝层的组织结构变化

国内外学者研究的重要内容之一是脉冲激光熔凝后熔凝层的组织结构变化问题, 具体情况见表 2。可见, 脉冲激光熔凝后熔凝层的组织结构会发生重要变化。

2.3 脉冲激光熔凝后熔凝层的性能变化

脉冲激光熔凝后熔凝层的显微硬度、耐磨性和耐蚀性等性能变化问题是国内外学者研究的重要内容之二, 具体情况见表 3。可见, 脉冲激光熔凝后熔凝层的综合性能得到提高。

表 1 脉冲激光熔凝和相变硬化所研究的材料种类

材料种类	脉冲激光熔凝 ^[1-16]	脉冲激光相变硬化 ^[12,17-25]	
高速工具钢	W6Mo5Cr4V2(M2), R9K5, W18Cr4V(T1) 等	R9M4K8, R6M5K5, R6M5 等	
碳素工具钢	T8, U8 等	U7, U8, U10, U10A 等	
冷作模具钢	CrWMn, X30CrMoN151, Cr12(D3) 等	9CrWMn(O1), Cr12MoV(D2) 等	
钢	结构钢	30KhGSA 等	
	普通碳钢	AISI4340, St40, S45C, 45 等	
	不锈钢	4Cr13, AISI410, AISI304 等	
高温合金	incoloy 800HT 等	/	
硬质合金	VK8 等	VK6, VK8 等	
铸铁	合金铸铁(Fe3.4C-0.9Mn-0.5Cr-0.5Mo-0.4Si-0.2Ni)、 球墨铸铁(Fe3.6C-2.7Si-5Mn-0.1S-0.1P-0.5Cr) 等	过共晶可锻铸铁等	
有色金属及其合金	镁合金	模铸 AZ91D, AM60M, VMD10 等	/
	铝及其铝合金	Al, 铸铝合金 AS5036, 变形铝合金 D19 等	2024T62 铝合金等
	钛及其钛合金	Ti, Ti-15Al-20Nb, Ti-14Al-21Nb 等	/

表 2 脉冲激光熔凝后熔凝层的组织结构变化

组织结构变化情况	文献来源
用脉冲钨玻璃激光熔凝 W18Cr4V(T1) 高速工具钢时, 在激光熔化区观察到 M 体、A _R 体、 δ Fe 体、M ₆ C 碳化物和胞状偏析的 W、V 和 Cr。而熔化区成分均匀和组织细小得益于高的冷却速率。回火后有细析出物, 胞状 M ₆ C 碳化物和板条状 MC 碳化物形成。随着回火温度的增加, 熔区显微硬度增加得益于 A _R 体转变 M 体和碳化物的析出。	[1]
用脉冲红宝石激光熔凝合金铸铁凸轮轴时, 其表面形成激冷组织和大量碳化物而提高表层硬度。	[2]
用脉冲 Nd:YAG 激光熔凝球墨铸铁时, 发现 Fe ₃ C 异常迅速石墨化, 获得了含超细石墨球和既含超细石墨球又含快速凝固共晶 Fe ₃ C 的两种组织。这主要归因于脉冲激光束辐照产生强烈周期性起伏温度场的微退火(microannealing)效应。	[3]
用脉冲激光熔凝 R9K5 高速钢和 KV8 硬质合金时, 出现 M ₆ C 碳化物的溶解和 VC 碳化物的析出。	[4]
用脉冲激光熔凝铸 Al 合金 AS5036 时, 一方面因共晶体和 θ 初始析出相的溶解而引起显微硬度的降低, 另一方面再结晶过程中的细晶粒又引起显微硬度的大幅度提高。	[5]

表 3 脉冲激光熔凝后熔凝层的性能变化

熔凝层的性能变化	文献来源
用脉冲红宝石激光熔凝 316L 不锈钢后可大大提高其抗点蚀性, 原因在于敏化不均匀微观组织的消除。	[6]
用脉冲 Nd:YAG 激光熔凝 W6Mo5Cr4V2(M2) 高速工具钢时, 可提高其显微硬度和耐磨性, 而且实际处理车床用刀具后, 其使用寿命延长。	[7]
用脉冲 Nd:YAG 激光熔凝模铸 AZ91D 和 AM60M 镁合金表面后, 其耐盐水腐蚀性并未降低, 反而显示有某些增强因素存在。	[8]
用纳秒脉冲 Nd:YAG 激光熔凝 incoloy 800HT 后, 能降低其腐蚀率。	[9]
用脉冲 Nd:YAG 激光熔凝 Ti-15Al-20Nb 合金后, 其表层硬度提高两倍, 且抗蚀性提高。	[10]
用脉冲 Nd:YAG 激光熔凝可锻铸铝可提高其表面耐磨性和耐蚀性。	[11]
用脉冲 Nd:YAG 激光熔凝过共晶可锻铸铁可提高其滑动摩擦系数。	[12]

2.4 脉冲激光熔凝所涉及的基础理论问题研究概括

国内外学者研究的重要内容之三是有关脉冲激光熔凝时的温度场与流场、应力场与变形场等方面的基础理论问题。具体情况见表 4。可见, 目前脉冲激光熔凝研究所涉及的基础理论问题包含了温度场与流场、应力场与变形场, 但未涉及浓度场和组织

场。

2.5 脉冲激光相变硬化后硬化层的性能变化

脉冲激光相变硬化后硬化层的显微硬度、耐磨性、疲劳寿命等性能变化问题是国内外学者研究的重要内容之一。具体情况见表 5。可见, 脉冲激光相变硬化后硬化层的综合性能同样得到提高。

表4 脉冲激光熔凝时的温度场与流场、应力场与变形场

已经研究的基础理论问题	文献来源
对脉冲 Nd:YLF 激光加热的数值分析结果表明, 变形随时间变化, 且峰值变形与激光功率成正比。	[13]
研究了用 2 维平面应变模型模拟线状脉冲 Nd:YLF 激光辐射不锈钢表面所引起温度场和热弹塑性变形过程, 并用有限元方法求解。	[14]
研究了考虑辅助气流作用下的纳秒脉冲激光加热温度场的数值模拟, 并将低 Re 数条件下的 $k-\epsilon$ 模型用于计算湍流。	[15]
以合金相变多区域统一模型为基础, 利用数值模拟方法, 对脉冲 Nd:YAG 激光表面熔凝过程的非稳态温度场和熔区内的流场进行了理论分析。能量方程求解中考虑了固液相变潜热的吸收与释放、合金元素气化热损失、自然对流与辐射热损失; 动量方程求解过程中考虑了热表面张力与浮力联合驱动流。结合实验条件计算了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在低频脉冲熔凝情况下熔区的形状和尺寸, 并与实验解剖进行比较。结果表明, 在占空比较小时, 系列脉冲中每一脉冲形成的表面熔区形状和尺寸可用定点轴对称脉冲模型很好地近似。	[16]

表5 脉冲激光相变硬化后硬化层的性能变化

硬化层的性能变化	文献来源
用脉冲激光硬化处理硬质合金 VK6 和 VK8 时, 其磨损率最低。	[17]
用脉冲激光硬化处理高速钢时, 二次析出碳化物数量与脉冲宽度有关, 且工具寿命因显微硬度的增加而提高 3~5 倍。	[18]
用脉冲激光硬化处理调质结构钢和轴承钢后, 可提高它们的疲劳极限寿命。	[19]
采用“点阵硬化”加工方式时, 对于油淬冷作工具钢而言, 仅需脉冲激光硬化 20%~40% 的面积, 其抗磨损耐磨性就差不多和 100% 激光硬化试样的相似。	[20]
用脉冲激光硬化处理铝合金后, 可提高其疲劳寿命。	[21]

2.6 脉冲激光相变硬化所涉及的基础理论问题研究概括

国内外学者研究的重要内容之二是有关脉冲激光相变硬化时的温度场和应力场等方面的基础理论

问题。具体情况见表 6。可见, 目前脉冲激光相变硬化研究所涉及的基础理论问题包含了温度场和应力场, 但未涉及变形场和组织场。

表6 脉冲激光相变硬化时的温度场和应力场

已经研究的基础理论问题	文献来源
实现了计算步进脉冲 Nd:YAG 激光辐射所引起的温度场及热应力场。	[22]
用有限差分方法计算了移动边界条件下的脉冲激光硬化 Fe-Mn 合金的温度场, 并和调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光及红宝石激光的计算结果进行了比较。	[23]
研究了通过电子-声子碰撞机制实现能量交换的脉冲激光加热问题。在研究过程中, 采用了运动学理论方法, 且不考虑相变过程, 仅考虑热传导过程。最后对不同激光脉冲密度、脉宽和重复频率条件下的热积累过程进行数值模拟。	[24]
傅里叶加热理论并不适合短脉冲类型的激光加热问题。通过 1 维傅里叶加热模型、两个方程和运动学理论模型预测 10^{-9} 、 10^{-10} 和 10^{-11} 秒级脉宽激光加热的温度场, 发现在基材中均得到相似温度场形状。但当脉宽降至 10^{-10} s 和 10^{-11} s 时, 用 1 维傅里叶加热模型预测的温度偏高, 而用两个方程和运动学理论模型所预测的温度形状相似, 在这种情况下, 电子温度快速上升而晶格温度增加缓慢。	[25]

3 脉冲激光熔凝和相变硬化研究存在的主要问题及发展方向

3.1 薄试样的脉冲激光熔凝和相变硬化变形问题研究较少

综合现有文献报道, 发现目前脉冲激光熔凝和相变硬化所用试样的厚度不超过 15mm, 而且试样厚度从纳米级(如薄膜)变化到毫米级。人们常讲脉冲激光熔凝和相变硬化的试样变形小, 这仅对中厚试样(5mm 以上)成立, 而对于 3mm 以下的薄试样

而言, 在脉冲激光熔凝和相变硬化过程中试样的变形问题同样非常严重, 而有关这方面的研究内容国内外报道不多(见表 4 和表 6)。

3.2 超短脉冲激光加热理论问题及其对材料组织结构和性能影响方面的研究不够深入

随着激光技术的发展, 激光器已经由传统的连续类型发展到脉冲类型, 单脉冲持续时间由毫秒(10^{-3} s)、纳秒(10^{-9} s)逐步发展到皮秒(10^{-12} s)、飞秒(10^{-15} s)的程度。目前, 国内外对于连续类型激光加热理论问题研究较深入, 而对于脉冲类型激光

加热理论问题研究不够深入,特别是超快条件下激光加热理论及其对材料组织结构和性能影响等方面还有很多基础问题未得到解决。

余宁等人指出,傅里叶导热定律($q = -\kappa \nabla T$)作为热传导理论的本构方程描述了热流量和温度分布之间的关系,其数学表达式为抛物线型偏微分方程,其假设成立条件之一是认为热是速度无限的扩散行为^[26]。但是在20世纪40年代,人们发现在液氮温度附近热以19m/s的速度传递,进一步研究指出,实质上热是以有限速度运动的波行为,从而提出非傅里叶导热定律($q = -\kappa \cdot \nabla T - \tau$),其数学表达式为双曲线型偏微分方程。傅里叶导热定律适用于瞬态导热,其温度分布曲线是连续的;非傅里叶导热定律适用于强瞬态导热,其温度分布曲线是间断的。非傅里叶导热定律更真实地反映物体遭受温度突变初始瞬间材料表面的温度分布。当热作用时间大于材料弛豫时间10倍时,非傅里叶导热作用减弱,其温度分布可按照傅里叶导热定律计算,反之应按照非傅里叶导热定律计算。不过,非傅里叶效应作用距离很小,对于半无限大物体,其深度取决于热扩散速率和弛豫时间,表达式为 $x = 10(\alpha\tau)^{1/2}$ 。

因此,对于纳秒至飞秒级脉冲激光加热理论及其对材料组织结构和性能影响问题进行深入的研究就显得尤为重要。而有关这方面的研究报道不多。

3.3 发展方向

目前,用于脉冲激光熔凝和相变硬化的脉冲激光持续时间多为毫秒或纳秒级。随着各种晶态、非晶态薄膜及薄壁件的大量采用,对其进行脉冲激光熔凝和相变硬化处理以提高其性能的要求,迫使人们必须正视其温度场与流场、应力场与变形场等基础问题的研究。另一方面,随着脉冲激光持续时间的缩短,研究超快条件下激光加热理论及其对材料组织结构和性能等方面的影响也是必须解决的。因此,今后脉冲激光熔凝和相变硬化研究的重点应该集中在有关因超快脉冲激光加热而引起薄膜和薄壁件的温度场与流场、应力场与变形场及其对材料组织结构和性能影响方面。

参 考 文 献

- [1] Kusinski J. *Physical Metallurgy and Materials Science*, 1988, A19(2): 377~ 382.
- [2] Girzhon V V, Anpilogov D I. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 1997(4): 11~ 13.
- [3] 王华明, Bergmann H W. *材料研究学报*, 1998, 12(1): 99~ 101.
- [4] Bekrenev A N, Gureev D M, Laletin A P *et al.* *Physics & Chemistry of Materials Treatment*, 1990, 24(2): 127~ 129.
- [5] Dufour J P, Gerland M, Darquey P. *Scripta Metallurgica*, 1989, 23(4): 483~ 488.
- [6] Mudali U K, Pujar M G, Dayal R K. *J Materials Engineering and Performance*, 1998, 7(2): 214~ 220.
- [7] Kusinski J. *Applied Surface Science*, 1995, 86(1): 317~ 322.
- [8] Dube D, Fiset M, Couture A *et al.* *Materials Science and Engineering A: Microstructure and Processing*, 2001, 299(1~ 2): 38~ 45.
- [9] Yilbas B S, Khaled M, Gondal M A *et al.* *Opt & Lasers in Engng*, 1999, 32(2): 157~ 172.
- [10] Yilbas B S, Sami M. *J Materials Engng and Performance*, 1996, 5(1): 124~ 128.
- [11] Gadag S P, Srinivasan M N. *Appl Phys A: Materials Science & Processing*, 1996, 63(4): 409~ 414.
- [12] Gadag S P, Srinivasan M N. *Wear*, 1994, 173(1~ 2): 21~ 29.
- [13] Iwamoto M, Ye M, Grigoropoulos C P *et al.* *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 1998, 34(8): 791~ 804.
- [14] Chen G F, Xu X F, Poon C C *et al.* *American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD*, 1998, 36(1~ 4): 49~ 57.
- [15] Yilbas B S, Shuja S Z, Budair M O. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(7): 1023~ 1038.
- [16] 雷永平, 史耀武, 周家谨. *中国激光*, 1996, 23(4): 369~ 375.
- [17] Yares'ko S I. *Sverkhtverdye Materialy*, 1993(6): 39~ 47.
- [18] Ivashov G P, Grigor'yants A G, Safonov A N *et al.* *Soviet Forging and Sheet Metal Stamping Technology*, 1987(6): 92~ 95.
- [19] Hosenfeldt T, Grupp M, Bomas H *et al.* *HTM Haertere Technische Mitteilungen*, 2000, 55(6): 361~ 371.
- [20] Xue L, Islam M U, McGregor G. *Materials and Manufacturing Processes*, 1999, 14(1): 53~ 65.
- [21] Peyre P, Fabbro R, Berthe L *et al.* *J Laser Applications*, 1996, 8(3): 135~ 141.
- [22] Yilbas B S, Sami M Sh, Shahzada Z. *Opt & Lasers in Engng*, 1998, 30(1): 25~ 37.
- [23] Sarady I, Magnusson C, Wei L Y. *SPIE*, 1994, 2119, 170~ 182.
- [24] Yilbas B S, Sami M. *J Phys D: Appl Phys*, 1997, 30(22): 3088~ 3095.
- [25] Yilbas B S, Shuja S Z. *J Phys D: Appl Phys*, 1999, 32(16): 1947~ 1954.
- [26] 余宁, 胡明娟, 潘健生 *et al.* *材料热处理学报*, 2001, 22(3): 28~ 31.