

文章编号: 1001-3806(2003)01-0008-03

## 轧辊表面脉冲激光三维微改形过程参数分析\*

何云峰<sup>1</sup> 都东<sup>1</sup> 刘莹<sup>2</sup> 岁波<sup>1</sup> 熊丽娟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>清华大学机械工程系, 北京, 100084) (<sup>2</sup>清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京, 100084)

**摘要:** 从研究和分析脉冲激光参数入手, 提出了轧辊表面一种球冠状微凸新形貌的脉冲激光三维微改形(毛化处理)新机制, 并最终成功获得了预先优化设计的新的三维微观形貌尺寸。在试验中, 通过运用激光毛化新机制, 对激光脉冲参数(脉冲波形、脉冲能量、脉冲宽度、离焦量等)进行了分析研究和匹配, 并获得了该新形貌及尺寸。另对脉冲激光参数与轧辊主要形貌参数的影响规律作了进一步的研究。结果表明, 单脉冲能量的大小及其空间分布是形成球冠状微凸新形貌和尺寸的关键因素。

**关键词:** 激光毛化; 三维表面形貌; 参数分析

**中图分类号:** TG176 **文献标识码:** A

## Parametric analysis of pulsed Nd YAG laser texturing process

He Yunfeng<sup>1</sup>, Du Dong<sup>1</sup>, Liu Ying<sup>2</sup>, Sui Bo<sup>1</sup>, Xiong Lijuan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

(<sup>2</sup> The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** According to the investigation and analysis of pulsed laser parameters, we put forward a new principle of laser texturing of a new roll surface roughness profile (slight protuberance similitude of spherical cap) and successfully achieve the optimization predesign 3D surface roughness profile and size. In the experiment, based on the new principle of laser texturing, the laser parameters, such as pulse waveform, pulse energy, pulse duration, defocusing, are primely selected and matching. Consequently, the surface roughness profile and size have been successfully obtained. Furthermore, the influence rules between pulsed laser parameters and main profile parameters of roll have been analyzed and investigated. The results show the magnitude and space distribution of single pulse energy are the key factors of producing the new surface roughness profile and size.

**Key words:** laser texturing; 3D surface roughness profile; parametric analysis

## 引言

随着激光技术的飞速发展, 脉冲激光加热技术得到越来越广泛的应用, 在工业生产应用中解决了许多常规方法无法解决的难题。激光毛化技术正是由此应运而生, 它采用高能量、高重复频率的脉冲激光在冷轧辊表面按预定形貌和几何分布进行熔凝造形, 以生产高品质的冷轧薄板。激光毛化与传统的毛化方法相比, 其优点是: 可以加工表面硬度极高的轧辊, 延长轧辊寿命; 毛化辊表面粗糙度均匀、可控, 能明显改善毛化板深冲性能和涂镀性能; 此外, 激光

毛化过程无噪声、无污染, 是一种绿色生产工艺。

在轧辊表面脉冲激光三维微改形(即激光毛化)过程中, 脉冲 Nd: YAG 激光由于其参数具有很大的可控性, 因此, 如何匹配激光参数, 将直接决定表面改形的外形轮廓和尺寸。在以往的研究中<sup>[1, 2]</sup>, 轧辊表面的三维形貌基本上都是呈火山口状(四周为凸肩, 中间为凹坑), 如图 1 所示, 要得到从摩擦学角度优化设计的图 2 所示外形尺寸的球冠状微凸形貌非常困难, 至今未见相关文献报道, 它需要对激光参数(包括脉冲波形、脉冲能量、脉冲宽度、离焦量等)进行细致的分析和研究。

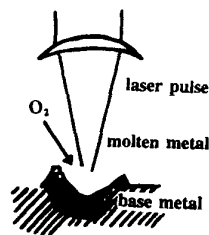


Fig. 1 Traditional fusion surface roughness of laser texturing

\* 教育部优秀青年教师基金资助项目。

**作者简介:** 何云峰, 男, 1977 年 9 月出生。博士研究生。从事激光加工技术、激光加工过程的建模与仿真方面研究。

**收稿日期:** 2002-01-22; **收到修改稿日期:** 2002-03-21

采用现有 500W 脉冲 Nd: YAG 激光器对轧辊

表面进行了毛化处理,通过对轧辊表面脉冲激光三维微改形新机制和激光器参数的研究,及对轧辊表面主要形貌参数的分

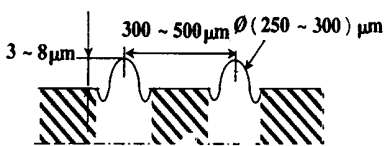


Fig. 2 New profile and size of roll surface

析和比较,得出了脉冲激光参数对轧辊表面三维形貌的影响规律,成功获得了如图2所示的新的球冠状微凸形貌和尺寸。

## 1 激光三维微改形新机制

以往的激光毛化技术,包括CO<sub>2</sub>激光毛化和YAG激光毛化,其基本原理都是将调制后的高能量密度和高频脉冲激光,按一定的方式编组,等间隔地逐点辐照在按一定速度运动着的轧辊工作表面,并在其表面上扫描成高密度斑点,形成微小熔坑,同时辅以一定成分、一定压力的辅助气体沿一定角度侧吹熔池中的熔融物,使其按制定要求堆积到熔池边缘。由于聚焦后的激光功率密度很高,使得轧辊表面金属在很短时间内熔化(并有部分汽化)和凝固,从而形成了众多火山口状(四周为凸肩,中间为凹坑)的微粗糙体<sup>[3]</sup>。激光快速熔凝使其表面形成了熔凝层与相变硬化层的叠加硬化,强化了轧辊表面凸肩的硬度和抗疲劳性能,从而可应用于钢板的毛化。

针对由摩擦学理论优化设计的轧辊表面球冠状微凸新形貌和尺寸,本试验的基本原理是利用Nd:YAG脉冲激光器,在对其脉冲激光能量波形进行改形的基础上,将一定脉冲宽度范围的激光施加峰值功率增益 $T_r$ 离焦、等间隔地逐点辐照在按一定速度运动着的轧辊工作表面,并在其表面扫描成高密度的斑点,同时辅以一定压力的氩气侧吹熔池,促使其产生微凸的三维微观形貌。能够产生微凸新形貌的关键在于:(1)很好匹配了脉冲激光的各项工艺参数,如脉冲波形、脉冲宽度、脉冲能量、离焦量及激光扫描速度等,使得脉冲激光输入能量的施加时间及空间能量分布得到控制,因此,使得轧辊表面金属在很短时间内熔化和凝固并且有效地抑制金属的汽化;(2)依据快速熔凝理论,对于过冷熔体因干扰而产生的凸缘尖端其生长速率最大;(3)一定压力的氩气沿一定角度对熔池的侧吹扰动也有利于微凸形貌的产生;(4)由于激光照射轧辊表面的时间非常短,通常伴随着组织的变化。当激光能量密度适中时,金属组织产生相变,比体积增大产生体膨胀而易

形成微凸。

在板材成形过程中,传统的环状凹陷可以起到一定的储油、冷却和容屑的作用,因而在钢板的冲制过程中起到了润滑及抗擦伤的效果。然而从摩擦学及润滑理论上分析,板材表面最理想的微观形貌应为球面或椭球凹陷,因为环状凹陷在板材的冲压过程中形成的流体膜润滑方式不能形成收敛的油楔效应,易产生干涉光纹;而球面或椭球凹陷则能够使钢板在冲压过程中形成独特的微水坑润滑机构,有效减小了摩擦力和磨损,减少了冲压裂纹的产生,同时形成上述微坑也有利于钢板表面相应形成的微突体表面圆滑,尖锐少以保证板面具有足够小的粗糙度。因此,在轧辊表面形成的新的微凸形貌优于传统的火山口状形貌。

## 2 脉冲激光波形分析

采用EM 500型能量计、TH 730 200MHz 1Gs/s示波器采集500W脉冲Nd:YAG激光的能量输入波形,如图3所示。图中横、纵坐标单位标尺分别为每一大格200μs和100mV,白线为无 $T_r$ (峰值功率增益)时的能量输入波形,脉冲输入能量 $E_p=52\text{J}$ ,脉冲宽度 $T_p=0.5\text{ms}$ ,脉冲频率 $f=5\text{Hz}$ ,输出平均功率 $P_m=10\text{W}$ ;黑线表示施加 $T_r$ 情况下的能量输入波形,脉冲输入能量 $E_p=64\text{J}$ ,脉冲宽度 $T_p=0.5\text{ms}$ ,脉冲频率 $f=5\text{Hz}$ ,输出平均功率 $P_m=12\text{W}$ 。

由图3可以看出,脉冲激光的脉冲宽度是一个脉冲周期内激光输入能量的施加时间<sup>[4]</sup>,峰值功率增益 $T_r$ 实质上是在脉冲宽度时间范围内对激光能量的分布进行调整,使得脉冲宽度后期部分能量前移,从而提高了脉冲宽度前期激光的瞬时能量密度,但脉冲宽度时间内能量总和保持不变,实际上也就是对脉冲波形进行改形处理。

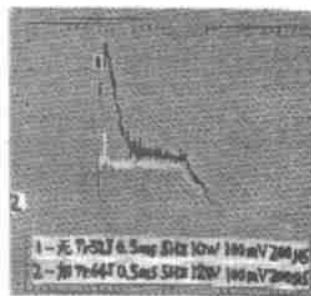


Fig. 3 Example of the real power pulse used in the study

## 3 试验材料与工艺

在实验中,激光毛化试样选择高碳铬轴承钢GCr15,试样为圆柱形,直径17mm,厚度6mm。具体化学成份如表1所示,整体淬火后,表面硬度达到60HRC,经研磨后表面粗糙度为 $R_a=0.04\mu\text{m}$ 。

采用最大平均功率为500W的脉冲Nd:YAG

激光器, IGBT 开关型激光电源, 输出激光波长为 1064 nm, 脉冲频率范围 1Hz~ 100Hz, 脉冲宽度 0.5ms~ 9ms, 稳定度在  $\pm 5\%$  之内。具体的试验参数设置如表 2 所示。

Table 1 Chemical compositions of GCr15

chemical compositions/ wt %	
GCr15	C= 0.95~ 1.05, Mn= 0.25~ 0.45, Si= 0.15~ 0.35, P $\leq$ 0.025, S $\leq$ 0.025, Cr= 1.40~ 1.65

Table 2 Parameters set up for the experiments

parameters	set up values
pulse shape	without $T_r$ (peak power gain) or apply $T_r$ (show in Fig. 3)
speed	2.5mm/ s
pulse duration	0.5ms, 1ms
pulse repetition	1Hz, 5Hz, 10Hz
pulse energy	without $T_r$ : 10J, 15J, 20J, 25J, 28J, 30J, 35J, 40J; apply $T_r$ : 25J, 28J
defocusing	2.0mm, 3.8mm, 3.9mm, 4.0mm, 4.1mm, 4.15mm, 4.2mm, 4.25mm
shielding gas	argon gas blowing vertically or at constant rate of 18 l/m in at 45°

本试验的设计策略是首先由预先设计的轧辊表面凸起间距及外观尺寸, 初步确定激光扫描速度、脉冲频率和脉冲能量。然后依据前面对新形貌机制的分析和研究, 对脉冲波形、脉冲宽度及离焦量进行初步确定, 同时考虑气体保护方式对形貌的影响。最后进行参数匹配性实验, 分析激光参数对轧辊表面形貌的影响规律, 确定最佳激光加工参数。

4 实验结果和分析

由于试验采用单脉冲对轧辊表面进行处理, 因此从理论上讲, 频率对轧辊的表面形貌及尺寸几乎没有什么影响。但是采用单脉冲处理, 若频率发生变化, 则激光的扫描速度也将产生变化, 这样必然会导致激光能量的空间分布和熔池内部力的大小分布产生细微变化, 从而影响轧辊表面的形貌和尺寸。研究表明, 频率对微凸体的直径几乎没有什么影响, 但是对微凸体的高度会产生很大影响, 甚至不能形成微凸, 故选择一个合适的激光频率参数非常重要。

单脉冲能量的大小和分布直接决定了微凸体的形貌和尺寸。为了使得轧辊表面能够在激光的作用下快速熔凝而不汽化, 必须在短时间内施加适中的能量注入, 脉冲宽度、激光输入能量和离焦量需要很好的匹配。脉冲宽度是一个脉冲周期内激光输入能

量的施加时间, 两者需要很好的匹配。激光输入能量过小、脉宽过短, 金属不易完全熔化, 激光输入能量过大、脉宽过大, 则金属易汽化。通过试验表明, 脉冲能量输入 25J, 脉宽 0.5ms 时施加峰值功率增益是一个非常恰当的能量注入。这样便为保证轧辊表面金属的快速熔凝而不汽化提供了理论依据。离焦量也是保证金属熔凝和汽化量的一个非常重要的参数, 离焦量过小, 金属极易汽化, 离焦量过大则不能保证足够的金属熔化量。图 4 表示了处理层凸起高度  $h$  随离焦量  $\delta$  的变化情况。图 4 中共分为 3 个区域, I 区离焦量为 0~ 3.8mm, 此时由于激光能量较为集中, 使得轧辊表面金属在短时间内熔化( 并有部分汽化) 和凝固, 形成火山口状微粗糙体; II 区离焦量介于 3.8mm~ 4.2mm 之间, 此时为最佳离焦量范围, 能保证轧辊表面金属熔化并抑制汽化的产生, 形成球冠状微凸形貌; II 区离焦量大于 4.2mm, 此时能量密度很小, 不能保证足够的金属熔化量。

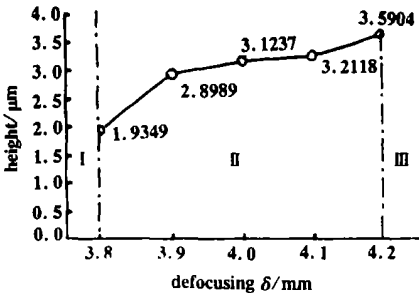


Fig. 4 Variation of protuberance height caused by varied defocusing

本试验中, 辅助气体氩气的主要作用是提供保护气氛, 采用侧吹熔池的保护方法是避免直吹对微凸形貌的破坏。在激光参数保持不变的条件下, 使用氧气和惰性气体氩气得到的微观形貌截然不同。由于氧气的氧化和助燃作用, 增加了热量的交换, 不仅使光斑变大而且产生熔坑。但采用氩气能很好地保护热熔区不被氧化, 同时按照一定的压力、流速、入射角控制给气可对熔池形成一定程度的微小扰动, 利于凸缘尖端的生长, 使材料表面形成微凸。

经过上述激光参数的分析和研究, 得出最终采用的脉冲激光工艺参数为: 输入能量  $E_p = 25J$ , 脉宽  $T_p = 0.5ms$ , 频率  $f = 5Hz$ , 扫描速度  $v = 2.5mm/ s$ , 离焦量  $\delta = 4.1mm$ 。在上述加工参数下对轧辊试件进行三维改形处理, 得到如图 5 所示的显微形貌图。为进一步获得轧辊表面的三维微观形貌和尺寸, 在 WYKO 非接触式三维形貌仪上对其表面进行测定和分析, 待测表面上微观形貌的凹凸变化将在显微

持放电的效率。

为了了解预电离对功率的控制作用和影响,对脉冲预电离电压的脉冲宽度、重复频率和幅值进行了研究。图 5 为混合气压 2.7kPa、预电离脉冲重复频率

35kHz、脉冲电压 2.5kV、主放电电压 6kV 时输出功率和电光转换效率随脉冲宽度的变化关系。由图可知,输出功率随脉冲宽度的变化不大,几乎可以忽略,取为 0.5μs,使预电离消耗的功率保持最低。

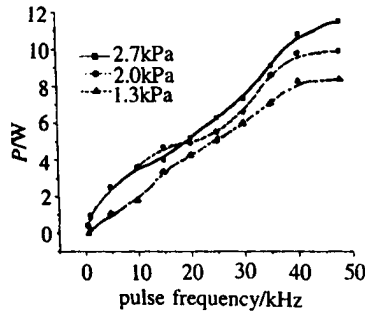


Fig. 5 Dependences of power & efficiency on pulse width

pressure of mixture: 2.7kPa

接下来研究了不同气压下输出功率随脉冲重复频率的变化,如图 6 所示。在同一气压下,输出功率随频率的变化关系是单调上升的,即随着脉冲频率的升高而升高,故可通过调节预电离脉冲频率控制输出功率的大小。图 7 为  $P=2.7\text{kPa}$ 、频率为 35kHz 情况下输出功率和效率随脉冲电压的变化关系。从图中可看出,输出

(上接第 10 页)

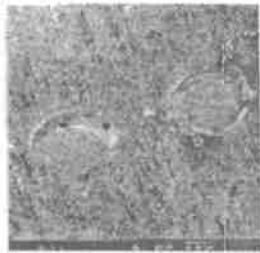


Fig. 5 Roll surface plane profile after laser texturing

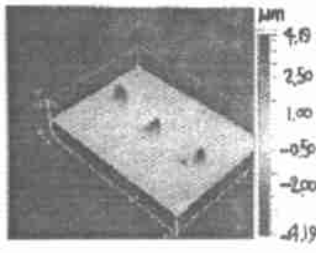


Fig. 6 Roll surface 3D profile after laser texturing

镜的光学系统中产生干涉图像,然后通过目镜上电子扫描摄像仪转换成离散点阵信号并输入计算机进行处理,得到如图 6 所示的微观三维形貌尺寸。从图 6 可以看出,脉冲激光加工后的轧辊表面形貌尺寸与预先设计的非常吻合。

功率随脉冲电压的升高存在一最佳值。这说明预电离存在最佳的  $E/P$  值,高于或低于此值均会使激光器的输出功率下降。

3 结 论

采用螺旋结构横向脉冲预电离技术首次研究了非自持纵向放电 CO<sub>2</sub> 激光器,取得了很好的结果。实验证明该方式的非自持放电能够大幅度降低工作电压,可省去限流电阻,提高电光转换效率,且脉冲预电离电源对输出功率具有极好的控制性,这些有利于激光器的多种应用。

非常感谢周锦文副研究员、王东蕾工程师在实验中的帮助和讨论,并感谢谭荣清研究员和吴谨副研究员对本工作的支持。

参 考 文 献

[1] Colley A D, Baker H J, Hall D R. A P L, 1992, 61(2): 136~138.

[2] Generalov N A, Gorbulevko M I, Solov' yov N G *et al.* Gas lasers recent developments and future prospects. Nether Lands: Kluwer Academic Publisher, 1996: 323~ 341.

[3] Nath A K. Opt Engng, 1994, 33(6): 1889~ 1893.

[4] Nagai H, Hishii M, Tanaka M *et al.* IEEE J Q E, 1993, 29(12): 2898~ 2908.

[5] William L. Physical Review A, 1970, 2(5): 1989~ 2000.

5 结 论

(1) 针对由摩擦学角度设计的微凸形状轧辊表面新形貌,提出了脉冲激光毛化的新机制,并成功实现了该新形貌。(2) 单脉冲能量的大小和分布(脉冲波形、脉冲能量、脉冲宽度、离焦量等)是形成微凸的微观新形貌和尺寸的关键因素。(3) 微凸形状新形貌的激光加工初步取得成功,为进一步研究该形貌在轧制时的复映关系及毛化后钢板的冲压性能等提供了基础。

参 考 文 献

[1] 林子光. 机械设计, 2000, 4(4): 24~ 27.

[2] 陈光南. 应用激光, 1996, 16(4): 155~ 158.

[3] Pfestorf M, Engel U, Geiger M. J Mach Tools Manufact, 1998, 38(56): 607~ 614.

[4] Tzeng Y F. J Mater Proc Technol, 2000, 102: 40~ 47.