

文章编号: 0258-7025(2009)01-0210-06

# 多棱镜扫描分光多头激光毛化技术研究与实践

周乐 陈培锋 王英

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为了提高激光毛化(LT)效率以满足企业生产的实际需要,生产出具有可控表面形貌的冷轧钢板,提出了一种采用多棱镜扫描分光的多头激光毛化技术的实现方案,从原理和光路设计上对其进行了分析,并进行了生产实践。结果表明,其单头脉冲频率可以达到30 kHz,毛化点密度可达 $7 \times 7$  dots/mm<sup>2</sup>,脉宽范围0.03~1 ms;对于 $\phi 600$  mm $\times$ 1800 mm的辊面,在 $6 \times 6$  dots/mm<sup>2</sup>毛化点密度下,毛化效率可达35 min/根,满足企业的实际生产需要;同时得到圆形毛化点,改善了冷轧激光毛化板的均匀性,从而提高了激光毛化板的力学性能。基于该技术的多头激光毛化设备已投入实际生产并取得良好效果。

**关键词** 激光技术;多头激光毛化;多棱镜扫描分光;毛化点;轧辊

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0210

## Study and Practice on Multi-Head Laser Texturing Technology Using Polygon Scanning for Beam Modulation

Zhou Le Chen Peifeng Wang Ying

(College of Optoelectronic Science and Engineering,

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Multi-heads laser texturing (LT) technology using polygon scanning beam modulation is proposed to increase the production efficiency to meet the industrial need and produce cold roll steel sheet with controllable surface topography. Optical design, system principle and the practice are introduced. The results indicate that single-head pulse repetition frequency of 30 kHz and crater density of  $7 \times 7$  dots per square millimeter can be obtained, with pulse width ranging from 0.03 ms to 1 ms. For roll with length of 1800 mm and diameter of 600 mm, when textured in  $6 \times 6$  dots per square millimeter, the texturing efficiency can reach 35 min per roll, enough to meet the industrial requirement. Meanwhile, round texturing craters are obtained, which improves the uniformity of the steel sheet and its mechanical properties effectively. Double-heads laser texturing equipment based on this technology is already in practice and the results are satisfying.

**Key words** laser technique; multi-heads laser texturing; polygon scanning beam modulation; texturing crater; mill roll

## 1 引言

具有特殊表面形貌的冷轧毛化钢板在制造业中有着广泛的应用,特别是在汽车和家电产业中,是由表面经毛化处理的轧辊轧制而成的,其毛化的表面形貌特征对钢板的深冲、涂装等工艺性能影响极大<sup>[1,2]</sup>,具有很高的附加值。

激光毛化(LT)是采用高能量脉冲激光束聚焦照射于轧辊表面,利用激光束的高亮度在轧辊表面

获得非常高的能量密度,使激光聚焦处的轧辊表面加热、熔化并部分气化形成毛化点,并在毛化点凹坑周围由堆起的熔化物快速冷却凝固形成凸缘。该凸缘在随后的轧制过程中翻印在钢带表面形成具有储油润滑作用的凹坑,从而提高了钢板的深冲性能和涂漆附着性能。我国在激光毛化技术及加工设备方面进行了大量的研究,传统的毛化技术主要有两种:一种是采用波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的YAG固体激光器,利

收稿日期:2008-09-16;收到修改稿日期:2008-10-13

作者简介:周乐(1982—),男,博士研究生,主要从事轧辊激光毛化和表面检测技术方面的研究。

E-mail: kuailtuoliao@163.com

导师简介:陈培锋(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工和光电检测技术方面的研究。

E-mail: pfchen@mail.hust.edu.cn

用声光调 Q 技术产生脉冲激光对轧辊表面进行毛化加工<sup>[3]</sup>。另一种是用大功率 CO<sub>2</sub> 气体激光器,采用斩光盘(chopper)将连续激光束分割成高重复频率脉冲激光作用于轧辊表面,实现毛化加工<sup>[4]</sup>。YAG 激光毛化技术采用声光调 Q 输出脉冲激光,脉冲频率约 10 kHz,典型激光脉宽为 100~200 ns,脉宽较短,即使经过特殊的波形调制,也只能将脉宽展宽到 4~7 μs<sup>[5]</sup>,激光功率密度较高,毛化时轧辊材料大部分产生气化,使得轧辊毛化点边缘不易形成凸台。采用高功率的斩光盘式 CO<sub>2</sub> 激光毛化技术,其脉冲频率最高为 24 kHz,以毛化点密度 6 × 6 dots/mm<sup>2</sup> 毛化一根长 1.8 m,直径为 600 mm 的轧辊的时间长达 85 min,其毛化效率难以满足现代加工企业的生产需要;或者采用降低单位面积毛化点密度的毛化方法,然而这样生产出来的毛化钢板其表面质量和冲压性能难以满足高档汽车面板的要求。对于这两种传统毛化技术,制约其推广应用发展的主要原因是由于传统的毛化技术采用单头毛化方式,毛化效率较低,在高毛化点密度毛化辊要求下毛化时间太长,而冷轧板的发展趋势是高点密度、低粗糙度的毛化板<sup>[6]</sup>,因而无法满足企业的实际需求。

为了达到较高的加工效率,近年来寻找和尝试了对高功率激光器脉冲输出的新的调制方法,如采用腔内机械调 Q 的三折腔的尝试<sup>[7,8]</sup>,也有采用射频激励的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光进行毛化的探索<sup>[9]</sup>,由于热效应和机械稳定性以及毛化效率低下所产生的问题,均没有达到满足工业化生产要求的效果。多棱镜扫描技术<sup>[10,11]</sup>由于其高速稳定的特点,被广泛应用于成像扫描、激光融覆和表面强化中。基于多棱镜扫描分光技术的多头 CO<sub>2</sub> 激光毛化技术<sup>[12]</sup>,由于相同毛化时间内加工头数增加,因而成倍提高了毛化效率,满足了企业生产效率要求,并取得了良好的生产实践效果。本文从多棱镜扫描分光的技术原理,系统方案与组成,毛化效率分析与实践等方面介绍这一技术及其实际使用效果。

## 2 多棱镜扫描分光技术原理

多棱镜扫描分光多头 CO<sub>2</sub> 激光毛化技术的核心为多棱镜扫描分光技术,其功能是将连续的高功率激光变成高功率、高重复频率的短脉冲,并且均匀地分到多个毛化头上,然后再分别由这些毛化头对轧辊表面进行加工。

多棱镜扫描分光技术的原理如图 1 所示,激光照射在多棱镜的某个表面,多棱镜的这个面在旋转

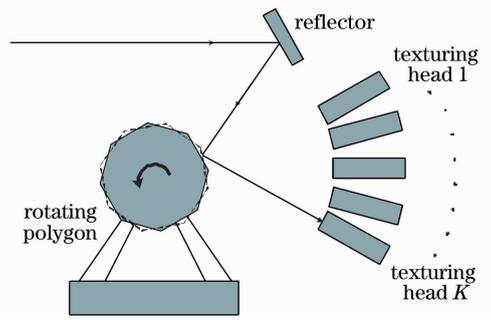


图 1 多棱镜扫描分光系统示意图

Fig. 1 Sketch of polygon scanning beam splitting and modulating system

过程中将激光束依次扫过  $K$  个毛化头,每一个毛化头在激光扫过时接收到一部分激光。这样当激光依次扫过  $K$  个毛化头时,相当于给每个毛化头分配一个激光脉冲,实际上旋转多棱镜将一个连续激光分割成为  $K$  路脉冲激光,每一路脉冲激光完全相同。在光路设计上进行对称结构的设计可以达到多个毛化头的毛化效果一致。

对于多棱镜分光系统,调整多棱镜转速即可调整输出脉冲的频率,由于多棱镜的转速可以较快达到 20000 r/min 以上,而且多棱镜面数可以加工成较多,而对于每一个面而言其对应着  $K$  个脉冲,因而可以大大地提高毛化效率,单头脉冲频率可达 30 kHz,加工效率可与电火花相当。同时由于是对连续激光进行对称分光,装置和输出功率的稳定性均较好,而且光束传输系统承受的平均功率较斩光盘毛化要低,因而光学系统也有较好的稳定性。

## 3 多头毛化的方案原理及系统组成

根据毛化效率和效果的要求,提出高功率纵流 CO<sub>2</sub> 激光器+多棱镜分光系统+车床平移结构的整体方案。高功率纵流 CO<sub>2</sub> 激光器应用成熟,具有输出功率高且稳定、光束质量良好的优点。磨床结构虽然可以避免飞行光路所导致的光程差对光束质量的影响,但由于重达 4~5 t 轧辊难以在平移的同时高速稳定地旋转,而且其造价昂贵,因而采用车床平移结构,通过光学传输系统的设计优化,尽量减少飞行光路的影响。

多头毛化设备总体结构由高功率 CO<sub>2</sub> 激光器、外光路系统和脉冲分光系统、激光聚焦和毛化装置、红光准直指示、毛化机床、数控系统、总控制台和冷却系统等部分组成,如图 2 所示。

轧辊置于机床旋转轴上,启动数控机床,使轧辊按设定的转速旋转。激光器输出的连续激光束进入

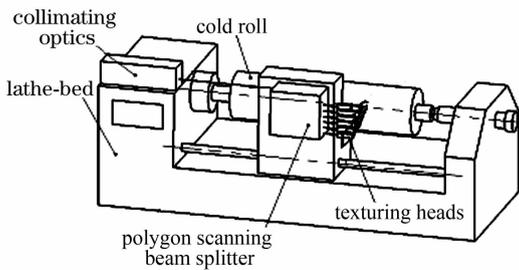


图2 多头毛化设备的总体装置图

Fig. 2 Sketch of multi-heads laser texturing equipment

安装在工作平台上的多棱镜分光机构,通过多棱镜扫描分光机构将进入的连续激光束分成两路高功率高脉冲频率激光输出,然后分别经两个聚焦头聚焦,焦点垂直落在旋转的轧辊工件表面,两个聚焦头对轧辊工件同时进行双头毛化加工,形成两条螺旋扫描线点阵毛化坑分布。在机床对轧辊工件转速、多棱镜转速、工作平台平移速度的集中控制下,获得所需的毛化点密度要求。通过上面的描述,双头毛化设备同时进行两条螺旋线毛化点的加工,因此在同样的轧辊转速下双头毛化头横向移动的螺距是单头加工的两倍,加工速度加倍。

## 4 毛化效率分析及实践生产效果

### 4.1 毛化效率分析与比较

如图3所示,设轧辊的长度为 $L$ ,半径为 $R$ ,点阵密度为 $m \times m$ ,多棱镜面数为 $n$ ,转速为 $\omega_1$ ,车床的转速为 $\omega_2$ ,其线速度满足 $V = \omega_2 \cdot R$ 。单条螺距之间的距离即为 $\Delta d_1$ ,且 $\Delta d_1 = a + b$ ,其中 $a$ 为毛化点直径, $b$ 为相邻毛化点之间的间距。若是 $K$ 头的毛化,则有车床横向平移的螺距 $\Delta d_2 = K \cdot \Delta d_1$ 。对于双头毛化,则有 $\Delta d_2 = 2 \cdot \Delta d_1$ 。

由于形成均匀的螺旋线分布,对于横向间距,车床平移 $V_p$ 的速度满足

$$V_p = \frac{\Delta d_2 \cdot \omega_2}{2\pi}, \quad (1)$$

对于纵向间距,轧辊转速 $\omega_2$ 与多棱镜转速 $\omega_1$ 之间

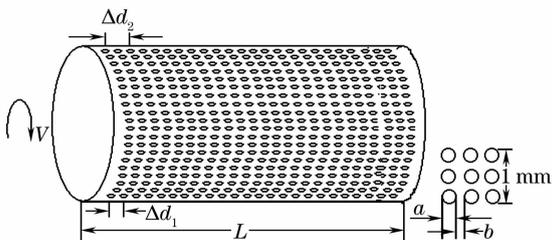


图3 毛化的轧辊以及毛化点分布

Fig. 3 Textured roll and texturing craters

满足关系式

$$\frac{2\pi}{\omega_2} = \frac{2\pi R / \Delta d_1}{n} \cdot \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi R}{n \cdot \Delta d_1} \cdot \frac{2\pi}{\omega_1}, \quad (2)$$

即

$$\omega_1 = \frac{2\pi R}{n \cdot \Delta d_1} \cdot \omega_2, \quad (3)$$

则其毛化一根辊的时间 $t$ 满足

$$t = \frac{L}{V_p} = \frac{L}{\Delta d_2} \cdot \frac{2\pi R}{V} = \frac{L}{\Delta d_2} \cdot \frac{2\pi}{\omega_2}, \quad (4)$$

单头脉冲输出频率 $f$ 满足

$$f = \omega_1 \cdot n / 60, \quad (5)$$

由(3)~(5)式可知,通过提高多棱镜和轧辊的转速以及多棱镜的面数可以大大提高脉冲输出频率,缩短毛化时间。目前多棱镜的转速可达24000 r/min,面数可达72面。若要完全发挥多棱镜的分光作用达到单头毛化频率为28.8 kHz,在35 min内完成毛化密度为 $6 \times 6 \text{ dots/mm}^2$ 的情况下,其要求车床的转速到达153 r/min,而一般车床的转速仅为60~80 r/min。对于转速高达140~160 r/min的大型车床,由于车床的刚性难以承受,也难以满足长时间高速旋转稳定工作。因而提高车床转速成了提高毛化效率缩短加工时间的一个瓶颈所在;另一方面,在相同的毛化时间内,若激光毛化头数增加 $K$ 倍,相应地车床的转速 $\omega_2$ 则降低为 $\omega_2 / K$ ,如上例当为4头毛化时,对车床的转速要求仅为72 r/min,对应多棱镜转速为12000 r/min,从而通过发展多头毛化来有效地降低对车床转速的要求。总之,发展多头毛化是激光毛化应用满足现代企业加工效率的一个重要方向。

对于目前轧钢厂家比较常用的大型轧辊的尺寸 $L = 1.8 \text{ m}$ , $R = 600 \text{ mm}$ ,采用72面的多棱镜,在车床转速为150 r/min条件下,其毛化效率如表1所示。与传统的两种激光毛化技术的参数对比如表2所示。

### 4.2 实践生产效果

#### 4.2.1 现场毛化效果

在激光功率为3 kW,多棱镜转速为18500 r/min,轧辊转速为120 r/min,毛化点密度为 $6 \times 6 \text{ dots/mm}^2$ ,垂直吹惰性保护气体,气压约为110.32 kPa,采用负离焦,即焦点位于轧辊表面之下,离焦量为0.6 mm,此时轧辊表面光洁,没有做任何增加激光吸收处理的条件下,实际生产效果如图4所示,此时毛化一根 $\phi 600 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$ 的轧辊用时45 min。若提高车床转速至150 r/min,多棱镜转速至23000 r/min,此时仅需35 min。

表 1 双头毛化的毛化效率

Table 1 Texturing efficiency of double-heads laser texturing

Texturing crater density / (dots/mm <sup>2</sup> )	$\Delta d_1$ /mm	Texturing time /min	Rotating speed of the roll / (r/min)	Single-head pulse frequency /Hz	Rotating speed of polygon / (r/min)
3×3	0.4	15	150	11781	9817
4×4	0.283	22	150	16652	13876
5×5	0.2125	28	150	22176	18480
6×6	0.17	35	150	27720	23100
7×7	0.145	41	150	32499	27083

表 2 三种激光毛化技术参数比较

Table 2 Parameters comparison between three laser texturing techniques

Texturing technology	Single-head pulse frequency /kHz	Texturing time /min	Pulse width / $\mu$ s	Texturing crater density / (dots/mm <sup>2</sup> )	Shape of texturing crater
YAG laser	10	60~120	0.1~7	3×3~5×5	Round
Single-head CO <sub>2</sub> laser using chopper beam modulation	24	40~85	42~1000	3×3~5×5	Elliptical
Multi-heads CO <sub>2</sub> laser using polygon scanning beam modulation	30	20~45	33~1000	3×3~7×7	Round



图 4 毛化现场生产效果

Fig. 4 Effect of texturing at production site

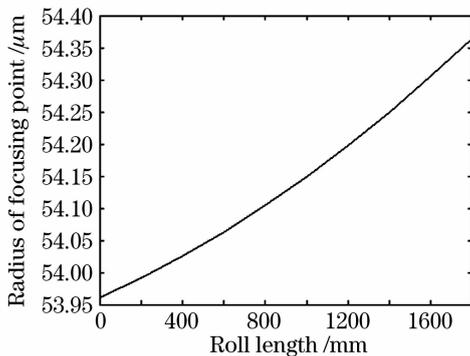


图 5 聚焦点半径随轧辊长度的变化

Fig. 5 Radius of focusing point versus roll length

虽然采用的是飞行光路,通过合理的光路设计<sup>[13]</sup>,其聚焦点大小的变化非常小,其直径在轧辊两头的变化不到 $1\ \mu\text{m}$ ,如图 5 所示,基本上不对毛化点的形貌产生影响从而可以忽略。实践中,在轧

辊两头观察实际毛化出来的效果基本上没有区别,有着较好的一致性。

#### 4.2.2 毛化点形貌

选择不同的加工参数<sup>[14]</sup>,毛化点的大小可在 $0.1\sim 0.25\ \text{mm}$ 调整,毛化点密度可以在 $3\times 3\ \text{dots/mm}^2\sim 7\times 7\ \text{dots/mm}^2$ 间调整,粗糙度 $R_a$ 可控制在 $0.6\sim 5\ \mu\text{m}$ ,毛化坑边缘凸起的高度约为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ ,熔凝区的硬度约为 $\text{HV}600\sim \text{HV}900$ 。毛化点形貌如图 6 所示,与传统的斩光盘激光毛化技术椭圆点(如图 7)相比,其近似为圆形。

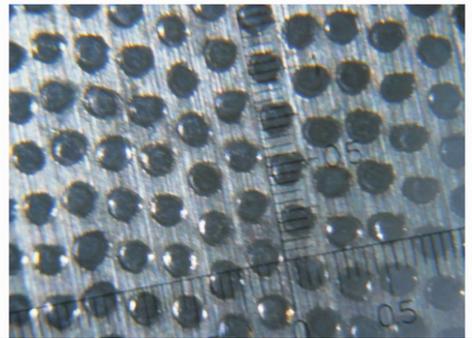


图 6 100 倍显微镜下实际的毛化点效果

Fig. 6 Microscopic photograph of texturing craters (100 $\times$ )

在传统的斩光盘毛化加工时,光束的传输方向是不动的,因而产生了激光聚焦点位置与轧辊的相对移动,造成椭圆毛化点。然而,在多棱镜扫描分光多头毛化加工时,激光束是扫描运动的,那么如果激光扫描的方向与轧辊旋转的方向一致,通过对离焦量、多棱镜扫描速度等参数的控制,就完全有可能使

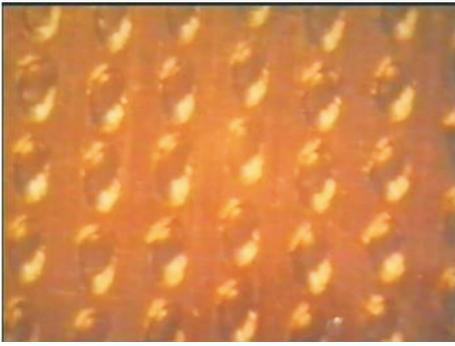


图 7 斩光盘毛化的典型椭圆毛化点形貌

Fig. 7 Typical elliptical craters by chopper modulated laser texturing

激光聚焦光点扫描与轧辊旋转同步,从而使聚焦激光点始终与轧辊上的同一点相互作用,这样就不存在激光聚焦点位置与轧辊的相对位移,从而保证毛化点是圆形的。圆形激光毛化点保证了轧制的钢板在力学性能,特别是冲压成型方面不会产生方向性差异,这一点对于冷轧钢板的性能保障非常重要。

#### 4.2.3 金相显微分析

图 8 为轧辊切片试样用 W5 号金相砂纸打磨后,再用体积分数为 4% 的硝酸乙醇腐蚀后,用 M-400-H1 金相显微镜观察的结果。其中(a)为毛化点在 400 倍放大下的金相图,(b)为毛化点熔凝区组织在 640 倍放大下的金相图,(c)为材料基体在 640 倍放大下的金相图。可以看出(b)在放大 640 倍的金相显微镜下,仍然看不出熔凝区的组织,说明其晶粒非常细小,组织非常致密。而图(c)中基材组织看得比较清楚,主要是铁素体和珠光体的混合物。高功率密度的激光脉冲将基体材料熔化并气化时,由于熔池内的液体快速流动,使材料分布均匀,在极大的

冷却速率下,形核率大大超过晶核的生长速度<sup>[15,16]</sup>,得到的晶粒极其细小,使得熔凝区的铸态组织结构非常致密,其硬度和耐腐蚀性大大加强,同时也提高了材料的耐磨损性能。实践生产中亦证明激光毛化轧辊的轧制寿命较喷丸毛化有明显提升。

## 5 结 论

基于多棱镜分光多头激光毛化技术的双头毛化设备已经在冷轧企业中投产使用,取得良好的效果,通过一年多的生产实践,结果表明该技术有以下特点:

1) 高的毛化效率。多棱镜转速较高,单头毛化频率可达 30 kHz。双头毛化速度比单头斩光盘 CO<sub>2</sub> 激光毛化技术成倍提高,与电火花毛化速度相当,可以满足冷轧企业对毛化效率的要求。

2) 圆形毛化点。避免了传统的激光毛化技术所产生的椭圆毛化点所造成的冲压方向性差异,保证钢板两个方向的冲压方向性能一致,进一步提高了冷轧后钢板的力学性能。

3) 高的毛化点密度。毛化点直径比斩光盘 CO<sub>2</sub> 激光毛化技术的椭圆毛化点直径小,因而毛化点的密度可达  $7 \times 7 \text{ dots/mm}^2$ ,满足特殊冲压性能钢板的需求。

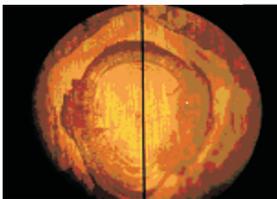
4) 较好的稳定性和对称性。聚焦头结构简单,由于聚焦镜承受的平均功率较以往的斩光盘毛化要低,而且光路为对称结构,因而保证了毛化过程的稳定性和双头毛化的一致性。

5) 提高了轧辊表面硬度和强度,延长轧辊的轧制寿命,提高了企业生产效率并降低了生产成本。

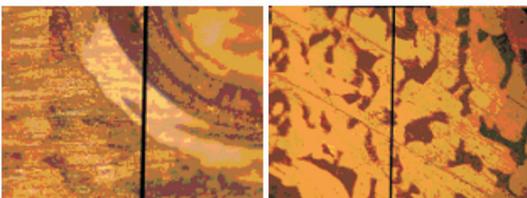
作为一种先进可靠的技术,多棱镜扫描分光多头激光毛化技术的研究与实践,为冲压性能良好和高映像清晰度的高质量冷轧板的制造与应用提供了技术保障。其设备造价较低,生产效率高,适合于在冷轧企业中广泛推广应用,具有良好的发展前景。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Jiacong. Texturing technology used for cold roll [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 1996, 17(3):1~18  
周家琮. 冷轧轧辊毛化技术[J]. 钢铁钒钛, 1996, 17(3):1~18
- 2 Tang Jing. Test and analysis on surface roughness and micro-profile of cold-rolled steel sheet [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2004, 25(2):60~70  
唐 静. 冷轧薄板表面粗糙度微观形貌的测试分析[J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(2):60~70
- 3 He Yunfeng, Du Dong, Liu Ying et al.. Parametric analysis of pulsed Nd : YAG laser texturing process [J]. *Laser*



(a)



(c)

(b)

图 8 毛化轧辊切片试样的金相分析

Fig. 8 Microscopic photograph of textured roll sample

- Technology*, 2003, **27**(1):8~13  
何云峰, 都 东, 刘 莹等. 轧辊表面脉冲激光三维微改形过程参数分析[J]. 激光技术, 2003, **27**(1):8~13
- 4 Xu Anding. New type of high-power CO<sub>2</sub> laser texturing equipment and technology [J]. *Metallurgical Equipment*, 2004, (6):35~37  
徐安定. 新型大功率激光毛化成套设备及工艺[J]. 冶金设备, 2004, (6):35~37
- 5 Yang Mingjiang, Peng Linhua, Li Zhengyang. Development of YAG laser texturing technology [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(3):323~326  
杨明江, 彭林华, 李正阳. YAG 激光毛化技术进展[J]. 应用激光, 2002, **22**(3):323~326
- 6 G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components [J]. *Tribology Transactions*, 2002, **45**(4):444~449
- 7 Wan Daping, Wang Yumin, Gui Zhenxing *et al.*. A novel method for stability analysis and design of laser folded cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1217~1221  
王大平, 王裕民, 归振兴等. 一种激光折叠腔稳定性分析及设计的新方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(9):1217~1221
- 8 Liu Liping, Wang Qi. Design of the local beam branch in CO<sub>2</sub> laser imaging radar optical system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):605~608  
刘丽萍, 王 骐. CO<sub>2</sub> 脉冲外差激光成像光学系统中高斯光束光路的设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(7):605~608
- 9 Xue Yuan, Chen Peifeng, Zhu Mingzhu. Experimental research on RF CO<sub>2</sub> laser used in roller texturing [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(4):16~19  
薛 原, 陈培锋, 朱明珠. 射频 CO<sub>2</sub> 激光用于轧辊毛化的实验研究[J]. 光学与光电技术, 2007, **5**(4):16~19
- 10 Xu Min, Hu Jiasheng. Analysis and calculation of rotating polygonal scanner in laser scanning imaging system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):782~787  
许 敏, 胡家升. 激光扫描成像中旋转多面体的分析计算[J]. 中国激光, 2008, **35**(5):782~787
- 11 Wang Yunshan, Yang Xichen, Liu Yajun. Temperature field of laser scanning line facula [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):981~986  
王云山, 杨洗陈, 刘亚君. 激光扫描光斑温度场[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):981~986
- 12 Chen Peifeng. A method for high power laser multi-heads texturing on roll surface and its device [P]. China Patent, 200610018261.1. 2006-07-19  
陈培锋. 高功率激光辊类表面多头毛化加工方法及其装置[P]. 中国专利, 200610018261.1. 2006-07-19
- 13 Chen Haiqing. Modern Applied Optical System [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003. 30~79  
陈海清. 现代光学系统[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003. 30~79
- 14 Wan Daping, Hu Dejin, Liu Hongbin *et al.*. Computational fluid dynamic numerical simulation for pulse laser texturing machining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):1004~1008  
王大平, 胡德金, 刘红斌等. 脉冲激光毛化加工的计算机流体力学数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(7):1004~1008
- 15 Yang Sen, Huang Weidong, Liu Wenjin *et al.*. Reconstruction of molten pool during laser surface remelting [J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(4):224~228  
杨 森, 黄卫东, 刘文今等. 激光表面快速熔凝过程中熔区组织重构[J]. 应用激光, 2001, **21**(4):224~228
- 16 C. L. Chan, J. Mazumder. The effect of radiative heat lost on laser material damage [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **63**(12):5890~5892