

用 SPDT 法制造大功率 CO₂ 激光反射镜

翁志成 马文生 韩荣久

苏宝 陈兰英 钱红斌

(中国科学院长春光机所应用光学国家重点实验室, 长春 130022) (中国科学院上海光机所, 上海 201800)

摘要 介绍了用 SPDT 法制造的反射镜的精度、反射率和抗激光性能。讨论了有关反射镜的使用寿命问题。

关键词 单点金刚石切削, CO₂ 激光反射镜

激光用光学元件可分为透射型和反射型两大类。因反射型元件更适合于功率大、功率密度高的场合,故开发高性能的反射镜是发展激光技术的重要课题。本文重点介绍用单点金刚石切削工艺方法(Single-point diamond turning,简称 SPDT 法)制造的反射镜的精度、对 CO₂ 激光的反射率和使用寿命等问题。

1 SPDT 法简介

SPDT 工艺是一种在高精度的设备上,以金刚石为刀具,切除零件上多余的材料,获得所需要的表面形状和表面质量的工艺方法。可加工的材料为有色金属、激光加工技术中需要的平面镜、球面镜、圆锥面镜、圆柱面镜、非球面镜、扫描转镜和复合曲面镜等。

与传统的研磨抛光方法制造激光反射镜相比,SPDT 法很容易地获得所需要的表面形状,高精度形状和表面质量。加工周期短,适合批量生产。

2 用 SPDT 法制造的反射镜对 CO₂ 激光的光学性能

作为大功率 CO₂ 激光用反射镜,主要要求在相当高的功率密度的激光照射下不破坏。即要求反射面对激光的反射率高,吸收率小。用 SPDT 法制造的反射镜对红外波段的激光反射率很高,能接近该材料反射率的理论极限。但由于 SPDT 法加工的反射镜材料均为易氧化的有色金属,为了长期使用,一般需要镀一层化学稳定性好的膜加以保护。

反射面的反射率与加工表面粗糙度有关。在激光连续照射下,反射镜温度会上升,温升 ΔT 在达到临界温度时,镜面将发生破坏,这就是温升破坏理论^[1]。其表达式如下

$$\Delta T \sim [(A_{\text{surf}} \cdot P_{\text{inc}})/K] \times (\text{几何学系数}) \quad (1)$$

式中 A_{surf} 为表面吸收率, P_{inc} 为入射激光功率, K 为反射镜基材热传导率。

镜面发生破坏的性能指数 $(F. M.)_T$ 定义为

$$(F. M.)_T \sim (T_{\text{dest}}/A_{\text{surf}}) \cdot K \quad (2)$$

其中 T_{dest} 为破坏临界温度。

另一评价反射镜性能的指标是光学畸变。由于温度上升,使反射镜产生局部畸变,不管是否有镀膜层,畸变主要发生在基体上,由于膜层极薄,膜层的畸变被忽略不计,则反射镜的畸变近似表达为

$$\text{畸变} \sim \alpha \cdot \Delta T \sim (\alpha \cdot A_{\text{surf}} \cdot P_{\text{inc}})/K \quad (3)$$

式中 α 为反射镜材料的线膨胀系数。

光学畸变性能指数 $(F. M.)_o$ 定义为

$$(F. M.)_o \sim K/(\alpha \cdot A_{\text{surf}}) \quad (4)$$

温升破坏理论指出,反射镜基板应是热传导率高,而线膨胀系数小的材料。铜、铜合金、铝合金这些材料可用 SPDT 法容易地制成所需要的形状和相对光滑的表面,其表面微观形貌如图 1 所示。是用 Form Talysurf 型表面测量仪测得。

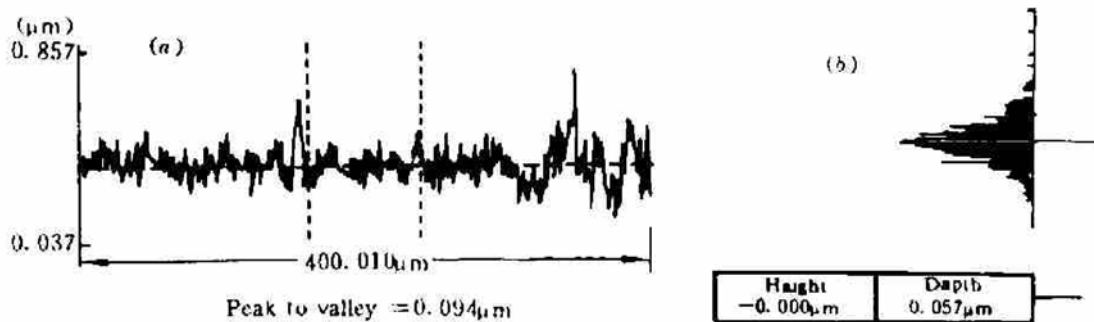


Fig. 1 Profile of a surface produced by SPDT

(a) 2D topograph of the surface meridian the abscissa. The evaluating length. Evaluation length L_0 , 400.010 μm ; Mathematics mean value $R_a = 0.007 \mu\text{m}$; Peak value $R_p = 0.057 \mu\text{m}$; Root mean square value $R_q = 0.009 \mu\text{m}$; Valley value $R_v = 0.037 \mu\text{m}$; Peak to valley value $R_z = 0.94 \mu\text{m}$; (b) Distribution of amplitude for curve (a). The abscissa is the percentage of the amplitude fluctuation and the ordinate is the amplitude

用 SPDT 法制造的反射镜的面形精度在 $\phi 150 \text{ mm}$ 范围内小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。通常用激光干涉仪可以测得干涉图。图 2 是用 SPDT 法加工的非轴抛物镜面形的干涉图。零件口径为 $\phi 50 \text{ mm}$ 。抛物线方程为 $Z = 1/757.2105x^2$ 。测试原理如图 3。

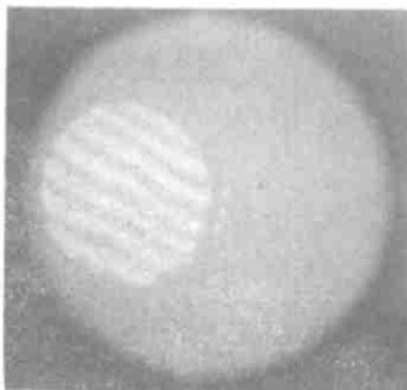


Fig. 2 Interferogram for an off-axis parabola mirror fabricated by SPDT

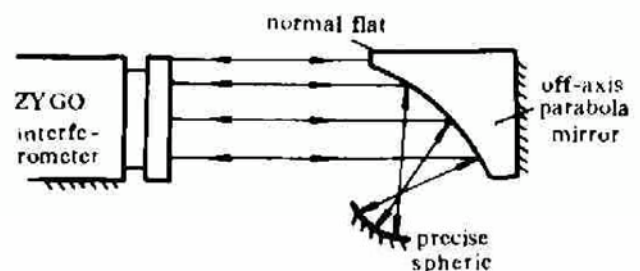


Fig. 3 Principle map for the measurement of the off-axis parabola mirror

H. Davies 用统计学方法给出反射镜面的反射率 R_s 的表达式为

$$R_s = R_0 \cdot \exp[-(4\pi\delta/\lambda)^2] \quad (5)$$

式 R_0 为该物质完全光滑表面的反射率, δ 为表面粗糙度均匀方根值, λ 为入射光波长。

(5) 式成立的条件: 1) $\delta \ll \lambda$; 2) 表面起伏幅值分布是以平均值中线为中心的高斯分布。

图 1(a) 曲线的均方根值等于 $0.009 \mu\text{m}$, 此值远小于 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 。图 1(b) 表示了起伏幅值是以深度等于 $0.057 \mu\text{m}$ 线(即平均值中线)为中心的高斯分布。所以 SPDT 法切削的表面可按 (5) 式计算得到

$$R_s = R_0 \cdot [1 - (4\pi\delta/\lambda)^2] \quad (6)$$

图 4 为粗糙表面产生 TIS 的示意图。当 $\delta = 0.009 \mu\text{m}$ 时, $R_s = R_0 \times 0.9999$, $\delta = 0.020 \mu\text{m}$ 时, $R_s = R_0 \times 0.9994$, $\delta = 0.040 \mu\text{m}$ 时, $R_s = R_0 \times 0.9977$ 。

由此可以得出结论: 用 SPDT 法加工的反射镜用于 CO₂ 激光时, 表面粗糙度均方根值 δ 达 $0.04 \mu\text{m}$ 时, 已是很光滑的表面了, 而决定反射率的主要因素是 R_0 。不同材料、不同表面状态, R_0 值大不相同。

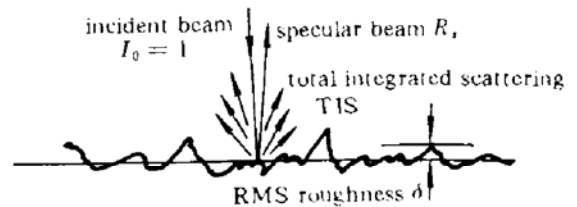


Fig. 4 Schematic drawing of total integrated scattering by a rough surface

Table 1 Laser damage text data for different specular mirrors

SN	SM	RSPDTS (μm)	Reflective index (%)			LDTH ($\text{W}/\text{cm}^2, 10.6\mu\text{m}$)(min)	IT	TS ($^{\circ}\text{C}$)	FS
			SPDTS	GC	AF				
L ₁	LY12	0.011	97.12	98.92		$>1.4 \times 10^5$	12	269	Damage-free
L ₂	LY12	0.008	97.22		97.06	1×10^5	1	105	Point microfusion
L ₄	LY12	0.012	97.37			1×10^5	3	204	Point fusion
L ₅	LY12	0.013	97.33		97.24	1×10^5	2	230	Point microfusion
P ₁	HP ₆₅₉₋₁	0.008	97.28	98.97		$>1 \times 10^5$	12	183	Damage-free
P ₂	HP ₆₅₉₋₁	0.010	97.35		97.38	1×10^5	5	290	Point microfusion
P ₄	HP ₆₅₉₋₁	0.010	97.36			1×10^5	2	161	Point microfusion
P ₁₅	HP ₆₅₉₋₁	0.021	97.72			1×10^5	3	202	Point fusion
P ₂₀	HP ₆₅₉₋₁	0.059	96.72			1×10^5	4	227	Surface oxidization
H ₁	H62	0.010	97.55	98.96		1×10^5	6	166	Point fusion
H ₂	H62	0.010	97.39		97.50	1×10^5	3	223	Point microfusion
H ₃	H62	0.009	97.40			1×10^5	4	165	Point fusion
T ₁	Oxygen-free copper	0.007	99.34	99.06		$>1.4 \times 10^5$	12	117	no variation
T ₂	Oxygen-free copper	0.008	99.35		99.16	$>1.4 \times 10^5$	12	134	no variation
T ₄	Oxygen-free copper	0.011	99.14			1×10^5	12	138	gradual oxidizing
1*	Oxygen-free copper				98.7 routine machining	1×10^5	10	173	surface oxidization
2*	H62				96.5 chemical plating	1×10^5	3	320	Point microfusion

SN: Sample number; SM: Sample material; RSPDTS: Roughness of SPDT surface; SPDTS: SPDT surface; GC: Gold-coating; AF: Antiabrasion film; LDT: Laser damage threshold; IT: Irradiation time; TS: Temperature of substrate; FS: Final state

我们在 MSG-325 机床上, 用 SPDT 法制备了一组反射镜片, 尺寸为 $\phi 35 \text{ mm}$, 厚 4 mm 。测试了表面粗糙度、绝对反射率及镀金膜或镀保护膜后的反射率, 以及在不风冷无水冷条件下进行的抗激光破坏性能的实验。实验结果列于表 1。

表 1 的试件材料均用市售冷轧棒材料制备;SPDT 表面粗糙度用 Taylor Hobson 出售的 Form Talysurf 型表面测量仪测试;金膜和氧化物保护膜用蒸着法制备。抗激光性能实验是在中国科学院上海光机所激光应用中心测试的。为了加速考核激光对镜面的破坏,在不加水冷不加风冷条件下采用 2 kW 及 5 kW CO₂ 激光束直接照射下测量。实验结果表明:

1) 铜、黄铜、铝合金等材料均可用 SPDT 法制得使其对 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 波长激光为光滑表面。加工表面粗糙度只与设备和切削参数有关; 2) 各种状态的反射面反射率 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) 以无氧铜的 SPDT 表面最高,镀金表面次之,黄铜和铝合金 SPDT 表面居第三,而镀氧化物保护膜的表面反射率依赖于基体表面反射率,并有 0.5% 左右的下降; 3) 铝的密度小,毛坯制备也相对便宜,而且最适合于 SPDT 法加工,因此在激光功率密度 $\leq 10^5 \text{ W/cm}^2$ 条件下使用时,可以考虑选用铝合金或黄铜为镜材,但在功率密度 $> 10^5 \text{ W/cm}^2$ 宜选用无氧铜作为反射镜材料; 4) 在有良好冷却条件下,表 1 试件的抗激光破坏的性能会大大提高。

3 用 SPDT 法制备的反射镜的使用寿命

在第 2 节中已经表达了反射镜的破坏是热影响,用 SPDT 法制造的反射镜表面粗糙度 R_a 均可小于 $0.04 \mu\text{m}$,其反射率 $R_s \propto R_o$ 。与传统研磨抛光法相比,SPDT 法没有嵌砂现象。其 R_o 即为该反射镜材料的 R_o ,但在使用过程中环境条件很复杂,如灰尘烟雾附着污染,将使反射面性质起质的变化,已不是 SPDT 法加工的表面,其反射率随其污染程度不同而恶化。在抗激光性能实验中已证实,没有镀膜的试片可以经受一段时间高功率密度激光辐照而不破坏。从表面变质开始,破坏速率是极高的。从点微熔到烧穿的过程只是瞬间的过程。因此我们认为反射镜的使用寿命,主要取决于使用过程状态。维持使用过程反射镜面的清洁是延长反射镜使用寿命的中心环节,必须引起结构设计和现场使用者的足够重视。

致谢 在本研究过程中,国家光学机械产品质量检测中心邵桂英副研究员进行了反射率测试,长春光机所初国强、于志恒等同志进行了膜层制备,在此一并表示感谢。长春光机所的余景池、黄巍、王淑荣同志和上海光机所的胡文富、吴怀英、柴洪均同志参加了本项工作。

参 考 文 献

- 1 宫田威男等. 大出力 CW CO₂ レーザー用光学部品の开发. レーザー研究, 1985, 13(2): 129

Fabrication of Mirrors with SPDT Technology for High-power CO₂ Laser

Weng Zhicheng Ma Wensheng Han Rongjiu

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Academia Sinica, Changchun 130022)

Shu Baorong Chen Lanying Qian Hongbin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract This paper describes the optical surface accuracy, reflectance and laser damage resistance of the CO₂ laser mirrors which are fabricated by Single Point Diamond Turning (SPDT) technique. The life time of the mirrors is discussed.

Key words single-point diamond turning, mirrors of CO₂ laser