

# 用于激光加工的金属表面涂层的研究

苏宝熔 王哲恩 罗乃草 胡文富 奚全新

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 给出涂布粉末金属表面吸收率的测量方法。研究了八种金属材料表面涂布绝缘和非绝缘粉末层在低功率密度和高功率密度的  $\text{CO}_2$  激光作用下的吸收特性。

## Study of the coatings on metal surface for laser treatment

*Su Baorong, Wang Zhen, Luo Naicao, Hu Wengfu, Qi Quanxin*

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

**Abstract:** A method to measure the absorptivity of powder coatings on metal surfaces is presented. The absorption characteristics of eight kinds of powder layers coated on common metals have been investigated using  $\text{CO}_2$  laser beam with low and high power density.

### 一、引 言

金属表面状态对激光的吸收率直接影响到激光加工的效能。因为一般金属都是良导体,其磨光的表面对 10.6 微米光波反射率很高,这给激光加工带来困难。因此激光束作为热源利用时,必须了解被加工材料表面对激光的吸收特性,从而确定所需功率密度和移动速度以及涂料类型。

过去大多数研究是在室温、高真空下磨光的金属材料上进行的<sup>[1]</sup>。实际上在激光热加工时金属表面并不是这种情况,而是各种表面状态相应的吸收率随激光的功率密度和移动速度而变。

荒田吉明在 1971 年发表了关于铝和不锈钢吸收特性实验研究的结果<sup>[2]</sup>,他认为涂

布粉末的金属表面的吸收率必须用热传导理论求出<sup>[3]</sup>。但对多模散焦光束,不能作为点光源处理,因此不宜用热传导理论求其吸收率。然而在金属表面涂布粉末是一种使吸收率增大的最方便、有效的处理方法,颇受人们重视<sup>[4]</sup>。

本文给出涂布粉末金属表面吸收率的测量方法;重点研究在金属表面涂布绝缘和非绝缘粉末,在低功率密度和高功率密度  $\text{CO}_2$  激光作用下的吸收特性。

### 二、实验方法

1. 对低功率密度  $\text{CO}_2$  激光束吸收率测定:实验材料选用碳钢(20号、45号、T10)、合金钢(20Cr, GCr15, 33CrNiMoA)、不锈

收稿日期:1981年10月5日。

钢、铝合金等 8 种。试样尺寸为：12×12×4 毫米，对试样表面进行抛光或铣床粗加工，然后涂布上氧化锆、氧化钛、磷酸锰、炭黑、石墨、镍硼硅合金粉以及铝的氧化黑处理。试样放入图 1 所示的量热计中，用 CO<sub>2</sub> 波导激光器作光源（功率密度为 14.6 瓦/厘米<sup>2</sup>），照射 3 分钟。用多次反射灵敏检流计测量试样经光照后的反射和散射信号，与此同时用 JG-3-S 型激光数字功率计监视激光器输出功率的稳定性，被测量的数值用已知镀金膜层的反射率（98.6%）修正后可以得出不同表面状态的吸收率。

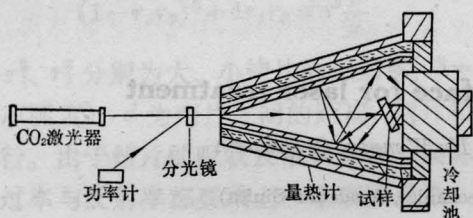


图 1 吸收率测量装置

2. 对高功率密度吸收率的测定：实验材料选用 20 号、45 号、T10、GCr15、33CrNiMoA，尺寸为 28×20×17 毫米，试样表面分别涂布氧化锆、磷酸锰、炭黑、石墨、镍-硼-硅合金粉，粉末粒度在 200 目以下。用千瓦横流 CO<sub>2</sub> 激光器作热源，在不同功率密度和移动速度下对各种金属表面进行激光加热，然后用金相显微镜测出热作用区的横截面积。

吸收率

$$R_0 = \frac{A_0}{A} \quad (1)$$

$A_0$  为有反射损失的激光热作用区横截面积； $A$  为激光全部被金属表面吸收的横截面。当金属材料 and 激光工艺参数相同时，则：

$$\frac{R_0}{R_1} = \frac{A_0}{A_1} \quad (2)$$

$A_1$  为另一种表面涂层热作用区面积； $R_1$  为另一种表面涂层吸收率。

鉴于氧化锆涂层在熔化之前激光热作用面积随功率密度增加而缓慢增加，我们取氧

化锆涂层低功率密度吸收率近似等于 1800 ~ 2000 瓦/厘米<sup>2</sup>。因此可将试验方法 1 所得的吸收率代入式 (2)，求出与其相对应的不同功率密度和移动速度下的吸收率。

### 三、结果和讨论

1. 对低功率密度 CO<sub>2</sub> 激光的吸收率，用图 1 装置测出各种金属表面状态的吸收率（见表 1）。结果表明，金属表面的吸收率与涂料特性、金属表面光洁度以及基体材料成分等因素关系密切。非常粗糙的加工面和抛光的金属表面吸收率均随各种钢材中含碳量的增加而增大。在相同条件下高碳钢比低碳钢加工表面的吸收率大 1 倍左右。因为吸收率  $R_0$  与金属材料电阻率  $\eta_0$  的平方根成正比，即  $R_0 = 112.2\sqrt{\eta_0}$  [2]。由于高碳工具钢 T10 碳元素含量高，电阻率也高，因此吸收率随之增大。同样原因不锈钢要比 20Cr 钢加工表面的吸收率大 4 倍，经抛光后这两种材料的吸收率之差仍不变。表 1 所列各种材料的加工面经抛光后，吸收率降 2~6 倍，可见表面光洁度对吸收率影响很大。

尽管金属表面非常粗糙，但它对 CO<sub>2</sub> 激光的吸收率仍然很低，不能直接用于小功率的激光加工。如果在金属表面涂上相应的粉末，可显著改善激光加工效能。实验表明，涂布绝缘涂料的金属表面的吸收率几乎与基体材料无关，仅取决于涂料的特性。但涂布非绝缘性涂料的金属表面，吸收率与基体材料的化学成分有关。由于涂层被激光照射后，一部分能量很快传导到基体材料的上表面，如果基体材料电阻率高，其吸收率也高。正如表 1 中对涂有炭黑、石墨、镍硼硅涂料的 45 号钢比 20 号钢表面吸收率高。

2. 在大功率密度作用下的吸收率，热作用面积与激光加工工艺参数的关系。图 2 表明随激光光斑面积的增加，离点光源理论中假设关系偏差增大。可见不适宜用热传导理

表1 在低功率密度下的吸收率

材料	非常粗糙的 加工面	抛光面	吸 收 率 (%)						
			绝 缘 涂 层				非 绝 缘 涂 层		
			氧化锆	氧化钛	磷酸锰	氧化铝	炭黑	石墨	镍硼硅
20#	23.3	4	90.1	89.3	88.9		67.3	54.9	73.8
45#	7.1*	5.6	90.1		87.3		83.5	80.6	82.8
T10	100# 砂纸磨过	19.4	92.1				83.3		
20Cr		6	89.2	89.3	88.3		78.9	54.8	86.9
不锈钢		23.5	89.6				83.8		
铝合金						81.9			

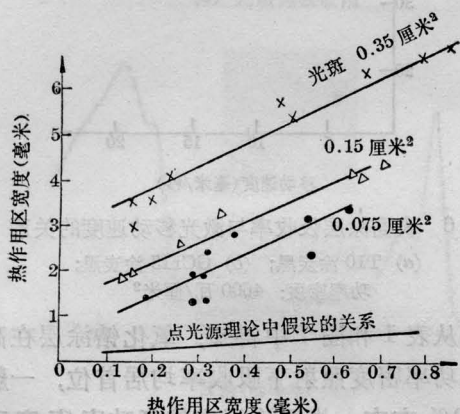


图2 45号钢在激光热作用下的宽度与深度的关系

论确定多模光束，尤其是散焦光束对金属表面的吸收率。

图3表明涂有氧化锆的三种材料表面的激光热作用横截面积随功率密度的提高而加大。氧化锆随功率密度提高烧蚀不严重。而涂炭黑的热作用面积随功率密度的提高而缓慢下降，当功率密度大到一定程度时其截面积突然上升。说明炭黑随功率密度的加大烧蚀严重，热作用面积突然上升表明金属表面开始熔化。图4表明炭黑涂层的热作用面积随激光移动速度的提高而缓慢上升，当移动速度达某一数值后其热作用面积又随移动速度提高而下降。因移动速度慢，炭黑易烧蚀；但当速度足够快时激光照射在涂层的总能量也减少了。

图5、6表明涂层的吸收率随功率密度

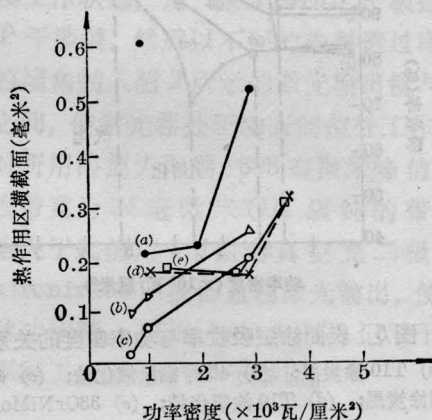


图3 热作用区横截面积与功率密度的关系

(a) 45号钢涂氧化锆；(b) T10涂氧化锆；  
(c) 33CrNiMoA涂氧化锆；(d) T10涂炭黑；  
(e) 45号钢涂炭黑；激光移动速度：14.7毫米/秒

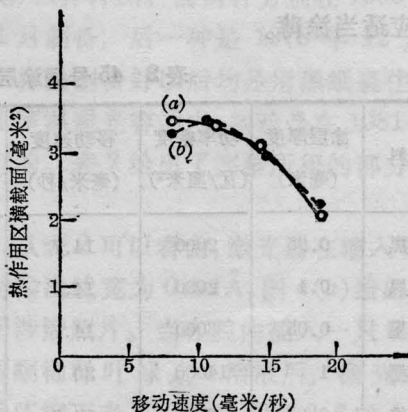


图4 热作用面积与激光移动速度的关系

(a) T10涂炭黑；(b) GCr15涂炭黑；  
功率密度：4600瓦/厘米²



和移动速度的变化可分三个阶段：功率密度小于1800瓦/厘米<sup>2</sup>，移动速度小于8毫米/秒，其吸收率变化微弱。在中等功率密度下氧化锆涂层的吸收率随功率密度增加而增加，而炭黑涂层的吸收率随功率密度增大而降低，随移动速度提高而提高。在大功率密度下由于金属表面的熔化，其吸收率突然上升，此时涂层失去了作用。在高移动速度下，吸收率随移动速度的加快而降低。

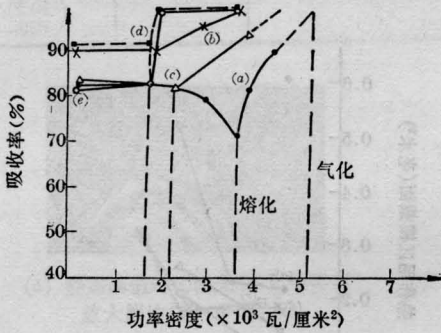


图5 表面涂层吸收率与功率密度的关系

(a) T10 涂炭黑; (b) 45号钢涂氧化锆; (c) 45号钢涂炭黑; (d) T10 涂氧化锆; (e) 33CrNiMoA 涂氧化锆; 移动速度: 14.7 毫米/秒

由表2得知，涂层厚度在0.05~0.2毫米对激光加工效果影响不大；但当厚度在1毫米左右其加工效果下降9倍。此外对易燃易爆的涂料应适当涂厚，对高熔点不易燃的涂料应适当涂薄。

表2 45号钢涂层的吸收率与涂层厚度等因素的关系

涂 料	涂层厚度 (毫米)	功率密度 (瓦/厘米 <sup>2</sup> )	移动速度 (毫米/秒)	表面硬度 (Hv)	硬化层宽 (毫米)	硬化层深 (毫米)	热作用面积 (毫米 <sup>2</sup> )	涂层吸收率 (%)
炭 黑	0.05	2000	14.7	838.5	5.6	0.45	1.68	60.5
炭 黑	0.1	2000	14.7	843.3	4.4	0.65	1.91	68.8
石 墨	0.05	3000	14.7	745	4.9	0.55	1.8	63.7
石 墨	1	14000	30	653.8	1.8	0.18	0.21	7.6
氧化锆	0.05	2000	14.7	889	5	0.75	2.5	90.1
氧化锆	0.2	2000	14.7	855.5	4.8	0.73	2.34	84.3

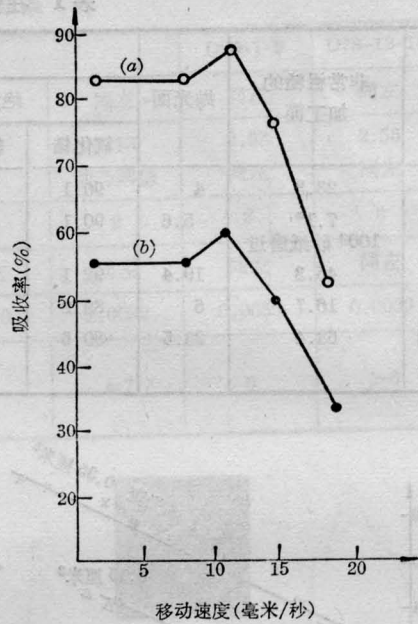


图6 表面涂层吸收率与激光移动速度的关系

(a) T10 涂炭黑; (b) GCr15 涂炭黑;  
功率密度: 4600 瓦/厘米<sup>2</sup>

从表1和图7中得知，氧化锆涂层在高或低功率密度照射下吸收率均居首位，一般在90%左右。炭黑涂层在较低功率密度下(2000瓦/厘米<sup>2</sup>左右)吸收率居于中上等，一般在80%左右。但在高功率密度下处于末位，一般在50%左右。在我们实验的条件下，五种涂料均能使金属表面硬化，硬化效果随吸收率的高低而异。凡表面涂层吸收率高其基体金属表面受激光热作用的面积大，同

(下转第532页)

表1 KrF体系的电流波形参数

体系	$\frac{J_T(X)}{J_T(He)} = \frac{I_1^2(X)}{I_1^2(He)}$	$I_1(X)/I_1(He)$	$I_1$ (千安)	$I_2$ (千安)	$I_1/I_2$	$\frac{dI_1}{dt}$ ( $\times 10^{12}$ 安/秒)	$\frac{dI_2}{dt}$ ( $\times 10^{12}$ 安/秒)
He	1 (5)	1	33.1	24.9	1.33	1.24	0.36
KrF	0.8(4)	~0.9	29.8	21	1.42	1.16	0.34

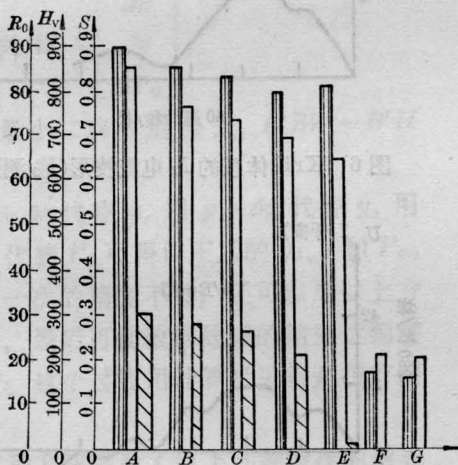
注:  $I_1$ 、 $I_2$ 均为最大值;括号内数字是示波器上幅值(平均值)

参 考 文 献

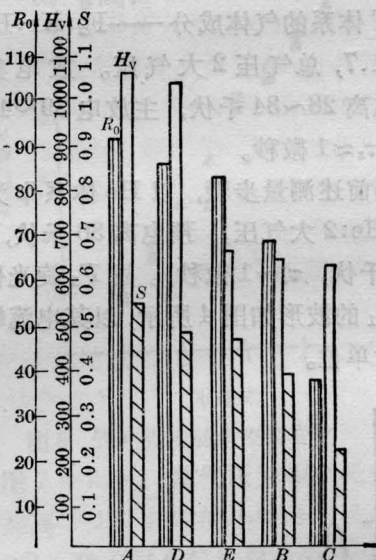
[1] R. C. Sze et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, **QE-14**, No. 12, 944.  
 [2] K. Noguchi et al.; *Japan J. A. P.*, 1980, **19**, No. 10, L585.

[3] 傅淑芬等;《物理学报》, 1980, **29**, No. 6, 799.  
 [4] Chen Jianwen et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**, 883.  
 [5] 清华大学编;《冲击大电流技术》,第8章,科学出版社出版,1978年。

(上接第536页)



(a) 功率密度: 2000 瓦/厘米<sup>2</sup>;  
移动速度: 14.7 毫米/秒



(b) 功率密度: 4000 瓦/厘米<sup>2</sup>;  
移动速度: 14.7 毫米/秒

图7 45号钢的各种涂层吸收特性的比较

A—氧化锆; B—磷酸锰; C—炭黑; D—石墨; E—镍、硼、硅; F—加工面; G—抛光面;  
带竖线的表示吸收率  $R_0$ ; □—表面锥氏硬度  $H_v$ ; 带斜线的表示激光热作用面积  $S$

时表面硬度也高。凡经加工或抛光的无涂层的金属表面均无硬化效果。

作者感谢王瑞华、黄关龙等同志对量热计制作工艺和校对给予指导和支持,西北工业大学李恩普同志参加了部分工作。

参 考 文 献

[1] Smithells C. J.; *Metals Reference Book III*,

London: Butterworths, 1967.

[2] 荒田吉明等;《溶接学会志》,1971年,第40卷,第12号,1249~1260.  
 [3] 荒田吉明等;《溶接学会志》,1972年,第41卷,第3号,291~301.  
 [4] Jon. E. Miller et al.; *Metal Progress*, 1977, **III**, No. 5, 38~43.  
 [5] 黄永楷等;《计量学报》,1981, **2**, No. 1, 18.