

高功率 CO₂ 激光深穿透焊接的研究

郑启光 陶星芝 杨 杨 李家熔 王汉生 李再光

(华中理工大学激光所, 430074)

王朝诚 孙树元 高小春 张显林 王富林

(第一汽车厂, 130011)

摘要: 本文采用 3~5 kW (低阶模 3~4 kW) 高功率 CO₂ 激光束对 18CrMnTi 低合金钢进行了深穿透焊接的研究, 焊缝深宽比接近 2, 焊接穿透深度达到 5.5 mm 以上, 对影响激光深穿透焊接效果的各种焊接工艺参数进行了研究。找到克服激光焊缝区缺陷的一些有效措施。

关键词: 激光, 深穿透焊接, 低合金钢

Study on laser deep penetration welding of metallic materials

Zheng Qiguang, Tao Xingzhi, Yang Yang, Li Jiarong, Wang Hansheng, Li Zaiguang
(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Wang Chaocheng, Sun Shuyuan, Gao Xiaochun, Zhang Xianlin, Wang Fuling
(First Automobile Plant, Changchun)

Abstract: Experimental results on the welding of low alloying steel (18CrMnTi) and 45 steel with 3-5 kW CO₂ laser are discussed. The depth/width ratio being about 2, the maximum penetration depth is about 5.5 mm. Various technological parameters influencing the effect of laser deep penetration are studied and some effective measures for overcoming the defect (crack, gas hole) of laser deep penetration welding have been found.

Key words: laser, deep penetration welding, low alloying steel

一、引 言

激光焊接可分为脉冲激光焊接和连续激光焊接。在连续激光焊接中又可分为热传导焊接和深穿透焊接。随着激光器的输出功率的提高,特别是数千瓦级高功率连续 CO₂ 激光器的发展,激光深穿透焊接也已迅速发展起来。目前国外特别是美国用于激光深穿透焊接的高功率 CO₂ 激光器的输出功率已达 20 kW,焊接穿透深度为 19 mm,用 77 kW CO₂ 激光器焊接,最大焊接深度达 2 英寸。高功率激光深穿透焊接具有广泛的应用前景,特别是在机械制造、造船及国防工业上起很重要的作用。

与连续热传导激光焊接 ($10^4 \sim 10^5$ W/cm² 左右的功率密度) 不同的是激光深穿透焊接是采用 $10^5 \sim 10^7$ W/cm² 的高功率密度,焊接时金属表面的温度很高,其热量不能单靠热传导、对

流、辐射从激光入射点处排走,而是作用点处的金属达到气化,因而在材料中会形成“孔穴”^[1]。材料内的金属蒸气压有力地支撑着“孔穴”周围液态金属。后继的激光束作用在孔穴中,通过孔壁的多次反射,使激光束直接进入金属材料内部,并逐步使“孔穴”加深。孔穴处于动力学稳态,并穿过液态金属向前移动,后置的孔穴由于激光能量的撤除,孔穴周围的液态金属使孔穴塌陷,并随后凝固而形成深宽比(h/b , h 是焊深, b 是焊宽)很大的深熔焊接。

本文主要研究 3~5 kW 高功率 CO₂ 激光束深穿透焊接的主要工艺参数,并较详细地研究了激光深穿透焊接中焊接接头的缺陷(如裂纹、气孔等)。并找到了克服焊缝缺陷的一些有效措施。

二、实验条件和装置

激光深穿透焊接试验是在 5 kW CO₂ 激光试验机和 HGL-87 型万瓦级横流 CO₂ 激光器上进行的,激光器输出低阶模 3~4 kW,高阶模 5 kW。透镜焦距为 80~175 mm,试验材料为 18CrMnTi 低合金钢。

激光焊后的试件在拉伸试验机上分别作了拉伸和弯曲试验,用金相显微镜、扫描电镜观察了激光焊接头的微观组织并进行了焊后缺陷(裂纹气孔等)的检查,测量了焊缝及热影响区的硬度。

三、激光深穿透焊接的工艺参数

3.1 激光功率

激光深穿透焊接的深度与激光功率、光斑直径有关。图 1 示出焊接深度与激光功率的关系曲线,从图中看到:焊接深度在光束直径一定时,随入射激光功率的增加而增加,当采用 3.5 kW 功率时,焊接穿透深度达 5.5 mm。Banas 的研究指出,最大的熔深与激光功率的 0.7 次方成正比^[1]。如果增大光斑直径,实验发现焊缝区及热影响区宽度均变宽。

3.2 表面状态及吸收率

激光焊接的效率是由于工件表面吸收激光能量决定的,金属对红外光的吸收取决于自由电子的热传导吸收,因此吸收率是与金属电阻率有关, $A = 112.2\sqrt{\rho_r}$, 其中 A 是吸收率, ρ_r 是电阻率;另外吸收率是波长的函数,对于 45# 钢和一些低合金钢(18CrMnTi),在 300°C 用 Bramson 方程可计算出吸收率大约在 15% 左右。表面黑化能提高吸收率或利用活性气体亦可增加吸收率,例如所吹的 Ar 中加入 10% 左右的氧气。

虽然金属在室温下对红外光的吸收率较低,但是一旦超过金属的阈值能量(约 10^6 W/cm^2),深熔焊接的形成,孔穴的产生则会大大提高材料对激光束的吸收,我们实验表明,在形成

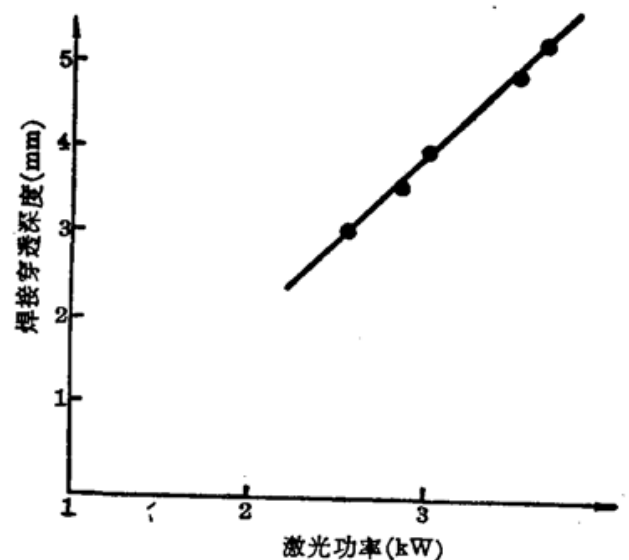


图 1 焊接穿透深度与激光功率的关系曲线

深穿透焊接后,材料表面状态并不严重影响激光深穿透焊接。

3.3 焊接扫描速度

在深穿透焊接时,焊接扫描速度因“光孔”效应而受到限制,当焊接扫描速度增加时,形成光孔所需的时间与工件特定区域的照射时间可比拟时,这时因光孔不再完全吸收入射能量而使利用率下降。若焊速太慢,也则由于等离子体的屏蔽而使熔深下降。故在一定的功率密度作用下有一个最佳的焊接速度。图2示出激光焊接深度,宽度随焊接速度的变化曲线。图3示出不同焊接速度的焊缝形状。从图中看到,在一定的速度范围内,功率一定,焊接深度和宽度随扫描速度的增加而减少。焊缝热影响区也会随扫描速度的减少而变大。

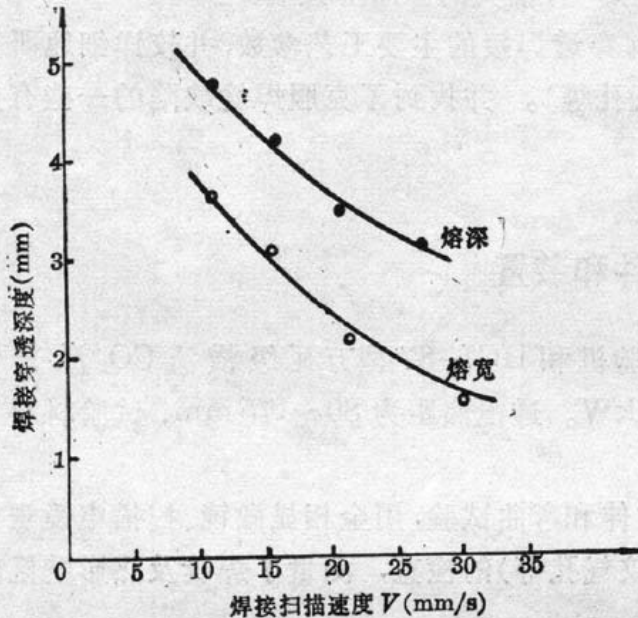


图2 激光焊接深度与扫描速度的关系

3.4 透镜的焦距及离焦量

对一定深度的激光深穿透焊接,有一个合适的透镜焦距范围,一般说来,需焊接的深度越深,则需选较长焦距的透镜,离焦量对焊接穿透深度和焊缝形状影响很大。对于一定厚度的材料的激光焊接,在透镜焦距确定后有一个合适的离焦量。通常采用适量的负离焦,即是说,激光焦点是在工件表面下的某一距离处可得到最大的焊接穿透深度。表1列出了不同离焦量对激光焊接的影响。从表中看到,当采用137 mm 焦距透镜对 18CrMnTi 低合金钢焊接时,大约合适的离焦量为 -2 mm 左右,此时可

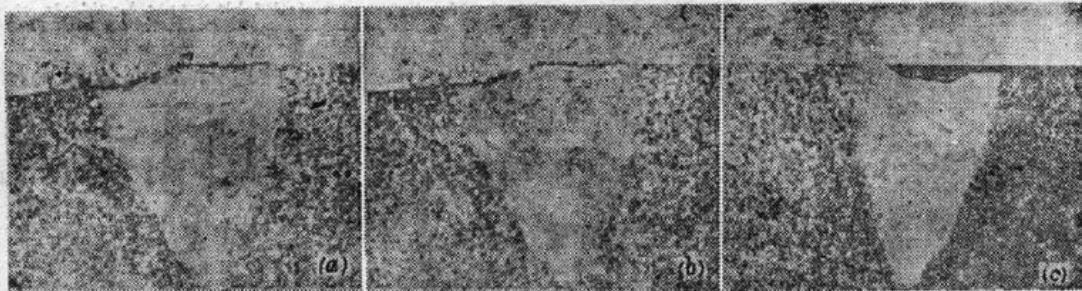


图3 (a) 焊速为 15 mm/s; (b) 焊速为 20 mm/s; (c) 焊速为 30 mm/s

表1 不同离焦量对激光焊接的影响

试样号	激光功率 (kW)	焊速 (mm/s)	离焦量 (mm)	焊接穿透深度 (mm)	吹气量 (L/min)
1	3	20	-1	~3.5	5
2	3	20	-1.5	~3.7	
3	3	20	-2	~4	
4	3	20	-4	~2.5	
5	3.5	15	-2	>5	
6	4.0	15	-1	~3.7	9
7	4.0	15	-2	~5	
8	4.0	15	-3	~3.2	

得到最大焊接深度。例如当采用 3.5 kW 激光功率, 焊接扫描速度为 15 mm/s 时, 深度达 5.5 mm 以上。

3.5 辅助吹气

在孔穴内所形成的高压金属蒸汽温度很高, 在向孔穴外喷射后使得孔穴表面的气体离化而形成等离子体。等离子体形成后反过来又屏蔽后继的激光束, 使激光束功率密度降低, 这对得到深宽比大的焊缝影响很大, 严重时不能产生深熔焊接效应, 因而在激光深穿透焊接中, 抑制或吹开等离子体是一个很重要的问题。实验中采用正向或侧向吹气对保护透镜不受污染和抑制、吹开等离子体均有作用。实验发现, 离焦量少, 即光斑小, 功率密度大, 此时产生的等离子弧光强, 而当离焦量大, 即光斑大、功率密度降低时, 等离子弧光变弱, 实验还发现, 在激光功率密度高 ($\sim 10^6 \text{ W/cm}^2$) 时, 等离子弧光呈天兰色, 当激光功率密度下降 ($< 10^5 \text{ W/cm}^2$) 时, 等离子弧光呈粉红色^[9]。

图 4 示出不同吹气量吹气方向对激光焊接等离子弧的影响。图中表明, 在未使用辅助吹气时, 等离子弧很强(见图 4(a)), 随着辅助吹气(Ar)增大, 等离子弧减弱, 且看到采用侧向吹气比单正向吹气时效果好。在采用侧吹 Ar 时, 采用与水平方向约成 10° 夹角, 吹气量为 10 l/min 左右, 此时效果最好(见图 4(d))。

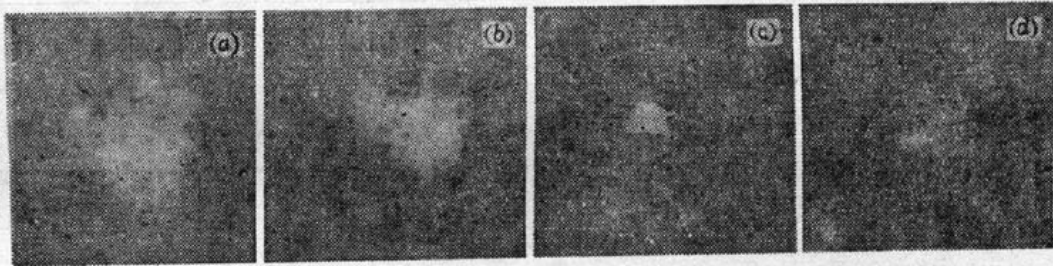


图 4

除以上几种工艺参数外, 激光模式对深穿透焊接的质量影响很大, 采用多模激光束焊接, 焊缝深宽比小, 热影响区大, 而采用低阶模焊接时可得到较大的焊接深宽比和较窄的热影响区。

四、激光焊接接头的金相分析

由于激光焊接的加热速度快、焊接熔池迅速冷却, 故与普通的常规焊接在金相组织上有重要的差别, 其表现在: (1) 焊接溶池的液-固界面存在着很大的温度梯度; (2) 焊接溶池是在较快速移动下结晶的; (3) 焊缝区的热影响区少。图 5 为 18CrMnTi 的焊缝区和热影响过渡区的组织形貌图中看到, 母材金属为珠光体和铁素体, 激光焊缝区、主要为马氏体, 组织均匀, 硬度在 HV 500 左右。在激光焊缝热影响区主要为马氏体、铁素体和珠光体(屈氏体、索氏体)的混合。并且具有带状分布的特征, 此区组织晶粒并未明显长大, 热影响区硬度不均匀, 硬度为 HV 320 ~ 500。图 6 示出 18CrMnTi 的激光焊接接头的显微硬度分布。

表 2 示出 18CrMnTi 的激光焊接试样拉伸试验数据, 拉伸试验研究结果表明, 尽管焊缝区存在硬度较高的马氏体组织, 但它的强度并不比母材金属低, 相反抗拉强度还要比母材高。

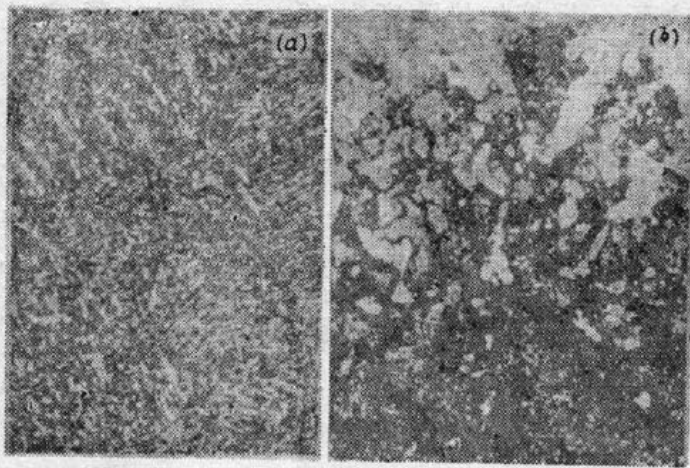


图 5

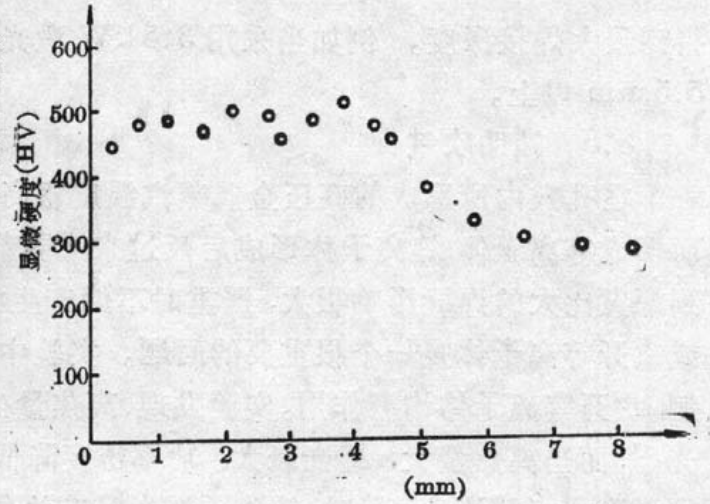
图 6 激光焊接 18CrMnTi 焊缝区的显微硬度分布 ($P=3\text{ kW}$, $V=15\text{ mm/s}$)

表 2 18CrMnTi 的激光焊接试样拉伸试验数据

试样号	板厚 (mm)	板宽 (mm)	面积 (mm ²)	最大加载 (kg)	破坏负载 (kg)	延伸长 (mm)		应力 (mm)		应变 (mm)		试验结果
						最大负载	破坏负载	最大负载	破坏负载	最大负载	破坏负载	
No1	4.8	16	76.8	4147.9	3456.6	15.000	17.100	54.009	45.008	30.000	34.200	在母材处断
No2	2.8	12.7	35.560	2616.5	2172.4	49.000	52.200	73.582	71.092	9.800	12.692	在母材处断

五、激光焊接接头的缺陷

在焊接过程中由于种种原因,使焊接接头产生各种缺陷(如裂纹、气孔等),这些缺陷会严重影响焊接质量。

焊接裂纹是焊接中危害最大的缺陷,在激光焊接中,如果工艺参数等选择不当,也会出现根部裂纹,显微裂纹和焊缝区的纵向裂纹。图 7 示出激光焊缝中的根部裂纹。焊缝根部裂纹是一种从焊缝底部缺口发生并通过母材或熔敷金属内的裂纹,



图 7

根部裂纹是沿着焊道的纵向裂纹,从横断面上看是从焊缝根部出发并向内部扩展的。根部裂纹是属于冷裂纹,实验中发现,一些根部裂纹是在焊接结束后经过一定的时间(几小时或几天)才出现的。根部裂纹一般认为是发生在 400°F 以下的温度范围内。影响根部裂纹的主要因素:即熔合区的塑性,氢及拘束应力。激光焊接时,若拘束度大会产生大的

拉伸应力,故认为拘束度、焊接板厚和应力集中可能是产生根部裂纹的重要因素。消除根部裂纹可采取如下措施:1)预热可防止根部裂纹、对 18CrMnTi 低合金钢进行激光焊接时,采用预热 200°C 左右再进行激光焊接,可消除根部裂纹。我们实验结果已证明了这一点。2)后热可防止根部裂纹,由于有些根部裂纹是在数分钟甚至数小时后才产生,故在激光焊后 $1\sim 2$ 分钟内即将焊件置入炉内加热至 300°C 左右,也可有效地防止根部裂纹;3)防止根部裂纹的其他方法是改善焊接的热循环,增加线输入能量以及在估计焊接时会产生收缩的相反方向加应力,这样

可降低材料的应变, 同样对消除根部裂纹有积极的作用。

激光焊接中也会出现纵向裂纹, 这种裂纹的形成可能与焊缝金属及其附近热影响在冷却时开始收缩, 长度、宽度和高度都会变小有关, 即与组织应力有关。另一方面与低于转变温度范围的塑性流动有关。实验证明激光加热速度快, 在焊接厚大件时更易产生纵向裂纹。这时, 同样可以通过预热等办法来消除焊缝区的纵向裂纹, 此外焊接接头的形状, 配合间隙的改进也有积极的效果。显微裂纹通常属于热裂纹, 一般认为与焊缝中的组织、化学成份及硫的含量等有关。但显微裂纹对钢的焊接的整体性能影响不很大。

激光焊接时还会出现气孔, 气孔起源于: 1) 焊缝区保护不好, 空气中的氢或氧进入焊缝区, 由于激光焊接的速度快, 会出现气孔气体来不及逸出); 另一方面空气中的氧可与金属中的碳反应生成一氧化碳, 这也会使(气孔的形成; 2) 焊区清洗不干净, 残留着油、或锈污等, 也会因氢或氧进入焊缝而形成气孔。故为了消除气孔, 加强对激光焊区的保护是非常重要的。

参 考 文 献

- 1 G. M. Banas, *Opt. Engineer.*, 17(3), 210(1978)
- 2 Yoshiki Arata *et al.*, *Transition of JWBI*, 14(1), 2(1985)

Cr:Mg₂SiO₄ 激光晶体的发光机理

掺铬镁橄榄石 (Cr:Mg₂SiO₄) 是一种新型激光晶体, 可获得可调谐的近红外激光。但其发光机理尚不清楚。作者从实验上用激光诱导荧光法研究了它的发射光谱, 并从理论上计算和解释了发光中心的结构和机理。

实验样品是自己生长和加工的, 尺寸为 14×14×20(mm)³。泵浦激光的波长分别为 0.532 μm、0.64 μm 和 1.064 μm, 用偏振激发方式, 在不同方向上得到了结构不同的荧光辐射。实验表明, 泵浦光的偏振矢量相对于晶体轴的方向对辐射带的结构有重要影响。泵浦波长为 0.532 μm 时, 荧光辐射谱有两个带, 带峰分别

位于标识线 (1.064 μm) 的两边, 短波带 (S 带) 峰位于 0.8 μm 附近, 而长波带 (L 带) 峰则在 1.18 μm 附近。但当泵浦激光的偏振方向平行于晶轴 b (E // b) 时, 辐射主要表现为 S 带; 而当该偏振方向平行于晶轴 c (E // c) 时, 辐射主要为 L 带; 只有当该偏振方向平行于晶轴 a (E // a) 时, 两个带才以接近的强度同时出现。图 1 给出了这三种辐射谱图。泵浦波长为 0.640 μm 时, 情况与此类似; 泵浦波长为 1.064 μm 时, 辐射带的结构与图中 E // c) 时的 L 带基本一样。实验表明, Cr:Mg₂SiO₄ 的两个荧光辐射带应源于两种发光中心。其中 S 带可以用位于八面体中的 Cr³⁺ 的辐射予以解释, 但对 L 带的解释应寻找新的机制。我们认为它是源于处在氧四配位的四面体中的 Cr⁴⁺, 并用 MS-X_a 方法对该结构进行了计算和分析。结果表明, 它在可见和近红外区有三个吸收带, 一个位于 1 μm 附近, 是 ³E(基态) → ³T₁、³T₂、¹T₁、¹T₂、¹E 和 ¹A₁ 的跃迁, 另一个弱吸收位于 0.7 μm 附近, 是 ³E → ¹A₁ 的跃迁。且于 Cr³⁺ 的 ⁴A₂ → ⁴T₁ 的吸收带重合。而发射带的波长范围则在 1.0 μm ~ 1.2 μm 区域。理论结果与实验吻合很好, 进一步表明 Cr:Mg₂SiO₄ 中应有 Cr⁴⁺ 存在, 并且应是获得红外可调谐激光的主要机制。

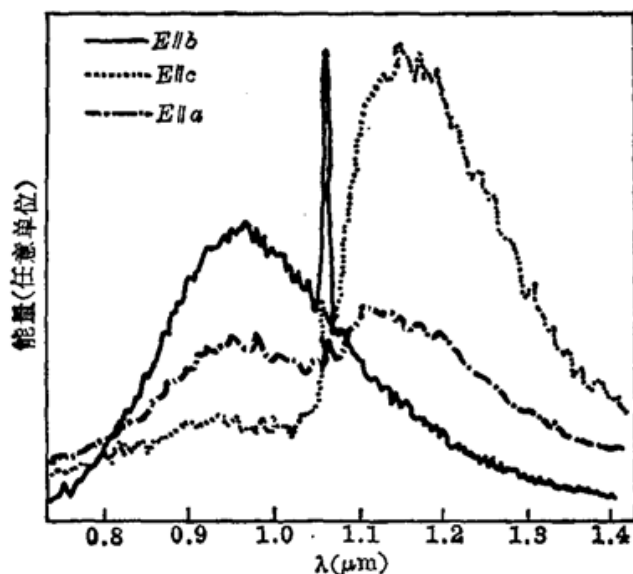


图 1 泵浦激光波长为 0.53 μm 时的荧光辐射谱图

迁, 一个位于 0.55 μm 附近; 相应于 ³E → ³T₁ 和 ³T₂ 的跃迁, 另一个弱吸收位于 0.7 μm 附近, 是 ³E → ¹A₁ 的跃迁。且于 Cr³⁺ 的 ⁴A₂ → ⁴T₁ 的吸收带重合。而发射带的波长范围则在 1.0 μm ~ 1.2 μm 区域。理论结果与实验吻合很好, 进一步表明 Cr:Mg₂SiO₄ 中应有 Cr⁴⁺ 存在, 并且应是获得红外可调谐激光的主要机制。

本课题获国家自然科学基金资助。

(华东师范大学物理系, 200062 林远齐 杨宝成 林平
中国科学院上海光机所, 201800 潘佩聪 邓佩珍 颜声辉
1990年2月14日收稿)