

圆柱体工件激光相变硬化过程的理论研究

姚善长

(化工部化工机械研究院)

提要: 提出了利用复曲面反射镜对圆柱体工件进行连续激光相变硬化的数学模型, 利用它能够计算硬化过程中的温度、相变和应力值。最后给出一些试样的计算结果。

Theoretical study of laser phase transformation hardening for cylindrical pieces

Yao Shanchang

(Chemical Machinery Research Institute, Ministry of Chemistry, Lanzhou)

Abstract: Mathematical models for progressive laser transformation hardening with a toric mirror are presented. The models valid for cylindrical geometry can be used for calculating temperature, phase transformation and stress during the hardening process. Moreover, computer calculating results for some specimens are given and analysed.

一、前言

激光相变硬化是最近十多年来才出现的一种新型的材料表面硬化方法。由于它具有生产率高、节能、工作环境洁净、工件变形小、容易实现局部硬化及显著地提高机件的硬度、耐磨性和疲劳强度等优点, 已引起了人们愈来愈大的关注^[1, 2]。特别是随着大功率激光器的发展, 这种方法已开始进入了广泛的工业性应用。

利用一种称为复曲面反射镜 (Toric Mirror) 的光学装置对圆柱体工件表面进行连续激光硬化是一种有效的方法^[3, 4]。图1为采用这种装置对圆柱体工件外表面进行激

光硬化处理的示意图。复曲面反射镜的主要优点是它能形成环形的激光束。当圆柱体工件在这环形束中间以一恒定的速度轴向移动时, 可以在整个圆柱表面上得到连续、均匀的硬化。这种方法也避免了用光斑多道扫描照

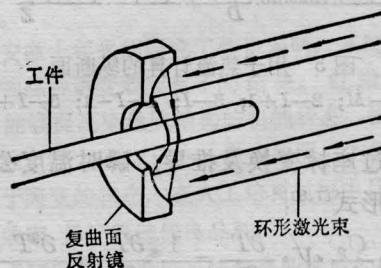


图1 利用复曲面反射镜对圆柱体工件进行激光相变硬化的示意图

收稿日期: 1986年3月10日。

射时产生的叠加区回火现象。

二、理论模型

数学模型包括整个激光硬化处理过程中温度、相成份和应力值的计算。

在上述的三个量之间，存在着复杂的耦合作用，如图2所示。这些耦合作用的机理已有一些作者作了详尽的解释^[5,6]。由于虚线所示的两个作用相对来说十分微弱，可以忽略这两个作用，即忽略了应力对温度和相变过程的反馈作用。这样的处理可以使问题简化，特别是可以使温度和相成份的计算与应力的计算分开进行。

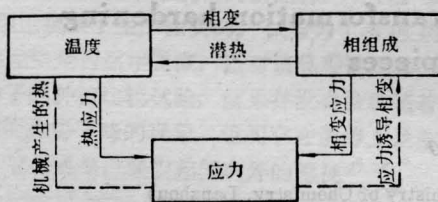


图2 热处理过程中温度、相组成和应力间的耦合作用。

温度场

图3为用于热传递计算、并画有网格范例的纵断面。



图3 用于热流计算的纵断面

1-I-M; 2-I+1; 3-I; 4-I-1; 5-I+M

通过座标变换及推导，瞬时温度公式变成下列形式^[7,8]：

$$\rho \frac{C_p}{\lambda} \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{P_i}{\lambda} \quad (1)$$

式中 T 为温度； V 为工件的移动速度； λ 为热

传导率； C_p 为比热； P_i 为相变潜热； ρ 为工件密度。在推导上式的过程中作了如下的假设： λ 为常数，且与方向无关；不考虑过程的起始和终了状态；过程为一稳态热流问题，即 $\partial/\partial t=0$ 。这样的处理使问题成为只考虑通过求解区的材料。其边界条件可归纳为（参看图3）：

边界 A: $T = \text{常数}$;

边界 B: 对冷却剂:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = -\alpha(T) (T_{\text{边界}} - T_{\text{环境}})$$

$$\text{对激光束: } \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \dot{q};$$

边界 C: $\dot{q}_z = 0$;

边界 D: $\dot{q}_r = 0$ 。

上列式子中的 α 为对流热传递系数； \dot{q} 为热流量。在计算时，假定激光束至工件表面的流热量是恒定的。然而，在实际计算中还能方便地修正计算机程序。例如，将吸收率考虑进去，它是温度的函数。

相组成

由于材料性能参数和相变潜热均与相组成和相变过程有关，因而温度场的计算必须与相变过程的计算同时进行。

相变过程的计算是利用材料的等温转变图。由于在热传递公式(1)中没有时间函数关系，故采用了跟踪径向节点运动的方法，即根据某一节点在求解区内的实际移动速度和在 z 向的位移来算得与时间有关的温度 $T(r \cdot t)$ 。

由于激光硬化过程的加热速度极快，材料在奥氏体化温度下几乎无保温时间，其等温转变图与一般资料中给出的材料标准等温转变图有较大偏差，因而应该通过实验来确定材料在快速加热条件下的等温转变图。图4和图5是SS2244钢在快速加热条件下的等温加热转变图和等温冷却转变图，它们是通过膨胀仪法实验确定的^[9]。利用等温转变图计算相变过程是采用Hildenwall提出的

方法^[10]。将温度曲线模拟成一阶梯,即将微小的时间步长与沿着恒定体积百分比线的瞬时温度变化连结起来。

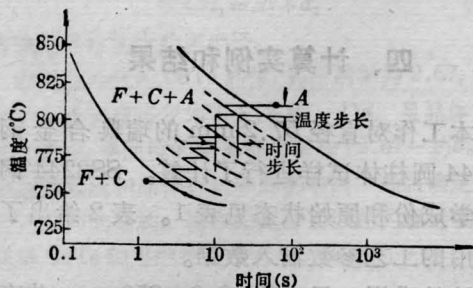


图4 SS2244 钢快速加热时的等温加热转变图和计算用的阶梯模型,加热速度 1000°C/s

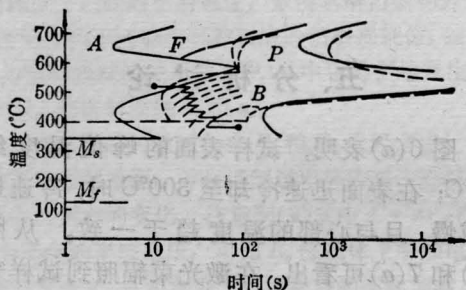


图5 SS2244 钢快速加热(实线)和标准的(虚线)等温冷却转变图

对加热过程中的奥氏体转变及冷却过程中奥氏体向光共析铁素体或渗碳体、珠光体和贝茵体的转变可用 Avrami 表达式^[11]计算:

$$V_K = 1 - \exp(-b_K t^{n_K}) \quad (2)$$

上式中, V_K 为 K 相的体积百分比量; t 为时间; b_K 和 n_K 为与温度有关的参数,它们可从材料的等温转变图求得:

$$n_K = \frac{\ln \left[\frac{\ln(1 - V_{SK})}{\ln(1 - V_{JK})} \right]}{\ln \left[\frac{t_{SK}(T)}{t_{JK}(T)} \right]} \quad (3)$$

$$b_K = - \frac{\ln(1 - V_{SK})}{t_{SK}(T)^{n_K(T)}} \quad (4)$$

上两式中的 V_{SK} 和 V_{JK} 为 K 相在开始转变线(1%)和终了转变线(99%)处的百分比量; t_{SK} 和 t_{JK} 为相应的时间。

对无扩散的马氏体转变,采用下列式子计算^[12]:

$$V_m = 1 - \exp[K(M_s - T)^n] \quad (5)$$

上式中, V_m 为马氏体的体积百分比量; M_s 为马氏体开始转变温度; T 为温度; K 和 n 为常数,它们由实验确定^[12]。

最后,可用下式计算(1)式中的相变潜热 P_i :

$$P_i = \sum_k (P_{i,K} \cdot V_K) \quad (6)$$

上式中, $P_{i,K}$ 为转变为 K 相的相变潜热,本工作采用了[5]实验确定的数据。

应力

应力的计算采用一维模型。考虑一个薄截面以速度 V 通过求解区,并假定此薄截面不发生扭曲,即产生的为一平面应变状态。对完全轴对称的长圆柱体,其平衡公式及位移与应变之间的关系式在一般的力学教科书中均可找到。然而,将温度梯度、相变过程及塑性流变和应力连系起来的本构方程是相当复杂的。本工作采用了 Sjöström 提出的本构方程^[5]。

三、数学方法和计算机程序

温度和相组成的数值计算采用了有限差分法。例如,对热传导公式(1)中的空间导数项可用下列的有限差分来代替:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{2} \left(\frac{T(I) - T(I-1)}{r(I) - r(I-1)} + \frac{T(I+1) - T(I)}{r(I+1) - r(I)} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{T(I) - T(I-M)}{z(I) - z(I-M)} + \frac{T(I+M) - T(I)}{z(I+M) - z(I)} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{2}{r(I+1) - r(I-1)} \cdot \left(\frac{T(I+1) - T(I)}{r(I+1) - r(I)} - \frac{T(I) - T(I-1)}{r(I) - r(I-1)} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{2}{z(I+M) - z(I-M)} \cdot \left(\frac{T(I+M) - T(I)}{z(I+M) - z(I)} - \frac{T(I) - T(I-M)}{z(I) - z(I-M)} \right) \quad (10)$$

上列式中的 M 为径向节点号。

计算温度和相组成的计算机程序的输入数据包括:

- ① 基本节点网格;
- ② 边界条件: $\alpha(T)$ 和外表面上的估算温度; 作用于工件表面的激光束宽度和热流量 \dot{q} ; 工件开始处理端(图 3 上的边界 A) 的温度;
- ③ 材料参数: 热传导率 λ 、比热 C_p 、密度 ρ 及材料的等温加热和等温冷却转变图;
- ④ 工件的轴向移动速度;
- ⑤ 精度要求。

应力的计算采用有限单元法。本工作直接采用了 Sjöström 博士编制的一个一维有限单元法程序^[5]进行计算。应力程序的输入数据除了前面程序已算得的温度和相组成值外, 还包括节点网格以及各个相的弹性模

量 $E(T)$ 、泊桑比 ν 、热应变 $\epsilon^{th}(T)$ 、相变应变 ϵ^{tr} 、相变塑性应变 ϵ^{tp} 、屈服强度 $Y(T)$ 和应变硬化率 $H(T)$ 。

四、计算实例和结果

本工作对直径 57.2 mm 的瑞典合金钢 SS2244 圆柱体试样进行了计算。SS2244 钢的化学成份和原始状态见表 1。表 2 给出了计算用的工艺参数输入数据。

计算采用一尺寸为 28.6 × 250 mm、共有 30 × 158 个节点的网格。图 6 至 11 给出了这些试样的计算结果。

五、分析讨论

图 6(a) 表明, 试样表面的峰值温度约 950°C; 在表面迅速冷却至 300°C 时, 冷速显著减慢, 且与心部的温度趋于一致。从图 6(b) 和 7(a) 可看出, 在激光束辐照到试样表面时, 表面及 0.50 mm 深度处可全部转变为奥氏体; 在 0.75 mm 深度处只形成 35% 的

表 1 SS2244 钢的化学成份和原始状态

化 学 成 份 (%)									原 始 条 件	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	热处理	硬 度 H _V 0.5
0.40	0.31	0.72	0.010	0.026	1.11	0.16	0.16	0.15	调质	320

表 2 计算输入数据

试样号	试样材料	试样半径 mm	运动速度 m/min	激光束宽度 mm	输入功率密度 W/m ² ·10 ⁶	总的输入功率 W
1	SS2244	28.6	0.152	8.175	6.605	9703
2			0.191	8.175	6.605	9703
3			0.229	8.175	6.605	9703
4			0.191	8.175	8.256	12130
5			0.191	8.175	9.907	14550
6			0.152	7.475	7.224	9705
7			0.152	5.025	10.745	9705

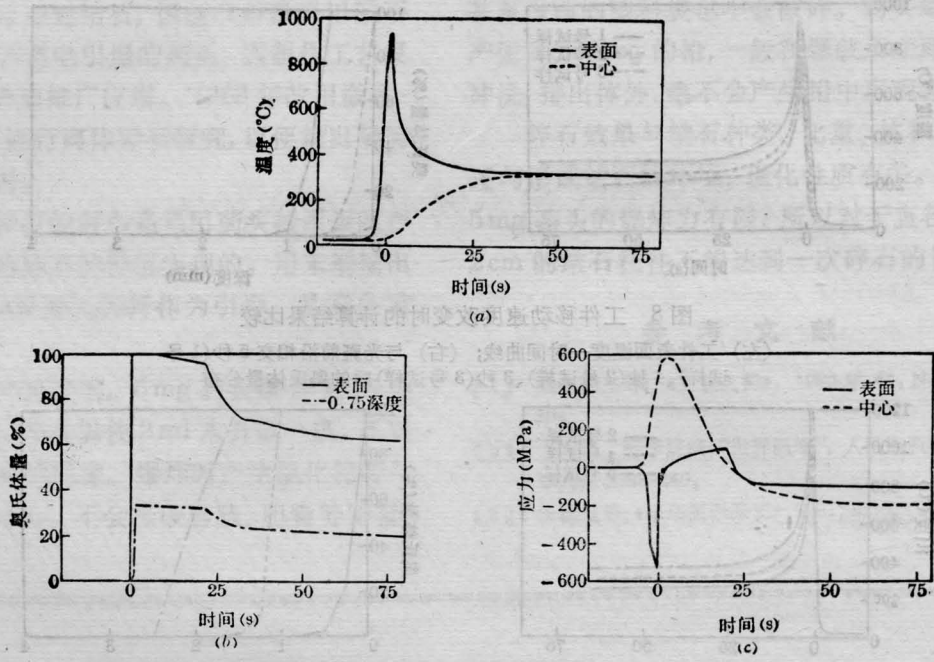


图6 1号试样的计算结果
 (a) 温度—时间曲线; (b) 奥氏体量—时间曲线;
 (c) 轴向应力—时间曲线

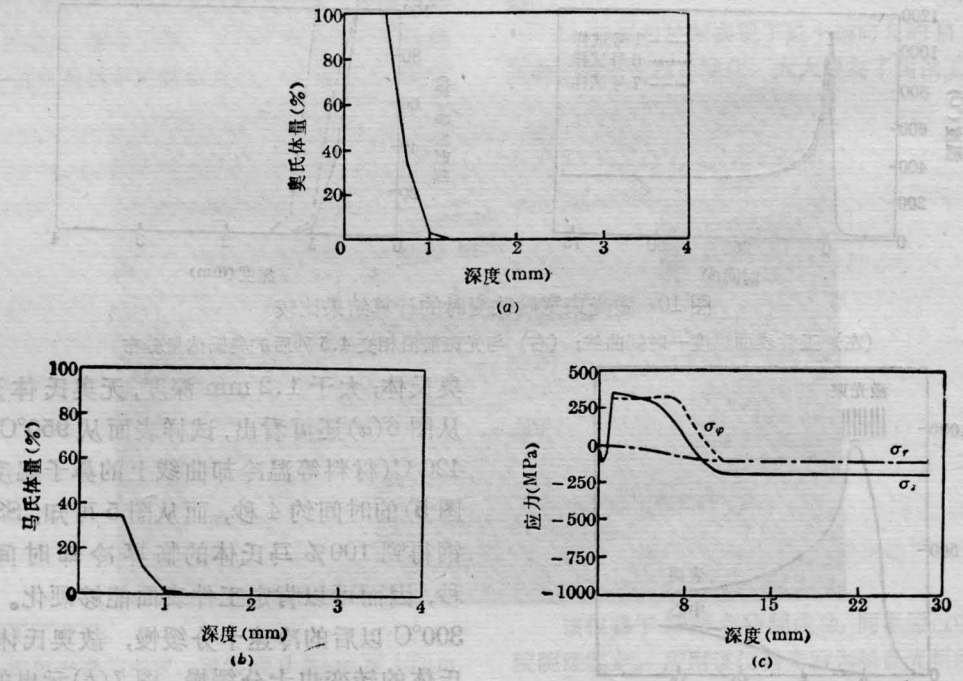


图7 1号试样的计算结果
 (a) 与光斑前沿相交7秒后的奥氏体量分布; (b) 与光斑前沿相交80秒后的马氏体量分布; (c) 与光斑前沿相交80秒后的轴向、切向和径向应力分布

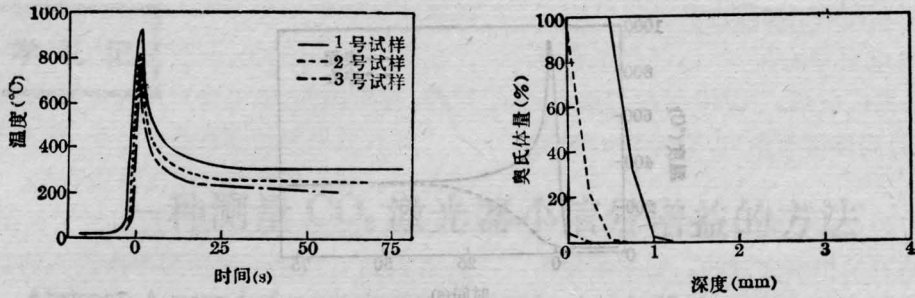


图8 工件移动速度改变时的计算结果比较

(左) 工件表面温度—时间曲线; (右) 与光斑前沿相交 5 秒(1号试样)、4 秒(2号试样)、3 秒(3号试样)后的奥氏体分量分布

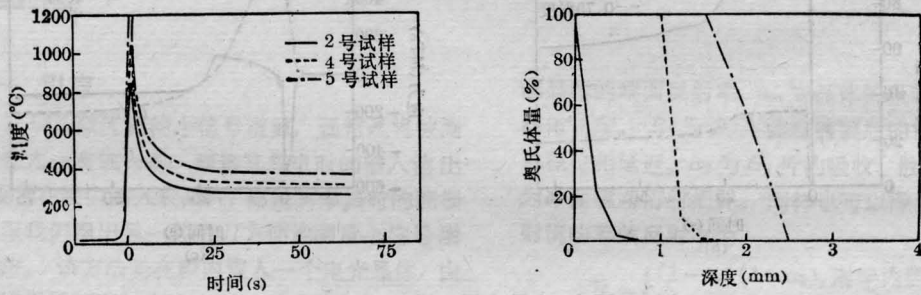


图9 激光输出功率改变时的计算结果比较

(左) 工件表面温度—时间曲线; (右) 与光斑前沿相交 4.5 秒后的奥氏体分量分布

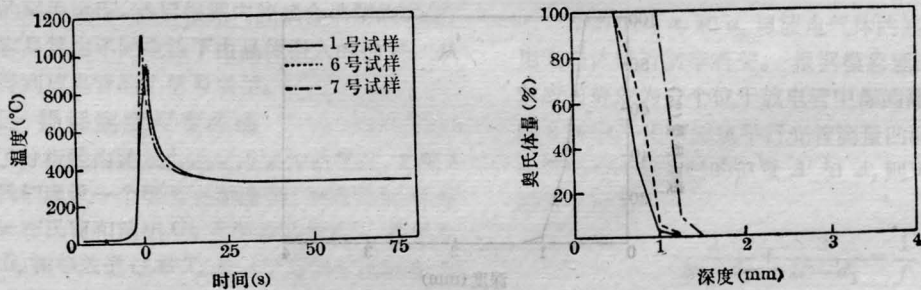


图10 激光束宽度改变时的计算结果比较

(左) 工件表面温度—时间曲线; (右) 与光斑前沿相交 4.5 秒后的奥氏体分量分布

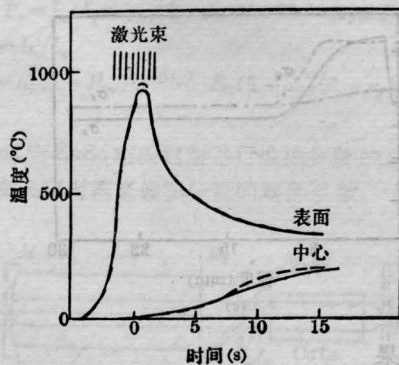


图11 两种数学模型计算结果(1号试样)的比较

实线: Kou 和 Sun 的计算结果;
虚线: 本工作的计算结果

奥氏体; 大于 1.2 mm 深度, 无奥氏体形成。从图 6(a) 还可看出, 试样表面从 950°C 冷至 420°C (材料等温冷却曲线上的鼻子温度, 见图 5) 的时间约 4 秒, 而从图 5 可知, SS 2244 钢得到 100% 马氏体的临界冷却时间约 6 秒, 因而可以肯定工件表面能够硬化。由于 300°C 以后的冷速十分缓慢, 故奥氏体至马氏体的转变也十分缓慢, 图 7(b) 示出的是计算终了时 (即激光辐照开始后 80 秒、表面温度仍约 300°C) 的表面马氏体量 (仅约 35%); 随着时间的延长, 温度继续下降, 马氏体量将

不断增加。这种在马氏体转变区中的缓慢冷却是十分有益的，它大大减小了热应力和引起的变形。图 6(c) 是轴向应力随时间的变化曲线。从图 6(c) 可看出，在加热开始时，表面产生很大的压应力，而心部产生很大的拉应力，这种应力状态的产生是由于表面的急剧热膨胀受到冷硬的心部抑制所致。在奥氏体形成后，由于表面区比容的相对减小和高温下的应力松弛作用，表面的压应力急剧地向拉应力转变，心部的拉应力值也随之不断减小；随着马氏体转变的开始，表面膨胀，应力状态又由拉应力转变为压应力，而心部的拉应力继续减小，最终也呈现出压应力状态。图 7(c) 给出了计算终了时的残余应力分布，从图上的三条应力曲线可看出，表面和心部都存在着微弱的残余压应力。然而，这些应力分布曲线是在表面只有 35% 马氏体的情况下得到的。可以预料，随着冷却过程的继续和马氏体量的增加，表面区的残余压应力值还将进一步增加。

图 8、9 和 10 比较了不同工艺条件下的计算结果。从图 8 可看出，随着工件移动速度的减小，表面峰值温度和奥氏体转变深度增加。显然，3 号试样的移动速度过快，其表面峰值温度低于 800°C，表面转变的奥氏体量不到 5%。图 9 和 10 表明，随着激光束功率密度的增加（即激光输入功率的增加（图 9）和激光束宽度的减小（图 10）），表面峰值温度和奥氏体转变深度增加。5 号试样所用的功率密度显然过高了。这些计算结果对研究

激光工艺参数对硬化效果的影响及优化工艺过程有一定的指导意义。

图 11 比较了本工作与 Kou 和 Sun^[8] 的工作所得到的计算结果。两者采用的输入数据是几乎相同的（1 号试样）。图 11 表明，两者得到的温度-时间曲线基本吻合。Kou 和 Sun 的工作未考虑相变潜热，这可能是导致曲线轻微偏离的原因。

参 考 文 献

- [1] J. Mazumder; *J. of Metals*, 1983, **35**, No. 5, 18~25.
- [2] D. S. Gnanamuthu; "Application of Lasers in Materials Processing", American Society for Metals, 1979, 177~211.
- [3] M. Melander, Yao Shanchang; *Surface Engineering*; 1985, **1**, No. 4, 273~281.
- [4] T. Ericsson *et al.*; "第四届国际材料热处理大会宣读论文", Berlin, 1985.
- [5] S. Sjöström; "Linköping Studies in Science and Technology", Dissertation No. 84, Linköping University, Sweder, 1982.
- [6] T. Inoue *et al.*; *Ingenieur-Archiv*, 1981, **50**, 315~327.
- [7] E. R. G. Eckert, R. M. Drake; "Analysis of Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, 1972.
- [8] S. Kou, D. K. Sun; *Metall. Tran.*, 1983, **14A**, 1859~1846.
- [9] M. Melander, J. Nicolov; *J. of Heat Treating*, 1985, **4**, 32~38.
- [10] B. Hildernwall; "Linköping Studies in Science and Technology", Dissertation No. 39, Linköping University, Sweder, 1979.
- [11] M. Avrami; *J. Chem. Phys.*, 1939, **7**, 1103~1112.
- [12] D. P. Koistinen, R. E. Marburger; *Act. Metall.*, 1959, **7**, 59~60.

二氧化碳激光治疗前庭大腺囊肿

我们对 19 例前庭大腺囊肿患者用 CO₂ 激光切割造口，并行囊腔内壁气化，伤口内不放引流，所有的病人仅在局麻下或阴部神经阻滞麻醉下进行。手术在门诊完成，平均手术时间 4~6 分钟，手术后 15 分钟便可离开医院。一次治疗成功。术后无感染及病变发生。经过 6 月~5 年的随访，病灶全部清除，

无复发迹象。有正常的腺体功能，疗效满意。手术所用的 CO₂ 激光器输出激光波长为 10.6 μm，刀头功率为 10⁵ W/cm²，光斑直径 0.2 cm。

（西安医科大学第一附属医院 刘惠喜

李维清 蒋志慧 陈美兰

1986 年 11 月 28 日收稿）