

用作高能激光窗的碱卤晶体的强化

牛永生 刘守学 康 儒 崔凤柱*

一、序 言

用碱卤化物单晶做大功率激光器窗口时,面临着一个严重的炸裂问题。F. Horrigan^[1]研究了大功率激光窗的损伤机理。从热破裂角度来看,红外透过材料的品质因数 P 由下式决定

$$P = \frac{\sigma_c \cdot K}{\beta \cdot \alpha \cdot E} \quad (1)$$

σ_c ——临界破坏应力。

K ——热导率。

β ——吸收系数。

α ——线膨胀系数。

E ——杨氏模量。

大的品质因数意味着较大功率激光束通过窗口时,而不致发生破裂。为使品质因数 P 最大, β 要小,若 K 、 α 值接近时,应尽量减小 E , 而加大 σ_c 二者又可统一为增加强度值。

上述损坏机理的分析可以认为解决大功率激光窗炸裂的途径是提高材料强度、降低吸收。

本文所采用的晶体热锻技术,是在不影响晶体光学性质的前提下,能够有效地提高晶体强度的新工艺。

我们对碱卤晶体,如: KCl 、 $NaCl$ 单晶进行了热锻实验,就初步的结果来看,晶体的强度有显著提高。

二、晶体热锻与塑性变形

金属在高温下加热,能在锻锤下进行锻造,是由于它具有塑性,能够产生塑性形变。

而脆性的晶体和金属具有类似的性质。当晶体的温度升高时,原子围绕着它们的平衡位置热振动的平均振幅将增大。由于这种振动,所以在任何瞬时,晶体点阵中原子的位置都在某种程度上违背了点阵的周期性。根据 J. Frenkel^[2] 的概念,处在热力学平衡下的晶体中,存在着许多空间点,即有许多没有原子和离子空间点存在,称之为填隙位置。在外力作用下,原子或离子“挤”在这个位置上,而周围的原子又补充上来;在外力去掉后,不能恢复原位,称为塑性形变。晶体具有的这种性质,叫做塑性。

晶体的塑性变形过程主要是通过滑移来实现的,单晶体中的滑移,是在滑移面上进行的。

在断面面积为 S 的单晶体施加力为 P , 滑移面法线方向与外力间交角为 φ 、滑移方向与外力交角为 λ (图 1) 则滑移应力为:

*参加本工作的还有张俊、于淑珍

$$\tau = \frac{P}{S} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda$$

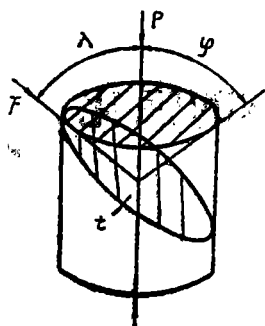


图1 外力 P 作用下的滑移

在外力 P 作用下, 滑移面 t 上的原子沿着 F 方向进行滑移。去掉外力 P 后原子并不返回初始的平衡位置, 而占据了新的稳定的平衡位置。原子至新的平衡位置总和构成了由外力作用引起的晶体的塑性形变。

实验表明, 晶体具有塑性, 在一定条件下 (温度、压力) 可以产生塑性形变。根据塑性理论, 碱卤化物的单晶可以进行热锻。

晶体塑性形变理论是晶体热锻工艺的理论依据。

三、碱卤晶体的热锻

1. 热锻与力

在晶体热锻过程中, 变形每瞬间沿模冲方向的作用力, 总等于晶体变形抗力, 此作用力称为变形力。

变形力的分析对晶体热锻有重要意义。变形力 P 用下式表示:

$$P = \iint \sigma_H \cdot dF \quad (2)$$

式中 σ_H 为正应力。 σ_H 分布见图 2。

直角坐标(2)式可写为:

$$P = \iint \sigma_H \cdot dydx$$

变形力除以 F , 得到单位变形力:

$$P' = \frac{P}{F} = \frac{\iint \sigma_H \cdot dF}{F}$$

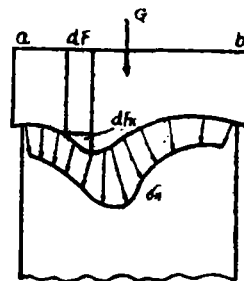


图2 正应力分布图

P' 与晶体性质有关, 与热锻温度、形变速率及晶体尺寸有关。

如果已知接触面上 σ_H 的分布规律, 则可由(2)式计算出变形力 P 。

2. 碱卤晶体热锻工艺^[3]

(1) 样品: 把 KCl , $NaCl$ 单晶加工成圆柱形, 且两柱面抛光。

(2) 样品入模: 把加工好的样品两端垫有涂石墨润滑剂的云母片, 然后轻轻装上模冲, 注意防止样品破碎。

(3) 升温加压: 样品装好后逐渐升温到 $300^{\circ}C$, 恒温一小时, 开始按形变速率的要求缓慢加压, 注意观察锻造比达到要求高度, 停止加压, 卸压而后缓慢降温。

四、影响因素

1. 摩擦力的影响

我们对于有摩擦和无摩擦（加润滑剂）的晶体热锻过程进行比较。其一是对圆柱形 KCl, NaCl 单晶，升高到一定温度，逐渐加压。其二是在圆柱形 KCl, NaCl 单晶两端加涂以石墨乳的云母片（接近无摩擦）。所加温度与压力与前者相同。从热锻样品结果来看，前者晶体样品出现较大的鼓形（图 3），而后者几乎很难观察到圆柱侧面曲度。

这是由于接触表面的摩擦向晶体纵深扩展而形成“困难区”，所以热锻过程中不仅外形畸变，也有其内部变形不均匀相对应。可把晶体形变分为三个区：（图 4）I 区位于样品两端面，

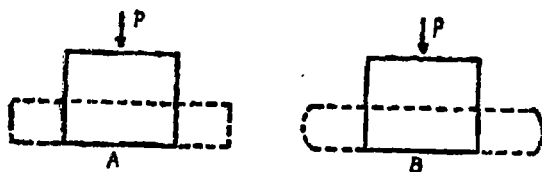


图 3 有摩擦力与无摩擦力样形变对比

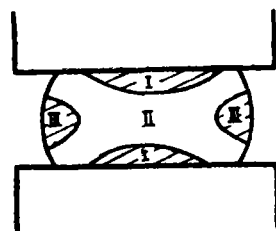


图 4

变形很不显著，是由于接触面上摩擦力的影响，使 I 区成强烈各向受压，故把它称为“困难变形区”。II 区的轴向和径向变形都很剧烈，位于 I、II 区分界处晶体，塑性变形过程中绕着 I 区流向顶表面，即侧面晶体可过渡到接触表面上去，特别是在 $d/h < 1$ 时，此现象更为明显。III 区变形程度介于 II 区和 I 区之间，随着变形程度加大，或对于 d/h 很大的样品，III 区显著减小，且 I、II 区汇合为一，由于上下端面靠近而形成显著的三向应力状态。此时，因变形遍及这两个区的全部体积，从而使变形均匀性提高了，而使鼓形减小了。这就是当样品垫上涂石墨乳的云母片时（即减小摩擦力），I 区减小，提高了样品变形均匀性，使鼓形减小的原因。

2. 拉应力的影响

在相同的温度、压力下，对同一规格圆柱形 KCl NaCl 单晶样品进行拉应力实验。结果是加铜箍的样品周围无裂纹，效果较好，而不加铜箍的样品周边产生裂纹，这是由于加压时的不均匀变形引起附加应力的积聚，出现拉应力，而使鼓形发展（图 5）分成两区域，在锻造过程中圆柱形逐渐变为鼓形，从而使管状区产生拉应力 σ_t ，好像是受内压力 σ_p 作用的管一样。在继续加压时，拉应力 σ_t 达到最大值，从而引起热锻过程中样品周边产生裂纹。

3. 显微结构不稳定性的观察

将热锻 KCl, NaCl 晶体样品抛光、腐蚀，在金相显微镜下观察，测得 8~10 微米粒度的显微结构。在室温下放置 30 天，再测时粒度超过 300 微米。再经过一段时间，粒度可达 1~2 毫米。观察表明样品粒度逐渐变大，结构不稳定。

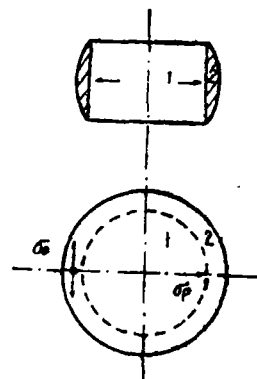


图 5

五、实验结果

热锻 KCl 晶体经光学加工后，测得其红外透过率为95%（见图6透过率曲线），可以和 KCl 单晶透过率媲美。

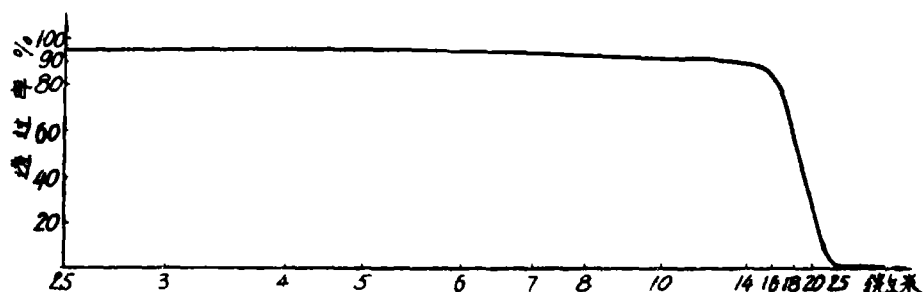


图6

最鼓舞人心的是经热锻后晶体强度成倍提高。KCl 晶体强度提高4至5倍，NaCl 晶体强度提高6倍。热锻晶体的硬度也有提高，NaCl 晶体硬度提高2倍（见表1）。

表1 实验数据

	单 晶		条 件		热 锻 晶 体		
	硬 度	强 度	温 度	形变速率	锻 造 比	硬 度	强 度
	公斤/毫米 ²	公斤/毫米 ²	摄氏	分		公斤/毫米 ²	公斤/毫米 ²
KCl	6.9	0.23	300	<0.04	50	18.0	1.03
NaCl	14.9	0.41	320	<0.04	50	18.1	2.57

六、结 论

经热锻后碱卤晶体强度成倍提高，这一结果充分说明晶体热锻工艺是提高晶体强度行之有效的新技术，也是目前解决高能红外激光器窗材的良方。然而，由于晶粒逐渐长大，会使晶体强度相应降低。因此，必须设法解决这一问题，我们打算下一步开展双掺杂法增强晶粒稳定性的研究，以便限制晶粒长大。

参 考 文 献

- [1] F.Horrigan, *Microwaves*, 8, No 1, 1969, 86.
- [2] J.Frenkel, *Dislocations*, 1964.
- [3] 崔凤柱, 牛永生, *硅酸盐学会学术论文汇编*, 1981, 334.
- [4] R.H.Andersen, *J.American Ceramic Society*, 56, No 5, 286.
- [5] J.A.Adamski, *J.Crystal Growth*, 1977, 44, 564.