

冰洲石晶体加工技术的新发展^{*}

夏 伟 胡华南

(华南理工大学机一系, 广州 510041)

摘要 冰洲石是一种昂贵的光学晶体材料, 由于其完善的解理性和脆性而难于加工。依靠传统的纯机械加工方法常常导致生产率低下和废品率增高。随着科学技术的进步, 冰洲石晶体的加工技术有了较大的发展。本文概述了国内外关于冰洲石晶体加工技术的现状及存在的主要问题, 并着重介绍了近年来的新发展。提出了当前急需解决的研究课题。对深入开展这方面的研究及生产实践具有一定的指导作用。

关键词: 冰洲石; 晶体; 加工; 抛光

1 引 言

随着科学技术的迅速发展, 晶体材料的使用愈加广泛和重要。对晶体材料的性能要求也愈来愈高。因而, 晶体材料的开发、加工及应用普遍受到人们的重视。

冰洲石是一种纯净透明的天然碳酸钙负单轴晶体, 属六角晶系, 具有晶体的基本特性。冰洲石的一个显著特性就是它具有良好的双折射性, 属完善解理性质; 其溶解度小, 故属非潮解性; 由于其各向异性, 沿不同方向的热膨胀系数不同; 另外, 冰洲石的脆性较大。

冰洲石是一种昂贵的光学晶体材料, 主要用于制作偏振棱镜及干涉偏振滞后片。另外, 冰洲石还用于制造大炮射程仪、测距仪、天文仪器及大屏幕显示器等。也由于冰洲石的特殊性质, 其加工困难。在以传统工艺切割、研磨和抛光时, 振动、低温或温度骤变都能引起冰洲石开裂、掉棱或解理剥落; 同时冰洲石质软, 使获得高质量的加工表面更加困难。冰洲石不易得到而且贵重, 如何经济、高效地加工出高质量的冰洲石器件已经成为国际国内所关注的课题。

本文旨在对目前国内外冰洲石技术新发展做一概述, 并提出当前急需解决的课题。

2 加工技术现状及存在的问题

晶体加工是一项专门的技术, 也尚属一门较年轻的技术。但在国外, 晶体加工的地位和

^{*} 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1994年7月8日

作用很受重视,尤其是一些技术先进国家对晶体加工工艺的研究已有很大的投入。原苏联、英国、美国、日本等国都取得了较大进展^[1-4]。然而加工技术是严格保密的。在国内,五十年代只有几个单位,如长春光机所、上海光学仪器厂等进行过水晶、冰洲石、云母等晶体加工,并且数量很少。晶体加工主要是在六十年代后发展起来的。六十年代后,激光技术的发展,推动了晶体加工技术的发展。长春光机所加工出我国第一根红宝石激光晶体棒,到目前为止加工晶体的品种和数量都有大幅度增长,但与浩如烟海的晶体品种相比仍然是非常有限的。不同晶体性能差异又大,故对某些性能奇特的晶体零体的加工还没效地得以解决。因此,可以说,我国的晶体加工基本上还处于探索阶段^[5-7]。就冰洲石晶体加工来说,近年来也受到人们较大重视。我国电子工业部 11 所、曲阜师范大学、华中理工大学、上海光机所等也在进行冰洲石加工技术研究。我们华南理工大学也在较系统地进行冰洲石加工的机理和工艺研究。并且,也已取得了较大的进展^[8-10]

2.1 冰洲石晶体的切割

切割是晶体成形加工的前道工序。切割时冰洲石晶体很易脆裂,切割质量对晶体成品的质量有直接的影响。故也倍受人们重视。

金刚石内外圆锯片切割法。此法切割时,必须解决两个问题是晶体的粘结和锯切速度选定。对于冰洲石晶体,使用传统的热粘结不太适用,已有人试用的 501 胶(或 502 胶)与 613 粉调和而成的粘剂是一种室温固化冷胶,效果较为理想。另外,锯切速度不宜过高。

劈裂切割法。也称解理切割法。它是利用晶体的解理特性进行切割的一种特殊方法。对于冰洲石而言,此法主要用于选矿上。此法简单方便,但最大缺点是会以刀口处产生局部应力,另外,若操作不当,有可能引起晶体整体开裂。

水线切割法。只要用马达驱动的纤维线加温水调磨料就能进行有效的切割。为防止切割时产生的摩擦热导致晶体开裂,线速度不要超过 0.5m/s。

传统的超声切割法。此法可以提高贵重晶体材料的利用率,还能够解决晶体其他切割手段所无法解决的一些加工难题,如小孔、深孔、异形孔的加工及晶体棒材的套料。在超声工具上镶上金刚石微粉就可以不用散粒磨料。因而更具有其优越性。传统超声工具在加工中旋转工作的超声旋转钻在国外已应用多年。国内目前也正进行这项试验研究工作。

化学腐蚀割法。它是利用化学腐蚀剂顺着一直垂直绷紧的细金属丝(负极)流动而实现对晶体进行腐蚀切割。此法由于切割作用力小特别适用于薄晶体的切割。

此外,晶体的激光切割、微电子束切割在实验室中已有应用,但设备制造复杂、成本昂贵。因此,仍有必须发展新方法,用于冰洲石等晶体的切割加工。

2.2 冰洲石的研磨

晶体研磨料的选择应以研磨效率高而又不会给晶体研磨表面造成太大的机械损伤为原则,杂质少,粒度均匀的金刚砂用于研磨冰洲石,表面均匀细腻,损伤层小,效果很好。研究表明,晶体表面损伤层深度随磨料硬度增加而加大,晶体损伤层深度还随磨料尺寸加大而增大。

研磨悬浮液和研磨模都直接影响冰洲石的研磨质量。在研磨液中加入电解质或研磨液呈弱酸性均能获得贝壳状表面,且晶体表面粗糙度较小^[7]。

选择合适材料的研磨模并适当开槽能有效地解决冰洲石在加工时易碎裂、掉棱、解理剥落等问题,值得强调,研磨模与悬浮液合理配合可使得冰洲石研磨表面获得高质量(表面粗

糙度指标 $Ra \leq 0.20\mu\text{m}$ ，且表面呈较理想贝壳状)^[10]。

另外，由于冰洲石对温差反应敏感，容易开裂，因此，宜用温水调和磨料，金属磨模最好用适当的方式加温后使用。

2.3 冰洲石的抛光

抛光粉是晶体加工的重要辅料，其粒度、硬度及熔点是影响抛光效果的重要因素，实践证明，抛光粉的熔点应比被抛光冰洲石晶体的熔点高。研究表明^{[5][10]}，其主要成份由红粉或微金刚石粉组成的抛光粉，用于抛光冰洲石可获得很好的抛光效果。值得强调，抛光粉使用前要进行均匀性处理，尽量使其粒度细而均匀。

抛光模的制作是抛光技术的一项重要内容，必须特别重视。有资料推荐，对于冰洲石，因其硬度较低，解理性强，抛光模也可用棉花石蜡（用油酸作抛光介质）或沥青蜂蜡盘（用普通蒸馏水作抛光介质）。这两种模主要用于保证晶体的表面粗糙度，但光圈的修改稍为困难些，为此，在抛光之前应将晶面尽量磨细（M7或M5）以减少抛光时间，当零件精磨的面形尚未遭到破坏时即把粗糙度抛好，冰洲石晶体的光轴面可按照此法抛光。研究表明，较软的抛光模可以获得低的抛光表面粗糙度，但由于其成形性差，平面度差，使冰洲石表面会出现光圈问题；而太硬的抛光模，可获得高平面度，光圈问题好解决，但又出现表面粗糙度高的问题。为此，采用使硬抛光模新软化技术，可以较好地解决这一矛盾^{[5][10]}。值得强调，抛光模对光圈修正及抛光生产率起至关重要的作用。作者等配制多种抛光液进行抛光冰洲石晶体表面试验研究表明，抛光液对抛光过程作用同样很大。并且，已研制出一种有效的抛光液（AK型）与特殊的抛光模（MX型）、抛光粉（FPE型）配合使用，可抛光出表面粗糙度指标 Ra 稳定在 $0.01\mu\text{m}$ 以下的冰洲石表面。并且，表面疵病等级指标也很好，抛光生产率也很高^[10]。

另外，冰洲石抛光加工不可忽略影响因素有抛光环境及抛光时间。冰洲石抛光加工，论其精度当属超精密加工范畴，故对温度有着严格的要求。抛光作用及环境温度所引起的试件温度均极大影响抛光表面精度；作者研究还表明，在抛光冰洲石表面时，有一个抛光的最佳时间存在^[10]。

然而，经过抛光加工获得低粗糙度表面仍是当前冰洲石加工的主要难点。也是消耗工时最多的一道工序。致力于表面粗糙度问题的解决成为晶体加工的主攻方向，这是毫无疑问的。

冰洲石晶体抛光是一个复杂的工艺过程，有许多影响因素，现在还不完全为人们所认识所掌握。近年来人们也一直进行加工技术的探索，并提出一些新工艺，以降低抛光表面粗糙度。这些新技术主要可归结为以下几个方面。第一、连续抛光技术。第二、采用表面软化的硬胶盘抛光技术。第三、采用 BFP (Bowl-Feed Polishing) 抛光技术，即把抛光盘浸在盛有水和抛光液的塑料容器中进行抛光。此技术完成抛光所需的时间较长，目前只能在实验室中应用。第四、离子抛光技术。此技术是利用高能离子束将晶体加工表面的原子一层一层剥除，它不会对晶体加工表面产生任何机械损伤。然而其技术复杂，设备昂贵。第五、化学抛光技术。它是利用化学腐蚀液对晶体表面的腐蚀作用，实现对表面进行加工。一般说来，化学抛光只能得到无损层的光学表面，化学抛光因有缺陷即晶体的腐蚀过程带有选择性，难以得到良好的面形精度。第六、化学机械抛光技术。这是化学腐蚀抛光和机械磨削抛光的结合，是在抛光盘上滴上预先精确配制的化学腐蚀液对晶体进行抛光。据报道，有人对 InSb 晶片进行化学机械抛光，效果尚好。第七、振动抛光技术。振动抛光综合了化学抛光和机械抛光的优点，又比离子抛光容易实现，抛光时，使用纤维织物抛光盘以及特殊的抛光粉，使用的抛光

液呈悬浮态。振动抛光周期较长,但抛光后的晶体零件不会产生任何机械损伤,这是此法的最可贵之处。然而,国内目前还没有开展振动抛光技术研究工作。

无论如何,至目前为止,冰洲石加工技术已取得了较大进展。国外已抛光出 $R_a \leq 0.025 \mu\text{m}$ 的冰洲石表面。我们也研究出一整套冰洲石研磨、抛光工艺^[10],这些技术均可以应用于实际生产。

3 关于冰洲石晶体加工理论研究

要高效地加工出高质量的冰洲石晶体零件,解决问题的根本方法应该是首先研究其加工机理。为此,已有不少学者进行过这方面的实验及研究工作。

3.1 冰洲石印压实验及切削实验研究^{[8][9]}

作者等利用显微摄像技术,采用对称与单料楔形压头对解理样本解理面的印压表明,在被观察面上总出现两个区域:平行于晶体解理面的裂纹区,和朝向晶体钝顶角方向的近似三角形的破坏区,并且破坏区对应于垂直于光轴层状方向,这一结论对冰洲石加工有着重大的意义;对冰洲石进行直角自由切削实验表明,对加工过程及表面质量影响最大的是冰洲石本身的结构特性,切削方向与被加工面方位决定着表面粗糙度和破坏层深度的大小。切削刀具几何参数和切削用量也有一定影响。对冰洲石解理面进行正向和反向切削的实验表明,正向切削时切屑以整块解理形式出现,已加工表面纹理清晰整齐,表面损伤层较薄;而反向切削时破坏以小晶粒破碎为主,表面损伤较厚。这一点与冰洲石印压实验结果是一致的。

3.2 溶液对冰洲石晶体的溶解作用机理^{[11][12]}

Richard G. 和 Compton 等人专门进行了冰洲石单晶体溶解动力学过程以及冰洲石晶体表面形貌对溶解过程影响的研究。此研究提出了溶解动力学方程。研究得出如下结论,第一,溶液 H^+ 浓度增加,导致晶体溶解速度加快;第二,冰洲石 (100) 解理面初始时,即使在酸性溶质中,也是相当不活性的,溶解过程极其缓慢,一直到溶解进行使得表面较粗糙时,晶体溶解才达到一个较快的稳定的溶解速度;第三,不同制作过程获得的晶体表面,其溶解特性相差很大,经抛光后的晶体表面,溶解最为缓慢,表面也最为光滑;晶体表面愈粗糙,其溶解也愈快,从而溶解浸蚀后的表面也愈粗糙,与 (100) 面呈不同倾角的表面溶解特性也相异。一般有,此倾角愈大,溶解速度愈快,所得溶解浸蚀表面也愈粗糙。第四,该文作者还用所谓“麻坑”机理解释了不同晶体表面所呈现的溶解特性以及冰洲石微粉的溶解特性。另外, V. M. Sergeev 等人^[13]还研究了黄色冰洲石退火时的颜色变化特性。

这些结论对研究冰洲石加工人员,势必会有重大参考价值。

3.3 关于抛光机理学说

到目前为止,对于晶体光学表面抛光机理,还未形成一个完整统一的理论,然而,目前主要存在以下几种学说,第一,纯机械作用说。此理论认为,抛光和研磨在本质上相同。第二,流变作用说。它认为,在抛光时,由于摩擦热使加工表面产生塑性变形和流动或热软化,以致熔融而产生流动,因此认为抛光过程是加工表面分子重新流动而形成平整表面的过程。第三,机械、物理化学说。此理论认为抛光过程是一个包含机械的、化学的和物理化学作用的综合过程。第四,化学学说。这一理论认为,抛光过程主要是水、抛光剂、抛光模和抛光面之间的化学作用的过程。

作者认为,冰洲石晶体表面抛光机理,应取决于具体的加工条件。如抛光运动的速度、抛光剂、抛光模、抛光液状态,一般说来,冰洲石抛光表面应是机械、物理(包括流变)、化学综合作用的结果。然而,这也有待于进一步深入研究。

4 目前急需研究的课题

目前在冰洲石晶体加工过程中,仍存在许多问题尚未解决,作者认为,今后的研究应重视以下几个方面:

(1) 冰洲石的切割及开采过程中,加工效率较低,冰洲石容易碎裂,故有必要进一步研究冰洲石切割、开采的新技术、新方法。

(2) 为能高效高质量加工冰洲石,需要进一步研究冰洲石晶体在各种加工条件下的应力状况,裂纹扩展机制,以指导冰洲石加工研究及实践。

(3) 化学抛光可以获得无机械损伤的表面层,而机械抛光方法可以获得较为光洁的表面。这两种抛光方法的机理有必要进一步研究;并以此为理论依据,研究化学机械复合抛光新技术,并应用于生产。

(4) 冰洲石晶体光学零件加工,当属脆性材料的超精密加工。引进其他材料的超精密加工技术对冰洲石进行超精密加工,进而采用多种加工技术相结合,取长补短,此乃是冰洲石加工一个重要的技术课题。

参 考 文 献

- [1] Volkova and N. V. Rozenman, L. S., Soviet J. Opt. Tech., 1976, 43 (6): 366—368
- [2] Patent, GB2178349A
- [3] Patent, SU1348145A1
- [4] Patent, SU280789A
- [5] 张心德, 晶体加工概要. 晶体加工工艺技术交流会议资料汇编, 1982. 1
- [6] 陈自新, 何正岷, 冰洲石棱镜加工及切割工艺简介. 光学零件冷加工交流会论文集, 1984
- [7] 蔡立, 田守信, 光学零件加工技术. 武汉华中工学院出版社, 1987. 6
- [8] Xia Wei et al., The Mechanism of Machined Surface Formation in Iceland Spar Cutting. Proc. of the 6th IMCC, HongKong, 1993. 4
- [9] 李玉红, 冰洲石加工的试验研究. 华南理工大学硕士学位论文, 1991. 12
- [10] 陶正之, 冰洲石研磨及抛光加工的试验研究. 华南理工大学硕士学位论文, 1993. 2
- [11] Richard, G. et al., The Dissolution Kinetics of Iceland Spar Single Crystals. J. of Colloid and Interface Science, 1984, 101 (1)
- [12] Richard, G. et al., The Dissolution of Iceland Spar Crystals; The Effects of Surface Morphology, J. of Colloid and Interface Science. 1986, 113 (1)
- [13] V. M. Sergeev and M. E. Ramenskaya, Yellow Iceland Spar Crystals Which Turn Black Upon Annealing. Sov. Phys. Dokl., 1975, 20 (2)

Development of Machining Technique for Iceland Spar Crystal

Xia Wei , Hu Huanan

*(Department of Machinery, South China University of Technology,
Guangzhou 510041)*

Abstract

Iceland spar is a kind of valuable optical crystal. It is very difficult to machine this crystal due to its perfect cleavage and brittleness. Conventional machining methods used in production often result in low productivity and high reject rate. The machining techniques for iceland spar make a great advance as technological progress. In this paper, the present situation of machining techniques for iceland spar crystal at home and abroad and existing problems are reviewed. Also, new development in recent years is introduced. Immediate problems need to be solved at present are proposed. This paper provides guides for further research and production practices

Key Words: Iceland spar, Crystal, Machining, Polishing