

doi:10.3799/dqkx.2013.022

晶面腐蚀像与晶面对称及晶面结构的关系

赵珊茸,徐畅,张国庆,李坤

中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

摘要: 综合分析了石英、石榴子石、橄榄石、锆石、红柱石的各不同结晶学意义的晶面腐蚀像特点,总结了晶面腐蚀像与晶面对称性及晶面结构特点之间的关系。腐蚀像不仅可以揭示晶面及晶体的对称性,还可以揭示晶面的结晶学意义,即同一晶体上的不同结晶学意义的晶面,尽管对称性相同,也具有不同的腐蚀像;不同晶体之间的具有相同对称性的晶面可能会有相同的腐蚀像;腐蚀像类似于一种宏观晶体形态,主要与晶面的对称性有关,与晶面上原子、离子排列的结构细节关系不大;同一晶体的同一晶面在不同的腐蚀剂中所得的腐蚀像也可能完全不同;有些晶面的腐蚀像可以用晶体生长形态的常见晶面与被腐蚀面的交棱来解释。该研究在揭示晶体溶解形态机理、将溶解形态与晶体生长形态对比、用溶解形态来反映晶体曾经经历的酸-碱环境等方面具有理论与实际意义。

关键词: 腐蚀像;晶面对称;晶面结晶学意义;晶面结构。

中图分类号: P573

文章编号: 1000-2383(2013)02-0211-07

收稿日期: 2012-04-15

Etch Figures Related to the Symmetry and Structure of the Crystal Faces

ZHAO Shan-rong, XU Chang, ZHANG Guo-qing, LI Kun

Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Etch figures of different crystallographic faces on quartz, garnet, olivine, zircon and andalusite have been observed and analyzed. The relationship between etch figures and crystal face symmetry as well as the characteristics of face structures is summarized. It is shown that etch figures can not only reflect the face symmetry, but also reflect the face crystallographic significance. The crystal faces with different crystallographic significance on the same crystal must have different etch figures, even though they may have the same symmetry. However, the faces with the same symmetry among different crystals maybe have the same etch figures. Etch figures are mainly related to the face symmetry, similar to the crystal morphology, but not related to the detailed arrangement of the atoms or ions on the faces. The etch figures formed by different solvents on the same face may be completely different. Some etch figures can be explained by the intersection edges between the growth faces on the crystal habit and the etching face. This research clarifies the mechanism of resolved shapes on crystals, illustrates the relationship between the resolved morphology and growth morphology and indicates the acid or alkali environment of the crystals.

Key words: etch figure; crystal face symmetry; crystallographic significance of the face; surface structure.

晶体的腐蚀像是指晶面(或切面)在酸、碱溶液中被侵蚀后形成的具有一定形状的蚀坑。对晶体腐蚀像的研究历史源远流长,最早是在矿物界,人们利用矿物晶体的天然或人工腐蚀像来研究晶体的对称、双晶(孪晶)等。由于各种先进的衍射技术的发明,这种应用已经不再被人们所重视了。然而,腐蚀像在反映晶体对称方面具有比其他衍射方法更直观、更具体、更方便的优势,并且在有些情况下腐蚀

像比各种衍射技术更适用,例如:一种晶体的左形体与右形体,衍射方法很难区分,但腐蚀像却可以很方便地、很直观地反映出来(Zhao *et al.*, 2001);再例如:同一晶体中发育的同一单形的正形与负形,仅仅是表面结构不同,一般衍射方法也难以区别,但腐蚀像却可以很方便地、很直观地区分出来(Zhao *et al.*, 2009)。因此,腐蚀像在反映晶体对称方面的优势还有待进一步开发利用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40872040)。

作者简介: 赵珊茸(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事矿物晶体形貌和晶体化学研究。E-mail: shanrongzhao@yahoo.com.cn

此外,腐蚀像所反映的是晶体被溶解的过程,与晶体生长过程相类似,晶体溶解过程也存在成核、溶解的界面过程等,并已经形成了一些热力学、动力学理论.这方面的报道很多,并且由于矿物晶体的溶解过程对地表、大气环境的影响意义,目前正在形成热潮. Gratz *et al.* (1991)用原子力显微镜对石英的腐蚀像进行了观察并将腐蚀像的结晶学方向与晶体结构中化学键对应起来,还基于腐蚀坑台阶高度计算了腐蚀速度,并与动力学理论进行了对比; Yanina *et al.* (2006)用原子力显微镜观察分析了石英柱面和菱面体面在 KOH 溶液中腐蚀速度、腐蚀坑形状变化规律; Bose *et al.* (2008)用原子力显微镜观察分析了天青石(001)面在未饱和溶液中溶解速度与浓度的关系,测定了台阶溶解与蚀坑成核所对应的浓度以及溶解速度与浓度的非线性关系; Teng *et al.* (2001)用原子力显微镜和 X 射线反射观察分析了正长石(001)解理面上原子级溶解过程和速度及其与 pH 的关系; Teng (2004)用原子力显微镜观察分析了方解石($10\bar{1}4$)面在不同浓度的未饱和溶液中溶解机理,测定了蚀坑成核所对应的浓度,并分析了其地球化学意义; Brown (2001)研究了矿物表面水解机制,从原子—分子尺度上建立了一些水化成键模型,认为水化后的矿物表面对重金属迁移的溶解有影响,从而对环境有影响; 碳酸盐矿物的溶解机理是近年来做的最多的,因为碳酸盐矿物在地表分布广泛而且它们的溶解直接影响沉积成岩环境,进而影响地球化学循环与大气气候; Morse and Arvidson (2002)对碳酸盐的溶解动力学理论与实验研究有一个综述. 这些研究深化了我们对表面化学热力学过程在原子—分子尺度上的理论认识,并对环境科学、地球科学的发展有实际意义. 但是,这些关于晶体溶解机理的研究与晶体各向异性及晶体对称的联系还不够.

本文综合分析了我们以前对石英、石榴子石、橄榄石、锆石、红柱石的腐蚀像观察与研究结果,总结了这些晶体各不同晶面的腐蚀像与晶面对称性的关系,并且分析了腐蚀像与晶面结构的关系,对比了不同晶体之间的溶解形态,对比了同一晶体不同腐蚀剂所形成腐蚀像,以期探讨晶面溶解机理与晶体对称的关系.

1 实验与观察

对石英、石榴子石、橄榄石、锆石、红柱石进行晶

体定向,具体的定向方法有:晶体测量法和背散射电子衍射法. 所谓晶体测量的方法,就是对发育有晶面的晶体进行测角,然后进行心射极平投影,最后确定晶面符号,这样就可以找到晶体样品的 x, y, z 轴; 所谓背散射电子衍射的方法,就是对没有发育晶面的晶体任意切一个切面,抛光后进行背散射电子衍射实验,并用软件自动做极图,得到以这个任意切面的法线为圆心、并且标明了晶体的 x, y, z 轴的极图,根据 x, y, z 轴的极点与圆心的夹角可以在晶体样品上找到 x, y, z 轴. 然后,根据每种晶体所属的点群(对称型),确定每种晶体的主要结晶学方向,如:(100)、(110)、(111)等,进行切面、抛磨,然后在选定的酸、碱溶液中进行一定时间的腐蚀,最后将腐蚀像在微分干涉显微镜或原子力显微镜下观察,得到腐蚀像形貌. 每种晶体所选择的结晶学方向的晶面(切面)是不同的,每种晶体所适用的腐蚀剂也是不同的,详情参见我们以前的报道(孟杰等,2008;王蓉,2010;连晨光等,2011;刘河清等,2011;徐畅等,2012).

2 分析与讨论

首先我们将每种晶体的各种不同的结晶学意义的晶面(或切面)的腐蚀像列于图 1 中.

第一,我们对图 1 中每一行中的同一晶体不同晶面(或切面)的腐蚀像进行对比,可见同一种晶体上的不同晶面的腐蚀像随着晶面的对称性不同而变化,腐蚀像能准确地反映晶面的对称性;如果将同一晶体的所有不同晶面的腐蚀像综合起来,就可以得出该晶体的点群. 这就是所谓的晶体腐蚀像反映晶体对称性的意义.

第二,在同一晶体中,有些晶面尽管对称性相同,但只要这些晶面在晶体的点群中具有不同结晶学意义(即这些晶面不能通过晶体的点群操作而重合,即这些晶面不属于同一单形),其腐蚀像就不同,例如,石英的 $\{11\bar{2}0\}$ 与 $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$,它们的对称性是一样的,都有一个 2(二次对称轴),但它们是属于不同单形的, $\{11\bar{2}0\}$ 是正三方柱单形,而 $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ 是负三方柱单形,也就是说它们是石英晶体上具有不同结晶学意义的方向,因此,它们具有不同的腐蚀像. $\{11\bar{2}0\}$ 是斜椭圆, $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ 是平行四边形(当然,斜椭圆和平行四边形反映的对称性都是 2). 再例如,橄榄石的 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 、 $\{001\}$ 这 3 种晶面都具有 2 mm 的对称性,单形名称也都是平行双面,但它们分属不同的

晶体	晶体的点群	腐蚀剂	晶体上各不同结晶学意义晶面及对称性				
			腐蚀像形状				
石英	32	NaOH	$\{10\bar{1}0\}$ 无 0001 $\bar{1}2\bar{1}0$	$\{10\bar{1}1\}$ 无 0001 $\bar{1}2\bar{1}0$	$\{01\bar{1}1\}$ 无 0001 $2\bar{1}\bar{1}0$	$\{11\bar{2}0\}$ 2 0001 $\bar{1}100$	$\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ 2 0001 $01\bar{1}0$
		KOH	0001 $\bar{1}2\bar{1}0$	0001 $\bar{1}2\bar{1}0$	0001 $2\bar{1}\bar{1}0$	0001 $\bar{1}100$	0001 0110
		HF	0001 $\bar{1}2\bar{1}0$	0001 $\bar{1}2\bar{1}0$	0001 $2\bar{1}\bar{1}0$	0001 $\bar{1}100$	0001 $01\bar{1}0$
橄榄石	mmm	HF	$\{100\}$ mm2 001 010	$\{010\}$ mm2 001 100	$\{001\}$ mm2 100 010	$\{110\}$ m 001 110	$\{101\}$ m 101 010
石榴子石	m3m	HF	$\{100\}$ 4mm 001 010	$\{110\}$ mm2 001 110	$\{111\}$ 3 m 001 110	$\{211\}$ m 001 110	$\{211\}$ m 001 110
		NaOH+KOH	001 010	001 110	001 110	001 110	001 110
锆石	4/mmm	NaOH+KOH	$\{100\}$ mm2 001 010	$\{110\}$ mm2 001 110	$\{101\}$ m 001 010	$\{111\}$ m 001 110	$\{001\}$ 4mm 010 100
红柱石	mmm	NaOH+KOH	$\{100\}$ mm2 001 010	$\{001\}$ mm2 010 100	$\{010\}$ mm2 001 100	$\{110\}$ m 001 110	$\{101\}$ m 001 010

图 1 石英、橄榄石、石榴子石、锆石、红柱石各种晶面的腐蚀像(各晶面腐蚀像实际照片参见:孟杰等,2008;王蓉,2010;连晨光等,2011;刘河清等,2011;徐畅等,2012)

Fig. 1 Different faces on quartz, olivine, garnet, zircon and andalusite

平行双面,即它们属于不同单形,所以也具有不同腐蚀像,分别为椭圆、菱形、矩形(当然,这三种形状的腐蚀像反映的对称性都是 2mm)。再例如,锆石的 $\{100\}$ 与 $\{110\}$, 它们的对称性也是一样的,都为 2mm , 单形名称也都是四方柱,但它们也是不同结晶学意义的两个四方柱,因此,它们的腐蚀像也不同,虽然都是菱形,但形态细节不同(当然,这两种形状的腐蚀像反映的对称性都是 2mm)。从这一点上看,腐蚀像能非常准确地反映晶体的结晶学对称意义。

第三,我们再将不同晶体之间的腐蚀像进行对比,发现在不同晶体之间,有些晶面上的对称要素相同,这时就可以出现相同或相近的腐蚀像,例如,橄榄石的 $\{010\}$ 与石榴子石的 $\{110\}$ 面,它们的对称性都是 2mm , 它们的酸腐蚀像都是菱形,这就说明,腐蚀像仅仅能够反映晶面的对称性,反映不了晶面结构的细节,因为这两种晶面的结构肯定是不同的,但

却出现了相同的腐蚀像;再如,橄榄石的 $\{001\}$ 与红柱石的 $\{001\}$ 也是同样的现象。

第四,同样一种晶体的同一种晶面,当腐蚀剂不同时,会产生完全不同的腐蚀像,例如,石英的 $\{10\bar{1}0\}$ 、 $\{10\bar{1}1\}$ 、 $\{01\bar{1}1\}$, 在三种腐蚀剂 (HF, NaOH, KOH) 中形成三种完全不同的腐蚀像;石榴子石的 $\{111\}$ 、 $\{211\}$ 、 $\{221\}$ 在两种腐蚀剂 (HF, NaOH+KOH) 所形成的腐蚀像也完全不同。这一点说明,不同腐蚀剂对同一晶面的溶解机制完全不同,如果将腐蚀像看成是腐蚀剂对晶面上各不同方向溶解速度不同造成的,那不同腐蚀剂对同一晶面的溶解速度各向异性是完全不同的。

从上面的第一点和第二点来看,腐蚀像肯定与晶面的结构有关,因为在同一晶体的不同结晶学意义的晶面上,晶面结构肯定不同,尽管有些晶面的对称性相同。所以,不同晶面结构的晶面,腐蚀像就不同,不管它们的对称性是否相同。但是,从上面的第

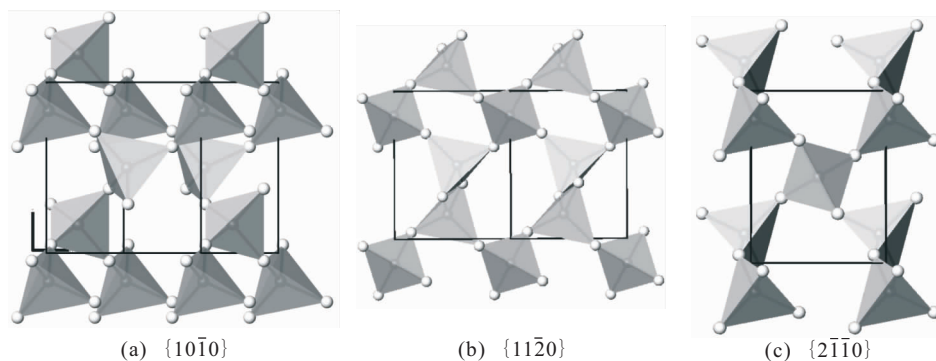


图 2 石英各晶面的结构特点

Fig. 2 Structure features of different faces on quartz

三点来看,不同晶体的有些晶面,当它们的对称性相同时,却有可能腐蚀像相同,而不同晶体的不同晶面之间,晶体结构及晶面结构肯定不同,但为什么出现相同的腐蚀像呢?这一点说明,腐蚀像只与晶面对称性有关,与晶面结构细节可能关系不大,这样的现象似乎有点矛盾.毫无疑问,腐蚀像与晶面的对称性肯定有关,但腐蚀像到底与晶面结构中原子、离子分布特点是否有关呢?

我们选择上述晶体的某些晶面结构进行分析.由于晶面结构是微观图形,腐蚀像是宏观图形(微米级),下面的讨论也只能是形象化对比,不能具体到腐蚀像与原子、离子排列或成键直接相关的细节.

首先分析石英.石英的 $\{10\bar{1}0\}$ 、 $\{11\bar{2}0\}$ 、 $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ 面结构的投影图如图 2 所示(晶面结构是从 ATOM 软件制作的晶体结构立体图进行定向投影而成,下同).从图 2 中可以看出,石英的 $\{10\bar{1}0\}$ 晶面结构特点反映不了腐蚀像特点;但石英的 $\{11\bar{2}0\}$ 与 $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ 晶面结构中 $[\text{SiO}_4]$ 四面体分布都形成平行四边形的分布格局和类似一个椭圆格局,这两种格局都具有 2(二次对称轴)的特点,所以腐蚀像就是二次对称的椭圆与平行四边形,但 $\{11\bar{2}0\}$ 的腐蚀像是平行四边形,而 $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ 的腐蚀像是椭圆,从结构上看它们都有平行四边形和类似一个椭圆的格局,为什么它们中的一个平行四边形腐蚀像而另一个是椭圆腐蚀像呢?即从结构上很难解释它们分别形成椭圆和平行四边形腐蚀像的现象.

然后分析橄榄石.橄榄石的 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 、 $\{001\}$ 晶面结构见图 3,从图 3 中也很难看出 $[\text{SiO}_4]$ 四面体和 $[(\text{Mg},\text{Fe})\text{O}_6]$ 八面体的分布格局与腐蚀像的形态特征有什么联系,但是,晶面结构上配位多面体分布格局基本上能够看出是 2 mm 的对称特点,与腐蚀像形态的对称性能够很好地联系起来.即橄榄

石的 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 、 $\{001\}$ 面具有二次对称,与腐蚀像(椭圆、平行四边形、菱形)的对称特点很吻合,但也很难看出晶面结构能体现椭圆、平行四边形、菱形的构图特点.

最后分析石榴子石.石榴子石的 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 和 $\{111\}$ 面的结构见图 4,从图 4 中也很难看出 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 晶面上 $[\text{SiO}_4]$ 四面体和 $[(\text{Mg},\text{Fe})\text{O}_6]$ 八面体的分布格局与腐蚀像(正方形、菱形)的形态特征有什么联系;但 $\{111\}$ 面的结构具有三角形的构图,视乎可以解释石榴子石 $\{111\}$ 面酸腐蚀形成的三角形腐蚀像,但却解释不了碱腐蚀形成的复三角形腐蚀像.

从不同晶体之间的情况来看,橄榄石的 $\{010\}$ 面与石榴子石的 $\{110\}$ 面腐蚀像相同,当然,这两种晶面的对称都是 2 mm,所以腐蚀像都是菱形,可以反映这两种晶面的对称,但这两种晶面的结构特点相差很大(见图 3 和图 4),可见结构完全不同的晶面只要对称性相同,就可以出现相同的腐蚀像.

因此,我们可以得出结论,腐蚀像只能够反映晶面的对称,不能够反映晶面上原子、离子排布的细节.腐蚀像类似于宏观形态,因为宏观形态也只能够反映晶体的对称,并不能够反映晶体结构细节,所以,不同晶体之间,只要对称性相同,晶体宏观形态也是很相近的.但是,同一晶体中的不同晶面,只要晶面处于不同结晶学意义的方向,尽管对称相同,腐蚀像也不同(见图 1 及对图 1 所作的分析第二点).这是一个非常有趣的现象,不同晶体之间的对称性相同的晶面,腐蚀像可以相同;同一晶体内的对称性相同但结晶学意义不同的晶面,腐蚀像形状肯定不同(当然腐蚀像的对称性是相同的).似乎是,腐蚀像是专门为我们鉴定晶面的结晶学意义而产生的,因为同一晶体的不同结晶学意义的晶面,代表着这个

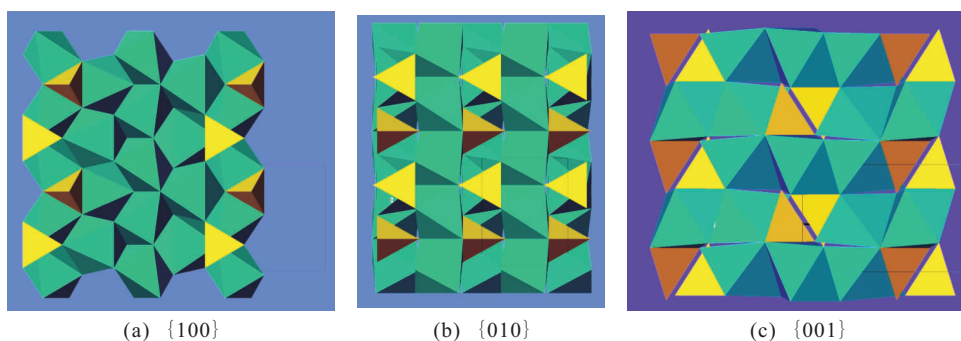


图 3 橄榄石各晶面结构特点

Fig. 3 Structure features of different faces on olivine

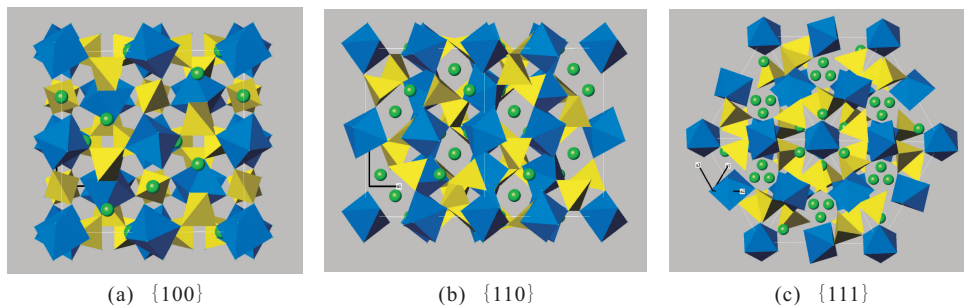


图 4 石榴子石各晶面结构特点

Fig. 4 Structure features of different faces on garnet

晶体坐标系里面不同意义的方向,是需要鉴别的,腐蚀像则将这种不同结晶学意义的方向明确地用不同腐蚀像形状来表征;而不同晶体之间的相同对称性的晶面,处于完全不同的晶体坐标系里面,根本不需要鉴别,所以,不同晶体之间的对称性相同的晶面可以出现相同的腐蚀像形状。

此外,对同一晶体的同一晶面,腐蚀剂不同时会出现不同的腐蚀像,这也像是晶体的宏观形态,因为不同溶剂中生长的晶体形态可以不同,所以,不同腐蚀剂形成的同一晶面的腐蚀像也会不同。

既然腐蚀像类似于晶体宏观形态,与晶面结构细节关系不大,不能够用晶面结构特点来解释腐蚀坑的形状,那么,可不可以用晶体宏观形态的特点来解释呢? 我们先将上述晶体最常见的晶面组成的宏观形态画出(图 5),然后将腐蚀坑形态与晶体的宏观形态进行对比,发现有些晶面或切面的腐蚀坑形状恰好是由晶体形态上常见晶面与被腐蚀的面的交棱组成的,例如,石英 $\{10\bar{1}0\}$ 面的 HF 腐蚀坑形状是由晶面 $\{10\bar{1}0\}$ 、 $\{10\bar{1}1\}$ 在该面上的交棱组成的(见图 6a);石榴子石 $\{100\}$ 面的酸或碱腐蚀坑形状是一样的,是由晶面 $\{211\}$ 在 $\{100\}$ 面上的交棱组成的(见图 6b);石榴子石 $\{110\}$ 面的酸或碱腐蚀坑形状也是

一样的,也是由晶面 $\{211\}$ 在 $\{110\}$ 面上的交棱组成的(见图 6b);石榴子石 $\{111\}$ 面的酸腐蚀坑形状是由晶面 $\{211\}$ 在 $\{111\}$ 面上的交棱组成的(见图 6c);橄榄石 $\{100\}$ 面腐蚀坑形状是由 $\{110\}$ 面和 $\{101\}$ 面在 $\{100\}$ 上的交棱组成的(见图 6d);红柱石 $\{100\}$ 面腐蚀坑形状是由晶面 $\{110\}$ 和 $\{001\}$ 在 $\{100\}$ 面上的交棱组成的(见图 6e)。除此之外,其他腐蚀坑形状却很难用晶面的交棱来解释了,特别是对一些曲线状的腐蚀坑更是很难用晶面交棱来解释。所以,宏观形态特点对腐蚀像的解释也是非常有限的。

最后我们来探讨腐蚀像对环境的指示意义。晶体的宏观生长形态因不同生长环境而不同,因此可以用晶体的生长形态来指示环境,这被称为形态标型。晶体的腐蚀像也因腐蚀剂的不同而不同,据此也可以指示晶体生长完成后所经历的酸碱腐蚀环境。从图 1 可以看出,石英的 $\{10\bar{1}0\}$ 、 $\{10\bar{1}1\}$ 、 $\{01\bar{1}1\}$ 这 3 种最常见的自然晶面的腐蚀像都会随着腐蚀剂的不同而不同,因此,在自然界产出的天然石英晶体上,只要观察这 3 种晶面上是否有腐蚀坑以及腐蚀坑的形状,就可以鉴别该石英经历过怎样的腐蚀(风化)环境;石榴子石最常见的自然晶面是 $\{211\}$,只要在该晶面上观察腐蚀像特点,也可以鉴别该石榴子

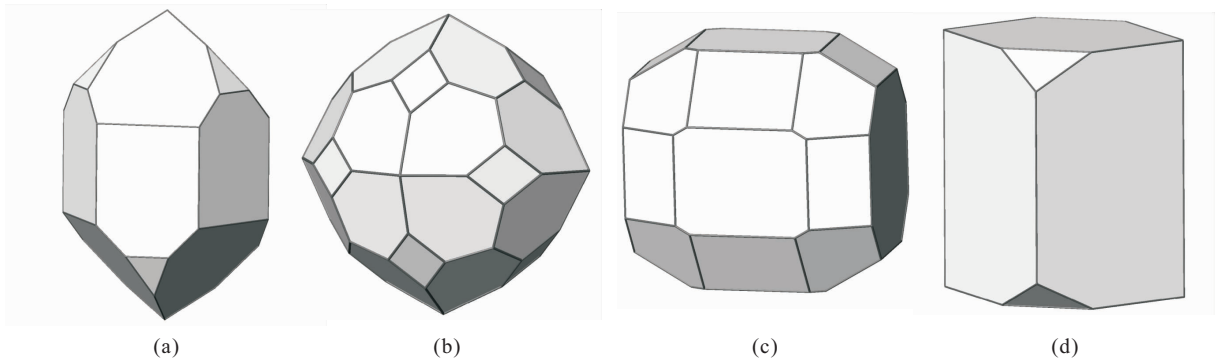


图 5 石英、石榴子石、橄榄石、红柱石的常见晶体形态
 Fig. 5 The habits of quartz, garnet, olivine and andalusite
 a. 石英; b. 石榴子石; c. 橄榄石; d. 红柱石

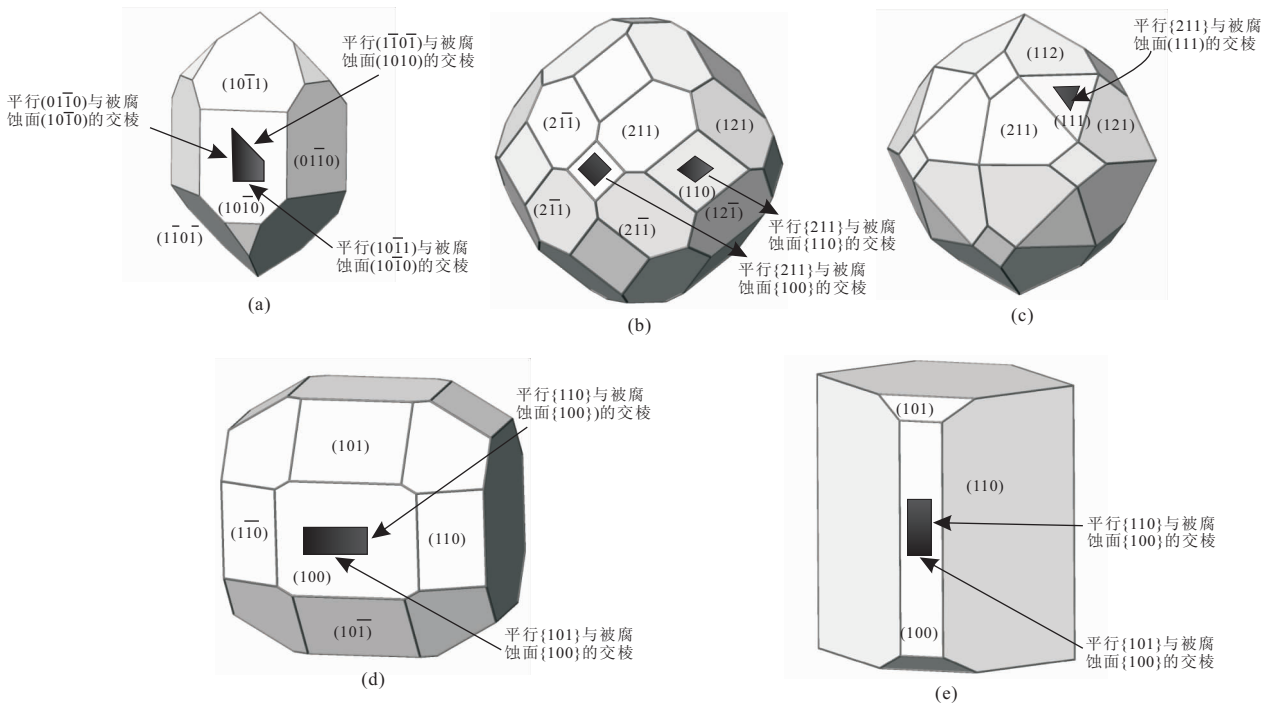


图 6 一些晶面的腐蚀像与晶体宏观形态常见晶面的关系
 Fig. 6 Some faces related to the growth faces on the habits

石所经历的腐蚀(风化)环境. 这样的工作对环境科学是具有现实意义的.

3 结论

在综合分析石英、石榴子石、橄榄石、锆石、红柱石的各种结晶学意义的晶面腐蚀像的基础上, 探讨了腐蚀像与晶面对称性的关系, 也分析了腐蚀像与晶面结构的关系. 最后认为, 腐蚀像主要受控于晶面的对称性, 因为腐蚀坑的形态与晶面的对称性是一致的; 在同一晶体的不同结晶学的晶面上, 尽管晶面

的对称性相同, 腐蚀像也不相同, 即腐蚀像可以准确地反映晶体上不同结晶学意义的方向(或晶面); 但在不同晶体之间, 对称性相同的晶面却可以出现相同的腐蚀像; 将腐蚀像与晶面结构的投影图对比, 基本上很难看出腐蚀像与晶面上的原子、离子排布细节的对应关系, 即腐蚀像与宏观形态一样, 不能够反映晶面结构细节, 只能反映晶面的对称性; 不同腐蚀剂对同一晶体的同一晶面的腐蚀像可以完全不同, 这也说明腐蚀像与宏观形态一样, 也是随着条件的不同而改变; 有些腐蚀坑形状可以用晶体形态上常见晶面与被腐蚀面的交棱来解释, 但有些腐蚀坑

却不能,即腐蚀坑形状在一定程度上可以用宏观形态来解释;同一晶面由不同腐蚀剂所形成的腐蚀像不同可以用来指示晶体所经历的腐蚀(风化)环境。

References

- Bose, S., Hu, X. M., Higgins, S. R., 2008. Dissolution Kinetics and Topographic Relaxation on Celestite (001) Surfaces: The Effect of Solution Saturation State Studied Using Atomic Force Microscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 759—770. doi: 10. 1016/j. gca. 2007. 11. 026
- Brown, G. E., 2001. How Minerals React with Water. *Science*, 294(5540): 67—69. doi: 10. 1126/science. 1063544
- Gratz, A. J., Manne, S., Hansma, P. K., 1991. Atomic Force Microscopy of Atomic-Scale Ledges and Etch Pits Formed during Dissolution of Quartz. *Science*, 251(4999): 1343—1346. doi: 10. 1126/science. 251. 4999. 1343
- Lian, C. G., Zhao, S. R., Xu, C., et al., 2011. Etch Figures of Quartz Crystal Formed by HF Solution and KOH Solution. *J. Synth. Cryst.*, 40(2), 419—423 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. Q., Zhao, S. R., Xu, C., et al., 2011. Etch Figure on a Garnet Crystal Formed by Alkaline Reagents and Its Difference from that Formed by Acid Solution. *J. Synth. Cryst.*, 40(5), 1236—1241 (in Chinese with English abstract).
- Meng, J., Zhao, S. R., Zhang, Z., et al., 2008. Three-Dimensional Evolution of the Etching Morphology and Crystal Symmetry of α -Quartz. *J. Mineralogy and Petrology*, 28(4): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Morse, J. W., Arvidson, R. S., 2002. The Dissolution Kinetics of Major Sedimentary Carbonate Minerals. *Earth-Science Reviews*, 58(1—2): 51—84. doi: 10. 1016/S0012—8252(01)00083—6
- Teng, H. H., 2004. Controls by Saturation State on Etch Pit Formation during Calcite Dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(2): 253—262. doi: 10. 1016/S0016—7037(03)00423—X
- Teng, H. H., Fenter, P., Cheng, L., et al., 2001. Resolving Orthoclase Dissolution Processes with Atomic Force Microscopy and X-Ray Reflectivity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(20): 3459—3474. doi: 10. 1016/S0016—7037(01)00665—2
- Wang, R., 2010. Three Dimensional Evolution of Etch Pits on Crystal Olivine and Garnet and Their Geological Significances (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).
- Xu, C., Zhao, S. R., Lian, C. G., et al., 2012. Establishment of the Three-Dimensional Model of Etch Figure of Zircon and Its Relationship with Crystal Symmetry. *Journal of Synthetic Crystals*, 41(5): 1237—1244 (in Chinese with English abstract).
- Yanina, S. V., Rosso, K. M., Meakin, P., 2006. Defect Distribution and Dissolution Morphologies on Low-Index Surfaces of α -Quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(5): 1113—1127. doi: 10. 1016/j. gca. 2005. 11. 019
- Zhao, S. R., Wang, J. Y., Sun, D. L., et al., 2001. Twin Structure in Yb: YAl₃(BO₃)₄ Crystal. *J. Applied Crystallography*, 34: 661—662. doi: 10. 1107/S0021889801010834
- Zhao, S. R., Meng, J., Wang, R., et al., 2009. Morphology and Etch Figures of a Yb: YAl₃(BO₃)₄ Crystal. *J. Applied Crystallography*, 42: 411—415. doi: 10. 1107/S002188980901036X

附中文参考文献

- 连晨光, 赵珊茸, 徐畅, 等, 2011. 石英晶体碱(KOH)腐蚀像及其与酸(HF)腐蚀像对比研究. *人工晶体学报*, 40(2): 419—423.
- 刘河清, 赵珊茸, 徐畅, 等, 2011. 石榴子石晶体碱腐蚀像及其与酸腐蚀像对比. *人工晶体学报*, 40(5): 1236—1241.
- 孟杰, 赵珊茸, 张泽, 等, 2008. α -石英晶体腐蚀形貌三维空间变化规律与晶体对称研究. *矿物岩石*, 28(4): 1—6.
- 王蓉, 2010. 橄榄石、石榴子石腐蚀像立体模型及其地质意义(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 徐畅, 赵珊茸, 连晨光, 等, 2012. 锆石腐蚀像立体模型的建立及与晶体对称的关系. *人工晶体学报*, 41(5): 1237—1244.