

解析库车提克买克墓地出土的天珠

Analyze the Gzi Unearthed from Tikemaker Cemetery in Kuqa

戴君彦¹ 阮秋荣²

Dai Junyan¹ Ruan Qiurong²

(1. 北京文博文化事业发展研究中心, 北京, 100717;

2. 新疆维吾尔自治区文物考古研究所, 乌鲁木齐, 830011)

(1. Beijing Cultural Development Research Center, Beijing, 100717;

2. Xinjiang Institute of Cultural Relics and Archaeology, Urumqi, 830011)

内容提要: 新疆库车提克买克墓地考古发掘出土了三颗战国至西汉时期的天珠, 本文借助光学显微镜等工具对这些天珠进行了细部的微观观察, 然后结合相关科学理论合理推导出它们的制作工艺, 进而运用“微痕考古”的方法探讨研究了它们在墓葬中埋藏了两千多年后发生的次生变化及成因。受玉髓质珠体的物理化学性状及埋藏环境的影响, 每颗珠子的受沁现象都纷繁复杂, 各沁像之间具有一定的系统规律性, 并有着直接或间接的因果关系。

关键词: 天珠 受沁 风化 玉髓 蚀花工艺

Abstract: This paper has carried out detailed microscopic observations on three Gzi beads in Warring States and Han Dynasty which unearthed in the archaeological excavation of Tikemaker Cemetery in Kuqa, Xinjiang, with the aid of optical microscopes and tools, and then reasonably derived them, in conjunction with relevant scientific theories, the production techniques, and then the use of “micro-marking archaeology” method to explore the secondary changes and causes of their burial in the tombs more than two thousand years. Affected by the physical and chemical traits of chalcedony beads and the burial environment, the seeped phenomenon of each bead is complicated, and the seeped phenomenon has certain systematic regularity and direct or indirect causality.

Key Words: Gzi; alteration of jades; weathering; chalcedony; flower erosion techniques

一、新疆库车县提克买克冶炼遗址及墓地简介

新疆文物考古研究所于2009年7月

至8月对提克买克冶炼遗址和墓地进行了考古发掘。提克买克冶炼遗址及墓地位于天山中部南麓、塔里木盆地的北缘, 海拔1858米, 在库车县阿格乡提克买克村西北, 北倚却勒塔格山, 南临库车河, 遗址呈西北—东南向断断续续片状分布于山脉坡

地及谷地溪流两侧，面积约280000平方米。发掘显示，提克买克冶炼遗址均为炉渣堆积区，有一次堆积，也有连续多次的堆积（图1）。炉渣堆积包含物中有大量的铜渣、铁渣、陶质流管及少量生活用陶器残片，它们由上至下基本相同，属同一时期遗物。炉渣应是炼铜后弃置，证明该遗址仅是先就地冶炼出纯铜，从而为铸造提供主要原料。从炉渣堆积面积广且厚度达1—3米的情况看，遗址的冶炼规模较大，沿袭时间较长。而炼渣大部分呈倾覆状被弃置在山坡上，因此我们推测炼炉应建造于山坡上。

提克买克墓地在冶炼遗址东部山坡的台地上，约有余座石堆石圈墓，沿山脊南北向分布。本次发掘的13座墓葬分别为竖穴土坑墓（10座）和竖穴石室墓（3座），系单人葬和多人葬。我们依据碳十四年代数据、出土遗物及相关资料推断墓地年代为距今 2455 ± 35 — 2210 ± 35 年，即公元前六世纪—前三世纪，也就是战国至西汉时期^[1]。提克买克墓地和冶炼遗址属同一时期的文化遗存，墓葬主人就是冶炼遗址的生产者，是一群专门从事金属冶炼的“技术工人”^[2]。

人类历史上最早的冶金遗址距今大约七千年，发现于西亚与东欧结合地带的巴尔干和安那托利亚地区，冶金技术的快速发展使这一地区对亚欧大陆的其他文明区域产生了重大影响。学界普遍认为“中原地区冶金术的真正崛起并形成独立的华夏风格，则是在二里头文化晚期才最终实现”^[3]，而“二里头文化的冶铜制铜技术很可能最初是由西方输入进来的”^[4]。我们根据器物以及墓葬形态和体质人类学的数据推测：在环塔

里木盆地周缘，包括西天山、帕米尔高原、昆仑山和库鲁克塔格山等地的山前地带及流入塔克拉玛干沙漠深处河流的尾间地带，于公元前1000年之后陆续有来自西方的人群融入本地的族群当中，其中一些人携带着先进的冶金技术，他们可能是由西部通过帕米尔高原的古老通道不断迁徙而来的，东西方的文化在这里交汇。

库车提克买克冶炼遗址的发掘填补了新疆冶金史上矿冶遗址考古发掘的空白，也为我们认识库车地区矿冶遗址年代问题提供了有力证据。墓葬出土文物除了大量陶器外，还有铜器、铁器、骨角器、玛瑙、石器、木器等，M13还出土了三颗天珠。M13为竖穴圆形石室墓，深1.5米左右，墓壁用石板或石块垒砌，其中出土40具以上的人骨，有头骨、肢骨、脊椎骨、盆骨等。人骨可分2—3层，系多次埋葬形成。

天珠是古人用大自然中的蚀花原材料对半透明的白玉髓珠的表层分别进行黑、白两次蚀染，从而获得黑色底上有乳白色纹饰的蚀花玉髓珠^[5]。藏族称这种蚀花玉髓珠为“GZI或DZI”珠，20世纪的西方学者将其汉语音译为“瑟”或“思”。“天珠”正是“GZI或DZI”珠的汉译名词，天珠的“天”既是宗教上所讲的天神，又有“外来的”之义^[6]。M13出土的天珠用白玉髓制作珠体，然后在珠体表层蚀绘了“黑”底和乳白色花纹，详情如下。

第一颗天珠（M13：12，图2）：该天珠呈圆柱状，珠体中间略粗，然后逐渐向两头收细，两端截平。珠体长42.25毫米，最大直径12.67毫米。珠体有穿孔，两头端部的截平面各有一个孔口，一端孔口的直径为1.70毫米，另一端孔口的直径为1.95毫米。珠体表面大部分蚀染呈深褐色，圆柱面上有乳白色与深褐



图1 提克买克冶炼遗址外景图

色相间的纹饰：在珠体两端邻近端部的位置分别蚀绘有一圈乳白色的圆圈纹环绕着珠体，这两条乳白色圆圈纹之间的珠体上蚀绘了一个乳白色的圆圈纹和一个方形纹，圆圈纹略呈椭圆形，而方形纹中贴近圆圈纹的两条边框也被艺术化处理成圆弧线。

第二颗天珠（M13：13，图3）：该天珠呈圆柱状，珠体中间略粗，然后逐渐向两头收细，两端截平。珠体长40.42毫米，最大直径13.13毫米。珠体有穿孔，两头端部的截平面各有一个孔口，一端孔口的直径为2.07毫米，另一端孔口的直径为1.95毫米。珠体表面大部分蚀染呈深褐色，圆柱面上有乳白色相间的纹饰：在珠体两端邻近端部的位置分别蚀绘有一圈乳白色的圆圈纹环绕着珠体，在这两条乳白色圆圈纹之间的珠体上分别蚀绘有两个位置相呼应的圆圈纹，其间有两条呈“Z”形的白色纹饰将这两个圆圈纹关联起来，使之形成“对立且有机统一”的组合关系。

第三颗天珠（M13：17，图4）：该天珠呈圆柱状，珠体中间略粗，然后逐渐向两头收细，两端截平。珠体长30.13毫米，最大直径8.26毫米。珠体有穿孔，两头端部的截平面各有一个孔口，一端孔口的直径为1.27毫米，另一端孔口残破。珠体表面大部分蚀染呈深褐色，圆柱形珠体上有四个基本上等距的乳白色圆圈纹环绕着珠体，但环绕在珠体中间的两条圆圈纹之间的间距相对稍大一些。

图2和图3中的天珠上蚀绘有“圆圈”和“方形”几何纹饰，它们构图合理、纹饰优美，不但具有很高的艺术价值还蕴含着古人深邃的宗教哲学思想。中亚锡尔河流域的维加罗夫斯基泰古墓



图2 第一颗天珠(M13:12)



图3 第二颗天珠(M13:13)



图4 第三颗天珠(M13:17)

也曾出土了相同形制和图案的天珠，其年代为公元前7—前6世纪^[7]。著名考古学家朱塞佩·杜齐（Giuseppe Tucci）在《西藏考古》一书中将天珠上的圆圈纹称为“睛（mig）”^[8]。关于这

种具有“睛”的天珠，大卫·麦克唐纳（David Macdonald）博士曾在写给霍鲁斯·贝克（Horace C. Beck）的回信中这样写道：“关于格雷乔伊教授拍下的标本照片，如果这种珠子是真正的玛瑙材质，那么它们的价值会非常可观，而且如果它们的图案是眼睛而非条纹，那么其价值会更高。”^[9]信中提及的格雷乔伊教授所拍照片中的标本正是黑、白两色的蚀花玛瑙珠，它有六条白色圆圈纹环绕着圆柱形珠体。

本文旨在运用“微痕考古”^[10]的方法，利用光学显微镜和微距镜头拍摄的方法对提克买克墓地M13出土的三颗天珠进行细部的微观观察，并借助专业学者对高古玉器次生变化的研究理论对它们的受沁现象及机理进行研究和科学诠释。在自然光下观察，这三颗天珠的白玉髓^[12]珠体的表层分别经过了黑、白两次蚀染，从而使珠体表层呈现出“黑”色的底色上具有乳白色纹饰的组合图案。也就是说，我们在天珠上观察到的珠体白色^[12]为色度不同的白玉髓的本色，而珠体表层呈显的黑色底和乳白色纹饰都系人工蚀染而成。这三颗天珠对透射光的反应不尽相同：相较而言，图4中的天珠透光性最好；图3中的次之；图2中天珠的透光性最差。造成这种差异的主要因素有两方面：（1）由于质量越高的玉髓，其晶体堆集密度高而透明度高，它的光泽和韧性也越高^[13]，而这三颗天珠的珠体分别来自不同的玉髓矿料，因此每一块玉髓矿料质量的差异造成了它们的珠体本就具有不同的透明度；（2）在长达两千多年的埋藏岁月中，白玉髓珠体会受土壤微观环境中相关因素的影响而发生变白失透的次生变化，这是天珠受沁后产生的蚀像^[14]之

一。受沁不仅会使天珠的白玉髓珠体逐渐变白失透，还会影响天珠表面的光泽，并带来其他相应的次生变化。由此可见，提克买克墓地出土的三颗天珠各自的现有状态是它们的受沁现象叠加于它们在古代成珠时的状态之上的综合结果。

二、天珠的制作工序

天珠的制作工艺大致可分为两个部分：珠体的制作工艺和蚀花工艺。

（一）加工玉髓珠体

对这三颗天珠而言，古人制作它们的白玉髓珠体时所涉及的基本程序是：首先，大致将矿石制作成所需要的珠子形状；其次，通过打磨和抛光进行珠子的表面处理；最后为珠子钻孔^[15]。

值得注意的是，玉髓的硬度达6.5—7，密度一般在2.60g/cm³左右，断口为次贝壳状断口^[16]，而只有硬度大于它的矿物才能在其表面刻划出痕迹。铜、铁质工具（铜质工具的硬度为3，铁质工具的硬度为5.5）的硬度都小于玉髓的硬度，故不能直接用来加工玉髓，工匠必须借助重要的介质——解玉砂才能对玉髓矿料进行切磨、钻孔、打磨等。解玉砂者何？治玉之砂也^[17]，它是一种重要的治玉材料，无论是粗加工还是精加工都会用到它。古代工匠在实践中会对解玉砂的种类和粒度进行分拣和加工，并根据使用目的将它们物尽其用，普通的石英砂只能勉强琢磨软玉（狭义的软玉硬度为6—6.5），而加工玉髓的解玉砂必须使用石榴子砂（硬度为6.5—7.5）、刚玉砂（硬度为9）、金刚砂（硬度为10）等硬度大于玉髓的矿砂。

制作玉髓珠体的第一阶段为开璞成型阶段。工匠要先将玉髓矿料切磨成比珠体稍大的长方体，然后用切角倒棱的方法不断削磨长方体矿料的棱角部分来逐渐获得圆柱形珠体，然后再反复琢磨去除珠体的多余部分，直至达到设计所需的形状。因此，当我们在手中缓缓转动珠体时，能偶尔感知到圆柱状的珠体隐约有高低起伏感，但肉眼看去整个珠体却相对圆润规整。珠体制作的第二阶段为打磨和抛光。玉髓的断口呈蜡状光泽，抛光平面才可呈现玻璃光泽^[18]，而刚磨削成型的珠子表面粗糙，需要使用粒度相对较细的解玉砂对其进行反复打磨，待珠子表面被打磨平滑后，再用更加细腻的解玉砂或其他材料进行抛光，直至珠体呈现莹亮的玻璃光泽。珠体制作的第三阶段是为珠子钻孔。钻孔是古人拿手的技艺，来自埃及底比斯一座墓

葬里的壁画（新王国时期，约公元前1420年）为我们展示了古代工匠用弦弓为珠子打孔的场景^[19]：他们用旋弓套住钻孔的圆棒，再用手来回拉弓，带动圆棒旋转来钻孔。古代工匠在钻孔时要浇上潮湿的解玉砂，当使用的解玉砂的粒度相对较大且不匀，而转速较慢且工匠用力也不太均匀时，就会在珠子的孔壁上留下显见的宽窄不同、深浅不匀的旋痕，这是游离状的解玉砂碾磨过孔壁后留下的明显痕迹。如果钻孔使用的解玉砂经过了捣细和分拣，砂子的粒度相对细小均匀时，珠子的孔壁就会留下游离状的解玉砂琢磨过后的浅而窄的旋痕。如果使用的游离状解玉砂粒度非常细小均匀，它们在较高转速的工具带动下琢磨过孔壁后，则留下非常轻微的旋痕，宏观上看孔壁也相对光滑。

图5中的天珠有一头破损，使我们得以很好地观察孔壁：肉眼可见孔壁相对光滑，呈蜡状光泽，无任何旋纹，与珠子端部表面部位经过抛光后的玻璃光泽明显不同，还有壤液成份胶结在孔壁上。图6是孔壁在40倍光学显微镜下的成像：可清楚看到黄色的壤液成份零星地胶结在孔壁上，而孔壁平滑，无任何旋纹。这是使用了精加工后的解

玉砂钻孔的结果，可以推测解玉砂的粒度非常均匀、细腻，它是在铁质管钻^[20]较高转速的带动下琢磨过孔壁的，工匠在钻孔时还使用了合适的夹具。这颗天珠的孔道有30.13毫米长，分别从两头对钻而成，而管钻在钻的过程中因为磨损而需要更换，且需要不断添加新的解玉砂，这样就在中间对打接连处附近的孔壁上留下一些细微的台阶痕和不连续的旋痕，当我们用手电筒的光从珠子一头的孔口照射并让光从整条孔壁掠过时，肉眼可在另一头的孔口处观察到光线随孔壁的高低而起伏的衍射现象。另外，在双面对打的连接处还有更为明显的台阶痕，这是双面定位出现细微偏差后导致孔内出现错位形成的台阶痕^[21]，光线衍射的高低起伏更加明显。

（二）天珠的蚀花工艺

天珠的制作工艺是在蚀花红玉髓技术上的沿革和发展，它需要工匠在给白玉髓珠蚀绘白色纹饰前先将珠体的表层全部染黑，以此达到黑、白鲜明的艺术对比效果。也就是说，工匠需要在琢磨成型的白玉髓珠体上分别进行黑色底的蚀染和乳白色花纹的蚀绘，才能制作成天珠。关于玉髓的染色工艺，由于致色物的渗入一般是以离子形式扩散的^[22]，因此天珠表层被染黑（或染白）的原理就是使离子状态的黑色素（或白色素）充填进白玉髓珠体的无数微孔隙中，从而在宏观上改变玉髓珠体表层的呈色。玉髓的微孔隙源于它的架状基型结构^[23]，其 SiO_2 集合体以较松散的状态无序混杂在一起，玉髓被染色的实质并不是矿体中的 SiO_2 被染色，而是让色素离子充满这些微孔道^[24]，当黑色或白色的色素离子充满玉髓珠体表层的微孔隙时，工匠就成功地在白玉髓珠体上蚀染（绘）好所需的黑底和白色花纹了。

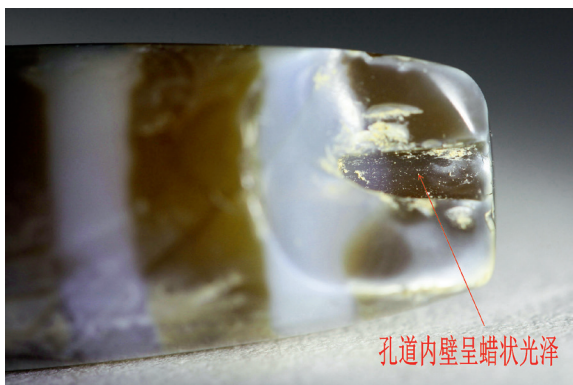


图5 从珠体破损处观察到的孔道特征

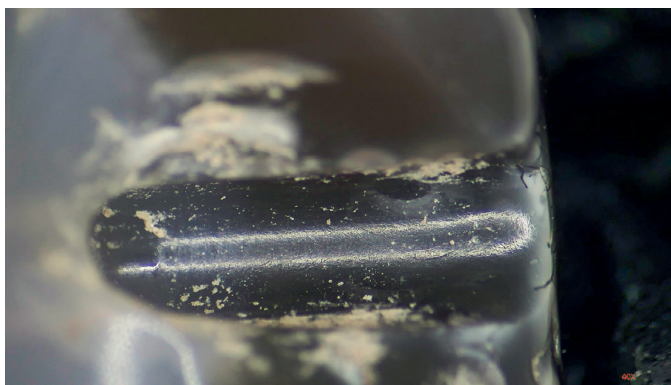


图6 40倍光学显微镜下的孔道特征

1. 天珠的黑色蚀染工艺

古代工匠首先要用黑色蚀染剂将白玉髓珠体的表层全部染黑,然后再用另一种蚀花方法蚀绘乳白色花纹于其上。黑色蚀染剂由黑色染料和相应的触染剂组成,能溶于水和水的介质。古人获取黑色染料的方法是在树瘿的提取物种中加入绿色的硫酸盐,或把几种暗色的染料综合调加在一起,而触染剂主要是明矾^[25]。这些物质主要来源于植物、动物和矿物^[26],用它们制作而成的蚀染剂能渗透进材料的内里,使用前需要除去杂质并进行精细研磨。由此可见,在制作天珠的工艺中,用上述方法制成的黑色蚀染剂具有或多或少的色彩差异。

就捷克买克墓地出土的三颗天珠而言,工匠将黑色蚀染剂稀释在水中用来长时间浸泡白玉髓珠体以将其染黑。这颗天珠的白玉髓珠体在被浸入黑色染剂中时还没有被钻孔,图7可见孔道内壁的深处仍然为天然白玉髓的色泽,只在临近孔口两三毫米处才呈显深褐色,这是浸泡过程中“黑”色素沿着玉髓珠体表层的微孔隙深入到珠体一定程度的结果,而珠子表层SiO₂晶体束的粗细和排列状态是影响黑色素深入珠体程度的重要因素。为了使白玉髓珠表层的染黑效果更好,工匠在将珠体浸入黑色蚀染液前,会将未完全抛光的白玉髓珠放在干

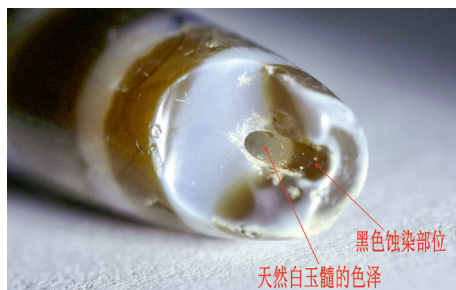


图7 孔道深处特征

燥处暴晒,以使珠体表层微孔隙中的吸附水^[27]析出,从而给蚀染剂中的黑色素离子留出进入的空间。

2. 白色纹饰的蚀花工艺

历史上最早出现人工彩绘花纹的小圆石发现于法国比利牛斯山脉的马斯·德阿吉尔“大岩洞”,年代距今约4万至1万年,珠体上有用红色的赭石表现的斑点和宽线条^[28],表现出人类对称、重复等艺术秩序规律的驾驭以及令其色彩经久不褪的工艺能力。在天珠的黑色底上蚀绘乳白色纹饰的技艺承袭自蚀花红玉髓珠(Etched Carnelian Beads)的蚀绘技术。在红玉髓珠上蚀绘乳白色花纹的技术是哈拉帕文明(Harappan Civilization,印度和巴基斯坦的青铜时代文明)的产物,这种工艺的成品早在摩亨佐·达罗和乌尔的属于公元前3000年前期的遗存中就已出现^[29]。英国学者贝拉西斯(A.F.Bellasis)早在1857年就关注到蚀花红玉髓珠,他在巴基斯坦信德省的萨温城做了实地考察并对蚀花工艺进行了研究,麦凯(Ernest Mackey)也于1930年在这里开展了实地调查并进行了相关研究工作。他们的研究表明:就制作工艺而言,古人是用碳酸钠(Na₂CO₃)作为有效成份在玉髓珠的表层蚀绘乳白色花纹的,因此霍鲁斯·贝克将这类珠子定名为“Etched Carnelian Bead”^[30]。人类对碳酸钠的使用由来已久,它主要来源于大自然、草木灰和燃烧过的酒石^[31]。夏鼐先生也采用了麦凯的研究成果,即:工匠首先用一种野生的白花菜(Capparis arphylla)的嫩茎捣成浆糊状并和以少量洗涤剂(碳酸钠)溶液调成半流状的浆液,作为在红玉髓珠上蚀绘白色花纹的染料,然后用笔将上述染料绘画于磨制光滑的红玉髓珠表面,之后将珠子熏干并埋于木炭余烬中,低温加热约5分钟取出,冷却后再用粗布疾擦,即可获得光亮的蚀花红玉髓珠^[32]。

玉髓由SiO₂晶体组成,SiO₂拥有自然界中最稳定的化学结构,要拆开SiO₂结晶体的化学键需要很高的能量,因此常温下的玉髓不与任何酸、碱物质发生反应,只有加热到一定高的温度才会与强酸、强碱发生反应。而我们根据前文提到的贝拉西斯和麦凯的实地调查和研究结果来看,古代工匠只是在大气条件下将蚀花好的珠子放进木炭余烬中加热约5分钟左右,这样的加热过程会使珠体表层的吸附水析出,并在一定程度上使SiO₂晶体发生位移型相变^[33],从而有助于碳酸钠以离子形式更好地充填进珠体表层晶体间的微孔隙中。基于抛光过程会使白玉髓珠表面发生层面流动而封闭玉髓原有的晶间孔隙,而使染液较难浸入,由此影响蚀染效果^[34],工匠们会在完成了黑、白两色



图8 珠体受沁现象细节图

蚀花工艺后才非常精细地抛光珠体，这样不仅增加了珠子光泽，还可以通过急擦珠体带来的局部抛光热引起的层面流动效应封闭玉髓珠表面原有的晶间孔隙，从而使充斥在 SiO_2 晶体间的黑、白色染料离子不会被轻易地析出。当我们仔细观察提克买克墓地出土的天珠时，发现它们珠体表层被蚀染的黑色底和白色纹饰都发生了或多或少的变化，这是珠子在漫长的埋藏岁月中受沁后发生的次生变化，如图8所示。

三、天珠受沁机理的阐释

天珠被埋藏在接近地表的土壤中，会受埋藏环境的影响产生风化作用，而“受沁”则特指古玉器埋藏入土后发生的风化作用（包括物理风化、化学风化和生物风化）。专业学者认为，古玉器自埋藏入土开始就不可避免地会与周围物质发生相互作用，这些物质包括土壤、地下水、有机质等，并且随着季节的变化、温度、湿度以及地下水水位等不断变化，这些物理变化协同化学风化作用使得古玉器不断地改变着原有的性状，这一过程被称为“受沁”^[35]。受沁是一个缓慢的动态过程，主要经历了风化淋滤阶段^[36]和渗透胶结阶段^[37]，它既是一个“失”的过程，同时也是一个“得”的

过程。古玉受沁后的内在因素表现为矿物的显微结构变松，吸水性增强、褪色发白、比重降低^[38]。天珠的珠体是由玉髓制作而成的，而玉髓和其他玉石矿料一样都是晶体矿物，因此从某个角度来说，它们的受沁机理是一样的。

对于提克买克墓地出土的三颗天珠而言，其玉髓珠体的化学、物理特性决定了它们在受沁过程中发生的风化作用主要是物理风化，表现为机械性地破坏 SiO_2 晶体间的连接作用，使 SiO_2 晶体松散，从而导致玉髓晶体间的结合力逐渐减小，最后使珠体的组织结构越来越疏松。因此，每一颗珠体的玉髓质量决定了它们各自的受沁程度^[39]，而埋藏环境则是决定它们受沁程度的另一个要素。

四、提克买克墓地出土天珠的沁像及成因

众所周知，土壤拥有极其复杂的生物物理、化学体系^[40]。这三颗天珠被埋入地下之始，就与周围土壤环境进行部分或全面的接触，开始了一系列的水解反应、有氧化反应、电化学反应、酸碱反应等。对提克买克墓地土壤环境的进一步了解，有助于我们从受沁的机理层面探讨这三颗天珠所呈现的斑斓多样的外观形态及成因。

就大环境而言，提克买克遗址和墓地所在地区的气候干燥，光照充足，植被稀少。墓地所处山梁的地表为砾石层，余者为疏松的沙石地层和岩石山体，山坡上可见裸露的暗红色山体，山坡下为水草丰茂的溪流沟谷地带。根据前文的叙述，我们判断M13的填土具有相对良好的通气性，且土壤中的水份会随着降雨等因素不断地变化，这是一个相对开放的埋藏环境。也就是说，埋藏在这种环境下的三颗天珠始终都难以与地下埋藏环境形成一个平衡体系，它们自埋藏入土开始就受周围环境的影响不断地发生着风化作用，从而渐次产生相应的蚀像。另外，提克买克墓地的一些特殊情况引起了我们的关注：1. 墓地处于冶炼遗址内，M13所处山脊两侧不远处就堆积着一定厚度的冶炼堆积物，因此我们推测：多次反复倾倒入于此的炼渣等堆积物当时应具有相当高的温度，它们会使附近墓葬土壤的温度升高；2. M13墓室填土为从沟谷处搬运而来的黄色土，而土壤地理学研究表明，这种土壤的含盐量高，盐分组成以氯化物——硫酸盐类型为主，碳酸钙含量也很高^[41]。那么，埋藏在提克买克墓地的三颗天珠在历经两千多年的岁月洗礼后，会产生什么样的受沁现象呢？

第一颗天珠：我们先用强光手电筒从珠子背面12点钟方向透射观察，整个珠体几乎不透光。于是稍微调整光源的方向，如图9所见，将手电筒调至约10点钟方向，这时我们看见珠体一头临近端部的地方透出莹亮的光辉，珠体另一处也有小片黑色蚀染元素褪去后露出的白色珠体，其色度与旁边蚀花而成的乳白色纹饰明显不同，结合珠子另一端也有轻微的透明度来看，我们判断这颗天珠的白玉髓珠体仍在相当程度上保留了其天然的物理化学性状。为什么同一颗天珠的白玉髓珠体上会呈现出不同的透明度呢？我们推断主要受微观埋藏环境中温度的影响所致。墓葬附近地表堆积的炼渣为炼铜后多次堆积而成，其堆积的时间、次数、先后顺序、炼渣的温度等都毫无规律可言，但炉渣带来的较高温度一定会通过土壤传递到墓葬土壤中，虽然大部分热能在传播过程中被消耗掉了，但仍有部分到达并被保存在墓葬的土壤中，这种热能的影响断断续续。结构矿物学告诉我们：热能在一定程度上的赋加，会使分布于玉髓孔隙中的分子水或赋存于纤维颗粒边界的内表面氨基水^[42]加快析出，从而使玉髓发生相变^[43]，产生“变白失透”的受沁现象。在一定温度下，由于玉髓的传热性不好，缓慢而持续的加热会使受热较多的部位在一定程度上变白失透，受热较少的部位则相变程度相对微弱，而热能不能到达之处仍保留着玉髓矿料原有的透明度，因此我们判断它们的珠体仅发生了相应的物理变化。另外，图中还可看见沁裂纹现象和色沁现象。

图10中，可见数条沁裂纹无规律地分布于珠体，它们或粗或细、或深或浅、或交错或断续地从珠体一直蜿蜒

至珠子一头的端部，多数沁裂纹被壤液中的铁元素沁染成褐红色，一些沁裂纹中的褐红色显然已沿着晶体疏松的网面深入到珠体肌理，从而形成了裂理面^[44]。“沁裂纹现象”的成因是：珠子受埋藏环境的影响而不断地发生着风化作用，赋存于晶体微孔隙中的水份在风化淋滤过程中携带着可溶性物质渗流析出，从而减小了SiO₂晶体间的连接力，使珠体变得疏松。当应力作用叠加于这一过程中时，珠体表层SiO₂晶体间的连接会沿着键力弱的晶体间加速断裂，从而形成裂纹。褐红色的“色沁现象”源于壤液中的铁元素，由于M13所处山体富含铁矿，壤液中含有较多的铁元素，氧化形态的铁离子在渗透胶结作用下与壤液中的其他物质一起渗透并胶结在经历过风化淋滤作用后相对疏松的晶体微孔隙间，形成了“色沁现象”。当多余的胶体溶液堆集在晶体相对疏松的部位和沁裂纹处时，就呈显出沁裂纹现象与色沁现象相叠加的状态。图中还可观察到“蚀色褪色现象”，其成因是：受各种具体因素的影响，即使同一个墓葬也会有各种不同的微观埋藏环境，当蚀染的色素离子在风化淋滤过程中大部分被析出后，在渗透胶结过程中由于所处微环境中无致色离子，导致没有其他致色离子补充进这一部位的晶间孔隙，于是呈现出“蚀色褪色现象”。另外，图中还可观察到晶体疏松现象和晶体脱落现象。

在图11的细节图中，我们可观察到除明显的蚀色褪色现象外，还在浅褐色的底色上看见一些深褐色的细纹呈平行纤维状或半弧形，深浅不一地隐于珠体表层，色素离子渗入并赋存较多处正是晶体相对疏松的地方，其形态可能与珠体表层石英晶体的取向和拓扑结构特征有关。图中还观察到沁裂纹现象、各种形态的土蚀现象以及隐约的橘皮纹现象。图12是珠体的15倍显微成像，沁裂纹处有深色的色沁现象以及各种形态的土蚀现象。图13是这一部位的40倍显微成像，可见黑褐色的致色元素充填在其中一条沁裂纹中，附近的晶体疏松部位和晶体脱落处也有部分被黑褐色的致色元素充填其间，而晶体疏松处还有土黄色的壤液胶结在裂理面。另外还可观察到橘皮纹现象。图14

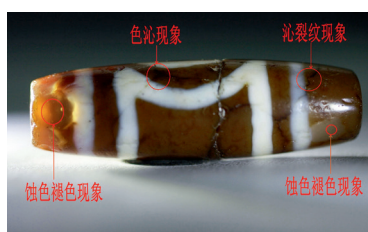


图9 侧透光观察第一颗天珠

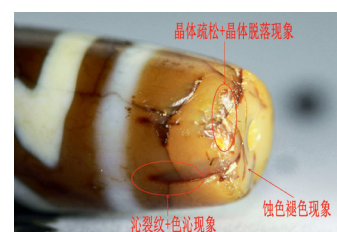


图10 珠体一端受沁现象细节图

是这一部位微调角度后的40倍显微成像，可清楚观察到橘皮纹现象和晶体脱落后形成的各种土蚀现象，严重处形成了多个凹坑，凹坑大小各异，形态多样，其中两个凹坑间有明显的晶体疏松现象和由此产生的虹化现象。晶体疏松、晶体脱落和虹化现象的成因是：风化淋滤作用导致珠体内 SiO_2 晶体间的微孔隙增大，当晶体间的连接力降低到一定程度时，就使这一部位变得疏松，形成晶体疏松现象；严重者会使部分晶体从珠体上渐次脱落，形成晶体脱落现象，根据脱落程度可分为土蚀痕、土蚀斑和土蚀坑；虹化现象则源于光线折射过晶体疏松处后形成的光学效应，风化淋滤作用和渗透胶结作用会改变珠

体中本就无序的晶体排列状态，当改变后的晶体排列形成某些特殊交角，并有光线从特定角度穿过时，就会产生虹化现象。图15是晶体疏松部位的70倍显微成像，使我们更加清晰地观察到晶体疏松部位的虹化现象。另外，这颗天珠的整个珠体都被一层有厚度的、莹亮的包浆^[43]包裹。图16是珠子一头的端部，蚀染而成的黑色几乎褪色殆尽，只残留少许色素离子在表层晶体间，呈显为淡黄色。有多条沁裂纹从珠体延伸至半透明的端面，可清楚看见许多沁裂纹中有褐红色的色沁现象，色沁现象一直深入珠体内，它们是壤液中的铁元素沁染所致。还可看到晶体疏松现象、晶体脱落现象、虹化现象以及少许壤液胶结在凹陷处。

第二颗天珠：图17是从12点方向透光观察这颗天珠，珠体呈微透明，它的表面有包浆包裹，呈现出润亮的光泽。包浆现象的成因是：经历了风化淋滤作用的珠体内有大量微孔隙，为壤液中的物质渗透进珠体提供了通道和空间，但在相对后期进行的渗透胶结过程中，胶结作用使晶体间的孔隙度逐渐减少和

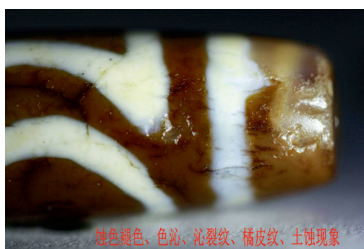


图11 珠体另一端受沁现象细节图

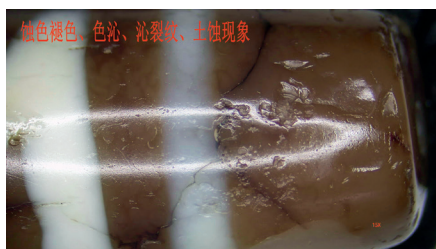


图12 珠体在15倍显微镜下的成像

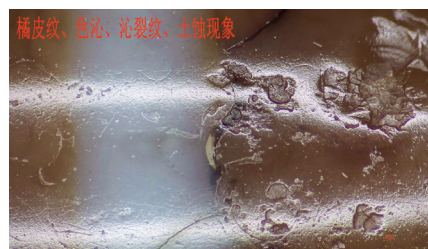


图13 珠体在40倍显微镜下的成像

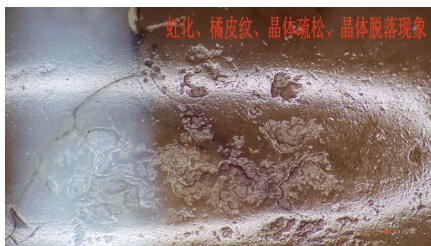


图14 珠体微调角度后在40倍显微镜下的成像

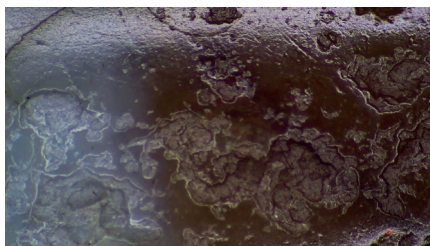


图15 珠体在70倍显微镜下的成像

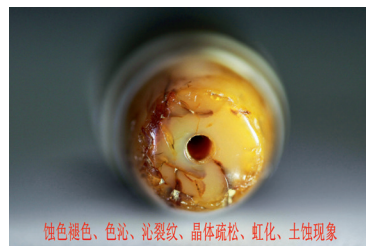


图16 珠子一头端部的特征



图17 透光观察第二颗天珠



图18 侧透光观察天珠的一端



图19 侧透光观察天珠的另一端

缩小，致使富含Al、Si和Fe元素的胶体溶液渐渐失去了渗入珠体内部的通道，只能大量聚集在珠体表层，形成了包浆。Si、Al等元素的富集增强了包浆带给珠体的光泽，使之更加莹亮。图18是用手电筒的光从11点方向透射过珠体后的照片，可以看到珠体呈微透明，珠体内部有隐约的缠丝纹路。如图19所见，当我们用手电筒的光从1点钟方向透射过珠体的另一端时，则可看见在微透明的玛瑙珠体上蕴含有韵律结构的缠丝纹，它主要源于矿体内部的化学组成和微观结构的韵律性变化。

图20中可见这颗天珠的珠体表面并非十分平整光滑，而是有许多大小不一、形态各异的土蚀现象和橘皮纹现象自然地分布于整个珠体。当我们微微转动珠体时，能观察到珠体表面的包浆带来的光泽感是一致的。白色蚀花纹路上有较明显的黄色沁现象，而蚀色褪色现象的形态沿珠体缠丝纹路的变化而相应变化。图21是10倍显微镜下的成像，可见珠体上有土蚀痕、土蚀斑、土蚀坑以及橘皮纹现象自然地分布于珠体，白色

蚀花纹路上还有淡淡的黄色沁现象。橘皮纹现象的成因是：微观上，这颗天珠的表面并非特别平整光滑，它在久远的埋藏历程中所经历的风化淋滤作用加剧了珠体表面凹凸不平的状态，当富含Si、Al、Fe元素的胶体溶液在渗透胶结的过程中堆积并胶结在本就不太平整的珠体表面，又有光线从特定角度照射时，就呈现出“橘皮纹”的光影效果。图22是这一部位在25倍显微镜下的成像，可清晰观察到上述受沁现象的细节特征：橘皮纹现象杂糅于土蚀痕、土蚀斑现象之间，它们互为因果，整体形态十分自然，有莹亮的包浆覆盖其上。其中一些土蚀斑上还有少许土黄色壤液胶结。图23是在50倍显微镜下的成像，它使我们对上述现象的观察更加清晰明了。

图24是珠体残损一端在10倍显微镜下的成像，可见圆柱形珠体上自然地分布着橘皮纹现象、土蚀现象，一条沁裂纹从珠体的圆柱面蜿蜒至断裂面上并与断裂面上的一处晶体疏松处相连接，有深色的致色元素深入到沁裂纹的裂理面。图25是这一部位在25倍显微镜下的成像，可更加清楚地观察到珠体表面的沁裂纹中有晶体渐次疏松的形态，其中还有色沁现象和壤液胶结。图26是珠体的另一部位在15倍显微镜下的成像，可见珠体内包裹有一块粗大颗粒的石英晶体。还可观察到橘皮纹现象、土蚀痕和土蚀坑现象。图27是这一部位在30倍显微镜下的成像，可清楚看见有壤液胶结在粗大颗粒的石英晶体表面，还隐约可见虹化现象。而在这一部位的周缘则有橘皮纹现象、土蚀痕、土蚀斑和土蚀坑现象，有一层包浆覆盖其上。图28是这一部位在50倍显微镜下的成像，可更加清晰地观察到胶结于粗大

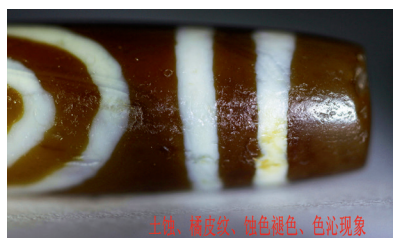


图20 珠体的局部细节图

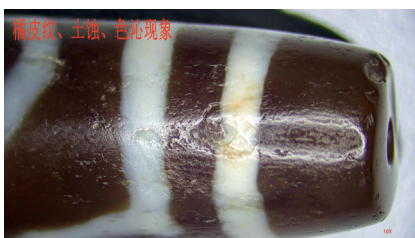


图21 珠体在10倍显微镜下的成像



图22 珠体在25倍显微镜下的成像

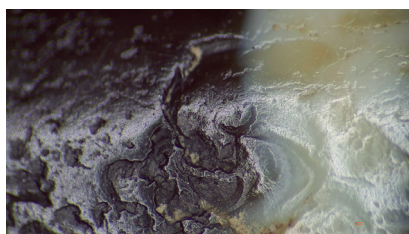


图23 珠体在50倍显微镜下的成像

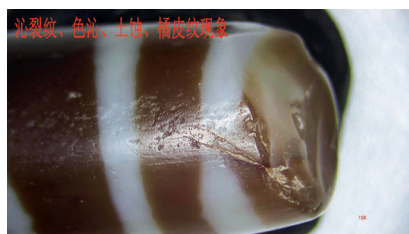


图24 珠体在10倍显微镜下的成像

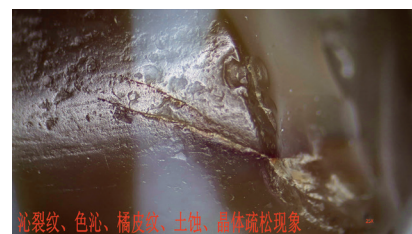


图25 珠体在25倍显微镜下的成像

石英晶体表面的壤液成份以及虹化现象，还可隐约看见在一处小土蚀斑内胶结有灰黄色的壤液成份。图29是这颗天珠一头的端部，可见端部外缘处有晶体脱落后留下的土蚀斑和土蚀坑现象，其上覆有包浆。端部的平面部位曾被非常精细地打磨、抛光，从而光滑细腻，其上有一层莹亮的包浆覆盖。

第三颗天珠：图30是透光观察第三颗天珠，当光线从1点钟方向透射过珠体时，整个珠体呈现出莹亮的内反射光，还可见珠体内蕴含着明显的缠丝纹，由于玛瑙的纹带结构主要源于它内部的化学组成和微观结构的韵律性变化，这种变化通过透明度和颜色差异在不同尺度表征出来^[46]，因此透射出来的光辉随着珠体的微微转动而变化。还可明显看见珠体表层包裹有一些黑色斑块，它们的色彩浓淡有别、深浅不一地自然分布于珠体内。这可能是珠体内部原有的杂质，也有可能是壤液中的黑色素沁入珠体表层所致。从图31看，珠体表面有大片的白色，这是富集于壤液中的碳酸钙渗透并胶结于珠体表层后出现

的白色沁现象。微观而言，玛瑙内部的显微结构复杂，石英晶体的取向和拓扑结构特征与其集合体赋存状态密切相关^[47]，因此当壤液里的碳酸钙渗透胶结在珠体表层时，就会在微孔隙相对较大且通畅处富集更多，这里所呈现的白色也就相对浓郁，反之亦然。图中可见碳酸钙渗透胶结在珠体表层的形态非常自然，有浓有淡，映衬出一些细小的圆圈状或半弧状的纹痕。另外，图中还可看到沁裂纹现象，人工蚀染的颜色和碳酸钙富集带来的白色都跟随着玛瑙条纹的变化而变化。图32是珠体在15倍显微镜下的成像，可见珠体表面非常细腻光滑，但通过反射光仍能观察到珠体表面密布着自然而细微的土蚀痕和土蚀斑现象，覆盖其上的包浆包裹使珠体呈现出挺括、润亮的玻璃光泽。碳酸钙富集的形态多样，它们受石英晶体的化学组成和微观结构的影响而变化多端。图33是珠体在50倍显微镜下的成像，可见沁裂纹的上半段因受沁相对严重而沿着裂理的网面发生了晶体成片脱落的现象，晶体疏松层面则沿着疏松的网面结构自然延伸至沁裂纹的下半段，然后悄然隐匿于珠体中，沁裂纹边沿胶结有壤液成份。图中还可见色沁现象、橘皮纹现象。

图34是在15倍显微镜下的成像，图中可见沁裂纹现象、晶体疏松现象、晶体脱落现象以及碳酸钙渗透胶结在珠体表层的现象。图35是在30倍显微镜下的成像，可见珠体端部外缘处的土蚀坑中胶结有壤液成分，沁裂纹形态自然，一处土蚀坑杂糅于细微的土蚀痕和土蚀斑中，其上覆盖有包浆，通过反射光还可观察到橘皮纹现象。图36是微调珠体部位后的30倍成像，可见碳酸钙的分布形态随着珠体表层中的晶体分布特征而呈现出半圆形、圆形

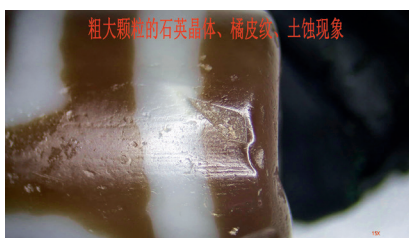


图26 珠体在15倍显微镜下的成像

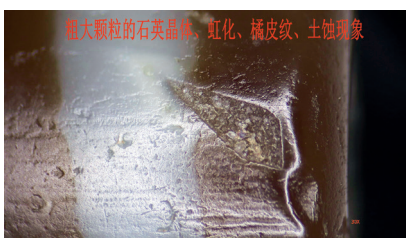


图27 珠体在30倍显微镜下的成像

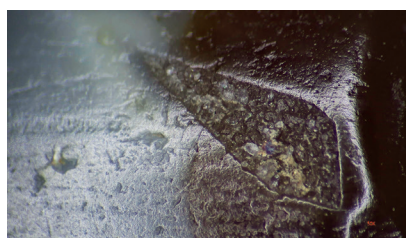


图28 珠体在50倍显微镜下的成像



图29 珠子一头端部的特征

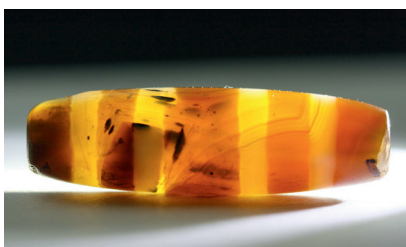


图30 透光观察第三颗天珠

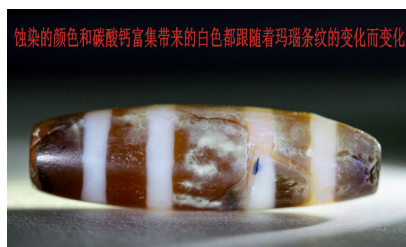


图31 珠体上的次生变化

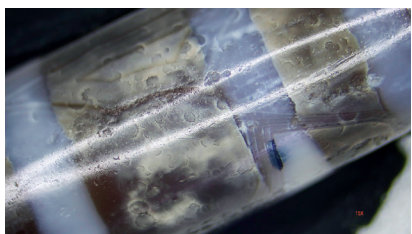


图32 珠体在15倍显微镜下的成像



图33 珠体在50倍显微镜下的成像

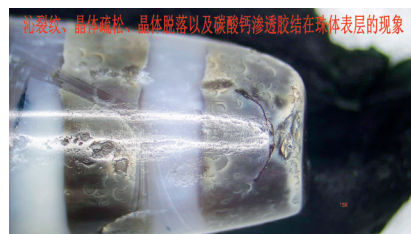


图34 珠体在15倍显微镜下的成像

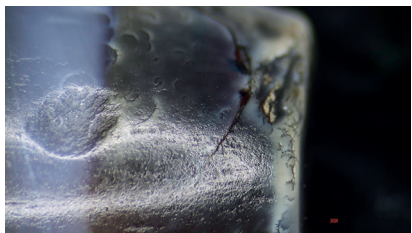


图35 珠体在30倍显微镜下的成像

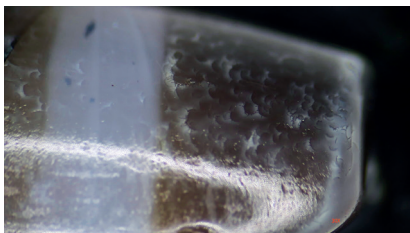


图36 珠体微调角度后在30倍显微镜下的成像

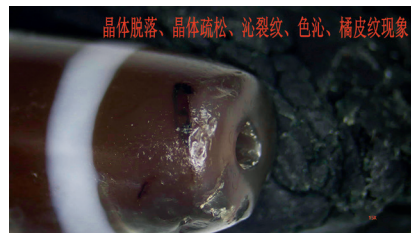


图37 珠子一头端部在15倍显微镜下的成像

等多种形态，它们有的集集成片，有的仅沿着半圆形边沿分布，形态疏朗而自然。图中还隐约可见橘皮纹现象和包浆现象。图37是珠子一头端部在15倍显微镜下的成像，可见端部的边缘处有晶体脱落现象、晶体疏松现象、沁裂纹现象、色沁现象和橘皮纹现象。

五、结 语

战国至西汉时期，有来自西方的人群陆续融入环塔里木盆地北缘的周边地区，库车提克买克冶炼遗址就为其中之一。这些西来人群不仅带来了先进的冶炼技术，还带来了他们喜爱的护身符珠宝——天珠。这些天珠伴随它们的主人被埋藏在提克买克墓地中长达两千多年，每一颗珠子受埋藏环境的影响都发

生了相应的次生变化，并由此产生了复杂多样的沁像。我们借助微距镜头和光学显微镜等观察工具，在这些天珠上看到了沁裂纹现象、色沁现象、蚀色褪色现象、虹化现象、晶体疏松现象、土蚀现象、橘皮纹现象、包浆现象等一系列受沁现象，上述受沁现象之间有着直接或间接的因果关系和一定的系统规律性。每一颗天珠的受沁现象不但与其玉髓质珠体的物理化学性状密切相关，还与提克买克墓地的宏微观埋藏环境有着千丝万缕的关系。由于冶炼遗址地表炉渣堆积赋加的热能使墓室土壤环境的温度相应升高，其中两颗天珠的玉髓珠体因在相当长的一段时间里持续受赋加热能的影响而出现了一定程度的变白失透，我们结合珠体仍具有轻微透明度的特征判断它们的珠体仅发生了相应的相变。而另一颗天珠的珠体因受微观埋藏环境中富集碳酸钙的影响，因此有较多的碳酸钙渗透胶结在部分珠体的表层，其形态受珠体表层组织中晶体的化学组成和微观结构的韵律性变化而形态多样。

附记：新疆文物考古研究所的李文瑛所长和闫雪梅主任在文物信息的提取工作上给予了大力支持，谨致谢忱。

注释

- [1] 新疆文物考古研究所：《库车县库俄铁路沿线考古发掘简报》，《新疆文物》2012年第1期。
- [2] 阮秋荣：《新疆库车县提克买克冶炼遗址和墓地初步研究》，《汉代西域考古与汉文化》，科学出版社，2014年，第136—149页。
- [3] 李水城：《西北与中原早期冶铜业的区域特征及交互作用》，《考古学报》2005年第3期。
- [4] 刘学堂、李文瑛：《中国早期青铜文化的起源及其相关问题新探》，《藏学学刊》（第3辑），四川大学出版社，2007年，第1—63页。
- [5] 中国社会科学院考古研究所新疆工作队、新疆喀什地区文物局、塔什库尔干县文物管理所：《新疆塔什库尔干吉尔赞喀勒墓地2014年发掘报告》，《考古学报》2017年第4期。
- [6] 汤惠生：《藏族饰珠“GZI”考略》，《中国藏学》1995年第2期。
- [7] Jeannine Davis-Kimball (ed.), *Nomads of the Eurasian Steppes in the Early Iron Age*. Berkeley: Zinat Press, 1995, p.218.
- [8] [意] G·杜齐著，向红笈译：《西藏考古》，西藏人民出版社，2016年，第7页。
- [9] Horace C. Beck, *Etched carnelian beads*. *The Antiquaries Journal*, vol.13, issue 1, 1933, p.382-398.
- [10] 武仙竹：《微痕考古研究》，科学出版社，2017年，第7、8页。
- [11] 白玉髓的颜色为白色（或灰白、灰色）的微透明—半透明的玉髓。玉髓（Chalcedony）是石英的一种致密微晶体，由细微的纤维体组成。纯净的玉髓为半透明的白色，但因其内部含微量元素或细微的矿物包体而颜色丰富多彩。条带清晰的玉髓被称为玛瑙（Agate），独特的色带通常沿着矿物形成空洞的轮廓而扩散。条带的颜色取决于不同的杂质，可以出现各种色度的白色、黄色、灰色、浅蓝色、绿色、褐色、粉色、红色和黑色。[英] 罗纳德·路易斯·勃尼威兹著，张红波、张晓光译，杨主明、董明审：《宝石圣典：矿物与岩石权威图鉴》，电子工业出版社，2013年，第226、230页；黄作良主编：《宝石学》，天津大学出版社，2010年，第240页。
- [12] 自色（idiochromatism）：是矿物自身固有的化学成分引起的颜色。自色较为固定，可作为矿物的鉴定特征。秦善、王长秋：《矿物学基础》，北京大学出版社，2006年，第21页。
- [13] 闻广：《苏南新石器时代玉器的考古地质学研究》，《文物》1986年第10期。
- [14] 蚀像（etch figure）：晶体在长成后因受到溶蚀而在晶面上形成的一些具有规则形状的纹痕或凹痕，称蚀像。蚀像的具体形态和方位均受晶体内部结构特征的控制，故不同矿物常有不同特征的蚀像。因此，对蚀像的观测有助于确定矿物的属种。在宝石学领域中，有助于识别宝石原料的真伪；在出土古玉的鉴别中，有无蚀像常可作为是否为出土古玉的重要依据，出土古玉蚀像的形成与古玉本身的质地（内部结构、物性、隐性绺裂）有关。张庆麟编：《珠宝玉石识别辞典》，上海科学技术出版社，2011年，第35、538页。
- [15] Nai Xia, *Ancient Egyptian Beads*. Social Sciences Academic Press (China) and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, p.27.
- [16] 次贝壳状断口（subconchoidal fracture）：断口呈光滑曲面形态，与贝壳状断口相似，但一般无或只有少数同心圆纹。许多变生非晶质矿物如钛铀矿以及隐晶质块状的矿物如玉髓等，常具这种断口。秦善、王长秋：《矿物学基础》，北京大学出版社，2006年，第28页。
- [17] 霍有光：《从玛瑙、水晶饰物看早期治玉水平及琢磨材料》，《考古》1992年第6期。
- [18] 黄作良主编：《宝石学》，天津大学出版社，2010年，第239页。
- [19] [英] 休·泰特主编，陈早译：《世界顶级珠宝揭秘：大英博物馆馆藏珠宝》，云南大学出版社，2010年，第5页。
- [20] 管钻：又称空心钻，可能在新石器时代早期就已发明。管钻因空心能迅速排除废屑，摩擦面也小，所以转速较快、省劲。徐琳：《中国古代治玉工艺》，紫禁城出版社，2011年，第44、45页。
- [21] 邓淑苹、沈建东：《中国史前玉雕工艺解析》，《中国玉文化玉学论丛四编》，紫禁城出版社，2007年，第1047页。
- [22] 单秉锐、臧竞存、段小芳：《玛瑙染黄色工艺研究》，《珠宝科技》2003年第4期。
- [23] 秦善：《结构矿物学》，北京大学出版社，2011年，第21页。
- [24] 沈才卿：《玛瑙化学染色的原理和工艺》，《中国宝石》2006年第3期。
- [25] [英] R. J. 福布斯等著，安忠义译：《西亚、欧洲古代工艺技术研究》，中国人民大学出版社，2008年，第274—278页。
- [26] [美] 薛爱华（Edward H. Schafer）著，吴玉贵译：《撒马尔罕的金桃：唐代舶来品研究》，社会科学文献出版社，2016年，第511—524页。
- [27] 吸附水（hygroscopic water）：以中性的水分子H₂O的形式存在，不参与矿物晶格，而是被机械地吸附于矿物颗粒的表面或缝隙中，因而不属于矿物的固有成分，不写入化学式。吸附水在矿物中含量不固定，随环境温度、湿度等条件而变化。常压下，温

- 度达到110℃, 吸附水基本上全部逸散而不破坏矿物晶格。吸附水可以呈气态、液态或固态存在。秦善、王长秋:《矿物学基础》, 北京大学出版社, 2006年, 第35页。
- [28] 倪建林:《装饰之源:原始装饰艺术研究》, 重庆大学出版社, 2007年, 第213、214页。
- [29] [英] 休·泰特主编, 陈早译:《世界顶级珠宝揭秘:大英博物馆馆藏珠宝》, 云南大学出版社, 2010年, 第52页。
- [30] Horace C. Beck, Etched carnelian beads. *The Antiquaries Journal*, vol.13, issue 1, 1933, p.382-398.
- [31] [英] R. J. 福布斯等著, 安忠义译:《西亚、欧洲古代工艺技术研究》, 中国人民大学出版社, 2008年, 第262页。
- [32] 作铭:《我国出土的蚀花的肉红石髓珠》, 《考古》1974年第6期。
- [33] 位移型相变 (displacive phase transition): 指相变时原相中的化学键无需打破, 只是结构中原子或离子的位置稍有移动, 新相的结构与原相结构有某种畸变关系。秦善:《结构矿物学》, 北京大学出版社, 2011年, 第36页。
- [34] 江辉、李云东:《巴西玛瑙染红色的工艺条件及控制》, 《宝石和宝石学杂志》2002年第1期。
- [35] 冯敏、刘壮、郝少康:《对“鸡骨白”古玉受沁情况的研究》, 《文物保护与科技考古》, 三秦出版社, 2006年, 第104页。
- [36] 风化淋滤阶段: 指在埋藏的微观环境下, 古玉器中的可溶性物质溶解后经扩散、渗流而被带出的过程, 这是一个“失”的过程。冯敏、刘壮、郝少康:《对“鸡骨白”古玉受沁情况的研究》, 《文物保护与科技考古》, 三秦出版社, 2006年, 第104页。
- [37] 渗透胶结阶段: 经历过风化淋滤过程的高古玉的内外结构中有很多微孔隙, 从而导致晶体之间的粘接力逐渐降低, 正因为这些微孔隙的存在, 也向含有Si、Al、Fe元素的胶体溶液提供了渗入的空间与通道。在土壤水的带动下, 土壤中的部分物质逐步渗入到经历了风化淋滤阶段后古玉的大量微孔隙当中, 这是一个“得”的过程。渗透作用是由表及里进行的, 而随之而来的胶结作用则是由内而外进行的。在渗透胶结过程中, 一些未被渗入的内里部位保留着经历风化淋滤过程时留下的大量孔隙, 致使结构疏松。而外层由于渗入了较多的土壤胶体溶液, 这些胶体溶液中富含Si、Al和Fe元素, 从而使古玉器的表层变得相对致密和坚硬, 由此, 受沁的高古玉普遍存在着“外实内松”的现象。冯敏、张敬国、王荣, 等:《凌家滩古玉受沁分析》, 《文物保护与考古科学》2005年第1期。
- [38] 闻广、荆志淳:《福泉山与崧泽玉器地质考古学研究——中国古玉地质考古学研究之二》, 《考古》1993年第7期。
- [39] 闻广:《苏南新石器时代玉器的考古地质学研究》, 《文物》1986年第10期。
- [40] 耿增超、戴伟主编:《土壤学》, 科学出版社, 2018年, 第8、9页。
- [41] 龚子同主编:《中国土壤地理》, 科学出版社, 2014年, 第332、333页。
- [42] 玛瑙中含有少量的水, 按照其赋存状态大致可以分为3类: 1. 孔隙或裂隙中的分子水, 结合度较弱, 低温下 (100℃—200℃) 就可以释放出来; 2. 内表面氢基水, 主要赋存在纤维颗粒边界、晶体缺陷或位错等位置, 结合度较高; 石英晶体内部结构水, 具有特征红外光谱谱峰, 结合度非常牢固。实际情况下, 不同类型分子水和结构水往往以不同比例同时共存。陶明、徐海军:《玛瑙的结构、水含量和成因机制》, 《岩石矿物学杂志》2016年第2期。
- [43] 晶体的相变 (phase transition) 指的是在化学组成不变的情况下, 由于温度、压力以及其他化学或物理因素的影响, 使得晶体结构或者其宏观物理化学性质发生改变的现象。秦善:《结构矿物学》, 北京大学出版社, 2011年, 第35、36页。
- [44] 裂理面 (parting plane): 裂理也称裂开, 是指矿物在外力作用下, 可以一定的结晶方向裂开成平面的性质, 裂开的平面叫裂理面。秦善、王长秋:《矿物学基础》, 北京大学出版社, 2006年, 第27页。
- [45] 人们常说的包浆分为两种: 1. 包裹于出土古玉器的周身的一层有厚度的、亮润晶莹的表层, 其来源于壤液中Si、Al和Fe等元素填充、胶结于古玉器表层后形成的光泽感; 2. 传世老物件上的一层经长年累月摩挲把玩或人体与物件之间经久摩擦而逐渐生成的一层莹亮的表层。本文所讨论的是前者。
- [46] 陶明、徐海军:《玛瑙的结构、水含量和成因机制》, 《岩石矿物学杂志》2016年第2期。
- [47] 陶明、徐海军:《玛瑙的结构、水含量和成因机制》, 《岩石矿物学杂志》2016年第2期。