

测温方法和技术解释 ——烧成温度的复杂性及其考古学意义

张云逸

中山大学历史学系, 广州 510275

摘要 陶器、烧土等考古受热材料与古代先民的诸多活动相关。研究不同类型考古材料的热历史, 有助于识别黏土材料的成因和古代烧制技术的发展, 以及研究与之相关的人类活动。目前, 烧成温度这一参数被广泛用于指征考古材料热历史。然而, 考古材料热历史受保温时间、加热速率等多个变量控制。近年来, 单一的烧成温度研究由于精确测温方法的局限性、受热过程的多维性以及技术解释的复杂性备受质疑。本文在综述测温方法和相关实验考古学研究的基础上, 深入讨论烧成温度的复杂性, 并探索考古材料热历史研究的潜在方法。

关键词 等效烧成温度; 考古材料热历史; 技术复杂性; 考古学解释

1 引言

古人类用火遗迹、陶瓷器、烧土和砖等考古材料的热历史研究是解读古代技术和相关社会实践的关键。一直以来, 烧成温度 (firing temperature) 这一概念被广泛用于指征考古材料热历史, 烧成温度的含义因黏土材料的不同而异, 其是黏土材料历史最高受热温度 (用火遗迹、沉积物经热温度等), 也是生坯在过烧与烧结之间的一个温度范围 (陶瓷器的正烧温度等)。研究受热沉积物等材料的受热温度, 有助于我们探讨其成因, 并解读与之相关的人类活动^[1,2]; 对石器、陶瓷器、烧土、砖等人工制品的烧制温度进行研究, 可以帮助我们深入理解其制作工艺, 从而获取古代社会发展的诸多信息^[3-9]。目前, 学界已经开发并完善了多种黏土材料测温方法, 但回顾测温方法研究史, 即便是发展半个多世纪的热膨胀法, 在测定各类考古材料烧成温度过程中仍存在一定的局限性^[10,11], 精确测定考古材料的烧成温度仍面临挑战。

此外, 科技手段测定的烧成温度是与历史最高受热温度或正烧温度不同的等效烧成温度 (equivalent firing temperature)^[12], 即通过实验室某一恒定烧制温度在某固定时间烧制出的样品的烧制程度将等效于样品原始烧成过程带来的烧制程度。等效烧成温度只是对受热黏土材料所受热量的一种等效度量, 考古材料热历史具有多个维度 (烧成温度、

收稿日期: 2025-03-26; 接受日期: 2025-05-06

作者简介: 张云逸, 博士研究生, 主要从事科技考古学研究。E-mail: yunyi1@mail.ustc.edu.cn

保温时间、气氛、加热速率等), 单一的烧成温度测定值能否用于衡量受热材料的热历史也引起了较多的争议和讨论^[13,14]。

再者是实验室中测定的烧成温度值究竟能做何考古学解释, 针对古人类用火痕迹等材料, 只需判断其是否为人类控制用火即可^[1,2]。然而, 在复杂化社会阶段, 技术进化和技术选择受多种因素影响, 单纯判断黏土材料是否受热难以满足技术解释的需要, 烧成温度的代表性也因此引起了学者们的怀疑^[14,15]。

上述测温技术的局限性、多维度的受热历史和技术解释的复杂性是当前烧成温度研究的主要问题, 本文将从这三方面展开, 评述当下的考古材料烧成温度研究, 以期探索考古材料热历史研究的更多可能性。

2 测温技术的复杂性

目前, 针对陶瓷器、烧土等考古黏土材料的热历史研究仍聚焦于烧成温度这一种变量, 原因主要是保温时间、升温速率等变量至今难以通过科技手段精确测定^[16]。在已有的测温方法研究中, 热膨胀法、X射线衍射(XRD)等矿物学方法最为常用。热膨胀法作为考古陶瓷样品等黏土制品的常规测温手段, 广泛应用于古代陶瓷器制作工艺研究; 矿物学方法因其高效、快捷, 也常作为温度判断的辅助性方法。近年来, 磁化率测温、释光测温、红外光谱测温等方法不断发展与进步, 在测温研究领域也引起了较多关注。

2.1 热膨胀法

热膨胀法是在程序控温和一定气氛下, 测量试样长度(或体积)随温度或时间变化的一种热机械分析技术^[17], 其用于测定黏土材料烧成温度主要基于这一假设: 黏土制品在烧制过程中会因黏土颗粒的凝聚而收缩, 黏土制品在烧成后, 低于其原始烧成温度的烧制不会使其发生不可逆的收缩, 样品只会出现可逆的受热膨胀, 但是当烧制温度超过其原始烧成温度时, 样品会继续烧结, 从而在正常的可逆受热膨胀的基础上产生不可逆的收缩(或膨胀), 在热膨胀曲线上表现为一个明显的拐点, 对应的温度即样品原始烧成温度估计值。热膨胀法是一种破坏性分析方法, 自20世纪50年代首次应用于考古学领域以来^[18], 至今已在学界得到了较为广泛的认同, 已经成为已玻璃化陶器和瓷器测温的常用方法, 广泛应用于各种陶瓷研究。1969年, Tite对热膨胀法进行了深入研究, 并将其应用于古代陶器测温, 证明了当陶器烧制温度低于玻璃化温度时, 热膨胀测温的结果反映的是黏土玻璃化进程开始的温度, 而非历史烧成温度^[12]。此后, 中国科学院大学科技考古团队建立并完善了多次重烧热膨胀法, 通过多次重烧热膨胀曲线的斜率变化来判定低温烧制的史前陶器的烧成温度^[19,20], 但这一方法对测试条件要求较高, 且一些低温烧成的样品往往较为疏松, 难以满足热膨胀法的制样要求, 该方法在考古学中的应用尚少。近年, 童永东等发现热膨胀测温实验过程中升温速率、判断曲线选择等多种因素均

会对实验结果造成影响,并尝试建立相对科学的测试标准^[21]。也有学者从材料科学的角度对用此方法测温提出了怀疑,直言此方法缺乏理论基础、没有统一的标准且结果不可重复^[16]。此外,常规热膨胀法的测温下限(高、低温黏土制品的界限)还有待科学的界定,部分学者此前以870℃或800℃为界^[21-23],但1969年Tite提出的870℃的玻璃化温度为Farnley耐火黏土的烧结温度^[12],黏土玻璃化温度实际上取决于原料中的助溶剂含量,一般开始于700℃—950℃这一区间^[24],以往发表的大量热膨胀测温数据,尤其是陶器、砖和一些烧土样品,烧成温度测定值集中于这一区间,其科学性有待探讨。最近,李卓朋等在应用热膨胀法进行瓷器测温研究过程中发现,当瓷器胎体接近完全玻璃化时,热膨胀法测定的烧成温度明显偏高,已有的高温瓷器热膨胀测温数据可能存在错误估计,古代窑炉温度可能存在高估的情况^[10]。从目前积累的研究看,常规热膨胀法的测温适用范围可能在黏土玻璃化开始温度到玻璃化接近完成温度这一较窄的范围内,加之测温方法本身可能存在约100℃的偏差^[10,21],因此还需对其进行进一步的适用性研究,以评估其能否作为一个精确测温的指标。

2.2 矿物学研究方法

目前常用的矿物学鉴定方法有X射线衍射、岩相分析、拉曼光谱分析和红外光谱分析方法。通过不同手段(X射线衍射、红外光谱分析、拉曼光谱分析方法)已能实现无损原位分析,无需对样品进行破坏)鉴定样品的矿物组成,根据不同的矿物组成可有效估算样品烧成温度的大致范围。研究发现,石英、钠长石、钾长石等矿物在1100℃的高温下也很稳定,不能提供有关烧成温度的信息;此外,绿泥石、高岭石、白云母等矿物的分解,莫来石等高温硅酸盐矿物的形成以及其他具有特定生成温度范围和分解温度范围的矿物均能为样品烧成温度判断提供有效的参考^[25-28]。然而,矿物学分析方法的测温精度较低,因为黏土中大部分矿物能在较大的温度区间(高达几百摄氏度)保持稳定,无法作为单独的烧成温度指标^[27]。更为精确的变温原位X射线衍射分析(situ HTXRD)^[29]等方法同样也受制于此。作为一种相对而言精度较低的烧成温度测定方法,矿物学分析方法常常与其他测温方法联用^[30,31],或通过多种矿物学分析方法联用以相互验证^[32]。

此外,基于矿物学研究的其他方法,如近年来广泛应用于陶器、砖、沉积物和烧土材料测温的磁化率法^[33-37],也受制于矿物的复杂变化。其是通过检测实验室重烧过程中样品的磁性变化来确定历史最高受热温度。然而,烧制过程中不同磁性矿物类型与粒径的复杂变化所导致的磁性抵消,以及某些温度区间内磁性矿物的热稳定性,使其并非总能准确指示考古样品的烧成温度。近年来相继出现了高温样品的低估^[38]和低温样品的高估^[37](误差高达几百摄氏度)案例,实际测温结果为磁性矿物的转化温度而非样品历史受热温度。

2.3 释光测温及红外光谱测温

释光测温是根据考古样品中石英颗粒的释光信号性质建立起来的测温方法,其是基于释光特征峰的灵敏度、峰型等释光信号的受热性质变化来判断样品的历史经热温度。目前,释光测温研究相对较少,吴又进等通过天然石英样品的释光性质模拟实验研究发现了不同退火温度下石英的释光信号变化规律,并将其应用于青铜鼎足中的泥质盲芯、青铜器中的流质砂芯、陶范等样品的经热历史研究^[39-41]。释光测温方法可有效判断低温烧制的考古样品的经热温度(根据目前的研究,测温分辨率约为100℃),但此方法需对样品进行化学处理以提纯石英,前处理和测试过程相对复杂,且高温样品的释光性质和测温适用性还有待研究。

红外光谱在测温方面的应用,除上述通过矿物鉴定来估算烧成温度外,还能够通过不同温度下吸收峰位置的变化来实现精确测温^[42]。严弼宸等依据不同温度下黏土矿物在谱图上的吸光度比值变化构建了一种红外光谱测温新方法,并将其应用于陶范等黏土制品的测温研究^[43]。严弼宸等证明了这一方法是测定陶范这类黏土制品烧成温度的有效方法,但最近刘耐冬等在使用红外光谱测定侯马白店铸铜遗址出土陶范样品的烧成温度时,发现严弼宸等开发的红外测温方法不适用于侯马样品,通过模拟实验又发现了新的吸收峰位置和比值变化规律,提出了新的判定方法。从目前的研究看,红外光谱法的测温上限在黏土玻璃化温度以下,测温分辨率约为100℃,且已有的红外精确测温方法可能不具备普适性,在应用此方法测温前可能需对考古样品同源未受热土进行适用性研究以验证测温结果的科学性。

3 受热过程的复杂性

上述考古材料烧成温度方法研究简史从方法层面阐明了精确测定烧成温度的复杂性及目前存在的局限性,但从烧制过程本身出发探讨精确测定考古样品烧成温度的可能性,以及科学认识影响黏土原料烧结的其他变量的作用,是解读考古学问题的关键所在。

实验考古学和民族考古学研究证明了烧制技术的复杂性。Gosselain评估了模拟实验烧制过程中火场不同位置的最高温度值差异,结果表明火场中不同位置最高温度差异均值达到了300℃,同一器物内外温度亦有差距^[44];Smith等的民族考古学调查研究更显示出在同样烧制条件下(甚至同一位陶工)的多次烧制也表现出了较大差距^[45];此后,Maggetti等的实验考古学研究也表明,实验测定的等效烧成温度与烧制过程中监测到的烧制温度差距较大,烧制过程中的矿物反应不仅受烧成温度影响,而且受加热速率、保温时间和矿物粒径影响^[46]。上述研究表明,同一次烧制过程中火场中的不同位置(火场中心与边缘)、烧制物品的不同位置(物品内外与上下)、不同的烧制事件(不同的烧制者甚至同一位烧制者)均为烧成温度的测定结果带来了不确定性和多解性。此外,很多黏

土制品还会采用加热到峰值温度立即冷却的方式烧制^[12],一部分平地堆烧结构,中途不能加薪^[47],导致了其在最高温度下保温时间较短。即使是窑烧,峰值温度的持续时间也不会很长^[48],所以黏土制品的烧结往往是在低于峰值温度下完成的。因此,单一的烧成温度参数可能难以代表考古材料的复杂受热历史。

4 烧成温度数据的技术解释

除了测温技术和受热历史的复杂性,烧成温度还面临着技术解释的难题,即烧成温度的考古学意义。在古代手工业考古研究中,学界对于烧成温度研究的一种“常识”是更高烧成温度(所指示的窑烧)代表了技术进步,但陶瓷器技术组织和生产组织的演变并非遵循单一的进化论逻辑^[15]。首先,从低温到高温或从无窑烧制到有窑烧制的技术变化标志着烧制技术的重大进步,然而其并非一种普遍规律,简单地把从低温到高温、从无窑向有窑的转变视作社会的进步可能会忽略其中的人类选择,甚至对社会发展产生错误的认识。如无窑烧制包括平地堆烧、有覆盖物的平地堆烧、坑穴堆烧、一次性薄壳窑等多种形式^[45],这些不同的烧制形式更多地来源于先民的技术选择,这也是至今世界范围内仍有较多地区制陶业采用无窑烧制的原因^[15]。其次,在考古发掘尚未发现陶窑前,烧成温度这一单独的参数难以评估史前陶器、烧土等黏土材料的烧制结构,这是因为不同的烧制结构(平地堆烧、一次性薄壳窑、多种固定窑炉等)并不能产生足以区分的热特性(主要是温度)^[44,45]。在实际情境中,烧成温度这一单一参数难以准确再现黏土材料的热历史,并可能导致对古代人类活动或烧制技术的误判。

5 结论

上述测温技术、受热过程和技术解释即烧成温度复杂性的三个维度,烧成温度这一参数的考古学意义也因此存在一些争议,但不可否认,烧成温度仍然可以为研究古代社会的生产力水平、大的时间和空间尺度下黏土制品烧制工艺的发展变化等提供参考。

对于烧成温度这一变量的继续研究,在继续探索模拟或特定样品测温结论普适性和多方法测温研究之外,或可将其置于黏土材料原料采集、制作操作链中进行技术解释,进行情境式研究,用选料、加工研究过程中成分、物相等分析的确定性弥补温度分析的不确定性和复杂性,探索等效烧成温度考古学解释的多元路径。

对于热历史的其他变量,一些矿物学研究可能为此提供了思路,此前已有学者研究了莫来石、方解石等矿物行为与保温时间、加热速率和多次受热等热特性的关系^[11,49-51]。未来研究的趋势是多维度的热历史,可结合实验考古学研究,开展不同类型窑炉的烧制实验,研究温度、时间等不同变量的变化规律,为考古样品热历史研究提供理论支持。

此外,热膨胀法等测温方法对研究古代黏土材料的物理性质有着重要作用,如开展

热循环测试研究黏土制品经热性能,但目前考古学界对测温以外的热分析研究关注甚少。烧成温度测定值作为一个数字或范围,在样本量足够时同样具有统计学意义,如用于衡量标准化程度,可为研究古代手工业技术组织和生产组织提供辅助等。

参考文献

- [1] 刘武,武仙竹,李宜垠,等.湖北郧西黄龙洞古人类用火证据[J].科学通报,2008,53(24):3096–3103.
- [2] 张岩,郭正堂,邓成龙,等.周口店第1地点用火的磁化率和色度证据[J].科学通报,2014,59(8):679–686.
- [3] 周振宇,关莹,高星.旧石器时代石制品热处理研究:回顾与展望[J].人类学学报,2013,32(1):19–30.
- [4] 李乃胜,张敬国,毛振伟,等.我国最早的陶质建材——凌家滩“红陶块”[J].建筑材料学报,2004,7(2):127–132.
- [5] 李乃胜,王吉怀,毛振伟,等.安徽蒙城县尉迟寺遗址红烧土排房建筑工艺的初步研究[J].考古,2005(10):76–82.
- [6] 李文杰.大溪文化红烧土房屋研究[J].中国国家博物馆馆刊,2012(6):6–14.
- [7] 李雨.仰韶时期房屋遗存中的烧土现象分析[D].西安:西北大学,2018.
- [8] 申佳妮,张中俭.基于磁化率测量平遥古城古砖的烧制温度[J].文物保护与考古科学,2020,32(5):81–85.
- [9] 周理坤,王涛,李珺,等.南庄头遗址早期陶器烧成温度研究[J].岩矿测试,2010,29(2):148–152.
- [10] LI Z P, HU X, JIANG X C Y, et al. Determination and interpretation of firing temperature in ancient porcelain utilizing thermal expansion analysis[J]. Heritage Science, 2024, 12.
- [11] LI Z P, HU X, LI L H, et al. Reconstructing the firing process of pottery from Dangxiong Cemetery, Tibet, China: estimating soaking time through XRD and thermal expansion analyses[J]. Journal of Cultural Heritage, 2024, 70: 157–162.
- [12] TITE M S. Determination of the firing temperature of ancient ceramics by measurement of thermal expansion: a reassessment[J]. Archaeometry, 1969, 11(1): 131–143.
- [13] TITE M S. Ceramic production, provenance and use—a review[J]. Archaeometry, 2008, 50(2): 216–231.
- [14] FREREBEAU N, PERNOT M. Dans la chaleur des fours: que restituer des pratiques des céramistes des sociétés anciennes? [J]. ArchéoSciences, 2018, 42(2): 95–105.
- [15] 郭梦.多样的陶器烧制技术:选择还是进化[J].考古,2016(3):74–85.
- [16] DREBUSHCHAK V A, MYLNIKOVA L N, DREBUSHCHAK T N. Thermoanalytical investigations of ancient ceramics[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 133: 135–176.
- [17] 丁延伟.热分析基础[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2020.
- [18] ROBERTS J P. Determination of the firing temperature of ancient ceramics by measurement of thermal expansion[J]. Archaeometry, 1963, 6(1): 21–25.
- [19] 张怡.测定低温陶器烧成温度方法研究[D].北京:中国科学院大学,2011.
- [20] ZHU J, ZHANG Y, WANG T, et al. Determining the firing temperature of low-fired ancient pottery: an example from the Donghulin site, Beijing, China[J]. Archaeometry, 2014, 56(4): 562–572.
- [21] 童永东.热膨胀法陶瓷测温多因素分析及在广西古陶瓷中的应用研究[D].南宁:广西民族大学,2018.
- [22] 李迎华,王昌燧,郑克祥.古代陶器测温的模拟实验研究[J].陶瓷学报,2012,33(2):215–221.
- [23] 鲁晓珂,徐嫦松,李伟东.顶杆热膨胀法测定古陶瓷烧成温度的应用研究[J].文物保护与考古科学,2020,32(5):70–80.
- [24] 张怡,朱剑,王涛,等.低温陶器的烧成温度测定及其初步应用[J].南方文物,2012(1):140–146.
- [25] PISKAREVA M P, RYANSKAYA A D, KISELEVA D V, et al. Determination of the firing temperature and redox atmosphere of the pottery from the Bronze Age settlement Kamenny Ambar by X-ray diffraction phase analysis[C]//VOLKOVICH V A, ZVONAREV S V, KASHIN I V, et al. Physics, technologies and

- innovation (PTI-2019): proceedings of the VI International Young Researchers' Conference. Ekaterinburg: AIP Publishing, 2019.
- [26] CHAPAGAIN Y P, SAPKOTA S, GHALE D B, et al. A case study on mineralogy and physico-mechanical properties of commercial bricks produced in Nepal[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(11).
- [27] GLIOZZO E. Ceramic technology. How to reconstruct the firing process[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2020, 12(11).
- [28] TARHAN İ, IŞIK İ. An in-depth chemometric study: archaeometric characterization of ceramic shards excavated from the sanctuary of Hecate at Lagina in Muğla (Turkey) by FTIR spectroscopy and multivariate data analysis[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2020, 111.
- [29] MIRAS A, GALÁN E, GONZÁLEZ I, et al. Mineralogical evolution of ceramic clays during heating. An ex/in situ X-ray diffraction method comparison study[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 161: 176–183.
- [30] SINGH M R, GANARAJ K, SHARMA V M. Microbial activity and studies on excavated megalithic micaceous potsherds from Peninsular India[J]. *Cerâmica*, 2021, 67(382): 250–260.
- [31] BAYAZIT M, IŞIK İ, KOZBE G, et al. Investigation of a diagnostic group of Bronze Age pottery (Dark Rimmed Orange Bowl ware) from the upper Tigris Valley, Turkey[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2021, 50(5): 436–453.
- [32] AKYUZ S, AKYUZ T, BASARAN S, et al. Analysis of ancient potteries using FT-IR, micro-Raman and EDXRF spectrometry[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2008, 48(2): 276–280.
- [33] RASMUSSEN K L, DE LA FUENTE G A, BOND A D, et al. Pottery firing temperatures: a new method for determining the firing temperature of ceramics and burnt clay[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39(6): 1705–1716.
- [34] FERRARA E, TEMA E, BEATRICE C. Estimating the equivalent firing temperature of ancient baked clay artifacts through magnetic measurements[C]//IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage. Torino: IMEKO. 2016: 265–269.
- [35] GOODWIN W A, HOLLENBACK K L. Assessing techniques for the estimation of original firing temperatures of Plains ceramics: experimental and archaeological results[J]. *Ethnoarchaeology*, 2016, 8(2): 180–204.
- [36] JORDANOVA N, JORDANOVA D, KOSTADINOVA-AVRAMOVA M, et al. A mineral magnetic approach to determine paleo-firing temperatures in the Neolithic settlement site of Mursalevo-Deveboaz (SW Bulgaria)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(4): 2522–2538.
- [37] TEMA E, FERRARA E. Magnetic measurements as indicator of the equivalent firing temperature of ancient baked clays: new results, limits and cautions[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2019, 35: 64–75.
- [38] KOSTADINOVA-AVRAMOVA M, JORDANOVA N, JORDANOVA D, et al. Firing temperatures of ceramics from Bulgaria determined by rock-magnetic studies[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2018, 17: 617–633.
- [39] JIN Z Y, WU Y J, LI G, et al. Luminescence determination of firing temperature of archaeological pure sand related to ancient Dian bronze casting, China[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 387–393.
- [40] WU Y J, JIN Z Y, FAN A C, et al. Firing temperature of a clay core sample in a bronze tripod from Daxinzhuan site in China using TL techniques[J]. *Geochronometria*, 2013, 40: 317–321.
- [41] JIN Z Y, WU Y J, FAN A C, et al. Luminescence study of the initial, pre-casting firing temperatures of clay mould and core used for bronze casting at Yinxu (13c. BC~11c. BC)[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 374–380.
- [42] SHOVAL S, BECK P. Thermo-FTIR spectroscopy analysis as a method of characterizing ancient ceramic technology[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005, 82: 609–616.
- [43] YAN B C, LIU S R, CHASTAIN M L, et al. A new FTIR method for estimating the firing temperature of ceramic bronze-casting moulds from early China[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11.
- [44] GOSSELAIN O P. Bonfire of the enquiries. Pottery firing temperatures in archaeology: what for?[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1992, 19(3): 243–259.

- [45] LIVINGSTONE SMITH A. Bonfire II: the return of pottery firing temperatures[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28(9): 991–1003.
- [46] MAGGETTI M, NEURURER C, RAMSEYER D. Temperature evolution inside a pot during experimental surface (bonfire) firing[J]. *Applied Clay Science*, 2011, 53(3): 500–508.
- [47] 秦小丽, 琚香宁. 平地堆烧与长江下游地区的陶器烧制技术——对浙江昆山、小兜里和新地里遗址相关遗迹的分析[J]. *故宫博物院院刊*, 2021(6): 44–57.
- [48] 杨剑, 霍耀, 郭梦. 宁夏隆德周家嘴头遗址制陶模拟实验[J]. *中原文物*, 2022(3): 49–57.
- [49] CASTELEIN O, SOULESTIN B, BONNET J P, et al. The influence of heating rate on the thermal behaviour and mullite formation from a kaolin raw material[J]. *Ceramics International*, 2001, 27(5): 517–522.
- [50] REGEV L, PODUSKA K M, ADDADI L, et al. Distinguishing between calcites formed by different mechanisms using infrared spectrometry: archaeological applications[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37(12): 3022–3029.
- [51] WEINER S, NAGORSKY A, TAXEL I, et al. High temperature pyrotechnology: a macro- and microarchaeology study of a late Byzantine-beginning of Early Islamic period (7th century CE) pottery kiln from Tel Qatra/Gedera, Israel[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2020, 31.

Temperature measurement methods and technical interpretation: the complexity and archaeological significance of firing temperature

ZHANG Yunyi

Department of History, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

Abstract Archaeological heated materials, such as pottery and burnt clay, are associated with many activities among ancient populations. Studying the thermal history of different types of archaeological materials can help identify the reasons for the formation of clay materials and the development of ancient firing techniques, as well as investigate human activities related to them. Currently, the firing temperature is widely used as an indicator of the thermal history of archaeological materials. However, the thermal history of archaeological materials is influenced by multiple variables, such as soaking time and heating rate. The study of firing temperature has been the subject of debate in recent years due to the limitations of precise temperature measurement methods, the multidimensionality of the thermal history, and the complexity of technical explanations. Based on a review of temperature measurement methods and related experimental archaeology research, this paper discusses the complexity of firing temperature and explores potential methods for studying the thermal history of archaeological materials.

Keywords equivalent firing temperature; thermal history; technological complexity; archaeological interpretation