

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2022.06.004

瓷砖的残余应力与表征研究进展

谢悦增¹, 饶德林², 林克辉¹, 张瑞尧², 张书彦²

(1. 马可波罗控股股份有限公司, 广东 东莞 523000; 2. 东莞材料基因高等理工研究院, 广东 东莞 523808)

摘要: 瓷砖在制造过程中因温度不均匀, 或者材料不均匀(釉和本体)等会产生残余应力。近年来, 随着大尺寸瓷砖板的迅猛发展, 残余应力对其质量的影响受到较多关注。就此相关问题进行详细的分析和研讨, 介绍了瓷砖残余应力产生的原因和国内外在瓷砖应力测量方面的主要方法, 详细介绍了裂纹柔度法和三点弯曲法在测量瓷砖残余应力上的应用, 也介绍了作者在运用高速钻孔法进行大瓷砖残余应力检测方面的实践, 这些研究的开展将为改进瓷砖制造工艺, 生产高品质大尺寸瓷砖提供保障。

关键词: 瓷砖; 残余应力; X 射线衍射法; 裂纹柔度法; 钻孔法

中图分类号: TQ174.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2022)06-0987-07

Research Progress in Residual Stress and Characterization of Porcelain Tiles

XIE Yuezheng¹, RAO Delin², LIN Kehui¹, ZHANG Ruiyao², ZHANG Shuyan²

(1. MarcoPolo Holdings Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China; 2. Centre of Excellence for Advanced Materials, CEAM, Dongguan 523808, Guangdong, China)

Abstract: During the manufacturing process of porcelain tiles, residual stress is generated due to non-uniform temperature or non-uniform material (glaze and body). In recent years, with the rapid development of large size porcelain tiles, the influence of residual stress on their quality has attracted much attention. Though detailed analysis and discussion, the causes of porcelain tile residual stress and the main measurement methods are introduced, including the crack compliance method and the three-point bending method. The authors' work, high-speed hole-drilling method to measure the residual stress of large size porcelain tiles, is also introduced. The studies will provide a guarantee to improve the porcelain tile manufacturing process and produce high-quality large size porcelain tiles.

Key words: porcelain tile; residual stress; X-ray diffraction; crack compliance method; hole-drilling method

0 引言

瓷砖是由黏土、石英砂、长石等原料混合加工而形成的建筑材料。瓷砖的加工包含配料、干燥、施釉、印花和烧制等一系列复杂的工艺。其中, 烧制是最重要的工艺之一, 烧制的温度及热处理制度等因素对瓷砖的质量有重要影响。早期瓷砖的尺寸都较小, 烧制过程中温度的不均匀性

表现得不明显, 因此, 对其内应力(残余应力)的关注比较少。近年来, 大尺寸瓷砖板(又称大岩板)在国内外得到迅猛的发展, 与普通小瓷砖相比, 大岩板具有更好的耐高低温性能, 更好的耐酸碱、耐磨刮、耐撞击性能, 它还可与食物接触, 可 100% 回收, 符合当今装修零污染的要求。

由于大岩板的尺寸大, 且在制造过程中, 烧结温度的不均匀, 成品中可能会产生较高的残余

收稿日期: 2022-05-13。

修订日期: 2022-08-12。

基金项目: 广东省基础与应用基础研究重大项目(2019 B030302-011); 广东省引进创新创业团队项目(2016ZT06G025)。

通信联系人: 饶德林(1965-), 男, 博士, 副研究员;
张书彦(1982-), 女, 博士, 研究员。

Received date: 2022-05-13.

Revised date: 2022-08-12.

Correspondent author: RAO Delin (1965-), Male, Ph.D., Associate researcher; ZHANG Shuyan (1982-), Female, Ph.D., Researcher.

E-mail: delin.rao@ceamat.com

应力。随着大尺寸瓷砖板的畅销,与之相关的力学性能检测、评价和工艺优化问题也逐渐显现,这些问题或多或少地与其残余应力有关联。大瓷砖在进入最终使用环节时,经常要进行切割,而大瓷砖在切割时会出现异常开裂的情况,导致整块瓷砖板的报废;同时,大瓷砖在烧制完成一定时间后,会发生变形,称为延迟弯曲,大尺寸瓷砖生产和使用过程中出现的这些问题成为瓷砖研究工作者关注的重点。

我国已经成为瓷砖生产大国,尤其是大尺寸瓷砖板的产量更是超过世界半数。据统计,截至2020年底,中国具备生产1200 mm×2400 mm及以上规格的大尺寸瓷砖板生产线达到68条,接近世界的一半,超过了意大利、西班牙、印度的总和(62条)。但瓷砖的制备技术与意大利、西班牙等国家还有不小的差距。Sánchez等^[1]在总结瓷砖研究三十年的历史时指出,在优化瓷砖制造工艺、生产高质量瓷砖产品的过程中,残余应力的表征和分析是一个关键因素。瓷砖的残余应力对其力学性能和质量的影响虽然已是共识,但国内相关的研究较少。本文介绍了国内外在瓷砖残余应力测量和表征方面的研究工作,包括高速钻孔法在瓷砖残余应力测量方面的首次尝试,旨在抛砖引玉,推动相关研究在国内的开展,为国内瓷砖行业的技术进步建言。

1 瓷砖残余应力的产生

与普通陶瓷一样,瓷砖的生产也需要经过高温烧制过程。但与普通陶瓷动辄十几个小时,甚至几十个小时的烧制时间不同,工业化生产的瓷砖烧制时间要短很多,通常只需要40 min~80 min,烧制的温度大约是1200℃,图1为典型瓷砖的烧制温度随时间的变化的烧制循环曲线。

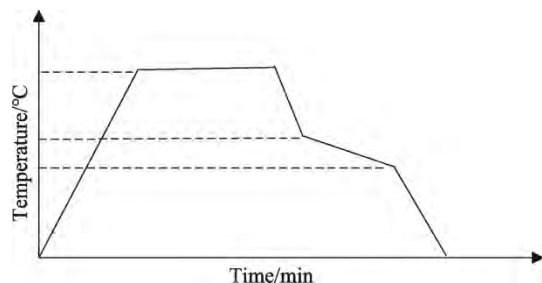


图1 一个典型的瓷砖连续烧制循环曲线示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a typical sintering cycle in kilns for porcelain tiles

热应力是烧制瓷砖产生残余应力的主要原因之一,由于短时间内较快的温度变化,导致瓷砖产生热应力。在瓷砖的冷却过程中,由于瓷砖材料的热导率较低,导致瓷砖表面和内部有较大的温度差。表面首先降温变硬、收缩,而内部还保持较高的温度,由于热导率低,内部甚至呈熔融态。随着冷却持续,内部也开始收缩,但内部的收缩受到表面先冷却材料的阻碍,导致表面呈现压应力状态,而内部有拉应力与之平衡,最终残余应力呈现外表面压应力、内部拉应力的状态,应力的分布与其温度梯度、冷却速率和瓷砖材料热性能参数有关。Sánchez等^[2]研究了不同冷却速率对残余应力分布的影响,如图2所示,C1和C2的冷却速率分别为0.7℃·s⁻¹和9.0℃·s⁻¹,可以看到C2的残余应力明显高于C1。

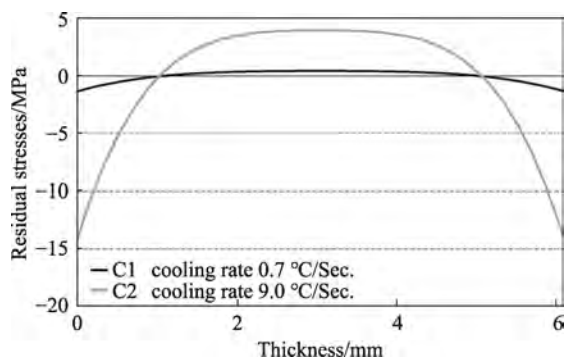


图2 不同冷却速率下瓷砖的残余应力分布^[2]
Fig. 2 Residual stress distribution of porcelain tiles at different cooling rates^[2]

相变是瓷砖产生残余应力的第二个原因。瓷砖的主要原料之一是石英,石英晶体在573℃的时候会发生晶相转变,同时伴随着体积的变化。具体而言,在瓷砖坯体由熔融态冷却至573℃时,由β石英转变为α石英,前者是斜六面体结构,后者是正六面体结构,结构转变的同时伴随着大约0.82%的体积膨胀,产生相变应力,严重时会导致瓷砖的高温破裂。因此,通常瓷砖在650℃~500℃的冷却过程中设置较慢的冷却速率,见图2,以便降低由相变应力导致开裂的风险。

瓷砖产品通常都有一釉层,釉层与瓷砖基体材料具有不同的成分,性能也有差别,不同的热膨胀系数会导致在冷却过程中有不同的收缩速率,使得瓷砖的表面产生残余应力,这是瓷砖产生残余应力的第三个原因。

当然,还有其他的一些原因也会影响到瓷砖

残余应力大小和分布。例如: 一些特殊的瓷砖, 在烧制过程中或烧制完成后, 会进行磨削抛光, 或者压制成型等工艺, 这些机械加工应力与热应力等叠加, 对瓷砖的最终应力产生影响。

2 瓷砖残余应力的表征

2.1 X 射线衍射法

X 射线衍射法是晶体结构材料残余应力检测的常用方法之一。它是基于 X 射线照射金属晶格时会发生衍射的原理, 当存在应力时, 晶格的常数发生变化, 从而影响衍射峰的角度, 测量衍射角的变化并借助布拉格公式, 可以确定出晶体的应变, 从而算出构件的应力。此方法最早在 1929 年提出, 之后成功研制出 X 射线应力测量仪。早期的 X 射线衍射法操作复杂, 直到 1961 年, 出现了 X 射线应力测定的 $\sin^2\psi$ 法, 主要用于二维残余应力的测量, 测试程序变得简单易行。

材料中的残余应力包括三类, 第一类是宏观残余应力, 影响材料的力学性能。第二类残余应力作用在晶粒之间, 第三类作用在原子尺度, 第二、第三类残余应力属于微观残余应力。在陶瓷的残余应力 X 射线检测方面, 国内外的检测大多是针对金属基陶瓷, 由于这类陶瓷多数为单一相的晶体结构, 国内外采用衍射方法测量残余应力的实例非常丰富。Eigenmann 等^[3]详细介绍了金属和金属陶瓷复合材料中三种类型残余应力的关系, 指出在不同相中的第二类残余应力不同, 多相陶瓷材料的残余应力可以用简单混合定律 (Simple mixture rule) 方法计算残余应力, 而常见的瓷砖配方体系为 K_2O 、 $Na_2O-Al_2O_3$ 、 SiO_2 三元系统, 经高温烧结最终结构是包含晶相、玻璃相和气相的多相组织, 非晶体相占比较大, 因此, 常见的以衍射技术为特点的 X 射线检测, 中子检测在瓷砖的 I 类宏观残余应力检测中受到很大限制。De Noni 等^[4]利用 Cu 靶的 $K_{\alpha 1}$ 、 $K_{\alpha 2}$ 射线测量了瓷砖中石英晶粒的微观残余应力, 研究了不同相的成分对石英微观残余应力的影响, 见图 3, 图中三角形的三个顶点分别代表三元相成分 (M + KG 是莫来石和高岭土, Q 是石英, A+AG 是钠长石), 实心圆点代表瓷砖实际成分, 等高线表示随成分变化的应力值。

采用 X 射线衍射法测量的瓷砖中石英晶粒的残余应力反映的是石英晶粒与基体界面的作用力, 这种残余应力属于第二类微观残余应力, 而

通常表征材料所需要的是宏观残余应力。瓷砖的宏观强度一般小于 100 MPa, 上述 X 射线衍射法测量结果显示石英晶粒微观残余应力的大约是 200 MPa ~ 300 MPa, 这显示瓷砖中石英晶粒的微观残余应力与瓷砖总体的宏观残余应力有较大的区别。闻万梁^[5]在研究瓷砖切割开裂与残余应力关系时也指出, 影响瓷砖切割裂的应力是宏观应力, 与微观应力并无绝对关系, 通过 X 射线衍射仪分析得到的微观残余应力不能实际解决瓷砖切割性能判定问题。

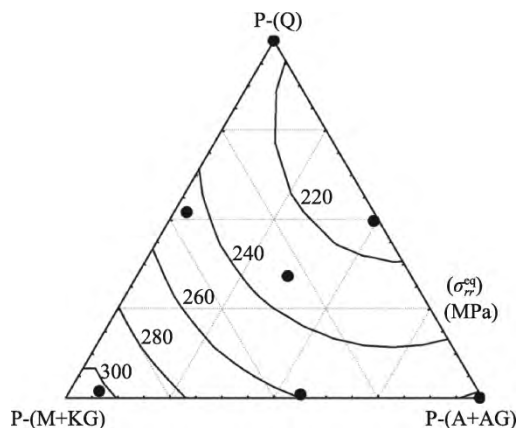


图 3 瓷砖石英颗粒微观残余应力与相成分关系^[4]

Fig. 3 Micro residual stress on quartz grains as a function of composition of porcelain tiles^[4]

2.2 裂纹柔度法

裂纹柔度法 (Crack compliance method) 又叫切割法 (Slitting method), 或开槽法 (Slotting method), 该残余应力测量技术 1971 年创立, 经过多年的发展, 其技术已经比较成熟。

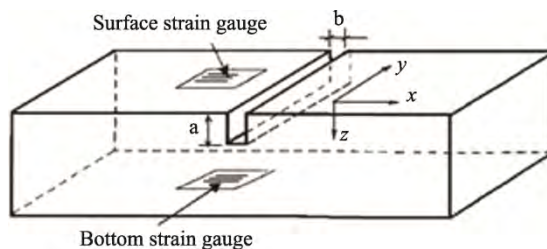


图 4 裂纹柔度法残余应力测量示意图^[7]

Fig. 4 Schematic diagram of residual stress measurement by using the crack compliance method^[7]

裂纹柔度法残余应力测量原理如图 4 所示, 待测的工件呈长条状, 需要测量的是工件长度方向, 即 x 方向的应力沿厚度 z 的大小分布, 假设该应力沿 y 方向的分布没有变化。工件上面或下面, 或两面预先贴有单向应变片。测量时, 从工

件上表面开始,在垂直于 x 方向分次切割开槽,槽的总深度 a 随开槽次数不断增加,由应变片检测每次开槽后的释放变形(应变),结合有限元分析得到的标定常数,就可以计算出沿厚度的 x 方向残余应力分布^[6-7]。裂纹柔度法与小孔法残余应力测量的原理非常相似,但前者可以获得沿材料全厚度的应力分布,后者一般限于表面和近表面的应力;前者只能获得垂直切割面的法向应力,而后者能得到 3 个平面应力分量。开槽可采用砂轮切割、铣刀铣削或电火花切割,由于瓷砖可采用金刚石砂轮切割,因此,裂纹柔度法是瓷砖残余应力测量的主要方法。

De Noni 等^[4]研究了瓷砖烧结过程中冷却速率对瓷砖表面残余应力的影响,通过对瓷砖表面逐层切割开槽,采用裂纹柔度法计算得到瓷砖表面的残余应力大小。图 5 显示了冷却速率对残余应力的影响,从结果可以看到,两者近似于线性的关系^[8]。而该学者采用裂纹柔度法测得的不同成分的瓷砖表面残余应力的结果见表 1^[9]。从表 1 可以看到,不同成分的瓷砖,其表面残余应力有一定的差别,最大的是 -18 MPa,而最小的是 -34 MPa,均为压应力,其中, C7 对应的是工业生产中常用的成分。

目前,裂纹柔度法进行瓷砖残余应力的测量主要是针对无釉面的瓷砖,其材料均匀性良好,而实际的瓷砖通常都有釉面,包括底釉和面釉,尽管它们的厚度都较小,在 $100\ \mu\text{m}$ 左右,但它们对瓷砖表面或近表面的残余应力有很重要的影响。目前,并没有见到采用裂纹柔度法对釉面应力表征的相关研究,这可能与该测量方法在厚度方向的解析度有关。

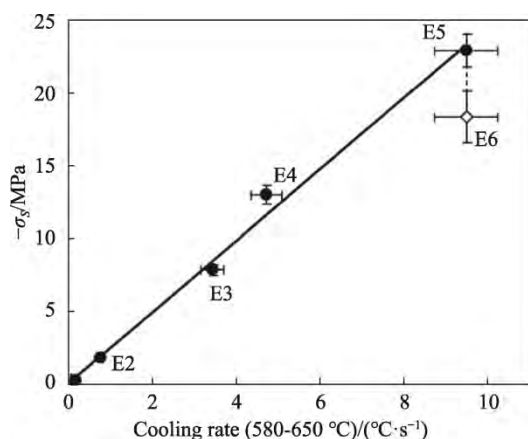


图 5 不同冷却速率下的瓷砖表面残余应力^[8]

Fig. 5 Porcelain tile surface residual stress at different cooling rates^[8]

表 1 不同成分的瓷砖表面残余应力及膨胀系数和杨氏模量

Tab. 1 Residual stress, expansion coefficient and Young's modulus of the porcelain tiles with different compositions

Mixture	σ_s/MPa	$\alpha_{625-750}/(\times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	E/GPa
C1	-18	36	50
C2	-33	48	60
C3	-34	62	53
C4	-20	44	56
C5	-24	48	51
C6	-34	54	57
C7	-24	47	55

2.3 三点弯曲法

普通的瓷砖都要施加釉面装饰保护层,该釉层的热力学性能、力学性能与基体材料有很较大差异,而且该装饰保护层的厚度较小,使得裂纹柔度法难于适用。Bannier 等^[10]采用三点弯曲法研究了含釉面瓷砖的残余应力。三点弯曲法测量表面残余应力的原理见图 6。

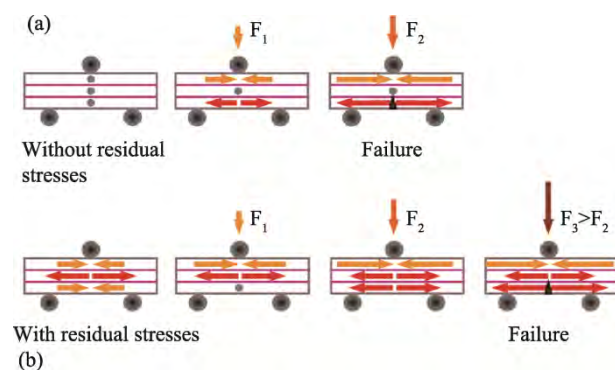


图 6 残余应力对三点弯曲试验的影响示意图^[10]

Fig. 6 Schematic diagram of the effect of residual stress on the three-point bending test^[10]

对于无残余应力的试板,其三点弯曲试验的过程见图 6(a)。施加载荷 F_1 后,试板下部受拉应力,而上部受到压应力,进一步加载后,试板在 F_2 载荷下断裂,可以得到反映其强度的应力指标—断裂模数。而对于表面有压应力的试板,其三点弯曲实验的过程见图 6(b)。施加载荷 F_1 后,试板下部受到的拉应力与原始压应力平衡,下表面应力为零,继续加载后,下表面出现拉应力,直到加载到 F_3 后,试板断裂。通过比较两种试板的断裂载荷,运用弯曲梁的力学原理,可以得到瓷砖基体、底釉和面釉的原始残余应力的大小。表

2 显示了两种瓷砖(A,B)的残余应力, 包括有无面釉两种情况, 其中, S 代表瓷砖基体, g 代表底釉(2g 表示 2 倍厚度的底釉), v 代表面釉(2v 代表 2 倍厚度面釉)。

表 2 瓷砖基体、底釉和面釉的残余应力

Tab. 2 Residual stress of porcelain tile body, engobe and glaze

Model	Part of porcelain tiles	$\sigma_{\text{res}}/\text{MPa}$	
		S+2g	S+g+2v
Model A	Body (interface with the engobe)	-0.4	8.1
	Engobe	4.6	12.9
	Glaze	—	-77.3
Model B	Body (interface with the engobe)	-9.0	1.5
	Engobe	63.3	73.7
	Glaze	—	-72.6

由表 2 可见, 只有底釉的瓷砖表面残余应力呈现拉应力状况, 而有底釉和面釉的瓷砖, 面釉有较大的压应力, 而底釉和基体呈现拉应力。这种应力分布与基体、底釉和面釉三者的热膨胀系数不同有关, 由于底釉比基体有更高的热膨胀系数, 在只有底釉的瓷砖冷却过程中, 基体限制了底釉的收缩, 导致其内部出现拉伸应力, 而基体在界面处呈现压应力。增加了面釉后, 它阻碍了其他两层的全面收缩, 导致在面釉和基体中出现较高的应力, 尤其是会在面釉层产生明显的压应力^[10]。

从三点弯曲法测量残余应力的机理可以知道, 测量需要一致性良好的无应力瓷砖做对比, 这很难在实际操作中得到保证, 文献[10]尝试通过提高釉层的厚度来解决这一问题, 但结果证明, 这种方法对釉层厚度比较敏感, 实际的单层釉面可能难以表征。另外, 瓷砖的弯曲开裂应力与瓷砖本身的缺陷相关, 因此, 这种测量方法的离散性不可避免, 测量的精度也会受到影响, 需要有大量的试验数据做支持。

2.4 钻孔法

钻孔法测量残余应力有较久远的历史。1934 年该方法被提出, 后经过多年的发展, 现已经成为最广泛应用的残余应力测量方法之一。钻孔法的工作原理与前面提到的裂纹柔度法类似, 只不过将裂纹柔度法的开槽更换成钻孔。钻孔法残余应力测量原理见图 7^[11], 对于构件平面应力状态的某个点的残余应力, 可以由两个主应力 σ_1 、 σ_2

和主应力方向角 θ 共三个未知量来表征。因此, 一般用三个应变敏感栅 R_1 、 R_2 和 R_3 组成的应变花进行应变测量。首先, 将应变花粘贴在结构件表面; 然后, 在应变花中心钻一个小孔, 释放局部的残余应力, 由应变敏感栅测量三个方向的应变; 最后, 经过计算可以得到构件原始状态的表面或近表面的残余应力。

通常在待测件上钻一个直径大约 2 mm、深度也是 2 mm 左右的盲孔, 所以钻孔法又被称为盲孔法。钻孔法残余应力测量时钻孔的尺寸小, 可以认为是近似无损的方法, 其操作过程也不复杂, 因此, 在金属结构的残余应力测量中得到了广泛的应用。

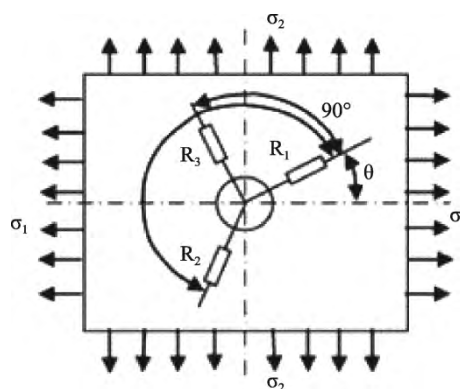


图 7 钻孔法残余应力测量原理示意图^[11]

Fig. 7 Schematic diagram of residual stress measurement principle of the hole drilling method^[11]

瓷砖材料与金属有很大的区别, 一方面, 它材质脆, 钻孔易开裂; 另一方面, 瓷砖本体的残余应力不高, 通常的慢速钻孔法很难精确测量其残余应力。文献调研显示, 国内外还没有采用钻孔法进行瓷砖残余应力表征的研究。为了实现在瓷砖上精确钻孔而不开裂, 作者采用意大利 SINT 每分钟 40 万转的高速残余应力测量钻孔仪, 选用了适用于陶瓷钻孔的金刚石钻头, 应用分步逐层钻削方法, 进行了瓷砖的残余应力测量研究。经过反复的试验与摸索, 克服了应变片保护、钻头润滑与保护等一系列瓷砖应力测量过程中的特殊问题, 得到了瓷砖的原始残余应力。图 8 是采用高速钻孔法进行大尺寸瓷砖的残余应力测量的现场。

图 9 为所制大瓷砖无釉面处某点的最大主应力测量结果。该结果是采用国标 GB/T31310-2014 和 ASTM E837-13 计算的瓷砖表面残余应力分布。结果显示, 表面 0.8 mm 深度内基本以压应力

为主。压应力深度、大小与图 2 的结果相近,但更深处的拉应力较图 2 的拉应力大。针对不同工艺加工的瓷砖板,作者还进行了钻孔法残余应力测量和对比,测量结果显示加工工艺对瓷砖残余应力有影响,详细结果将另文介绍。试验和分析结果表明,高速钻孔法残余应力测量技术可以用于瓷砖板的残余应力测量。

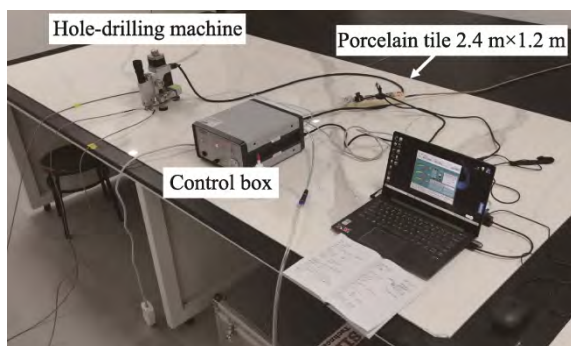


图 8 高速钻孔法进行大瓷砖的残余应力测量
Fig. 8 Porcelain tile residual stress measurement using the high speed hole-drilling method

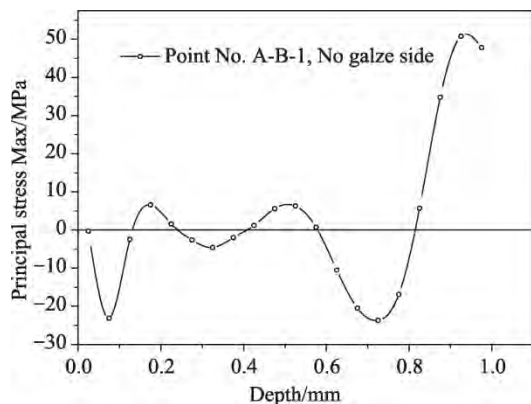


图 9 高速钻孔法测量无釉面大瓷砖残余应力结果
Fig. 9 No-glazed tile residual stress measured using the high speed hole-drilling method

2.5 压痕法

压痕法采用球形或棱锥形压头压入试样,通过压入过程中的压痕载荷—深度的曲线或者通过压入测量得到材料的强度,来分析计算材料的残余应力数值。与无应力状态相比,待测试样中的残余应力能够改变压头压入过程中压痕载荷—压入深度曲线的斜率。对于给定压入深度,待测试样中的残余压应力导致整个压入过程中所需要的压痕载荷更大,残余拉应力导致的结果则完全相反,见图 10,通过对压痕载荷—深度曲线的分析和计算可以得到其原始残余应力值^[12]。

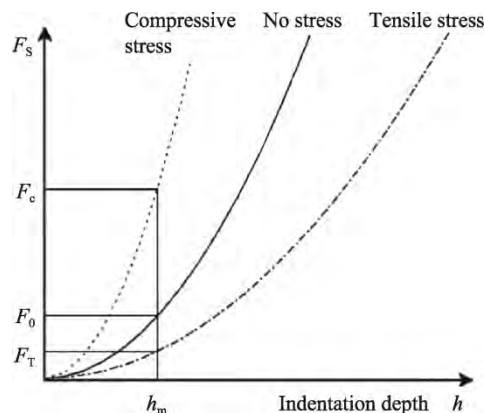


图 10 压痕载荷与压入深度曲线^[11]
Fig. 10 Indentation load-indentation depth curves^[11]

对于脆性材料,压入过程中使材料产生断裂的应力也会受到其原始残余应力的影响。包亦望等^[13]在研究球压法在线评价脆性材料的残余应力时发现,当材料表面存在残余压应力时,压头引起破坏的外力首先要平衡掉该残余应力,然后继续增加到材料强度值时发生断裂,因此,材料的承载能力提高了,提高的幅度近似等于原始压应力的幅度,反之亦然。通过测试有残余应力和无残余应力两种情况下的局部强度,可以较简便地估算出材料的残余应力,即两者的差就是残余应力,这种方法的原理与三点弯曲法类似,只不过瓷砖强度的检测方法不同。当然,这种方法首先需要准确制备无残余应力试样做比较。另外,正如文献[10]所指出,瓷砖本体结构不够致密,有空洞且表面比较粗糙,采用压痕法,尤其是纳米压痕法测量的结果会比较离散,不确定性比较大。

此外,还有一些方法可能用于瓷砖的残余应力的表征,如包亦望等^[14]在陶瓷涂层残余应力的研究中提出的改进型 Stoney 方法,借助材料本身的力学性能参数和几何形状,通过计算得到涂层的残余应力。瓷砖的釉面类似陶瓷的涂层,几乎没有弯曲变形,可以借鉴其文中的第二类涂层方法对瓷砖釉面的残余应力进行近似计算,当然,实际瓷砖釉面的厚度较薄,大约只有总厚度的六十分之一,Stoney 方法或者改进型 Stoney 方法对瓷砖应力分析的适用性还有待深入的研究。

3 结 语

瓷砖的残余应力与其加工过程中的不均匀加热和冷却密切相关,由于其组织成分的特殊

性,常用的 X 射线衍射法很难用于其宏观残余应力检测。裂纹柔度法是目前最常见的瓷砖残余应力检测方法,但该方法主要用于瓷砖本体残余应力测量,在釉面残余应力表征中该方法的解析精度还需要更多的研究。三点弯曲法和压痕法都需要有标准应力试样做比较,这在实际应用中存在不小的困难,这类方法的测量精度也制约了其应用。钻孔法作为一种金属结构残余应力常用的检测方法可以用于瓷砖残余应力的表征,高速钻孔法可以对釉面瓷砖的残余应力进行较精确的测量。

参考文献:

- [1] SÁNCHEZ E, GARCÍA-TEN J, SANZ V, et al. Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution [J]. *Ceramics International*, 2010, 36(3): 831–845.
- [2] SÁNCHEZ E, SANZ V, CASTELLANO J, et al. Residual stresses in porcelain tiles. measurement and process variables assessment [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(11): 3364–3372.
- [3] EIGENMANN B, SCHOLTES B, MACHERAUCH E. Determination of residual stresses in ceramics and ceramic-metal composites by X-ray diffraction methods [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1989, 118: 1–17.
- [4] DE NONI A, HOTZA D, SOLER V C, et al. Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. part II: Mechanical properties and microscopic residual stress [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(7): 1736–1743.
- [5] 闻万梁. 关于大规格陶瓷板和陶瓷板切割性能判定方法的探讨与研究[J]. *陶瓷*, 2021(1): 13–16.
WEN W L. *Ceramics*, 2021(1): 13–16.
- [6] PRIME M B. Plasticity effects in incremental slitting measurement of residual stresses [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(10): 1552–1566.
- [7] SCHAJER G S. Relaxation methods for measuring residual stresses: Techniques and opportunities [J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(8): 1117–1127.
- [8] DE NONI A, HOTZA D, CANTAVELLA SOLER V, et al. Influence of macroscopic residual stresses on the mechanical behavior and microstructure of porcelain tile [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, 28(13): 2463–2469.
- [9] DE NONI A, HOTZA D, CANTAVELLA SOLER V, et al. Influence of composition on mechanical behavior of porcelain tile. part III: Effect of the cooling rate of the firing cycle [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(9): 3330–3336.
- [10] BANNIER E, GARCÍA-TEN J, CASTELLANO J, et al. Delayed curvature and residual stresses in porcelain tiles [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33(3): 493–501.
- [11] 王晓洪, 赵怀普. 盲孔法测残余应力原理及几种打孔方式简介[C]//第 15 届全国残余应力学术交流会, 重庆, 2009: 1–4.
- [12] 向宏霄, 马恒, 吴益文, 等. 仪器化压痕法测量焊接残余应力分析[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(11): 137–140.
XIANG H X, MA H, WU Y W, et al. *Hot Working Technology*, 2021, 50(11): 137–140.
- [13] 包亦望, 陈志城, 苏盛彪. 球压法在线评价脆性材料的强度特性和残余应力[J]. *无机材料学报*, 2002, 17(4): 833–840.
BAO Y W, CHEN Z C, SU S B. *Journal of Inorganic Materials*, 2002, 17(4): 833–840.
- [14] 包亦望, 马德隆. 陶瓷涂层的残余应力评价及其尺寸效应[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(8): 1033–1038.
BAO Y W, MA D L. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(8): 1033–1038.

(编辑 梁华银)