

# 试验分析影响琉璃瓦抗压抗折强度的因素

陈百发

(故宫博物院, 北京 100009)

**摘要:** 采用WDW-100KW型电子万能试验机测试各样品的抗压、抗折强度, 结合测到的各样品的吸水率、显气孔率、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量等数据, 利用统计软件SPSS对琉璃瓦胎体抗压、抗折强度的影响因素进行多重线性回归分析得出, 在一定范围内, 影响抗压强度的因素主要有吸水率,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 $\text{CaO}$ 含量; 影响抗折强度的因素主要有吸水率,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 $\text{CaO}$ 含量。通过分析影响因素的内在联系, 以较小的外部干预达到古建筑延长寿命的目的。

**关键词:** 琉璃瓦; 抗压强度; 抗折强度  
**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A

琉璃瓦是一种中国古代重要的建筑材料, 具有悠久的制造、应用历史, 具有强度高、平整度好、吸水率低、抗折、抗冻、耐酸、耐碱、不易褪色等显著优点。

## 1 试验取样

我们分别对故宫博物院长春宫古代琉璃瓦样品 (CCG1~CCG7)、故宫博物院琉璃瓦料场琉璃瓦样品 (LC1~LC5)、河北涑水琉璃瓦厂琉璃瓦样品 (LS1~LS2) 进行编号、测量、拍照及病害状况记录。

## 2 抗折强度

将试样胎体切割成 $50\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的样条, 利用WDW-100KW型电子万能试验机测试材料的抗折强度。结果显示, 受不同年代制作工艺及原材料的影响, 并且由于经过长时间的环境侵蚀, 琉璃瓦个体间的保存状况存在显著差别, 琉璃瓦胎体的抗折强度也存在较大差别。其中试样CCG-1胎体中有较大的空隙, 试样CCG-2胎体发生了酥粉化, 这使其抗折强度显著下降。编号为CCG-7、LC-2~LC-4古琉璃瓦的抗折强度都超过了现代新烧制的样品LS-1、LS-2。其中LC-3、LC-4是1950年制作后又经过复烧的样品<sup>[1]</sup>, 在复烧的过程中有意识提高温度, 降低显气孔率, 从而改变胎体的质量、提高样品的抗折强度。

由于陶瓷类材料的结构特点, 材料内部结构中始终存在裂纹和缺陷。琉璃瓦作为传统手工艺作品, 便决定了其原料和制作工艺的不稳定, 特

别是古代手工制作的琉璃瓦, 即使同一瓦件的不同部分的强度之间也存在较大的波动。这种波动没有规律可以寻找, 也无法通过其他方式进行调整, 更多的是通过匠人自身的经验来筛选。材料的脆性断裂是裂纹扩展的结果, 琉璃瓦胎体中, 气孔的形状、孔径、孔径分布、孔隙率对断裂韧性有很大的影响。在其他条件相同时, 样品的显气孔率越低, 抗折强度越高。在抗折强度的测试中, 样品都是从结构上的薄弱处开始断裂, 当存在大裂隙时, 抗折强度会大幅度下降, 同时釉面也从该处发生剥落。LC-3的显气孔率是所取琉璃瓦样品中最低的, 其抗折强度则是最高的。

研究表明, 在其他工艺条件无明显差别的情况下,  $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量可影响琉璃瓦整瓦的抗折强度<sup>[2]</sup>。如适量提高胎体中 $\text{SiO}_2$ 的含量, 并同时降低 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量, 即提高石英的含量, 从而提高胎体的弹性形变、降低塑性形变,  $\text{SiO}_2$ 在胎体中的骨架作用更加明显。 $\text{SiO}_2$ 在胎体烧结的过程中由 $\beta\text{-SiO}_2$ 向 $\alpha\text{-SiO}_2$ 转变, 琉璃瓦胎体在烧制过程中发生收缩, 该转变过程是晶体体积增加的过程, 故该过程有利于提高胎体的热膨胀系数, 改善坯釉结合性, 减缓坯釉之间的应力。通过降低黏土量来降低氧化铝含量的同时, 也无形中降低了烧失量, 减少了收缩, 减轻了因干燥及烧成收缩过程带来的产品变形, 相应提高了胎体抗折强度。但在本研究的样品中, 原料配方 $\text{SiO}_2$ 含量由68.05%增加至72.82%, 变化范围较小, 同时抗折强度也仅提高8%, 故琉璃瓦胎化学组成的变化不

能作为判断琉璃瓦胎体抗折强度的全部依据<sup>[3]</sup>。同时可以看出,琉璃瓦的化学组成对胎体力学性能的影响小于孔隙对胎体力学性能的影响。

### 3 抗压强度

将试样胎体去除上下表面后切割成10mm×10mm×10mm的样块制成不带釉样品(胎体样品),用于抗压强度的带釉样品是直接将带釉的大样品切割成上述尺寸。用WDW-100KW型电子万能试验机测试样块的抗压强度。

试样CCG-2胎体发生酥粉化,这使其抗压强度显著下降,在所有样品中最低。清宣统时期的样品CCG-7,未知时代的样品LC-2,以及复烧的样品LC-3、LC-4抗压强度较高。总体的趋势是随吸水率的降低,样品抗压强度升高。

一般来说,烧结程度越差,吸水率越高,抗压强度也越小。很显然,这是因为烧结程度差,胎体内部气孔率相对偏高,而气孔不仅减小负荷面积,而且在气孔邻近区域应力集中,减弱胎体的负荷能力;烧结程度越好,坯体各组分间反应越完全,彼此之间的结合力越强,同时液相和晶相量也逐渐增多,液相可以有效地填充到裂纹和气孔中,而晶界对裂纹的扩展有着极大的阻碍作用。

### 4 综合分析

显然,琉璃瓦的抗压、抗折强度受多重因素的影响,包括吸水率、显气孔率、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O含量等,故利用统计软件SPSS对琉璃瓦胎体抗压强度的影响因素进行多重线性回归分析。

前文提到琉璃瓦胎体吸水率与显气孔率之间有明显的线性关系,故二者之间只取较容易测量的吸水率作为一类自变量。胎体组成中,对机械强度可能有影响的氧化物种类有SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O,故取以上6个氧化物含量为另外一类自变量。抗折或抗压强度为因变量,利用SPSS软件做吸水率、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O质量百分数与抗压强度之间的多重线性回归。其回归模型的判定系数R见表1。

表1 抗压强度模型汇总

模型	R	R <sup>2</sup>	调整R <sup>2</sup>	标准估计的误差
1	0.850	0.722	0.237	4.87842
2	0.847	0.717	0.377	4.40882
3	0.841	0.707	0.463	4.09126
4	0.832	0.692	0.517	3.88157
5	0.746	0.556	0.390	4.36250

模型拟合优度的结果解释:模型汇总表中,有R<sup>2</sup>、调整R<sup>2</sup>、估计的标准误差三个指标。以模型4为例解释拟合结果。

多重判定系数R<sup>2</sup>=0.692,其实际意义是:在抗压强度的变异中,能被吸水率、SiO<sub>2</sub>含量、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量和CaO含量的多元回归方程所解释的比例为69.2%。R<sup>2</sup>的平方根R就是抗压强度与4个自变量(吸水率、SiO<sub>2</sub>含量、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量、CaO含量)的复相关系数。

调整的多重判定系数(调整R<sup>2</sup>)为0.517,其实际意义是:在用样本量和模型中自变量的个数进行调整后,在抗压强度的变异中,能被吸水率、SiO<sub>2</sub>含量、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量、CaO含量的多元回归方程所解释的比例为51.7%。

估计的标准误差=3.88517,其实际含义是:根据所建立的多元回归方程,用吸水率、SiO<sub>2</sub>含量、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量、CaO含量来预测抗压强度时,平均预测误差为3.88517MPa。

表1中给出多个拟合模型,结合R<sup>2</sup>和调整R<sup>2</sup>,确定模型4为最优,即建立抗压强度与吸水率、SiO<sub>2</sub>含量、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量、CaO含量4个自变量之间的多重线性拟合。拟合结果如下:

$$y = -1.602x_1 - 6.258x_2 - 5.189x_3 - 23.717x_4 + 598.398$$

式中y——抗压强度,单位为MPa;

x<sub>1</sub>——吸水率,单位为%;

x<sub>2</sub>——SiO<sub>2</sub>质量分数,单位为%;

x<sub>3</sub>——Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数,单位为%;

x<sub>4</sub>——CaO质量分数,单位为%。

同理,抗折强度的结果见表2。

表2 抗折强度模型汇总表

模型	R	R <sup>2</sup>	调整R <sup>2</sup>	标准估计的误差
1	0.837	0.701	0.177	2.67741
2	0.837	0.700	0.340	2.39698
3	0.836	0.699	0.447	2.19354
4	0.834	0.695	0.521	2.04268
5	0.826	0.683	0.564	1.94868
6	0.768	0.589	0.498	2.09095
7	0.670	0.449	0.394	2.29627

若选择模型5,即建立抗折强度与 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 含量3个自变量之间的多重线性拟合。拟合结果如下:

$$y = -1.917x_1 - 0.492x_2 + 3.864x_3 - 5.360$$

式中 $x_1$ —— $\text{Na}_2\text{O}$ 质量分数,单位为%;

$x_2$ —— $\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量分数,单位为%;

$x_3$ —— $\text{CaO}$ 质量分数,单位为%。

若选择模型4,即建立抗折强度与吸水率、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 含量4个自变量之间的多重线性拟合。拟合结果如下:

$$y = -0.265x_1 - 1.680x_2 - 0.496x_3 + 3.241x_4 - 1.53$$

式中 $y$ ——抗折强度,单位为MPa;

$x_1$ ——吸水率,单位为%;

$x_2$ —— $\text{Na}_2\text{O}$ 质量分数,单位为%;

$x_3$ —— $\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量分数,单位为%;

$x_4$ —— $\text{CaO}$ 质量分数,单位为%。

模型4和模型5都有较高的调整 $R^2$ ( $>0.5$ ),模型5的调整 $R^2$ 高于模型4的,而模型4的 $R^2$ 高于模型5的。模型建立的目的是确定影响抗折强度较强的因素,故在拟合结果近似的情况下,应选择包含有更多自变量的模型,因此选择模型4。

## 5 结束语

综上所述,在一定范围内,影响抗压强度的因素主要有吸水率、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 $\text{CaO}$ 含量;影响抗折强度的因素主要有吸水率、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 $\text{CaO}$ 含量。吸水率在抗折、抗压强度中均有出现,而这一点也与经验相符。对古建筑影响最主要的因素还是水,而古建筑本体安全因其自身的特性、材料的特性而受到更多因素的影响。其中,降低吸水率、减少 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量有利于提高抗折、抗压强度;降低 $\text{SiO}_2$ 含量有利于提高抗压强度;降低 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量有利于提高抗折强度;降低 $\text{CaO}$ 含量有利于提高抗折强度,但不利于提高抗压强度, $\text{CaO}$ 因其可以与空气中的 $\text{CO}_2$ 结合后发生化学反应而增加强度,用时间的增加来换取强度的提升,只是这个过程因其自身与空气接触面积的关系而得不到加速,故不能作为常规变量看待。

受测试样品数量较少及不确定的样条内部缺陷影响,影响琉璃瓦抗折、抗压强度的因素仍需修正。古建筑材料本身因为是手工产品,非工业化流水线产品,从而决定了自身的差异性,每一块琉璃瓦都是单独的个体,甚至同一块琉璃瓦的不同部分都是单独的个体,这也影响了抗折、抗压强度的整体数值。

胎体中的大裂隙对抗折、抗压强度有严重的不利影响,尤其是抗折强度会大幅度下降。因此,在琉璃瓦胎体的烧制过程中,应注意避免胎体中大裂隙的出现。

结合多种测试结果,胎体制作工艺、胎体孔隙对琉璃瓦抗压、抗折强度的影响远大于化学组成的。整体上还是胎体的制作工艺是产生差异性的主要原因,因为胎体制作工艺的差异性,才导致胎体孔隙率的不同。在生产原材料相同的标准下,由于不同的制作手法造就了不同的个体差异,而这些个体的差异性通过断裂这一宏观现象呈现在监测过程中。手工制造产品的弊端在这里有了集中的体现,而产生这种弊端的原因是多样的。正是由于影响因素的多样性,才导致琉璃瓦抗压、抗折强度的波动。但是这种波动并不能改变琉璃瓦出现断裂的现象,只能影响断裂出现的频率。对古建筑本体而言,断裂的琉璃瓦是一块还是无数块,于建筑本体,都是病害,只是轻重程度不同。所以,对这种随着时间的增加而必然会发生病害,应加强日常的巡视,做到小修小补,防患于未然。缝缝补补的日常修缮更能为古建筑的寿命延长提供保障。

## 参考文献

- [1] 古代琉璃构件保护与研究课题组.古代建筑琉璃构件剥釉机理内在因素研究[J].故宫博物院院刊,2008(5):115-129.
- [2] 胡曦.影响琉璃瓦抗折强度的因素[J].佛山陶瓷,2000(4):17-19.
- [3] 陆小荣.陶瓷工艺学[M].长沙:湖南大学出版社,2005.