

建筑玻璃强度的测定

陈颖¹, 季清², 史阳¹, 杨健², 刘清风²

(1. 北京建筑技术发展有限责任公司, 北京 100055; 2. 上海交通大学 海洋船舶与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:介绍了美国、英国、俄罗斯和中国在测定玻璃大面强度及边缘强度的实验标准, 通过对比四国标准中对试件和加载条件之间的差异, 发现: 俄罗斯标准对试件要求成本最低, 对实验条件要求具体可行; 而我国目前对玻璃测试的标准制定最为粗糙, 具体细节有待提高。

关键词:建筑玻璃; 大面强度; 边缘强度; 美国标准; 英国标准; 俄罗斯标准; 中国标准

中图分类号: TU382

文献标识码: A

Evaluations of the strength of building glass

CHEN Ying¹, JI Qing², SHI Yang¹, YANG Jian², LIU Qing-feng²

(1. Beijing Building Technology Development Ltd. Beijing 100055, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Four commonly used standards including American, British, Russian and Chinese standards for measuring the body and edge strength of glass are documented. The difference of testing sample and loading condition in each country shows that the cost of Russian testing sample is the lowest and the testing condition is feasible; and the Chinese standards for glass testing is the lowest. And Chinese glass standards and its design practice in the glass industry should be improved in the future.

Key words: building glass; body strength; edge strength; American standard; British standard; Russian standard; Chinese standard

近年来, 玻璃材料因其优异的透光性能而被广泛应用于各类建筑物中, 在现代建筑中扮演了愈加重要的角色。玻璃是典型的脆性材料, 其实际强度比理论强度要低 2~3 个数量级^[1]。这是由于玻璃表面存在着大量的细小裂纹, 外力作用下, 裂纹尖端存在着非常显著的应力集中现象, 从而降低了玻璃的强度。根据断裂力学的相关知识, 玻璃的强度受裂纹长度、裂纹尖端曲率等多方面的因素影响^[2], 故其离散性较大, 需要大量实验数据来对其强度值作统计学上的确定。国内对玻璃强度测定的标准有 JC/T676 实验方法, 国外较常见的标准有美国标准 ASTM、英国标准 BS EN 以及俄罗斯标准, 其对实验试件以及加载条件要求各不相同。玻璃按不同的几何位置破坏又可分为大面破坏和边缘破坏, 相应的强度称为大面强度和边缘强度, 本文从大面强度和边缘强度两方面

对比四国标准在实验试件以及加载环境的区别。

1 玻璃边缘强度实验标准

1.1 美国标准

1.1.1 实验试件

美国标准规定^[3], 进行试验需要至少 30 个试件, 每个试件长为 250 mm, 宽为 $38.1 \text{ mm} \pm 3.2 \text{ mm}$ 。从一端到另一端宽度和厚度的变化不得超过 5%。

1.1.2 加载条件

ASTM C158-02 标准规定, 加载试验环境温度为 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $40\% \pm 10\%$ 。实验中, 对玻璃进行两点加载, 两点支承方法。两加载点相距 100 mm, 两支承点相距 200 mm。实验加载速率为 $(1.1 \pm 0.2) \text{ MPa/s}$ 。

1.2 英国标准

1.2.1 试件要求

根据英国标准^[4]规定,玻璃的边缘强度测定采用四点加载试验。试件长度为 $1\ 100\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$,试件宽度取 $360\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ 。试件宽度的量测误差需在 1 mm 之内,试件厚度的测量误差需在 0.01 mm 之内。

1.2.2 加载条件

对试件进行四点加载实验,两支承点间距为 $1\ 000\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$,两加载点间距为 $200\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 。抗弯实验需在温度为 $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $40\% \sim 70\%$ 的环境下进行。实验中,环境温度变化需保持 1°C 以内。整个实验过程对试件进行匀速加载,试件应力增加速率为 $(2 \pm 0.4)\text{ N/mm}^2$ 。

1.3 俄罗斯标准

根据俄罗斯标准^[5],玻璃边缘强度测定采取三点抗折强度测试方法。

1.3.1 试件要求

试验试件为矩形玻璃板,其规格及相应加载跨度如表1所示。样品的宽度和厚度误差不得大于 0.01 mm 。

表1 实验样品规格及相应跨度

Tab. 1 The experimental sample specifications and corresponding span

样品厚度 h/mm	样品规格 $a \times b/\text{mm}$	跨距 L/mm
2	40 × 6	32
3	60 × 10	48
4	80 × 12	56
5	100 × 15	80
6	120 × 18	96
10	200 × 30	160

1.3.2 加载条件

试验机械需保证静态加载,且加载误差不得大于 1% 。试验加载的速率为 $(5 \pm 0.5)\text{ mm/min}$ 。实验过程中,环境温度需保持在 $21^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$,相对湿度需保持在 $45\% \sim 80\%$ 之间,大气压力需为 $866.4 \sim 1\ 066.4\text{ kPa}$ 。

1.4 我国标准

1.4.1 实验试件

我国《玻璃材料弯曲强度试验方法》JC/T696-1997^[6]中规定,玻璃试样选取长为 $120\text{ mm} \pm$

1 mm ,宽 $20\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$,且横截面四角均为 $90^\circ \pm 0.5^\circ$ 。每组试样个数不得少于15个。

1.4.2 加载条件

JC/T696-1997标准中未对实验的温度和湿度作明确要求。但标准规定,实验加载采取位移速率控制加载,加载速率为 5 mm/min 。实验采取单点加载、两点支承的方法。

2 玻璃大面强度测试

2.1 美国标准

2.1.1 试件要求

按照美国标准要求^[7],大面强度测定需进行至少10组实验;当需要得到玻璃强度值的 Weibull 分布,需进行至少30组实验。实验试件可为圆形或方形试件,建议取圆形试件为佳。标准中对试件的几何尺寸要求如下:

(1)试件的厚度 h 需满足下式要求:

$$\frac{D_s}{10} \leq h \leq \sqrt{2\sigma_f D_s^2 / 3E} \quad (1)$$

式中, D_s 为支撑环直径; σ_f 为预期大面断裂强度; E 为试件的弹性模量。

(2)对于圆形试件,试件的直径与支撑环直径需满足如下要求:

$$2 \leq \frac{D - D_s}{h} \leq 12 \quad (2)$$

式中, D 为圆形试件的直径。对于尺寸大或边缘处理弱的试件,上式取值应取上限12。对矩形试件,可按式换算成等效试件直径:

$$D = 0.54(l_1 + l_2) \quad (3)$$

式中, l_1 、 l_2 为矩形试件的边长,需满足 $0.98 \leq l_1/l_2 \leq 1.02$ 。

2.1.2 加载条件

实验中,加载环直径为 D_L ,支承环直径为 D_s ,两者之比需满足 $0.2 \leq D_L/D_s \leq 0.5$ 。

2.2 英国标准

2.2.1 试件要求

英国标准^[8]规定,玻璃样品试件为正方形形状,边长为 $1\ 000\text{ mm} \pm 4\text{ mm}$,标准未对试件数量作要求。实验前,需对玻璃试件边缘至少八个点进行厚度测量。

2.2.2 加载条件

加载环境温度需保持在 $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$,实验过程中,温度变化需保持在 1°C 以内,相对湿度需保持

在 40% ~ 70%。实验中的加载环直径为 300 mm $\pm$ 1 mm, 支撑环直径为 400 mm $\pm$ 1 mm。

2.3 俄罗斯标准

2.3.1 试件要求

俄罗斯标准^[9]规定, 试件形状为正方形。玻璃板的规格以及相应的支撑环与压环的直径如表 2 所示。

表 2 实验样本及双环几何尺寸

Tab. 2 Experimental samples and geometrical size of two loops

样品厚度 h/mm	样品规格 $2l/\text{mm}$	支撑环直径 $2a/\text{mm}$	压环直径 $2b/\text{mm}$
2	40 $\times$ 40	16	8
3	60 $\times$ 60	24	12
4	80 $\times$ 80	32	16
5	100 $\times$ 100	40	20
6	120 $\times$ 120	48	24
10	200 $\times$ 200	80	40

2.3.2 加载条件

俄罗斯标准规定, 实验中环境需满足空气温度为 21 $^{\circ}\text{C}$ $\pm$ 3 $^{\circ}\text{C}$, 相对大气湿度为 45% ~ 80%, 大气压力为 866.4 kPa ~ 1 066.4 kPa。实验中, 试验机的加载速率为 (5 $\pm$ 0.5) mm/min。

3 标准比较

3.1 试件比较

3.1.1 边缘强度

英国 BS EN1288 - 3:2000 标准、美国 ASTM C158 - 02 标准对玻璃的边缘强度测试采取四点加载试验方式, 而俄罗斯 1. 232. 46 - 87 标准以及我国 JC/T696 - 1997 标准均采取三点加载的方式, 它们玻璃试件的要求详见表 3 所示。

由表 3 可知, 英、美、中国标准对玻璃试件的尺寸都做了较硬性的要求, 而俄罗斯标准的要求更为宽泛。英国标准要求的玻璃试件尺寸最大, 是美国标准的玻璃试件面积的 41.6 倍, 故其加载跨度也较大。而俄罗斯标准中, 对玻璃试件的尺寸要求较小, 即使在选择范围内最大的玻璃试件尺寸也只有 200 mm $\times$ 30 mm, 为美国标准玻璃试件面积的 62.9%, 为英国标准的 1.52%。英国标准中对玻璃试件个数未做要求, 而美、俄标准都对玻璃试件的个数做了具体要求。

3.1.2 大面强度

英国、美国、俄罗斯标准对于玻璃的大面强度测定均采用双环加载的试验方法, 其对玻璃试件及加载支撑环的尺寸要求如表 4 所示。中国标准没有关于大面强度测试的阐述。

由表 4 可得, 英国标准对于玻璃试件的要求最明确。而美国标准对玻璃试件以及加载支撑环的尺寸均未作明确规定。俄罗斯标准未对玻璃的尺寸做硬性要求, 其最大面积比英国标准规定的玻璃试件面积小。英国标准未对样本数量作要求, 而美、俄标准都对玻璃试件的个数做了具体要求。

表 3 各国边缘强度测定玻璃试件比较

Tab. 3 Comparison of requirements for glass specimens for different standards to measure edge strength

	英国 BS EN 1288 - 3:2000	美国 ASTM C 158 - 02	俄罗斯 1. 232. 46—87	中国 JC/T696 - 1997
试件长 L/mm	1 100 $\pm$ 5	250	40、60、80、100、120、200	120 $\pm$ 1
试件宽 B/mm	360 $\pm$ 5	38.1 $\pm$ 3.2	6、10、12、15、18、30	20 $\pm$ 1
加载点间距/mm	200 $\pm$ 1	100	—	—
支承点间距/mm	1 000 $\pm$ 2	200	32、48、56、80、96、160	100
试件个数	—	至少 30	至少 100	至少 15

表 4 各国大面强度测试玻璃试件尺寸要求

Tab. 4 Comparison of requirements for glass specimens for different standards to measure bending strength

	英国 BS EN 1288 - 2:2000	美国 ASTM C1499 - 05	俄罗斯 1. 234. 44—87
加载环 r_1/mm	400 $\pm$ 1	0.2 $\leq r_1/r_2 \leq$ 0.5, 建议 $r_1/r_2 = 0.2$	8、12、16、20、24、40
支承环 r_2/mm	300 $\pm$ 1	0.2 $\leq r_1/r_2 \leq$ 0.5, 建议 $r_1/r_2 = 0.2$	16、24、32、40、48、80
样品规格/mm	(1 000 $\pm$ 4) $\times$ (1 000 $\pm$ 4)	圆形或方形、无硬性要求	40 $\times$ 40、60 $\times$ 60、80 $\times$ 80、100 $\times$ 100、 120 $\times$ 120、200 $\times$ 200
试件个数	—	至少 10 个	至少 100 个

表5 各国边缘强度测定实验环境对比

Tab. 5 Comparison of experimental environments for different countries to measure edge strength

	英国 BS EN 1288 - 3:2000	美国 ASTM C 158 - 02	俄罗斯 1.232.46—87	中国 JC/T696 - 1997
温度/℃	23 ± 5	23 ± 2	21 ± 3	—
相对湿度/%	40 ~ 70	40 ± 10	45 ~ 80	—
加载速率	(2 ± 0.4) MPa/s	(1.1 ± 0.2) MPa/s	(5 ± 0.5) mm/min	5 mm/min

表6 各国大面强度测定实验环境对比

Tab. 6 Comparison of experimental environments for different countries to measure face strength

	英国 BS EN1288 - 2:2000	美国 ASTM C 1499 - 05	俄罗斯标准 1.234.44—87
温度/℃	23 ± 5	—	21 ± 3
相对湿度/%	40 ~ 70	—	45 ~ 80
加载速率	(2 ± 0.4) N/mm · s	取决于试件几何尺寸	(5 ± 0.5) mm/min

3.2 加载条件比较

3.2.1 边缘强度

各国标准中边缘强度测定实验的加载环境详见表5。加载环境主要分为加载时的环境温度、相对湿度以及加载速率。由表5可得,英、美、俄三国实验温度均大致为室温条件下进行,美国标准对温度要求最高,而英国要求最低。美国标准对于相对湿度的要求同样最高,误差仅限在10%以内,俄罗斯标准在相对湿度要求上最宽泛。中国标准对加载环境的温度湿度均未作明确的要求。英美两国标准对于加载速率的要求均为应力增速要求,而俄罗斯和中国标准对于加载速率的要求为位移增速要求。

3.2.2 大面强度

英、美、俄标准对于大面强度测定实验环境的要求详见表6所示。由表可得,美国标准对实验环境的相对湿度及温度未做出明确的要求。而英、俄对实验环境中温度及相对湿度的要求与边缘强度测定实验相同。美国标准要求的加载速率取决于试件的几何尺寸,而英、俄标准加载速率的要求与边缘强度测定标准所要求的相同。

4 结语

在边缘强度和在面强度测定标准中:

1) 英国标准所需的试件尺寸最大,俄罗斯标准要求的试件尺寸最小。

2) 俄罗斯对试件数量要求较多,美国、中国要求较少,而英国对试件数量未做明确要求。

3) 英国与俄罗斯标准对环境温度及相对湿度的要求均相同;美国标准在边缘强度测定实验中对温度及相对湿度做了要求,而在大面强度测定实验中未对温度及相对湿度作要求;中国标准也

无相应环境的要求。

4) 边缘强度测定实验标准中,英国与美国标准均对应力加载速率提出要求,而俄罗斯和中国标准对位移加载速率提出了要求。大面强度测定实验标准中,美国标准未对加载速率提出要求,而英国与俄罗斯标准提出的要求与边缘强度测定实验中的相同。

5) 综合比较各个标准,俄罗斯标准对试件要求成本最低,对实验条件要求具体可行;而我国目前对玻璃测试的标准制定最为粗糙,具体细节有待提高。

参考文献:

- [1] 李维红. 玻璃材料破坏过程的数值模拟与分析[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2011.
- [2] 张晓敏, 万玲, 严波, 等. 断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [3] ASTM 158 - 02, Standard test methods for strength of glass by flexure (determination of modulus of rupture) [S].
- [4] BS EN 1288 - 3:2000, Glass in building - Determination of the bending strength of glass - Part3: Test with specimen supported at two points(four point bending) [S].
- [5] 1.234.44—87, 三点抗折强度测试方法 [S].
- [6] JC/T676 - 1997, 中华人民共和国建材行业标准玻璃材料弯曲强度试验方法[S].
- [7] ASTM 1499 - 05, Standard test method for monotonic equibiaxial flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature[S].
- [8] BS EN 1288 - 2:2000, Glass in building - Determination of the bending strength of glass - Part2: Coaxial double ring test on flat specimens with large test surface areas [S].
- [9] 1.232.46—87, 双环试验方法[S].

(责任编辑 王利君)