DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240805001 文章编号:1672-9331(2024)06-0104-07
引用格式:张晓辉. Li_2O对盖板玻璃离子交换深度和力学性能影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(6):104-110.
Citation: ZHANG Xiaohui. Effect of Li_2O on ion exchange depth and mechanical properties of cover glass[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(6): 104-110.

Li_2O对盖板玻璃离子交换深度和力学性能影响

张晓辉
(彩虹集团(邵阳)特种玻璃有限公司,湖南 邵阳 422000)

摘　要:【目的】以$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐增强盖板玻璃的离子交换深度及力学性能。**【方法】**采用低温离子交换法对铝硅盖板玻璃进行化学强化,并在玻璃料方中添加Li_2O,对玻璃进行二次强化。**【结果】**在玻璃料方中添加Li_2O后进行的二次强化工艺能够显著提高玻璃的离子交换深度,同时保持其优良的力学性能。相比于传统的低温离子交换法,二次强化工艺在提高玻璃性能的同时,避免了可能导致玻璃变形和表面缺陷的高温处理过程。**【结论】**通过在玻璃料方中添加Li_2O的二次强化工艺制备的锂铝硅盖板玻璃具有较大的离子交换深度,同时该玻璃的抗冲击强度等力学性能得到了显著增强。该玻璃在航空航天领域、交通领域、电子产品及清洁能源等领域具有广泛的应用前景。

关键词:盖板玻璃;化学强化方法;离子扩散;低温离子交换法;二次强化工艺;Li_2O添加剂
中图分类号:U465;TQ171.73 **文献标志码:**A

Effect of Li_2O on ion exchange depth and mechanical properties of cover glass

ZHANG Xiaohui
(Caihong Group (Shaoyang) Special Glass Co., Ltd., Shaoyang 422000, China)

Abstract: [**Purposes**] This paper aims to enhance the ion exchange depth and mechanical properties of the cover glass by selecting $KNO_3/NaNO_3$ as molten salt. [**Methods**] Aluminum-silicon cover glass was chemically strengthened by a low-temperature ion exchange method. Li_2O was added to the glass formula for secondary strengthening of the glass. [**Findings**] The ion exchange depth of the glass can be significantly improved by adding Li_2O to the glass formula while maintaining its excellent mechanical properties. Compared with the traditional low-temperature ion exchange method, secondary strengthening method not only improves glass performance but also avoids the high-temperature processes that may cause glass deformation and surface defects. [**Conclusions**] The lithium-aluminum-silicon cover glass prepared by adding Li_2O for secondary strengthening demonstrates high impact resistance and other mechanical properties, showing a wide range of application prospects in the fields of aerospace, transportation, electronic products, and clean energy.

Key words: cover glass; chemical strengthening method; ion diffusion; low-temperature ion exchange method; secondary strengthening process; Li_2O additive

Corresponding author: ZHANG Xiaohui (1977—) (ORCID: 0009-0008-7546-9758), male, senior engineer, research interest: silicate ultra-thin cover glass production process research. E-mail: zxh6121160@126.com

收稿日期:2024-08-05;**修回日期:**2024-09-03;**接受日期:**2024-09-04
通信作者:张晓辉(1977—)(ORCID:0009-0008-7546-9758),男,高级工程师,主要从事硅酸盐超薄盖板玻璃生产工艺方面的研究。E-mail:zxh6121160@126.com

0　引言

随着科学技术发展，新型的玻璃强化方法，如物理强化和化学强化[1-4]，被广泛研究。物理强化是先将玻璃加热至软化点附近，再用空气吹冷。此时，玻璃表面与内部在冷却的过程中产生收缩差，进而表层处产生压应力。物理强化的本质是利用温度梯度来产生应力[5-6]。化学强化是通过改变玻璃的表面组成，使其表面形成压应力层。化学强化的本质是利用玻璃化学组成的改变或交换离子的浓度梯度来产生应力[7-8]。此外，化学强化与物理强化在玻璃中产生的应力分布不同。化学强化玻璃表层有很大的压应力，且压应力层厚度较小，而与其形成相平衡的内层的张应力却很小。因此，化学强化玻璃在内部张应力层被破坏时具有较强的安全性[9-11]，不会像物理强化玻璃那样碎成小片。因此，采用化学强化的方法可以有效增强盖板玻璃的力学性能及实用性。

在化学强化中，离子交换法具有方法简单、不损坏玻璃表面、不变形等特点[12-13]。通常，升高温度可以有效增大离子交换速率，增加交换深度。然而，大量的研究表明，过高的交换温度和过长的保温时间会导致缺陷结构在玻璃内部产生，从而产生松弛现象和降低玻璃的力学性能[14-16]。MEN等[17]在425~500 ℃对盖板玻璃进行化学强化，强化时间由0.5 h逐渐增加到24 h。结果表明：① 在开始阶段，随着温度升高，玻璃的离子交换深度逐渐增大，在4 h时达到稳定；② 继续增加保温时间，玻璃的离子交换深度几乎无变化；③ 在475 ℃时，缺陷结构在玻璃内部逐渐产生，玻璃的维氏硬度也逐渐降低。因此，在低温下对玻璃进行化学强化是当下研究的重点[18]。ATILGAN等[19]在单一的KNO_3熔盐体系中研究了离子交换温度（380~440 ℃）、时间（1~12 h）对铝硅盖板玻璃的离子交换深度、表面应力、显微硬度、透过率及化学稳定性的影响。其研究结果表明：① 通过单一的KNO_3熔盐体系在400 ℃以下制备的玻璃具有较大的透过率；② 这种通过一次强化制备的玻璃的离子交换深度（depth of layer，DOL）仅为54 μm，同时压缩应力较小，这会影响玻璃的力学性能，造成玻璃的硬度及抗冲击强度难以满足实际应用需要[20-21]。

因此，为了解决铝硅盖板玻璃的离子交换深度小及力学性能较差的问题，本研究通过在玻璃料方中添加Li_2O来生产锂铝硅盖板玻璃，并进行二次强化。Li_2O的引入使得浓度差在玻璃内部产生，有利于碱金属向玻璃周边持续地交换和扩散，极大地增大了DOL和增强了相关力学性能。该方法制备的锂铝硅盖板玻璃具有良好的应用前景。

1　材料与试验

1.1　材料

锂铝硅盖板玻璃原片的厚度为0.65 mm。本研究在离子交换之前，采用MXF-2400型X射线荧光光谱仪和能谱仪（energy dispersive spectrometer，EDS）测定了锂铝硅盖板玻璃的主要组成，结果如表1所示。

表1　锂铝硅盖板玻璃主要成分的质量分数

Table 1　Mass faction of main compositions of lithium-aluminum-silicon cover glass　%

w（二氧化硅）	w（氧化铝）	w（碳酸钠）	w（碳酸钾）	w（氧化锂）
56.2	14.7	17.3	5.2	4.3

1.2　铝硅盖板玻璃的一次强化

本研究首先用去离子水洗净玻璃，以消除玻璃表面杂质对离子交换的影响；然后，将玻璃在电阻炉中预热30~45 min，同时升温速度被设为10 ℃/min以避免玻璃因温差而破裂，应低于盐浴温度的预热温度被设为250~350 ℃；最后，将样品放置在纯KNO_3熔盐炉中进行一次强化，强化时间为5~6 h，熔盐盐浴温度为410~425 ℃。

1.3　锂铝硅盖板玻璃的二次强化

本阶段的洗净和预热过程同于1.2小节。

在预热之后，本研究将样品放置在混合熔盐炉中进行一次强化，强化时间约为130 min，熔盐中KNO_3和$NaNO_3$的质量比约为16∶9，混合熔盐盐浴温度为380~410 ℃。该步骤主要目的是增大离子交换深度和提高表面强度，其交换路径为$K^+ \rightarrow Li^+$（主要）、$K^+ \rightarrow Na^+$及$Na^+ \rightarrow Li^+$。

在一次强化之后，本研究继续在250 ℃下进行热处理：首先，使一次强化层向玻璃内部至少移动

3 μm,以便为二次强化层提供空间;然后,将样品放置在$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐二次强化炉中进行二次强化,混合熔盐中KNO_3和$NaNO_3$的质量比约为19∶1,熔盐温度为390 ℃左右,强化时间约为50 min。该步骤主要目的是为了增大离子交换深度和提高表面强度,其交换路径为$K^+ \rightarrow Na^+$(主要)、$Na^+ \rightarrow Li^+$及$K^+ \rightarrow Li^+$。

在采用单一熔盐体系对铝硅盖板玻璃进行一次强化的过程中存在"一元离子交换",即Na^+数量减小,K^+数量增大,强化时间约为5~6 h。在采用混合熔盐体系对锂铝硅盖板玻璃进行二次强化的过程中存在约3 h的"二元离子交换",即首先Li^+数量减小,K^+数量增大,然后是Na^+数量减小,K^+数量增大。二次强化的时间更短、效率更高,且强化后的性能更优。两者的具体流程如图1所示。

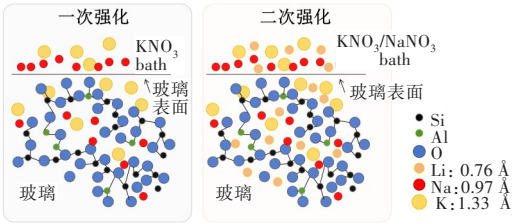


图1 一次强化和二次强化离子交换示意图

Fig. 1 Ion exchange between primary and secondary strengthening

1.4 表征方法

本研究采用散射光光弹性应力仪(scattered light photoelastic stress meter,SLP)对离子交换后玻璃在表面沿着垂直线进行扫描,测试K^+及Na^+在其深度方向上的浓度分布,从而得到玻璃的DOL。每个样品均测试5次。应力层深度测试误差为±5 μm,且测量数据的一致性较好。

本研究采用表面应力仪(surface stress meter,SSM)对玻璃在一次强化及二次强化后的压缩应力(compressive stress,CS)进行测试。在化学强化后,玻璃的表面与中心处于平衡状态。当玻璃经过强化工艺优化后,更大的压缩应力在玻璃表面产生。此时,玻璃中心的张应力也会同步增大以达到新的平衡状态,其数值变化与玻璃基材相关。每个样品测试3次。在本研究中,二次强化后的玻璃的应力是通过SSM和SLP测试而得的;一次强化后的玻璃内部的拉伸应力γ_I按式(1)计算。

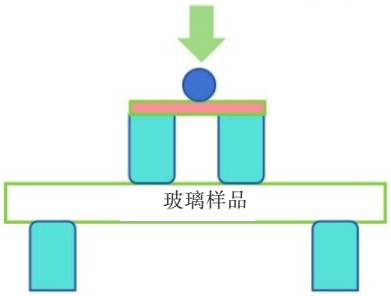
$$\gamma_I = h_{DOL} \times \gamma_{CS} = (h - 2h_{DOL}) \times \gamma_{CT} \tag{1}$$

式中:h为玻璃厚度;γ_{CT}为中心拉伸应力(central tensile stress,CT)的数值;h_{DOL}为DOL的数值;γ_{CS}为压缩应力的数值。

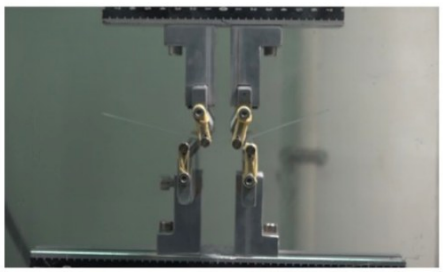
本研究使用力学弯曲强度测试仪,采用四点弯曲测试法(four point bending method, 4PB)和式(2)对四点弯曲强度S进行测试和计算。测试中每个样品都测试5次,四点弯曲测试法的原理和设备如图2所示。在试验中,玻璃下表面的边缘承受最大拉应力,这导致边缘微裂纹扩展并引发玻璃失效。因此,玻璃边缘的加工质量对四点弯曲强度数值具有显著影响。

$$S = \frac{3 \times 9.8Wl}{2bt^2} \tag{2}$$

式中:W为玻璃失效时的载荷,kN;l为有效载荷跨度,cm;b为测试样品的宽度,cm;t为测试样品的厚度,cm。



(a) 原理



(b) 设备

图2 四点弯曲测试法的原理和设备

Fig. 2 Principle and equipment for four point bending method

本研究使用维氏硬度计和静荷压入法测量样品的维氏硬度,其中载荷为0.98~1.96 N,持续时间为10~20 s,每个样品的最终测试值为3~6个测试点的平均值。

本研究采用落球试验法测试玻璃的抗冲击性能,如图3所示。在图3中,钢球距离玻璃上表面0.05 mm,钢球和底面均被设定为刚体属性,玻璃单元类型为C3D81。

本研究采用通用有限元分析软件进行建模，其中的MESH（无线多跳网络技术的统称）网格的大小为0.8 μm，层数为4，盖板玻璃样品的尺寸为141.70 mm×67.55 mm×0.65 mm。本研究采用32.5 g钢球，在九宫格的每处试验点均测试一次，测试时钢球的起砸高度为65 cm（相当于0.20 J），每次上调15 cm（相当于0.05 J），同时记录玻璃被破碎时的钢球高度/能量。

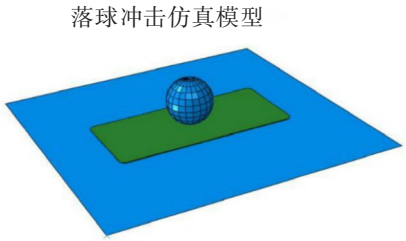


图3　落球冲击强度测试仿真模型

Fig. 3　Simulation model for falling ball impact strength test

本研究采用通用有限元方法分析钢球落球冲击过程，如图4所示。通常情况下，脆性材料的拉伸强度远低于其抗压强度和剪切强度，裂纹的生成和扩张均是由拉应力引起的。从图4可以看出，在接触圈的外部，径向应力为拉应力，且在边界$r=a$处达到最大值，亦即各处拉应力的最大值，其中的σ、τ分别为玻璃表面在冲击力F作用下受到的压应力和张压力。

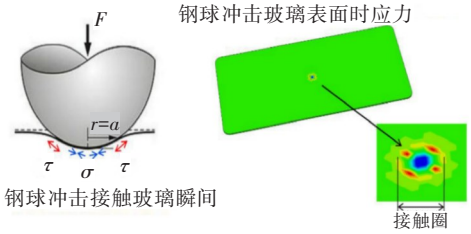


图4　落球冲击仿真图

Fig. 4　Simulation of falling ball impact

2　结果与讨论

2.1　离子交换深度测试

离子交换深度，即最终达到平衡的离子由玻璃表面扩散至玻璃内部的深度，是决定玻璃力学性能的关键因素。在铝硅盖板玻璃的一次强化过程中，纯KNO_3熔盐体系中的K^+离子与玻璃中的Na^+离子发生离子交换，K^+离子浓度从玻璃表面到内部逐渐降低。离子交换不均匀、不彻底的问题在单一成分的熔盐体系中常常存在，容易造成较低的离子交换深度，严重降低玻璃的力学性能。

为了解决铝硅盖板玻璃离子交换深度较小及离子交换不均匀、不彻底的问题，本研究通过在玻璃料方中添加Li_2O来制造锂铝硅盖板玻璃，采用混合熔盐体系进行二次强化，从而增大了玻璃的离子交换深度。

在第一次强化中，混合熔盐中KNO_3和$NaNO_3$的质量比约为16∶9。由于熔盐中K^+离子占比较高，所以先由K^+与较活跃的Li^+交换，此时强化深度得到增加。在K^+与Li^+交换到一定程度后，由于“阻塞效应”的存在，交换过程无法继续进行。同时，$NaNO_3$中的Na^+与玻璃中剩余的Li^+之间的交换最大程度地置换了玻璃中残余的Li^+，有效地增大了玻璃的离子交换深度。但半径较小的大量Na^+在这一过程中被引入玻璃内部，仍会对玻璃的硬度造成负面影响。此时，熔盐中的K^+与Na^+会进一步置换。由于K^+比Na^+具有更大半径，所以K^+与Na^+的置换会进一步增大玻璃表面硬度。但在上述过程中，K^+已经置换了玻璃中的Li^+，从而导致Li^+剩余量较低，且无法完全交换出玻璃中剩余的Na^+。因此，本研究需要采用第二次强化来继续置换Na^+。

为了置换玻璃中剩余的Na^+，本研究采用KNO_3和$NaNO_3$的质量比约为19∶1的熔盐体系对第二次强化进行研究。在第二次强化过程中，K^+与玻璃中的Na^+交换，从而大幅增强玻璃表面强度。同时，熔盐中少量的Na^+可以将玻璃中残余的Li^+置换出，以进一步提高玻璃的离子交换深度。相关结果如图5所示。

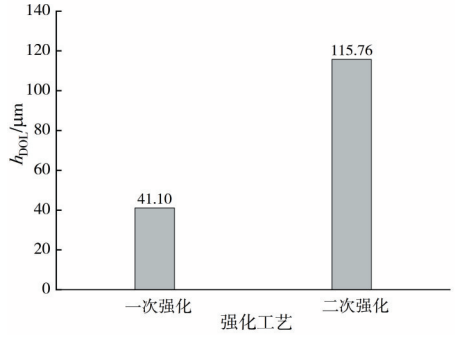


图5　不同强化工艺的离子交换深度

Fig. 5　DOL of different strengthening processes

从图5可以看出:采用纯KNO_3熔盐对铝硅盖板玻璃进行一次强化后,玻璃的离子交换深度仅为41.10 μm;经过$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐对锂铝硅盖板玻璃进行二次强化后,玻璃中仅存的K^+离子的交换深度达到115.76 μm,比纯KNO_3熔盐一次强化后的提升了181.65%。

更大的离子交换深度意味着K^+的交换更为彻底、有效,有利于减少玻璃内部的缺陷。同时,更平整的离子排列状态有效增强了玻璃的抗冲击性,同时增大了表面硬度。

2.2 压缩应力及弯曲强度测试

在化学强化中,离子尺寸的差异引起了晶格参数的不匹配,使得玻璃表面会形成一个压缩应力层。这个压缩应力层可以减少玻璃在弯曲时的表面拉伸,从而减少裂纹的扩展和传播,提高弯曲强度。不同强化工艺的玻璃表面压缩应力如图6所示。从图6可以看出:用纯KNO_3熔盐体系对玻璃进行一次强化后,由于玻璃中的离子交换不均匀、不彻底,玻璃的压缩应力为826 MPa;用$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐体系进行二次强化后的玻璃的压缩应力达到859 MPa,比纯KNO_3熔盐一次强化后的玻璃的压缩应力大33 MPa。该试验结果从侧面证明:对于用$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐体系进行二次强化后的玻璃,由于玻璃中存在的Li^+被K^+、Na^+全部置换,以及之后的Na^+被足量的K^+置换,此时玻璃中仅存离子半径较大的K^+,故此时的交换比较均匀、充分。所以,二次强化法能够有效增强玻璃表面压缩应力层,进而显著增强玻璃的力学性能。

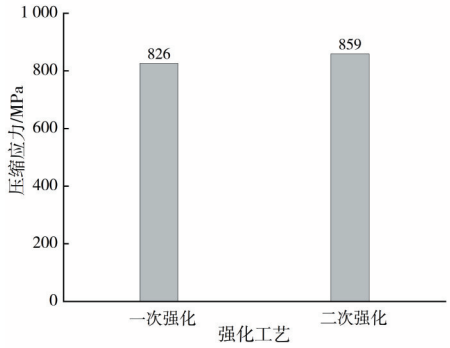


图6 不同强化工艺的玻璃表面压缩应力

Fig. 6 Compressive stress on glass surface of different strengthening processes

玻璃的弯曲强度是评估玻璃材料在实际应用中是否能够承受弯曲负荷的关键参数。业界通过弯曲强度测试来确定材料的强度极限和安全性。随着离子交换深度增大,玻璃中残存的应力分布更均匀,从而使得玻璃的弯曲强度也得到提高。本研究采用4PB法测试了通过不同强化工艺得到的玻璃的弯曲强度,结果如图7所示。通过纯KNO_3熔盐体系进行一次强化得到的铝硅盖板玻璃的弯曲强度为625 MPa;在选用$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐体系对锂铝硅盖板玻璃进行二次强化后,玻璃弯曲强度为876 MPa,比一次强化工艺的提升了40.16%。原因在于:二次强化均匀、充分地置换出玻璃中其余的碱金属离子,促进了离子的交换与扩散过程,使玻璃表面残存应力层变得更加均匀,从而有效解决了玻璃压缩应力及弯曲强度较小的问题。

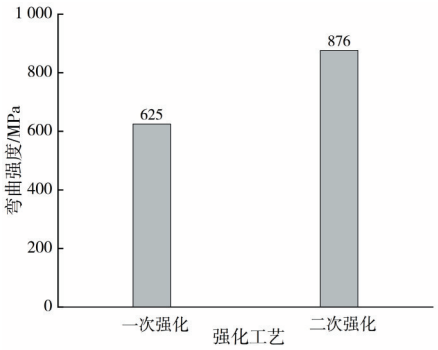


图7 不同强化工艺的玻璃弯曲强度测试结果

Fig. 7 Bending strength test results of different strengthening processes

2.3 抗冲击及表面硬度测试

本研究对二次强化后的玻璃进行落球测试,结果如图8所示。经纯KNO_3熔盐体系进行一次强化后的铝硅玻璃的抗冲击落球动能仅为0.10 J,而经过$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐体系进行二次强化后

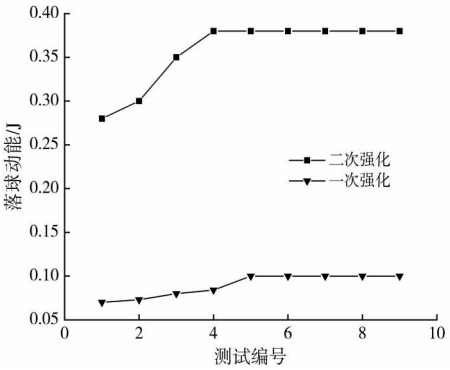


图8 落球测试

Fig. 8 Falling ball test

的锂铝硅玻璃的抗冲击落球动能达到0.38 J，抗冲击高度可达110 cm。该结果均远超最低要求。

玻璃表面硬度，即材料抵抗变形、压痕或划痕的能力，是衡量玻璃软硬程度的重要力学指标。经纯KNO_3熔盐体系进行一次强化后的玻璃的维氏硬度和经$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐体系进行二次强化后的玻璃的维氏硬度分别为57.86、61.78 MPa，如图9所示。其中，后者在数值上比前者提升了6.77%，意味着二次强化后的玻璃具有更强的耐刮划性能。

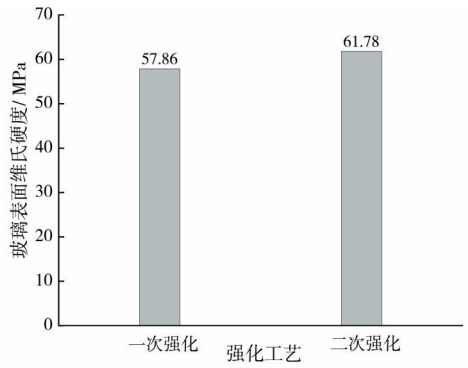


图9　不同强化工艺的玻璃表面硬度

Fig. 9　Glass surface hardness of different strengthening processes

3　结论

1）经过二次强化后，锂铝硅玻璃的离子交换深度从41.10 μm提升到115.76 μm，提高了181.65%。由于离子交换深度增大，玻璃中残存的应力分布变得更均匀，玻璃表面压缩应力达到859 MPa。该玻璃表面压缩应力比经纯KNO_3熔盐一次强化后的玻璃的表面压缩应力（826 MPa）增大了33 MPa，此时玻璃的力学性能得到增强。经二次强化后的玻璃的弯曲强度（876 MPa）远大于经过一次强化后的弯曲强度（625 MPa），有效提升了玻璃的强度极限和安全性。

2）采用$KNO_3/NaNO_3$混合熔盐体系进行二次强化后的玻璃的抗冲击性能为0.38 J，优于采用纯KNO_3熔盐体系进行一次强化的玻璃的抗冲击性能（0.10 J）。

3）经过二次强化后，玻璃表面硬度由一次强化后的57.86 MPa提升到61.78 MPa。这说明经二次强化后的玻璃具有更强的抵抗变形、压痕或划痕的能力。同时，玻璃的实际应用领域也将被大大拓宽。

［参考文献］

［1］　唐昆，乐江南，胡永乐，等. 非球面磷酸盐玻璃镜片精密热压仿真与试验［J］. 长沙理工大学学报（自然科学版），2022，19（4）：19-31. DOI：10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.003.
TANG Kun，YUE Jiangnan，HU Yongle，et al. Simulation and experiment of precision hot pressing of aspheric phosphate glass lenses［J］. Journal of Changsha University of Science & Technology（Natural Science），2022，19（4）：19-31. DOI：10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.003.

［2］　成钢，唐昆，刘冠中，等. 聚合物微针阵列热压印成型仿真与试验研究［J］. 长沙理工大学学报（自然科学版），2024，21（2）：68-76. DOI：10.19951/j.cnki.1672-9331.20221209001.
CHENG Gang，TANG Kun，LIU Guanzhong，et al. Simulation and experimental research on the hot embossing of polymer microneedle arrays［J］. Journal of Changsha University of Science & Technology（Natural Science），2024，21（2）：68-76. DOI：10.19951/j.cnki.1672-9331.20221209001.

［3］　毛静怡，袁健，郭震侨. 通过化学强化提高超薄柔性玻璃的弯曲性能［J］. 国际应用玻璃科学杂志，2024，15（3）：267-275. DOI：10.1111/ijag.16659.
MAO Jingyi，YUAN Jian，GUO Zhenqiao，et al. Enhancing bending performance of ultrathin flexible glass through chemical strengthening［J］. International Journal of Applied Glass Science，2024，15（3）：267-275. DOI：10.1111/ijag.16659.

［4］　LI X C，LI D，ZHANG S F，et al. Effect of Li^+/Na^+ exchange on mechanical behavior and biological activity of lithium disilicate glass-ceramic［J］. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials，2022，126：105036. DOI：10.1016/j. jmbbm. 2021. 105036.

［5］　陈福. 玻璃表面化学增强技术［J］. 玻璃，2019，46（6）：10-14. DOI：10.3969/j.issn.1003-1987.2019.06.002.
CHEN Fu. The chemical strengthening technology of glass surface［J］. Glass，2019，46（6）：10-14. DOI：10.3969/j.issn.1003-1987.2019.06.002.

［6］　LI X C，MENG M，LI D，et al. Strengthening and toughening of a multi-component lithium disilicate glass-ceramic by ion-exchange［J］. Journal of the European Ceramic Society，2020，40（13）：4635-4646. DOI：10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.075.

［7］　MUHAMMAD Z S，WANG Z，SUO T，et al. Dynamic failure of un-strengthened aluminosilicate glass. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2019，104：

102325. DOI:10.1016/j.tafmec.2019.102325.

[8] 李超.玻璃强化及热加工技术[M].北京:化学工业出版社,2013,87:115-135.
LI Chao. Glass strengthening and hot working technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013, 87: 115-135.

[9] JIANG L B, WANG Y, MOHAGHEGHIAN I, et al. Subcritical crack growth and lifetime prediction of chemically strengthened aluminosilicate glass. Materials & Design, 2017, 122: 128-135. DOI:10.1016/j.matdes.2017.03.020.

[10] RAGOEN C, MARPLE M A T, SEN S, et al. Na^+/K^+ ion exchange in silicate glasses: results from ^{17}O 3QMAS NMR [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 475: 190-194. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.09.003.

[11] 和阿雷.高铝硅酸盐玻璃化学强化研究[D].杭州:浙江大学,2016.
HE Alei. Study on chemical strengthening of high aluminosilicate glass [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[12] 田英良,李俊杰,宫汝华,等.碱铝硅酸盐玻璃化学强化关键影响因素概述[J].玻璃搪瓷与眼镜,2020,48(2):26-28,32. DOI:10.13588/j.cnki.g.e.2096-7608.2020.02.007.
TIAN Yingliang, LI Junjie, GONG Ruhua, et al. Overview of principal factors influencing chemical strengthening for alkali aluminosilicate glass[J]. Glass Enamel & Ophthalmic Optics, 2020, 48(2): 26-28, 32. DOI:10.13588/j.cnki.g.e.2096-7608.2020. 02.007.

[13] GUO Y L, LIU C, WANG J, et al. Effects of alkali oxides and ion-exchange on the structure of zinc-alumino-silicate glasses and glass-ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42(2): 576-588. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.016.

[14] ZHANG L Y, GUO X J. Thermal history and its implications: a case study for ion exchange[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2020, 103(7): 3971-3977. DOI: 10.1111/jace.17027.

[15] 闫建华,段正康,章泽成,等.玻璃化学强化用硝酸钾盐浴失活原因分析[J].硅酸盐通报,2015,34(2):438-443. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2015.02.022.
YAN Jianhua, DUAN Zhengkang, ZHANG Zecheng, et al. Analysis on the causes of the deactivation of KNO_3 molten salt baths used for chemical strengthening glass [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(2): 438-443. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2015.02.022.

[16] 姜良宝,厉蕾,张官理,等.化学强化铝硅酸盐玻璃研究进展[J].材料工程,2014,42(10):106-112.DOI:10.11868/j.issn.1001-4381.2014.10.019.
JIANG Liangbao, LI Lei, ZHANG Guanli, et al. Progress in research on chemical strengthened aluminosilicate glass [J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(10): 106-112. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.10.019.

[17] MEN T J, CHAI Z G, LI X C, et al. Improving early running-in wear characteristics for dental lithium disilicate glass-ceramics by ion-exchange[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2022, 126: 105037. DOI: 10.1016/j. jmbbm. 2021.105037.

[18] LI X C, MENG M, LI D, et al. Strong time-dependence for strengthening a lithium disilicate parent glass and the corresponding glass-ceramic by Li^+/Na^+ exchange [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2019, 100: 103394. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.103394.

[19] ATILGAN S, ÖZBEN N, SÖKMEN İ, et al. Effect of surface cleaning prior to chemical strengthening process of glass [J]. International Journal of Applied Glass Science, 2020, 11(4): 720-729. DOI: 10.1111/ijag.15479.

[20] 王明忠,梁新辉,宋占财,等.熔盐配比对锂铝硅玻璃化学强化性能的影响[J].玻璃搪瓷与眼镜,2020,48(6):8-12. DOI: 10.13588/j. cnki. g. e. 2096-7608.2020.06.002.
WANG Mingzhong, LIANG Xinhui, SONG Zhancai, et al. Effect of the ratio of molten salts on the chemically tempered performance of lithium aluminosilicate glasses [J]. Glass Enamel & Ophthalmic Optics, 2020, 48(6): 8-12. DOI: 10. 13588/j. cnki. g. e. 2096-7608.2020.06.002.

[21] 张燕红,徐龙,方俊杰.粗集料棱角性对水泥稳定碎石强度的影响[J].交通科学与工程,2022,38(1):15-20,54.DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u. 2022.01.005.
ZHANG Yanhong, XU Long, FANG Junjie. Influence of coarse aggregate angularity on strength characteristics of cement stabilized macadam [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(1): 15-20, 54. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.005.

(责任编辑:彭三军;校对:刘平)