

玻璃熔窑全氧燃烧技术及其耐火材料的研究进展*

陈国平, 李 慧, 吕承珍, 唐宝军

(陕西科技大学材料科学与工程学院, 西安 710021)

摘要 阐述了玻璃熔窑全氧燃烧技术的机理、发展历程、全氧燃烧应用的优点以及应用过程中存在的一些问题和解决方法。分析了影响全氧燃烧玻璃熔窑的几个因素以及全氧燃烧对耐火材料的新需求, 并对全氧燃烧的发展趋势进行了展望。玻璃熔窑全氧燃烧技术对于治理环境、减少大气污染、降低室温效应等能起到积极作用。

关键词 全氧燃烧 耐火材料 NO_x 碱蒸发 环境保护

Research Progress in Oxy-fuel Combustion Technology and Refractory for Glass Melting Furnace

CHEN Guoping, LI Hui, LU Chengzheng, TANG Baojun

(School of Material & Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021)

Abstract This paper introduces the mechanism, evolution and advantages of oxy-fuel combustion in glass melting furnace and some problems and solutions in the application process. It discusses the several influencing factors of oxy-fuel combustion for the glass melting furnace and its new demands on refractories, and it forecasts the whole trend of the development of oxy-fuel combustion. The technology plays a positive role in the treatment of the environment, reducing air pollution and depressing the greenhouse effect.

Key words oxy-fuel combustion, refractories, NO_x, alkali vaporization, environmental protection

玻璃熔窑的全氧燃烧就是将传统的空气-燃料燃烧系统改为氧气-燃料燃烧系统。全氧燃烧的产物主要是 CO₂、H₂O, 燃烧产物数量可大大减少。表 1^[1]分析了空气助燃和氧气助燃的燃烧结果。

表 1 空气助燃和氧气助燃的燃烧结果分析(3t/h 重油)

Table 1 Analysis of the results about air-assisted fuel combustion and oxygen-assisted fuel combustion (3t/h heavy oil)

助燃方式	烟气成分分析 / %					烟气体量 (m ³ /h)	烟气出口温度 / °C
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	O ₂	N ₂		
空气助燃	13.15	15.32	0.18	2.78	68.56	34356	450
氧气助燃	46.20	52.97	0.79	0.00	0.05	8056	1200

以前,玻璃熔窑一直采用空气作为助燃介质。而采用空气助燃是导致高能耗、高污染和温室效应的重要因素。由于空气中只有 21% 的氧气参与助燃, 78% 的氮气不仅不参与燃烧, 还携带大量的热量排入大气。通过长期反复的试验研究认为, 采用纯度大于等于 85% 的氧气作为助燃介质, 对于节约能源, 改善环境效果十分显著, 能耗可降低 12.5%~22%, 未来可望降低 30% 以上, 废气排放量减少 60% 以上, 废气中 NO_x 可下降 80%~90%, 烟尘也可降低 50% 以上^[2]。

纯度大于等于 85% 的氧气参与燃烧的系统被称之为全氧燃烧。由于燃烧系统的改变, 引起玻璃熔窑结构的改变。全氧燃烧熔窑取消了蓄热室、小炉、换火系统, 如同单元窑(图 1)。采用全氧燃烧的熔窑无需“传统换火工艺”就能使玻璃熔化更加稳定, 达到比较理想的生产要求。

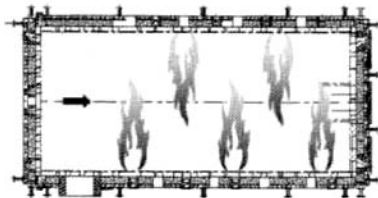


图 1 全氧燃烧玻璃熔窑示意图

Fig.1 Sketch map of oxy-fuel combustion glass furnace

1 全氧燃烧技术

1.1 发展历程

从 20 世纪 70 年代起, 熔块行业就率先采用全氧燃烧。同时一些较小的特种玻璃窑也开始采用全氧燃烧技术。进入 20 世纪 90 年代, 由于考虑到燃料成本和环境保护等因素, 全氧燃烧技术的研究开发与应用在国外得到广泛重视。一些政府的规定推动了全氧燃烧技术的发展和实施。在美国, 随着对经济可行性的研究和熔窑结构设计的优化, 全氧燃烧技

* 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAF02A26)

陈国平:男,1963年生,副教授,研究方向:热工玻璃窑炉设计及新玻璃材料 E-mail:chengp@sust.edu.cn

术开始应用于大规模玻璃生产^[4]。迄今为止,在全世界范围内,已经有 200 多座玻璃熔窑进行了从空气助燃到全氧燃烧的转变^[9],对 NO_x 和颗粒的排放已经有了很大的限制。

目前,在全球范围内,氧-煤气、氧-重油、氧-天然气燃烧技术正用于电视显像管、玻璃容器、特种玻璃、玻璃纤维和浮法玻璃等玻璃品种的熔化。但是,大型全氧玻璃熔窑的运营也出现了明显的问题,全氧技术的使用使碓顶硅砖的侵蚀加快,实验表明,主要是由于碱蒸发对碓顶和熔窑上部结构的侵蚀。这促进了对耐火材料的侵蚀进行一系列的研究^[9],使耐火材料也有了长足的发展。

1.2 全氧燃烧优点

(1) 节能减排,保护环境

全氧燃烧技术能减少废气中的 NO_x 含量,由于 N₂ 在燃烧系统中基本不存在,它是玻璃工业控制 NO_x 排放的最佳技术途径。据文献[7]报道,每吨玻璃全氧燃烧使 NO_x 的排放由 2.7~4.5kg 减少到 0.25~0.7kg,减少达 70% 以上。熔窑产生的烟气排放量从 34356m³/h 降到 8056m³/h,废气比空气助燃系统的烟尘排放量降低 70%~80%;粉尘排放量低至 150~250 mg/m³,比空气助燃系统降低 70%~80%。

(2) 提高玻璃质量和产量

由于全氧燃烧火焰传热能力大幅提高,使玻璃液深层得到加热,池底部玻璃液温度升高,加上玻璃液和大量水汽反应,OH⁻增加,粘度降低,有利于玻璃液中气泡的排除、澄清和均化。同时全氧燃烧提高了玻璃液面的温度,烟气中水量也增加,可加速熔化过程。与空气辅助燃烧相比,在熔化相同玻璃质量的前提下,玻璃液能吸收更多的热量,使玻璃产量得到提高。

(3) 减少初期建设投资

全氧燃烧熔窑结构近似于单元窑,且比单元窑还要简单,又无金属换热器及小炉、蓄热室。窑体呈一个熔化部单体结构,占地小,建窑投资费用低。同时,全氧燃烧窑体结构简单,故维修量减少。据文献[8]报道,全氧燃烧可节省建窑投资达 40% 之多。即使加上制氧设备的成本,初期建设投资也有所降低。

1.3 全氧燃烧技术在应用中存在的主要问题

现在国内玻璃生产企业主要关注的问题在于如何获得全氧燃烧可靠的成套技术、工程的投资规模及运营成本等。技术的可靠性和运营的经济性问题有待于按具体工程项目进行更深入切实的可行性研究^[9]。近 20 年来,全氧燃烧玻璃熔窑已成为玻璃行业的最佳选择,越来越多的全氧燃烧熔窑替代了空气蓄热式或换热式熔窑。然而,决定采用全氧燃烧熔窑主要还是受一些重要变化的影响,如环保法规方面的新变化和高质量、生产能力等。

20 世纪 90 年代中后期,欧美各国不断传出有关全氧燃烧熔窑的燃料、电力、氧气需求和成本以及基建投资方面的利好信息。尽管如此,大多数情况下,国内决定不采用全氧燃烧技术的原因通常是担心某些风险。这些风险不能够用现有的信息或经验来解决,通常与缺乏玻璃熔化经验有关,或担心耐火材料侵蚀对熔窑寿命或玻璃质量的影响。

1.4 全氧燃烧技术的发展趋势

目前全世界大约有 200 座玻璃熔窑采用了全氧燃烧技术,10 座浮法玻璃熔窑采用了该技术^[9]。基于全氧燃烧的许多优点以及我国浮法玻璃熔窑主要使用高品质燃料的有利因素,可以预见全氧燃烧技术以后将普遍应用于电子玻璃和玻纤等熔窑中^[11,12],而且随着技术的成熟,该技术将会应用到浮法玻璃熔窑中。以后全氧燃烧技术的应用将更加灵活^[13],如全氧燃烧器的变化,包括碓定加热、池底加热等;电助熔也将成为一种发展趋势。

2 影响全氧燃烧熔窑的几个因素

2.1 氧源的选择

氧源的选择一般有 3 种:(1)真空变压吸附法(VPSA)。其利用耦合分子筛分离 O₂ 和 N₂,多采用双床式,轮换操作;结构紧凑简单,设备运行可靠,操作简便经济,节能效果显著;可安装在生产现场,制氧成本低,产量可调性好。(2)低温氧气分离法(ICO)。生产纯度达 98% 的低压 O₂,还可同时生产 N₂。噪声低,安全性好。系统较复杂,维护困难。用氧量小时成本高,用氧量大时成本可下降。(3)液氧。它能供应纯度达 99.5% 的高压 O₂,生产费用高,每吨液氧可产生 700m³ 的 O₂。

氧源对全氧燃烧玻璃熔窑的影响主要是氧气的纯度和它的经济效益。现在玻璃熔窑大多采用真空变压吸附法进行现场制氧。

2.2 氧枪的选择

氧喷枪是全氧燃烧窑炉的关键设备之一,它起着雾化和燃烧的双重作用。在选择氧喷枪时,通行的是两段燃烧法。所谓两段燃烧法即分阶段供氧、可延缓燃烧、增大火焰覆盖面、提高火焰亮度,抑制 NO_x 形成。另外,含高浓度碱蒸气会冷凝在氧枪上,产生强烈腐蚀作用。故氧枪的材质必须耐碱性好。氧枪的选择对玻璃熔窑的火焰状况、湿度分布、传热效果、耐火材料的寿命长短都有很大的影响。

2.3 氧枪的布置

燃料与氧气的混合燃烧,由于没有大量 N₂ 参与,所以混合快、燃烧反应速度快。喷出火焰的特征除内焰与外焰外,在通常的可见火焰(明焰)前端还有一段不可见的火焰(暗焰)。暗焰内纯粹是燃烧产物,约占总火焰全长的 30%~35%。

对氧枪的布置除一般要求(如符合稳定均匀性)外,特别要优化空间气流流型,也就是要做到:(1)延长烟气停留在火焰空间的时间,停留时间的长短与空间大小、窑顶结构、排烟口大小和排烟速度等因素有关;(2)减轻对窑顶和胸墙的冲蚀;(3)不引起局部过热,尤其是对料粉的局部过热,会加强粉料逸出和挥发;(4)氧枪在窑上可作错位排列或顺排,窑体死角处要增设补充氧枪。氧枪的布置对配合料的损失、耐火材料的侵蚀、玻璃的质量都有一定的影响。

2.4 其它影响因素

(1) 碱蒸发

由于全氧燃烧玻璃熔窑内气氛变化较大,碱蒸气(NaOH)浓度增加数倍,造成碓顶硅砖侵蚀加剧^[14](如图 2),

从而大大缩短了熔窑的使用寿命。

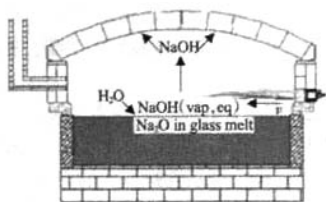


图2 碱挥发增加对耐火材料的侵蚀和粉尘的排放

Fig.2 Alkali vaporization increases refractories corrosion and particulate emissions

式(1)描述了耐火材料表面被侵蚀的化学反应:



式中:MOH 与耐火物中的 SiO₂ 反应产生液态的 M₂O 和 SiO₂。

Peter M. Walsh 等^[19]通过分析试验模型,利用激光诱导击穿光谱技术^[16,17,20]测量废气中的气体成分,得出 3 个影响碱挥发的因素:①随熔化温度的升高而增加^[21];②随着熔化物上方气流流速的增加而增加;③随着水蒸气气体分压的增加而增加。从反应式(2)^[22]可知,碱挥发很大程度上依赖于水蒸气的浓度。



为了解决碱挥发对碓顶耐火材料的侵蚀,并且减少大量蒸气运输到碓顶表面, Peter M. Walsh 等提出以下几点建议:①降低熔窑内 NaCl 浓度;②降低熔融体表面的温度;③提高熔窑的碓顶高度(图 3);④使用抗侵蚀的碓顶耐火物^[23];⑤融化物上方通入更高的氧气浓度。其中最简单和节约成本的方法是降低融化物上方的气流速度,或者在接近熔化料的位置增加氧气的浓度。

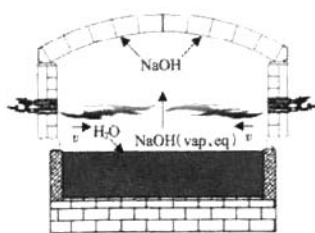


图3 高碓顶全氧玻璃熔窑

Fig.3 The oxy-fuel combustion glass furnace of taller crown

(2) SO₂ 和 NO 的形成

尽管全氧燃烧技术可在很大程度上减少 NO 和 SO₂ 的排放,但是由于渗透空气中 N₂ 的存在以及损失的 Na₂SO₄ 配合料,使废气中的 NO 和 SO₂ 成分增多,从而增加了全氧燃烧玻璃熔窑生产过程中对大气的污染。式(3)表示 Na₂SO₄ 与 H₂O 反应生成 SO₂。



分析发现,NO 的产生是由空气渗透引起的,要减少 NO 的排放,就要减少空气渗透,这可以通过提高对窑炉压力差的控制,或者堵住漏斗,以防止空气进入;要减少 SO₂ 排放,

需要增加 O₂ 浓度来解决。

3 全氧燃烧熔窑对耐火材料的新需求

3.1 全氧燃烧对耐火材料的影响

全氧燃烧对耐火材料的影响包括以下几个因素:

(1)全氧燃烧较空气燃烧产生的水蒸气高 3.5 倍,水蒸气被吸附在耐火材料的表面,加速了耐火材料的侵蚀反应。

(2)全氧玻璃熔窑气体中碱蒸气浓度高,加速侵蚀反应。而且玻璃品种的不同,挥发物也有所差别。以下列出不同玻璃品种的挥发物。钠钙玻璃的:挥发物为 NaOH、KOH、Na₂SO₄、K₂SO₄、Na₂O、K₂O、NaH、KH 等;TV 用彩色玻璃的挥发物为: PbO、KOH、Pb、NaOH、Na、K、Na₂O、K₂O、NaH、SiO₂ 等;硼硅酸盐玻璃的挥发物为: HBO₂、NaBO₂、KBO₂、BO₂、NaOH、Na、Na₂O、HBO₂、KOH 等。

(3)窑顶内表面温度比空气助燃时降低了 25~50℃,且气流冲量较大,所以窑顶硅砖容易侵蚀。硅砖是一种廉价的耐火材料,但是对碱侵蚀最为敏感的材料。硅砖能满足常规玻璃窑砌筑一般碓顶的要求,但在全氧窑中寿命由 5~10 年锐减为 2~3 年,成为窑炉中的最薄弱环节。

3.2 耐火材料的选择及研究进展

为了满足全氧燃烧熔窑碓顶耐火材料使用的要求,需要寻找替代材料或改进硅砖的性能。日本旭硝子公司^[24]通过模拟试验得出,比较适用于全氧燃烧的耐火材料为 αβ-刚玉砖和电熔锆刚玉砖,同时指出刚玉砖在不同气氛条件下的稳定相:玻璃成分中 Na₂O 含量在 24% 以下时,α-刚玉相为稳定相;在 26% 以上时,β-刚玉相为稳定相。

同时英国科学家认为,硅砖的优点是价廉体轻,如果在组织结构和玻璃相组成上给予改进,就可以继续应用。经多次试验后得到了一种改良硅砖,其结构致密,玻璃相为 CaO·SiO₂,熔融温度达 1520℃,能够耐高浓碱蒸气的侵蚀。美国倾向于用电熔氧化铝砖(α-βAl₂O₃),认为采用电熔锆刚玉砖可能会有碓滴下落。如果因 α-βAl₂O₃ 砖价格昂贵难以承担时,则必须从点到桥墙一段采用 α-βAl₂O₃ 砖。表 2 列出当前全氧燃烧条件下选用的耐火材料。

表 2 全氧燃烧条件下碓顶耐火材料

Table 2 The table of refractories crown on oxy-fuel combustion conditions

耐火材料	使用厚度 /mm
超功能硅砖	457
低钙硅砖	457
尖晶石结合刚玉砖	343
尖晶石砖	343
电熔 αβ-刚玉砖	356
电熔 αβ-刚玉砖	356
电熔 AZS 锆刚玉砖	356

4 展望

全氧燃烧熔窑替代蓄热式或换热式玻璃熔窑已被行业

认可。现在每年砌筑的全氧燃烧熔窑越来越多。生产技术的提高使氧气成本进一步降低。同时关注耐火材料及全氧熔窑的结构等有关因素会使全氧燃烧熔窑的寿命更长^[2],并能够进一步提高玻璃质量,减轻环境污染。近几年来国内玻璃行业的长足发展逐渐形成了一些大的玻璃集团公司,在一地往往集中多座熔窑。从发展战略上考虑,建议可以先在一座熔窑上实施全氧燃烧技术,取得实效后再行推广。

全氧燃烧技术给玻璃工业所带来的显著优越性已越来越为人们所重视,而且随着环境保护呼声的日益高涨,同时为了满足节能降耗的要求,有必要降低 NO_x 固体颗粒等物质的排放量。现在全球已经建成百余座全氧燃烧玻璃熔窑,无论从经济效益还是从环保方面,全氧燃烧技术都体现了其重要性。

参考文献

- 1 经验,田英良,等.浅谈全氧燃烧技术在玻璃工业中的应用[J].工业加热,2005,6:32
- 2 徐嘉麟.玻璃熔窑的全氧燃烧[J].中国玻璃,2006,1:3
- 3 Tuson G B, Hidgon R D. 100% oxygen firing of regenerative melters[J]. Ceram Eng Sci Proc, 1992, 12(3-4):1
- 4 Moore R D, Brown J T. Conversion of a large container furnace from regenerative firing to direct oxy-fuel combustion[J]. Ceram Eng Sci Proc, 1992, 12:18
- 5 Kobayashi H, Tasca A. Oxy-fuel fired glass melting technology-experience, evolution and expectation [C]. Proceeding of 2003 Annual Meeting of ICG, Kyoto, Japan, 2003. 10
- 6 Boillet J, Varela J A. Corrosion of silica and mullite refractories used in glass furnaces under 100% oxy-firing process[J]. Ceram Eng Sci Proc, 1996, 17(2):180
- 7 孙承绪.全氧燃烧池窑中若干技术问题的讨论[J].玻璃与搪瓷,2002,30(1):47
- 8 叶鼎铨.玻璃窑炉的全氧燃烧技术[J].玻璃纤维,2002,3:8
- 9 徐嘉麟.再论玻璃熔窑的全氧燃烧 [J]. 玻璃与搪瓷, 2007,2:6
- 10 戴志良,华南珍.国外平板玻璃工业技术发展方向[J].建筑玻璃与工业玻璃,2004,4:8
- 11 张润平.浮法玻璃熔窑的节能措施[J].建材技术与应用, 2004,4:14
- 12 赵恩录,杨建,刘志付,等.玻璃熔窑全氧燃烧技术概况和技术发展趋势[J].玻璃,2005,6:3
- 13 吕雷,童树庭.玻璃窑炉中的燃烧新技术[J].工业炉,2005, 27(5):8
- 14 Nilson R H, Marin O, Analytical models for high-temperature corrosion of silica refractories in glass-melting furnaces [J]. Glass Sci Techn, 2003, 76(3):1
- 15 Peter M Walsh, John W Neufeld. Effect of furnace operating conditions on alkali vaporization batch carover, and the formation of SO₂, NO in an oxy-fuel fired container glass furnace [J]. Glass Techn: Eur J Glass Sci Techn, 2006, 47 (6):177
- 16 Beerkens R, Van Limpt J. Evaporation in industrial glass melt furnaces[J]. Ceram Eng Sci Proc, 2001, 74(9):245
- 17 Van Limpt J. Volatilisation in glass furnaces an experimental tool to predict emission of volatile species in industrial glass furnaces [C]. In ICG 2000-Glass in the new Millennium, Amsterdam, 2000
- 18 Wu K T, Kobayashi H. Three-dimensional modeling of alkali volatilization/crown corrosion in oxy-fired furnaces [C]. Annual Meeting of the American Ceramic Society, Indianapolis, India, 1996. 217
- 19 Rice S F, Allendorf M D. NaOH vapour in glass furnaces using excimer laser photofragmentation spectroscopy [J]. Glass Sci Techn, 2005, 78(2):45
- 20 Walsh P M, Moore R D. Na vapour and gas temperature measured in glass container furnaces [J]. Glass Res, 2000, 10(1):3
- 21 Matousek J. Chemical reactions taking place during vaporization from silicate melts [J]. Ceram Sikiaty, 1998, 42(2): 74
- 22 Gonzales R A, Brown J T, Weilacher R P, et al. A review of improved silica crown refractory and practices for oxy-fuel fired glass melters[J]. Ceram Eng Sci Proc, 2004, 25(1):33
- 23 城户信幸.玻璃熔窑全氧燃烧技术与耐火物[J].耐火材料[日],2007,59(1):13
- 24 郭永国.提高玻璃熔窑热效率的最近进展[J].玻璃与搪瓷(专刊),2007,1:13
- 25 金明芳,何峰,谢峻林,等.玻璃窑用全氧燃烧技术及燃烧器的研究进展[J].国外建材科技,2007,28(7):27
- 24 Kim J S, Lim K T, Jeong Y S. Solid State Commu, 2005, 135(1-2):21
- 25 Kim J S, Park Y H, Choi J C, et al. J Electrochem Solid-State Lett, 2005, 8(8):H65
- 26 Kim J S, et al. Appl Phys Lett, 2004, 85(17):3696
- 27 杨志平,刘玉峰,等.物理学报,2007,56:546
- 28 Wand Jilei. Chinese J Luminescence, 2006, 27(4):463
- 29 刘春波,张广波.无机化学学报,2006,22(3):503
- 30 孙中新.无机化学学报,2006,22(9):1595

(责任编辑 邓小军)

(上接第 21 页)

- 17 吴昊,等.发光学报,2006,27(2):201
- 18 王治龙,王育华.功能材料,2005,36(9):1328
- 19 Yang Ping, Yao Guangqing, Lin Jianhua. Opt Mater, 2004, 26(3):327
- 20 陈仙玲,等.华东理工大学学报(自然科学版),2006,32 (9):1063
- 21 孙晓园,张家骅,张霞,等.发光学报,2005, 26:404
- 22 Yang P, Yao G, Lin J. Opt Mater, 2004, 26:327
- 23 Kim J S, et al. Appl Phys Lett, 2004, 84(15):2931

(责任编辑 邓小军)

玻璃熔窑全氧燃烧技术及其耐火材料的研究进展

作者: [陈国平](#), [李慧](#), [吕承珍](#), [唐宝军](#), [CHEN Guoping](#), [LI Hui](#), [LU Chengzheng](#), [TANG Baojun](#)
作者单位: [陕西科技大学材料科学与工程学院, 西安, 710021](#)
刊名: [材料导报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [MATERIALS REVIEW](#)
年, 卷(期): 2008, 22(4)
被引用次数: 4次

参考文献(25条)

1. [经验;田英良 浅谈全氧燃烧技术在玻璃工业中的应用](#)[期刊论文]-[工业加热](#) 2005(06)
2. [徐嘉麟 玻璃熔窑的全氧燃烧](#) 2006(01)
3. [Tuson G B;Hidgon R D 100%oxygen firing of regenerative melters](#) 1992(3-4)
4. [Moore R D;Brown J T Conversion of a large container furnace from regenerative firing to direct oxy-fuel combustion](#) 1992
5. [Kobayashi H;Tasca A Oxy-fuel fired glass melting technology-experience, evolution and expectation](#) 2003
6. [Boillet J;Varela J A Corrosion of silica and mullite refractories used in glass furnaces under 100% oxy-firing process](#) 1996(02)
7. [孙承绪 全氧燃烧池窑中若干技术问题的讨论](#)[期刊论文]-[玻璃与搪瓷](#) 2002(01)
8. [叶鼎铨 玻璃窑炉的全氧燃烧技术](#)[期刊论文]-[玻璃纤维](#) 2002(03)
9. [徐嘉麟 再论玻璃熔窑的全氧燃烧](#) 2007(02)
10. [戴志良;华南珍 国外平板玻璃工业技术发展方向](#) 2004(04)
11. [张润平 浮法玻璃熔窑的节能措施](#)[期刊论文]-[建材技术与应用](#) 2004(04)
12. [赵恩录;杨建;刘志付 玻璃熔窑全氧燃烧技术概况和技术发展趋势](#)[期刊论文]-[玻璃](#) 2005(06)
13. [吕雷;董树庭 玻璃窑炉中的燃烧新技术](#)[期刊论文]-[工业炉](#) 2005(05)
14. [Nilson R H;Matin O Analytical models for high-temperature corrosion of silica refractories in glass-melting furnaces](#) 2003(03)
15. [Peter M Walsh;John W Neufeld Effect of furnace operating conditions on alkali vaporization batch carover, and the formation of SO₂, NO in an oxy-fuel fired container glass furnace](#) 2006(06)
16. [Beerkens R;Van Limpt J Evaporation in industrial glass melt furnaces](#) 2001(09)
17. [Van Limpt J Volatilisation in glass furnaces an experimental tool to predict emission of volatile species in industrial glass furnaces](#) 2000
18. [Wu K T;Kobayashi H Three-dimensional modeling of alkali volatilization/crown corrosion in oxy-fired furnaces](#) 1996
19. [Rice S F;Allendorf M D NaOH vapour in glass furnaces using excimer laser photofragmentation spectroscopy](#) 2005(02)
20. [Walsh P M;Moore R D Na vapour and gas temperature measured in glass container furnaces](#) 2000(01)
21. [Matousek J Chemical reactions taking place during vaporization from silicate melts](#) 1998(02)
22. [Gonzales R A;Brown J T;Weilacher R P A review of improved silica crown refractory and practices](#)

[for oxy-fuel fired glass melters](#) 2004(01)

23. [城户信幸](#) [玻璃熔窑全氧燃烧技术与耐火物](#) 2007(01)
24. [郭永国](#) [提高玻璃熔窑热效率的最近进展](#)[期刊论文]-[玻璃与搪瓷](#) 2007(01)
25. [金明芳](#); [何峰](#); [谢峻林](#) [玻璃窑用全氧燃烧技术及燃烧器的研究进展](#)[期刊论文]-[国外建材科技](#) 2007(07)

本文读者也读过(10条)

1. [陈国平](#). [李慧](#). [郭丹妮](#). [吕承珍](#). [唐宝军](#). [CHEN Guo-ping](#). [LI Hui](#). [GUO Dan-ni](#). [LV Cheng-zheng](#). [TANG Bao-jun](#) [玻璃熔窑全氧燃烧技术的最新研究进展](#)[期刊论文]-[工业加热](#)2008, 37(4)
2. [经验](#). [田英良](#). [孙诗兵](#). [武立云](#). [JING Yan](#). [TIAN Ying-liang](#). [SUN Shi-bing](#). [WU Li-yun](#) [浅谈全氧燃烧技术在玻璃工业中的应用](#)[期刊论文]-[工业加热](#)2005, 34(6)
3. [赵恩录](#). [杨健](#). [刘志付](#). [冯明良](#). [李波](#). [Zhao En-lu](#). [Yang Jian](#). [Liu Zhi-fu](#). [Feng Ming-liang](#). [Li Bo](#) [玻璃熔窑全氧燃烧技术概况和技术发展趋势](#)[期刊论文]-[玻璃](#)2005, 32(6)
4. [贺可军](#) [节能减排与玻璃全氧燃烧技术研究报告](#)[会议论文]-2009
5. [刘志付](#). [赵恩录](#). [张文玲](#). [陈福](#). [Liu Zhifu](#). [Zhao Enlu](#). [Zhang Wenling](#). [Chen Fu](#) [玻璃熔窑全氧燃烧技术的开发](#)[期刊论文]-[玻璃](#)2008, 35(2)
6. [张文玲](#). [刘志付](#). [赵恩录](#). [冯明良](#). [陈福](#). [Zhang Wen-ling](#). [Liu Zhi-fu](#). [Zhao En-Lu](#). [Feng Ming-liang](#). [Chen Fu](#) [玻璃熔窑全氧燃烧技术的开发](#)[期刊论文]-[玻璃](#)2007, 34(5)
7. [徐嘉麟](#). [XU Jia-lin](#) [玻璃熔窑的全氧燃烧](#)[期刊论文]-[国外建材科技](#)2008, 29(2)
8. [金明芳](#). [何峰](#). [谢峻林](#). [刘小青](#). [JIN Ming-fang](#). [HE Feng](#). [XIE Jun-ling](#). [LIU Xiao-qing](#) [玻璃窑用全氧燃烧技术及燃烧器的研究进展](#)[期刊论文]-[国外建材科技](#)2007, 28(5)
9. [徐嘉麟](#) [全氧燃烧技术在玻璃熔窑中的应用](#)[会议论文]-2009
10. [邓力](#). [徐美君](#) [玻璃熔窑全氧燃烧技术的应用与发展](#)[期刊论文]-[玻璃](#)2002, 29(5)

引证文献(5条)

1. [李会平](#) [全氧燃烧玻璃熔窑热工特性的简化计算分析](#)[期刊论文]-[建筑材料学报](#) 2010(6)
2. [李会平](#) [全氧燃烧玻璃熔窑热工特性的简化计算分析](#)[期刊论文]-[建筑材料学报](#) 2010(6)
3. [唐保军](#). [陈国平](#). [殷海荣](#) [高碓顶玻璃熔窑全氧燃烧火焰空间的三维数值模拟](#)[期刊论文]-[玻璃](#) 2009(6)
4. [李会平](#). [薛佳杰](#) [空气助燃与全氧燃烧玻璃熔窑热工特性的对比分析](#)[期刊论文]-[玻璃与搪瓷](#) 2009(6)
5. [陈国平](#). [唐保军](#). [殷海荣](#). [李慧](#). [章春香](#) [浅析全氧燃烧玻璃熔窑耐火材料配置](#)[期刊论文]-[材料导报](#) 2008(11)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cldb200804006.aspx