

纤维增强轻骨料混凝土耐高温性能及有限元分析

孙庆霞¹, 曹万智², 薛海儒³, 周茗如⁴, 苏 强¹

(1. 山东城市建设职业学院, 山东 济南 250014; 2. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730124;
3. 中铁十局, 山东 济南 250117; 4. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 通过试验研究了轻骨料混凝土的耐高温性能,并与普通混凝土做比较,从残余强度入手,分析高温下混凝土性能的变化规律和机理,并给出了建议的计算公式;用有限元方法对轻骨料混凝土耐高温性能进行分析。结果表明:①统计给出的高温后轻骨料混凝土残余强度曲线的公式与试验结果吻合良好。②全轻骨料混凝土耐高温最好,砂轻骨料混凝土次之,普通骨料混凝土最差。③高温后轻骨料混凝土颜色发生改变,质量发生损失。该结论为轻骨料混凝土在高温环境下的应用提供技术依据。

关键词: 轻骨料混凝土; 高温作用; 残余强度; 有限元分析

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3550(2011)07-0023-04

Resistance to high temperature performance and finite element analysis on fiber reinforced lightweight aggregate concrete

SUN Qing-xia¹, CAO Wan-zhi², XUE Hai-ru³, ZHOU Ming-ru⁴, SU Qiang¹

(1. Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan 250014, China;
2. School of Civil Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730124, China;
3. China Railway Tenth Group, Jinan 250117, China;
4. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Researched the high-temperature properties of lightweight aggregate concrete through experimental and compared with the ordinary concrete. starting from the residual strength to analysis of the changes in laws and mechanism about concrete under high temperature performance, and given the proposed formula for calculating and analysis on the high-temperature performance of the lightweight aggregate concrete using finite element method. The results show that: ①The lightweight aggregate concrete after high temperature residual strength curve formula which Statistics given are in good agreement with the experimental results. ②The best high temperature of all-lightweight aggregate concrete, followed by sand lightweight aggregate concrete, the worst of ordinary aggregate concrete. ③After high temperature the lightweight aggregate concrete have changed in color and lossed in quality. This conclusion provide technical basis for the application of lightweight aggregate concrete in the high-temperature environment.

Key words: lightweight aggregate concrete; high temperature effect; residual strength; finite element analysis

0 引言

轻骨料内部有大量的孔隙,不仅会使轻骨料混凝土质量减轻,导热系数减小,保温性能提高,而且还可改善骨料表面与水泥砂浆的界面黏结性能,并改善混凝土的物理力学变形协调能力,而被广泛用于工业与民用建筑的墙体及承重结构外,还可用于桥梁、电杆、烟囱、高温窑炉的耐火内衬以及制造船舶等特殊构筑物中。我国不少地区还应用陶粒混凝土于烟囱、高温窑炉的耐火内衬、水泥筒库等。如山西省采用浮石混凝土于烟囱内衬上。轻骨料混凝土具有较好的耐热性能,在热工设备或附属设施中的应用有着广阔前景。

文中通过试验对轻骨料混凝土在常温、200、400、600、700、800、900、1 000 ℃时的宏观进行研究和分析,用有限元方法对轻骨料混凝土耐高温性能进行分析。从而为正确评估和利用轻骨料混凝土的耐高温性以及为混凝土结构的防火设计和进一步研究提供科学依据。

收稿日期:2011-01-19

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(J09LE51)

1 原材料

粗骨料 陶粒和碎石。圆球型页岩陶粒由甘肃广厦公司生产,碎石由兰州当地供应,性能指标见表1。

细骨料 陶粒轻砂和普通河砂。球型陶粒破碎细骨料,属于粗砂, $M_x=3.6$, 表观密度 $\rho_{ap}=944\text{kg/m}^3$, 堆积密度 $\rho=529\text{kg/m}^3$, 1 h 吸水率 $\omega_a=42\%$, 河砂属于中砂 $M_x=2.7$, 表观密度 $\rho_{ap}=2\,653\text{kg/m}^3$, 堆积密度 $\rho=1\,519\text{kg/m}^3$, 吸水率 $\omega_a=1.4\%$ 。

水泥 兰州甘草水泥集团生产的42.5级水泥。各项性能符合GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》标准要求, 28 d 抗压强度为43.1 MPa。

粉煤灰 兰州热电公司排放的II级粉煤灰。

外加剂 山西黄河外加剂厂生产的UNF-1型高效减水剂,掺量0.5%,减水率12%。

聚丙烯纤维 兰州维尼纶厂生产的聚丙烯纤维,平均长度

表 1 粗骨料物理力学性能

| 骨料类型 | 堆积密度/(kg/m ³) | 表观密度/(kg/m ³) | 筒压强度/MPa | 1 h 吸水率/% | 软化系数 | 孔隙率/% | 最大粒径/mm |
|------|---------------------------|---------------------------|----------|-----------|------|-------|---------|
| 陶粒 | 721 | 1 301 | 3.3 | 9.60 | 0.9 | 45 | 19.0 |
| 碎石 | 1 510 | 2 673 | - | 0.61 | - | - | 26.5 |

6 mm 密度 1.08 g/cm³ 抗拉强度 610 MPa 弹性模量 4 700 MPa。
水:自来水。

因为轻骨料具有吸水特征,需要试验前 1 h 进行轻骨料的预实湿处理,制成饱和面干状态,备用。

2 配合比设计

轻骨料混凝土的施工顺序、养护方法与普通混凝土相同。

按 JG 51—2002《轻骨料混凝土技术规程》^[1]的要求,全轻混凝土采用松散体积法进行设计,结果见表 2。

拌合物性能及物理力学性能,见表 3。

表 2 混凝土配合比设计

| 编号 | 混凝土类型 | 普通水泥 | 陶粒 | 陶砂 | 石子 | 河砂 | 水 | 高效减水剂 | 粉煤灰 | 聚丙烯纤维 |
|----|-------|------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-------|
| PP | 普通混凝土 | 368 | - | - | 1 074 | 659 | 216 | 1.84 | 74 | 3 |
| QP | 全轻混凝土 | 464 | 505 | 348 | - | - | 227 | 2.32 | 93 | 3 |

表 3 拌合物性能、物理力学性能

| 编号 | 混凝土类型 | 砂率/% | 水胶比 | 坍落度/mm | 干表观密度/(kg/m ³) | | 抗压强度/MPa | |
|-----|-------|------|------|--------|----------------------------|------|----------|------|
| | | | | | 7 d | 28 d | 7 d | 28 d |
| PP1 | 普通混凝土 | 38 | 0.49 | 80 | 2 282 | 26.4 | 36.8 | |
| QP1 | 全轻混凝土 | 47 | 0.41 | 85 | 1 317 | 12.3 | 25.0 | |

为减少试块湿含量对试验结果的影响,养护结束后移至烘箱中,在 105 ℃下烘烤 12 h 后再将试块放入电阻炉中按设定的升温制度升温。为使试块达到受热均匀的效果,升温应缓慢进行,升温制度为 50 ℃/20 min,达到要求的温度后保持恒温 8 h,然后自然冷却到室温后按照国家标准 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》完成抗压试验,测其残余强度;用裂缝测宽仪测定高温后混凝土表面的最大裂缝并详细记录混凝土的表面特征。试样升温曲线如图 1 所示。

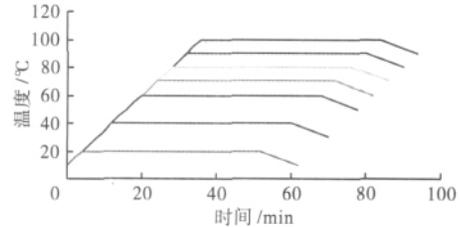


图 1 升温曲线

3 耐高温性能试验研究

试验结果如表 4、5 所示。

4 试验数据分析

4.1 高温后混凝土表观特征分析

由表 4 可以看出,400 ℃时两种混凝土表面都出现开裂,普通混凝土尽管强度与初始强度相比没有下降,但开裂最严重。600~700 ℃时也是普通混凝土开裂最严重。当温度达 800 ℃时,

普通混凝土残余强度比轻骨料混凝土要高,但最大裂缝宽度可达 0.64 mm,出现明显爆裂现象,而全轻混凝土最大裂缝宽度只有 0.10 mm,出现多条网状放射性裂纹。而且试块外观随着温度的升高都发生颜色的变化,且高温作用后由于孔隙中的水蒸发,毛细孔中水汽化,水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙脱水使得烧后试块质量都产生损失。

原因分析:300~400 ℃时,普通混凝土骨料开始膨胀,随着温度的升高,骨料膨胀和水泥收缩加剧,两者结合被破坏。另一方面水泥中的水分流失,湿度梯度大,有利于裂纹增长。温度达到 500 ℃以上后,硅酸盐类粗骨料出现晶体转化,并伴随有明显的热膨胀现象,初生的不连贯裂缝迅速扩展并连续起来,形成大裂缝,造成混凝土的宏观破坏。水泥石受拉,骨料受压,由此加剧了内裂缝的开展,这也是强度降低的主要原因。同时,水泥石与骨料之间的膨胀不同所引起的热应力,可在两者之间产生裂纹,并随温度的升高而发展。

表 4 高温后全轻混凝土表面现象

| 温度/℃ | 颜色变化 | | 表面现象 | | 最大裂宽/mm | | 烧后质量/g | |
|-------|---------|----------|----------------|-------------------------------------|---------|-------|--------|-------|
| | 全轻混凝土 | 普通混凝土 | 全轻混凝土 | 普通混凝土 | 全轻混凝土 | 普通混凝土 | 全轻混凝土 | 普通混凝土 |
| 200 | 无变化 | 无变化 | 无裂纹 | 无裂纹 | - | - | 1 302 | 2 273 |
| 400 | 灰褐色 | 灰褐色 | 极少微裂纹 | 明显出现多条放射性裂缝 | 0.06 | 0.14 | 1 291 | 2 266 |
| 600 | 淡灰白 | 灰白中土黄色 | 极少微裂纹 | 裂缝有发展 | 0.08 | 0.26 | 1 282 | 2 253 |
| 700 | 淡灰白 | 灰白中带有暗红色 | 裂纹有发展 | ①压试块时明显出现爆裂;②水泥石与骨料脱离,无粘结性;③强度降低,易碎 | 0.1 | 0.30 | 1 269 | 2 239 |
| 800 | 淡灰白 | 土黄色 | 出现多条放射性裂纹 | 出现爆裂 | 0.1 | 0.64 | 1 249 | 2 220 |
| 900 | 灰白 | 土黄色 | 同 800 ℃ | 出现严重爆裂,宏观上已破坏 | 0.14 | - | 1 249 | 2 218 |
| 1 000 | 土黄色中略带白 | 土黄色 | 出现多条放射性裂纹,完整性好 | 出现严重爆裂,宏观上已破坏 | 0.22 | - | 1 241 | 2 210 |

对于全轻混凝土而言,骨料吸水率大,水泥中的水分蒸发,被陶粒吸收,湿度梯度小,有利于裂纹减少。另一方面,热量在空气中的传递速率要比在固体中传递的速率要慢,对于密度较小的混凝土而言,其热传导的速率受温度的影响比普通集料混

凝土小很多。轻骨料混凝土的特点是含有较多的孔隙且密度较小,使得混凝土整体的导热系数降低,另外,骨料在 600~700 ℃时没有热胀现象,水泥石高温脱水时,粗细骨料中储存的水分逸出,补充到水泥石中,缓解脱水速度。所以,由图 2 也可以看

表 5 各温度段残余强度

| 混凝土种类 | PP | | QP | |
|----------|-----------|-------|-----------|-------|
| | 残余强度 /MPa | 强度损失比 | 残余强度 /MPa | 强度损失比 |
| 20 °C | 36.8 | 1.0 | 24.9 | 1.000 |
| 200 °C | 52.0 | 1.413 | 24.9 | 1.000 |
| 400 °C | 39.6 | 1.076 | 21.9 | 0.880 |
| 600 °C | 24.6 | 0.668 | 13.4 | 0.538 |
| 700 °C | 19.6 | 0.533 | 13.3 | 0.534 |
| 800 °C | 12.4 | 0.337 | 6.0 | 0.241 |
| 900 °C | - | - | 5.9 | 0.237 |
| 1 000 °C | - | - | 5.1 | 0.205 |

注 PP 在 900~1 000 °C 时,试块已经宏观上出现严重破坏,故不记改组的试验数据。

出 全轻混凝土残余强度曲线较平缓,强度下降慢,裂缝出现轻微。

4.2 高温后混凝土力学性能分析

由表 5 及图 2 可以看出,两种混凝土在 200 °C 时其残余强度都有不同程度的提高,其中普通混凝土提高最快,其残余强度可达 141.3%,而全轻混凝土残余强度几乎未变,这是因为普通混凝土在 200 °C 以上高温时,混凝土水泥石中的游离水汽化,加速水泥水化,使混凝土抗压强度增加,而对于全轻混凝土,200~300 °C 时,由于粗细轻骨料含有丰富的孔隙及通道,汽化的游离水不能用于水泥水化,而是迁移到粗细骨料的孔洞之中,所以水泥石强度与普通混凝土相比没有提高。400 °C 时轻混凝土其残余强度有所下降,而普通混凝土强度没有下降。但是,两种混凝土都出现表面开裂,普通混凝土尽管强度与初始强度相比没有下降,但开裂严重。600~700 °C 时,两种混凝土强度都降到了初始强度的 50%~70% 之间,800 °C 时降到初始强度的 20%~30% 之间。由图 2 可以看出,全轻混凝土强度损失比曲线较普通混凝土曲线平缓许多,说明轻骨料混凝土耐热性能较好。

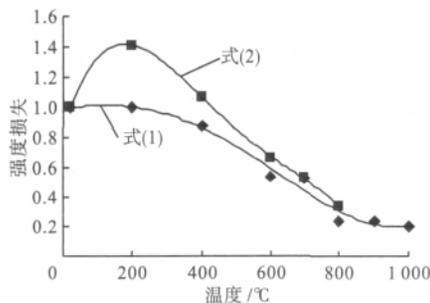


图 2 混凝土强度损失比曲线

通过回归分析,采用四次多项式给出了高温后混凝土立方体抗压强度计算公式,理论曲线绘于图 2,与试验结果相符良好。

全轻混凝土:

$$f_{cu} = (3 \times 10^{-12} T^4 - 3 \times 10^{-9} T^3 - 9 \times 10^{-7} T^2 + 0.000 3 T + 0.993 4) f_{cu} \quad (1)$$

(20 °C ≤ T ≤ 1 000 °C)

普通混凝土:

$$f_{cu} = (-2 \times 10^{-11} T^4 + 4 \times 10^{-8} T^3 - 3 \times 10^{-5} T^2 + 0.007 3 T + 0.864 9) f_{cu} \quad (2)$$

(20 °C ≤ T ≤ 800 °C)

式中 f_{cu} ——高温后混凝土残余强度;

f_{cu} ——常温时混凝土立方体抗压强度。

4.3 聚丙烯纤维对缓解混凝土高温开裂的贡献

由于大量均匀分布的聚丙烯单丝纤维形成的立体网络结构,当混凝土构件内部温度上升到 165 °C 以上时,纤维遇热熔化,形成内部连通的孔道以供高压蒸气从混凝土内部逃逸,

所以可有效避免高温环境下的混凝土的爆裂。

5 轻骨料混凝土烟囱有限元分析

5.1 模型材料特性的选取

本研究采用的是轻骨料混凝土,表观密度为 1 316.5 kg/m³,弹性模量为 13 100 MPa,泊松比为 0.2,热膨胀系数为 6×10⁻⁶/°C,导热系数为 0.42 W/(m·K),质量热容为 840 J/(kg·K),热对流系数为 58 W/(m²·K)。

5.2 模型的建立及网格划分

模型的尺寸参照工程实例,烟囱的上直径为 2.6 m,下直径 5 m,中间筒体部分直径为 2.2 m,高为 45 m,壁厚下端为 1.4 m,上端为 0.2 m。单元采用 20 节点空间实体单元,烟囱沿轴向分为 20 个单元,环向分为 24 个单元,径向分为 2 个单元,有限元模型及网格划分如下^[7]:

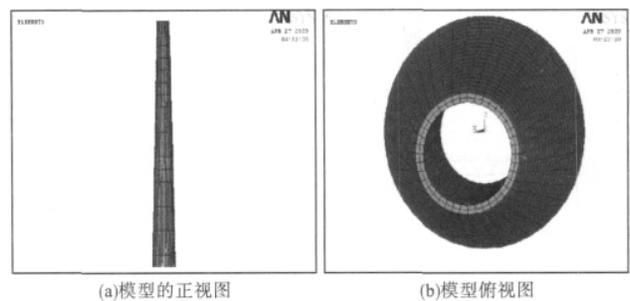


图 3 有限元模型及网格划分

5.3 模型的加载及求解

模型的加载方式为内侧烟气温度分别为 400、600、800 °C,采用热对流方式,对烟囱内侧节点进行加载,加载时间为 6 h,加载步长为 100 s,共 216 步,初始温度设为 20 °C。加载时对烟囱底部的节点进行各个方向的约束。

5.4 模型分析结果及分析

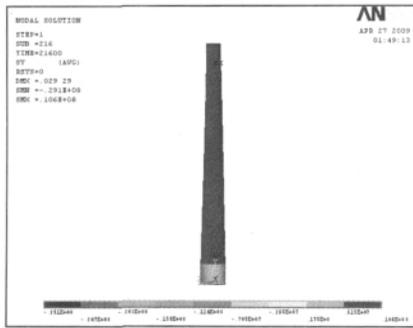
通过 ANSYS 分析结果可以看出,当烟气温度为 400 °C 时,烟囱内壁温度可达 390 °C,在此温度荷载作用下,烟囱伸长了 29.7 mm,如图 4 所示。拉伸应变为 0.07%。外表面按弹性计算得到的轴向拉应力达到 10.6 MPa,内表面的压应力为 29.1 MPa。说明在此温度下,烟囱有可能出现环向裂缝,但不严重,因为在该温度下,受力相对较小,主要拉应力由钢筋承担,所以在 400 °C 高温下,轻骨料混凝土可以正常使用。

当烟气温度为 600 °C,烟囱内壁温度可达 585 °C,在此温度荷载作用下,烟囱伸长了 42.5 mm,如图 5 所示。拉伸应变为 0.09%。外表面按弹性计算得到的轴向拉应力达到 16.1 MPa,内表面的压应力为 44.2 MPa,如图 5 所示。说明烟囱出现环向裂缝是完全可能的。其原因是,烟囱内表面升温膨胀将烟囱拉长,而外表面混凝土温度低,温度变形小,处于受拉状态,从而出现裂缝。

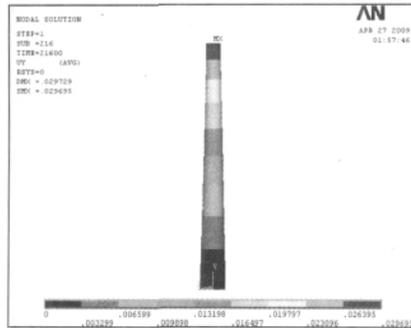
当烟气温度为 800 °C,由图 6 可以看出,烟囱内壁温度可达 780 °C,在此温度荷载作用下,烟囱伸长了 55.4 mm,拉伸应变为 0.12%。外表面按弹性计算得到的轴向拉应力达到 21.7 MPa,内表面的压应力为 59.4 MPa。此温度下,应力应变较大,烟囱内外温差引起的内力大概可以算作 $\sigma \propto E\alpha(T_1 - T_2)/2$,所以,内外表面温差较大时出现环向裂缝是完全可能的。

6 结论

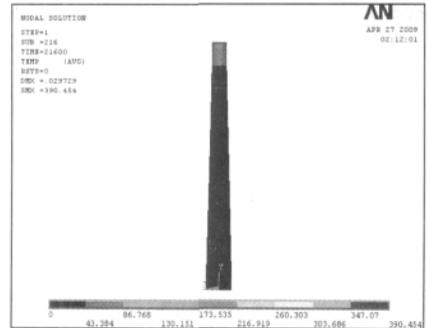
(1) 轻骨料混凝土的耐热性优于普通混凝土,主要原因是



(a) 烟囱轴向应力图

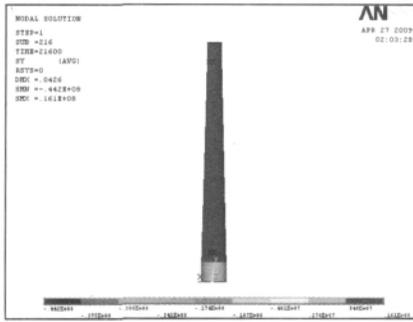


(b) 烟囱轴向变形图

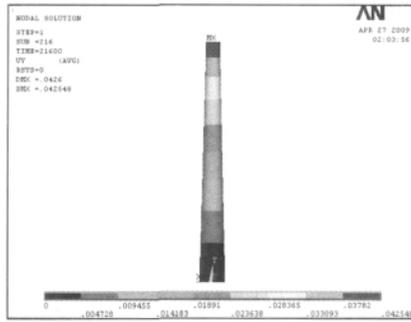


(c) 温度分布图

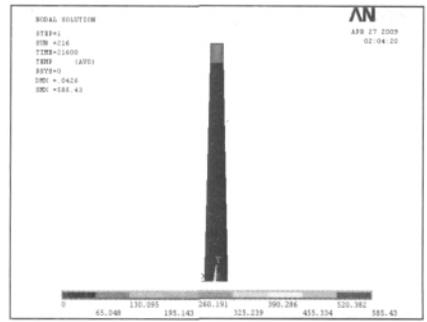
图 4 400 °C 时 ANSYS 分析结果图



(a) 烟囱轴向应力图

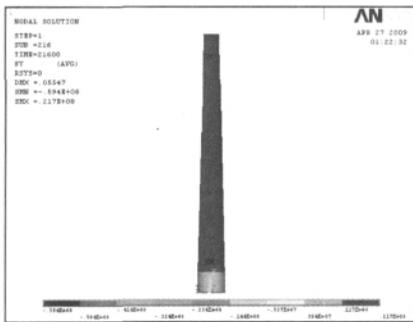


(b) 烟囱轴向变形图

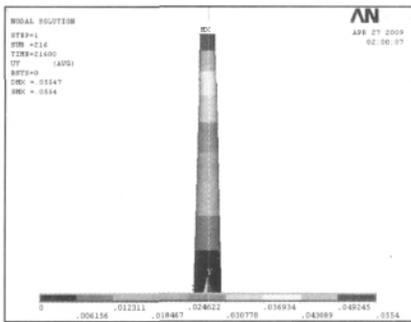


(c) 温度分布图

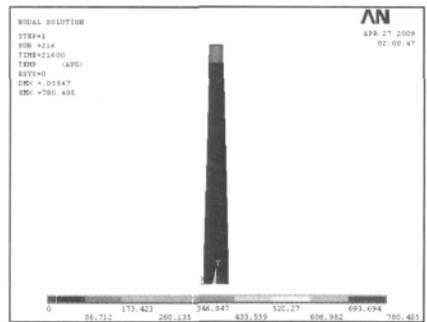
图 5 600 °C 时 ANSYS 分析结果图



(a) 烟囱轴向应力图



(b) 烟囱轴向变形图



(c) 温度分布图

图 6 800 °C 时 ANSYS 分析结果图

轻骨料经过高温煅烧而成,其热稳定性优于普通骨料,并且其导热性低于普通混凝土因此可较好地防止过度的温度升高。

(2)在 300~700 °C 的高温环境下,应该优先使用以陶粒等轻骨料为粗骨料,以普通砂为细骨料的砂轻混凝土。其混凝土坍落度、强度损失、表面开裂等指标均优于普通混凝土和全轻混凝土。高于 700 °C 的高温环境应该使用以高铝水泥为胶凝材料的耐火混凝土。不宜使用普通水泥为胶凝材料的各种混凝土。

(3)由文献[4]可知,陶粒混凝土最高使用温度为 400 °C。通过 ANSYS 分析结果可知:当温度达 400 °C 时烟囱拉应力较小,烟囱出现开裂性较小;当温度达 600、800 °C 高温时,轻骨料混凝土内外表面温差较大,出现环向裂缝是完全可能的。所以在高于 400 °C 时使用轻骨料混凝土需采取措施,可用轻骨料作为隔热层,并用耐火混凝土、耐火砖等材料设置内衬。

参考文献:

[1] JGJ 51—2002 轻骨料混凝土技术规程[S].
 [2] 袁润章.胶凝材料学[M].武汉:武汉工业大学出版社,1989.
 [3] 胡曙光,王发洲.轻集料混凝土[M].北京:化学工业出版社,2006.
 [4] GB 50051—2002 烟囱设计规范[S].
 [5] 徐利华,延吉生.热工基础与工业窑炉[M].北京:冶金工业出版社,

2006.
 [6] 李棒.自立式钢烟囱的设计[J].建筑与工程,2008(11):134-135.
 [7] Ivan Janotka, Lubomír Búgel. Pore structures, permeabilities and compressive strengths of concrete at temperatures up to 800 °C[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(2):196-200.
 [8] 胡海涛,董毓利.高温时高强混凝土强度和变形的试验研究[J].土木工程学报,2002,35(6):44-47.
 [9] 郭运杰,王元光,王旭斌.耐热混凝土的试验研究与工程应用[J].广东土木与建筑,2004(6):28-31.
 [10] 张朝晖,范群波,贵大勇,等. ANSYS 8.0 热分析教程与实例解析[M]. 第 1 版.北京:中国铁道出版社,2005:126-127.
 [11] Carlos Videla, Mauricio Lopez. Mixture proportioning methodology for structural sand-lightweight concrete, Cement and Concrete Research, 2000, 97(8):281-289.

作者简介: 孙庆霞(1982-),女,硕士研究生,专业:结构工程。
 联系地址: 山东省济南市历城区彩石彩龙路 1 号 山东城市建设职业学院(250014)
 联系电话: 13305318781