

高性能人造硅酸盐骨料及其混凝土的性能研究

杨秀丽¹, 崔崇¹, 崔晓昱¹, 贾建平², 朱志萍²

1. 南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094
2. 镇江市墙材革新与建筑节能管理办公室, 镇江 212001

摘要 利用固体废弃物研制了一种高性能的人造硅酸盐骨料, 期望可以取代天然骨料用于混凝土制备。采用水热合成的方法, 将工业固体废弃物制备成堆积密度为 859 kg/m³, 筒压强度最高达 20.65 MPa 的人造硅酸盐骨料。将人造硅酸盐骨料作为粗骨料配制混凝土, 混凝土的 28 d 抗压强度为 52.26~68.71 MPa, 表观密度为 1881~1949 kg/m³。在基体相同的情况下, 将人造硅酸盐骨料与普通石子进行等体积替换, 配制的混凝土的 28 d 抗压强度相当, 但人造硅酸盐骨料混凝土的表观密度比普通混凝土降低约 20.5%, 具有轻质高强的特点, 能够达到结构混凝土的要求。从混凝土的破坏形态看, 人造硅酸盐骨料与基体的界面结构比天然骨料好, 界面强度高, 无界面剥落的情况发生。

关键词 人造硅酸盐骨; 人造硅酸盐骨料的性能; 抗压强度; 界面结构

中图分类号 TQ177

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.23.007

Properties of Man-made Silicate Aggregate and the Lightweight Concrete

YANG Xiuli¹, CUI Chong¹, CUI Xiaoyu¹, JIA Jianping², ZHU Zhiping²

1. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China
2. Zhenjiang Wall Material Innovation & Energy Saving in Buildings Office, Zhenjiang 212001, China

Abstract High-performance man-made silicate aggregate was prepared with hydrothermal method by using industrial solid wastes, which can be used to replace natural aggregate. The obtained silicate aggregate was spherical with the bulk density of 859 kg/m³ and the maximum cylinder compressive strength of 20.65 MPa. The concrete was prepared using the silicate aggregate, accounting for 50% of the total amount in volume. The compressive strength of the concrete reached 52.26~68.71 MPa, and the apparent density was 1881~1949 kg/m³. Comparison of the concrete with silicate aggregate and common concrete with the same volume of aggregate and cement mortar shows that the compressive strengths of the two kinds of concrete were close, but the density of the former was 20% lower than that of the latter. The fracture morphology of the concrete shows that the interface structure of the silicate aggregate concrete is better than that of common concrete.

Keywords man-made silicate aggregate; properties of silicate aggregate; compressive strength; interface structure

混凝土是目前应用最广泛的建筑材料之一, 随着混凝土用量的增加, 天然骨料的需求急剧增加。然而天然骨料资源非常有限, 为保护环境, 实现资源可持续发展, 许多学者都在研究制备性能优异的人造混凝土骨料^[1]。再生混凝土骨料是近年的研究热点, 它是将废弃混凝土分拣、剔除钢筋、破碎、

分级, 按一定的级配组合, 形成粒径在 40 mm 以下的混凝土再生骨料^[2]。再生骨料存在很多缺点, 例如颗粒棱角多、表面粗糙有微裂纹、压碎指标高等^[3], 为提高再生混凝土的各项性能指标, 需要对再生骨料进行强化处理^[4,5]。国外对再生混凝土的研究较早, 肖开涛^[6]对再生骨料的各项性能进行研究, 并

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-06-23

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04010032); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ11-0243)

作者简介: 杨秀丽, 博士研究生, 研究方向为无机非金属材料, 电子信箱: jkyxl@126.com; 崔崇(通信作者), 教授, 研究方向为无机非金属材料, 电子信箱: cuichong@njjust.edu.cn

引用格式: 杨秀丽, 崔崇, 崔晓昱, 等. 高性能人造硅酸盐骨料及其混凝土的性能研究[J]. 科技导报, 2014, 32(23): 50-54.

对其进行处理,处理后的再生骨料配制的混凝土的流动性和强度得到提高。Ravindrargah等^[7]通过研究发现,再生混凝土强度比普通混凝土强度降低约为8%~24%。肖建庄等^[8,9]研究发现,再生混凝土的抗压强度和抗拉强度比普通混凝土低,但破坏过程和破坏模式相似。杨曦等^[10]研究发现,再生混凝土试块的劈裂抗拉强度比普通混凝土低,最大降低幅度可达30%。国内外的学者研究的结果一致,再生混凝土骨料缺陷较多,制备的混凝土强度大幅度降低,不能广泛用于结构混凝土中^[11,12]。

天然骨料资源日益匮乏,再生混凝土骨料性能不佳,因此急需研发一种高性能的人造骨料,取代天然骨料用于混凝土的制备。本文利用工业固体废弃物作为原材料,采用水热合成、壳层增强等手段,研制高性能的人造硅酸盐骨料。

1 实验原材料

制备人造硅酸盐骨料的主要原材料是废弃加气混凝土砌块、环氧丙烷渣、粉煤灰。实验中使用的加气混凝土取自南京某一加气混凝土企业生产的砂加气混凝土(sand autoclaved aerated concrete, SAAC)。废弃加气混凝土砌块用颚式破碎机破碎后,在球磨机中磨成粉状使用。采用激光粒度分析仪对球磨后的SAAC进行粒度分析,中位径 D_{50} 为45.49 μm , D_{98} 为199.58 μm 。采用BET氮气吸附法测得磨细后的SAAC的比表面积为17.84 m^2/g 。实验中使用的环氧丙烷渣取自南京某化工股份有限公司,含水率为45.5%;粉煤灰取自南京某热电厂;水泥来自江南-小野田水泥有限公司。原材料的主要成分如表1所示。

表1 原材料主要成分

Table 1 Chemical composition of raw materials

原材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	有效钙*
砂加气混凝土	57.34	5.16	1.90	26.61	-	-
环氧丙烷渣	8.07	2.60	0.98	59.56	2.03	54.70
粉煤灰	53.47	30.48	4.73	2.94	0.95	-
水泥	20.30	5.61	3.25	64.00	1.17	-

注:*有效钙指氧化钙(或氢氧化钙)。

2 人造硅酸盐骨料的制备及性能

2.1 人造硅酸盐骨料的制备

将原料环氧丙烷渣和粉煤灰按照钙硅质量比0.73计算用量、称量并混合均匀,然后按5%~65%的质量比掺入砂加气混凝土后继续混合均匀。将混合料放入成球盘中,边喷水边加料,制成球状骨料,骨料直径可控制在16 mm或20 mm以内。在骨料成型完毕后,继续在成球盘内滚动,将称量好的壳层材料均匀撒在球状骨料表面。壳层使用的原料由85%的粉煤灰和15%的水泥混合而成,壳层用量根据骨料直

径和质量确定,每1800 g、直径为5~16 mm的骨料,壳层用量为72 g,壳层与骨料内核的质量比为1:25。将包覆好壳层的骨料从成球盘取出,静放24 h后放入蒸压釜(180℃,1.0 MPa)中蒸压养护10 h。图1为人造硅酸盐骨料的照片,骨料的粒径分别为5~10 mm(左侧)和10~16 mm(右侧)。



图1 人造硅酸盐骨料照片

Fig. 1 Man-made silicate aggregate

2.2 人造硅酸盐骨料的性能

实验制备7组SAAC掺量不同的人造硅酸盐骨料,SAAC掺量(质量分数)分别为5%、15%、25%、35%、45%、55%、65%。表2给出了SAAC人造硅酸盐骨料的性能检测数据。

表2 SAAC人造硅酸盐骨料的物理性能

Table 2 Physical properties of man-made silicate aggregate

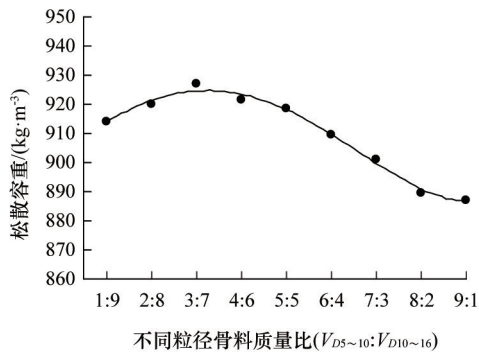
SAAC掺量/%	1 h吸水率/%	24 h吸水率/%	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	筒压强度/MPa
5	6.04	19.09	1587	872	15.69
15	7.19	19.22	1585	851	16.87
25	9.95	19.46	1583	848	19.56
35	6.78	19.45	1546	826	18.73
45	6.77	17.86	1581	874	20.65
55	7.47	18.08	1535	862	19.98
65	8.69	18.90	1593	880	17.97

如表2所示,人造硅酸盐骨料的1 h吸水率为6.04%~9.95%,24 h吸水率为17.86%~19.46%,平均表观密度为1573 kg/m^3 ,平均堆积密度为859 kg/m^3 。从表2可以看出,SAAC的掺量对人造硅酸盐骨料的吸水率和密度影响不大,对筒压强度影响较大。硅酸盐骨料的筒压强度随着SAAC的增加而增加,当掺量为45%的时候,筒压强度达到最大值20.65 MPa,若掺量继续增加,筒压强度则降低。这是因为SAAC掺量不断增加,钙质材料环氧丙烷渣和硅质材料粉煤灰所占的比例则不断减少,生成的托贝莫来石水化产物的数量相对更少,造成硅酸盐骨料的强度下降。

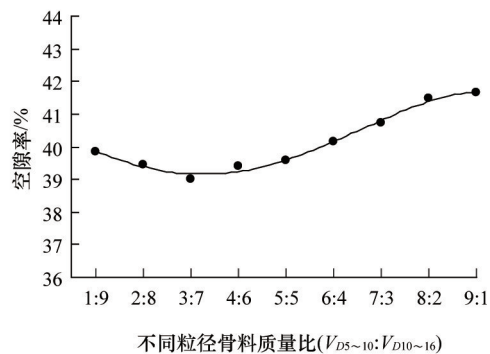
2.3 人造硅酸盐骨料的最优级配

骨料级配良好是混凝土质量的保证,最主要目的就是实现骨料在混凝土中堆积密度最大,孔隙率最小。根据最大理论密度,对制备的5~10 mm和10~16 mm的人造硅酸盐骨料进行最优级配研究。通过实验测出不同级配的容重,以最大容重时的级配为最优级配。图2为测出的人造硅酸盐骨料(5~10 mm、10~16 mm)的不同级配的松散容重曲线与空隙率曲线。由图2可以看出,当粒径为5~10 mm的人造硅酸盐骨

料占(质量分数)30%,粒径为10~16 mm的人造硅酸盐骨料占70%时,达到最大松散容重927.06 kg/m³,此时的空隙率最低为39.01%。当所有人造硅酸盐骨料粒径都为10~16 mm时,松散容重为893.14 kg/m³,孔隙率为41.24%。当所有人造硅酸盐骨料粒径都为5~10 mm时,松散容重为879.42 kg/m³,空隙率为42.14%。在实际应用中,可以扩大骨料级配的试用范围,5~10 mm人造硅酸盐骨料与10~16 mm人造硅酸盐骨料的质量比为2:8、3:7、4:6、5:5均可以选用。



(a) 不同级配的松散容重



(b) 不同级配的空隙率

图2 人造硅酸盐骨料的最优级配

Fig. 2 Optimal granular composition of man-made silicate aggregate

3 人造硅酸盐骨料混凝土的性能

3.1 人造硅酸盐骨料混凝土

人造硅酸盐骨料的吸水率较大,在加水拌和的过程中,吸入水泥浆体中的自由水分导致混凝土的流动性降低。为减小混凝土的坍落度损失,在拌和前一般要进行预湿处理。经过预湿处理后,人造硅酸盐骨料在混凝土拌和过程中吸收水泥浆体中水分的能力减弱,因此预湿处理对减小硅酸盐骨料混凝土坍落度损失的作用效果较明显。预湿处理的方法为:浸泡1 h,然后取出摊开,自然风干至饱和面干状态。

采用P.II.52.5水泥,设计5组人造硅酸盐骨料混凝土配合比,如表3所示,其中“C₁~C₅”表示5组混凝土编号,“Q”表示采用的是壳层硅酸盐骨料。使用的砂为河砂,减水剂为聚羧酸减水剂,人造硅酸盐骨料在混凝土中的体积分数固定为50%。混凝土使用模具为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的钢模,振动成型,刮平覆膜,于室内静置24 h后脱模,然后移入标准养护室内养护至28 d龄期进行力学性能测试。表4是人造硅酸盐骨料混凝土的28 d抗压强度和表观密度。从表4可以看出,人造硅酸盐骨料混凝土的抗压强度为52.26~68.71 MPa,表观密度为1881~1949 kg/m³。

3.2 不同骨料混凝土的性能对比

实验选用人造硅酸盐骨料与普通石子作为粗骨料,制备混凝土进行性能对比。为确保砂浆基体相同,粗骨料采用的是等体积替换的方法。配合比见表3,水泥、砂、水、减水剂保

表3 人造硅酸盐骨料混凝土的配合比

Table 3 Mixture proportion of man-made silicate aggregate concrete

编号	水泥/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ %	人造硅酸盐骨 料/(kg·m ⁻³)
C ₁ -Q	300	650	150	0.25	770
C ₂ -Q	340	590	150	0.25	770
C ₃ -Q	370	550	160	0.20	770
C ₄ -Q	400	550	155	0.25	770
C ₅ -Q	440	550	140	0.30	770

表4 人造硅酸盐骨料混凝土的28 d抗压强度及表观密度

Table 4 The 28 d compressive strength and the density of man-made silicate aggregate concrete

编号	28 d抗压强度/MPa	表观密度/(kg·m ⁻³)
C ₁ -Q	52.26	1881
C ₂ -Q	56.98	1865
C ₃ -Q	59.11	1873
C ₄ -Q	62.38	1894
C ₅ -Q	68.71	1949

持不变,将人造硅酸盐骨料换成等体积的普通石子,制备成普通混凝土对比试件,试件尺寸、成型与养护方式均相同。

表5给出了不同骨料混凝土的28 d抗压强度及表观密度检测结果。

表5 不同骨料混凝土的28 d抗压强度及表观密度检测结果
Table 5 The 28 d compressive strength and apparent density of concrete with different aggregate

编号	人造硅酸盐骨料混凝土		石子混凝土	
	抗压强度/ MPa	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C ₁	52.26	1881	51.84	2379
C ₂	56.98	1865	55.43	2360
C ₃	59.11	1873	63.14	2363
C ₄	62.38	1894	65.97	2388
C ₅	68.71	1949	72.98	2413

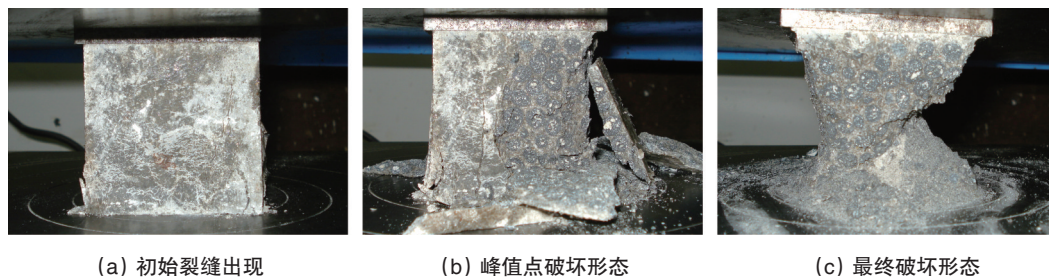


图3 人造硅酸盐骨料混凝土的立方体抗压试件破坏形态

Fig. 3 Fracture morphology of man-made silicate aggregate concrete

人造硅酸盐骨料混凝土与普通混凝土的破坏形态相似,都是形成2个对顶角锥形破坏面。但对于普通混凝土试件,由于泌水和离析的发生,在粗集料与基体的界面部分比较薄弱,强度较低,在粗集料的下方区域形成最弱的部分,这是裂缝的发源地,普通混凝土为界面剥落的破坏形式,如图4(a)所示。而人造硅酸盐骨料混凝土的断裂面穿过人造硅酸盐骨料如图4(b)所示,没有发现从界面处剥离的破坏状态,这与普通混凝土不同,说明人造硅酸盐骨料与砂浆基体的界面强度高。

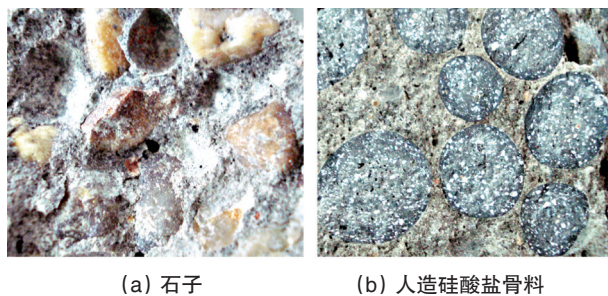


图4 混凝土的破坏断面

Fig. 4 Fracture surface of the concrete

从结果可以看出,在基体相同的情况下,人造硅酸盐骨料混凝土的立方体抗压强度与普通混凝土强度相当;普通混凝土的表观密度为 2381 kg/m^3 ,而人造硅酸盐骨料混凝土的平均表观密度为 1892 kg/m^3 ,人造硅酸盐骨料混凝土的表观密度比普通混凝土降低约20.5%。人造硅酸盐骨料混凝土具有强度高、密度低的轻质高强的特点。

3.3 人造硅酸盐骨料混凝土破坏形态

对人造硅酸盐骨料混凝土的破坏形态的研究是对混凝土延性、刚性研究的基础。图3是人造硅酸盐骨料混凝土的立方体抗压试件的破坏形态。在实验中观察到,人造硅酸盐骨料混凝土的初始裂缝出现在试件的侧边,为细小的沿着加载方向的纵向裂缝,如图3(a)所示。随着载荷继续增大,裂缝继续扩展,初始裂缝越来越宽,中间部位的表层向外鼓出、开裂,此时混凝土仍处于受压状态,压力持续上升。人造硅酸盐骨料混凝土试件所受的载荷到达峰值点附近时,试件中部变形起鼓,出现较多的剪切裂缝,并有碎块脱落,如图3(b)所示。最终可看到人造硅酸盐骨料混凝土的破坏形态为2个正、倒相连的四角锥,如图3(c)所示。

天然骨料是惰性物质,与混凝土中胶凝物质之间的反应微弱,骨料与基体之间的黏结力主要由机械咬合与物理吸附为主。人造硅酸盐骨料与天然骨料不同之处在于骨料内部存在微孔微管系统,使得混凝土具有许多优异的性能。人造硅酸盐骨料具有吸水作用,在混凝土拌合后会吸收水泥浆体中泌出的水分,使骨料表面的局部水灰比降低,增加了骨料表面水泥砂浆的密实性,提高了界面粘结力。另外,硅酸盐骨料吸收浆体中水分的同时也将部分水泥浆体带入骨料内部,在界面处形成浆体与骨料的镶嵌结构,提高了人造硅酸盐骨料混凝土的强度。

4 结论

1) 采用水热合成法制备了堆积密度为 859 kg/m^3 ,筒压强度最高可达 20.65 MPa 的人造硅酸盐骨料。使用该人造硅酸盐骨料配制了强度在 $52.26\sim 68.71 \text{ MPa}$ 之间,表观密度在 $1881\sim 1949 \text{ kg/m}^3$ 之间的轻骨料混凝土。

2) 在基体相同的情况下,人造硅酸盐骨料与普通石子进行等体积替换,配制的混凝土的28 d抗压强度相当,但人造硅酸盐骨料混凝土的表观密度比普通混凝土降低约

20.5%,具有轻质高强的特点。

3) 在混凝土制备过程中,人造硅酸盐骨料表面不会形成水膜,且界面区域水灰比较低,另外界面形成镶嵌结构,人造硅酸盐骨料的界面强度高。人造硅酸盐骨料混凝土的破坏形态与普通混凝土相似,为2个正、倒相连的四角锥,但人造硅酸盐骨料混凝土的断裂面穿过人造硅酸盐骨料,没有界面剥落的情况,与普通混凝土不同。

用工业废弃物制备人造硅酸盐骨料,性能优异,可用于混凝土中作为粗骨料使用,替代普通混凝土中的卵石和碎石,节约了天然资源,保护了生态环境。人造硅酸盐骨料混凝土具备良好的工作性能,具有广阔的使用前景。

参考文献(References)

- [1] 胡曙光, 何永佳. 利用废弃混凝土制备再生胶凝材料[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 593-599.
Hu Shuguang, He Yongjia. Preparation of regenerated binding material using waste concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(5): 593-599.
- [2] 郑强. 废弃混凝土再生利用的研究进展[J]. 商品混凝土, 2009, 6: 24-26.
Zheng Qiang. The research development of reutilization of waste concrete[J]. Beton Chinese Edition—Ready-mixed Concrete, 2009, 6: 24-26.
- [3] 刘昕, 张雄, 李雯霞, 等. 国内外再生粗骨料研究新进展[J]. 建筑技术, 2010, 41(1): 63-66.
Liu Xin, Zhang Xiong, Li Wenxia, et al. Latest progress on recycled aggregate[J]. Architecture Technology, 2010, 41(1): 63-66.
- [4] 王志威. 高品质再生骨料的生产工艺[J]. 混凝土, 2006, 9: 48-50.
Wang Zhiwei. Recycling technology for high quality recycled aggregate [J]. Concrete, 2006, 9: 48-50.
- [5] 孙增昌, 王汝恒, 古松. 再生骨料混凝土增强技术研究现状分析[J]. 混凝土, 2010, 2: 57-60.
Sun Zengchang, Wang Ruheng, Gu Song. Present situation of recycled aggregate concrete enhancement-technology research[J]. Concrete, 2010, 2: 57-60.
- [6] 肖开涛. 再生混凝土的性能及其改性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
Xiao Kaitao. Study on the properties and the modification of recycled concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [7] Ravindrarajah R, Tam C T. Properties of concrete as coarse aggregate [J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37(130): 29-38.
- [8] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1558-1561.
Xiao Jianzhuang, Li Jiabin, Sun Zhenping, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2004, 32(12): 1558-1561.
- [9] 肖建庄, 兰阳. 再生混凝土单轴受拉性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 154-158.
Xiao Jianzhuang, Lan Yang. Investigation on the tensile behavior of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9 (2): 154-158.
- [10] 杨曦, 吴瑾, 梁继光. 再生混凝土抗拉强度与抗压强度关系的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(5): 190-192.
Yang Xi, Wu Jin, Liang Jiguang. Experimental study on relationship between tensile strength and compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(5): 190-192.
- [11] 李婷. 再生骨料缺陷对再生混凝土力学性能影响的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
Li Ting. Influence of defects in recycled aggregate on mechanical properties of recycled aggregate concrete[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [12] 王竞妍. 再生骨料缺陷对再生混凝土耐久性的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
Wang Jingyan. Influence of recycled aggregate defects on the durability of recycled aggregate concrete[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [13] Ma H L, Cui C, Li X, et al. Study of high performance autoclaved shell-aggregate from propylene oxide sludge[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(7): 3030-3037.

(编辑 田恬)

·学术动态·



中国核学会成功申办2016年国际青年核能大会

2014年7月9日,在西班牙Burgos召开的2014年国际青年核能大会上,中国核学会青年委员会(筹)主席宋代勇代表中国对申办2016年国际青年核能大会进行答辩,成功赢得2016年国际青年核能大会的承办权。

国际青年核能大会成立于1998年,旨在宣传核能优势、促进和平利用核技术、向下一代青年核科技人员传授当代权威核专家知识与经验,至今已在斯洛伐克、韩国、加拿大、瑞典、瑞士、南非、美国举办。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38635/15782806.html>。