

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221413

蒸压加气混凝土砌块单轴拉伸力学性能研究

刘 磊^{1a,1b,2}, 郑志辉³, 史阳光^{1a,1b}

(1. 伊犁师范大学 a. 物理科学与技术学院; b. 新疆凝聚态相变与微结构实验室, 新疆 伊宁 835000;
2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 4100753; 3. 浙大宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 为了研究蒸压加气混凝土砌块(AACB)在静力状态下单轴拉伸的力学行为,通过对不同密度的 AACB 进行单轴拉伸试验,分析了 AACB 抗拉破坏特征、破坏机理,并探讨了其抗拉强度、弹性模量在不同密度下的变化规律及单轴拉伸强度与孔隙率、抗压和劈裂拉伸强度关系的相关公式。试验结果表明,随着 AACB 的密度增大,其拉伸屈服强度、弹性模量逐渐提高并呈幂函数增加,然而拉伸屈服应变却逐渐减小;AACB 材料在单轴拉力作用下的宏观破坏主要由材料受拉损伤机制控制,并表现出明显的脆性破坏特征。基于多孔材料理想预测模型及试验结果回归分析,拟合得到试验条件下 AACB 单轴拉伸强度与孔隙率半经验公式及修正系数,并提出 AACB 抗拉强度与其抗压强度、劈裂拉伸强度的换算关系。

关键词: 单轴拉伸; 弹性模量; 孔隙率; 抗压强度; 劈裂拉伸强度

中图分类号: TV431; TU522.3⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0173-04

1 引言

蒸压加气混凝土砌块(AACB)作为我国新型墙体材料之一,具有的质量轻、节约能源两大优点,已被逐渐用于低层和多层建筑非承重外墙、内隔墙、框架填充墙及屋面的保温隔热层等部位。目前,已从多方面研究了 AACB 砌块组成材料(特别是工业废料和添加剂)、制备、微观结构和主要物理性能(密度、干缩、吸湿性、力学性能、各向异性、隔热性和耐久性)等^[1,2],但难以反映 AACB 在承重墙系统中的真实受力特点。AACB 的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、弹性模量、名义应力—应变关系是 AACB 承重墙体结构设计及数学建模的关键因素^[3]。然而对 AACB 的单轴抗拉强度研究有限,且多集中在 AACB 的劈裂抗拉强度、抗压强度、抗折强度及其砌体墙体抗震方面,关于 AACB 单轴抗拉的弹性模量试验研究较少,特别缺少 AACB 单轴抗拉强度与孔隙率关

系、抗压和劈裂抗拉强度的研究。因此,本文采用 WDW-3000 微机控制万能试验机对 3 种不同密度的 AACB 进行单轴拉伸试验,研究了 AACB 在单轴静力作用下的拉伸受力特点,并分析了 AACB 的密度对其单轴拉伸强度、弹性模量、断裂能变化规律的影响以及单轴拉伸强度与孔隙率、抗压和劈裂拉伸强度的相互关系,探究了 AACB 单轴拉伸力学性能及其破坏机理。

2 试验概况

2.1 AACB 试件制作

AACB 由新疆金铭新型建材厂生产,选取常见的 3 种密度级别(B05、B06、B07)制备 AACB 单轴拉伸试件,3 种 AACB 材料密度分别为 500、600、700 kg/m³。参照相关标准规范^[4,5]及文献^[6]制作试验试件,试件尺寸为 40 mm×40 mm×220 mm,采用机械加工锯从 AACB 样品上锯切出试样(图 1)。每个等级制作 6 个试件,共 18 个。

收稿日期: 2022-07-25, **修回日期:** 2022-08-31

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01C339);伊犁师范大学校级科研项目(2017YSYY19);教育部高等教育司产学研合作协同育人项目(202102600026)

作者简介: 刘磊(1989-),男,博士、讲师,研究方向为新型建筑材料、装配式建筑结构、混凝土耐久性,E-mail:llmysy@163.com

通讯作者: 史阳光(1990-),男,博士、讲师,研究方向为新型建筑材料、钢筋混凝土结构工程,E-mail:1249140317@qq.com

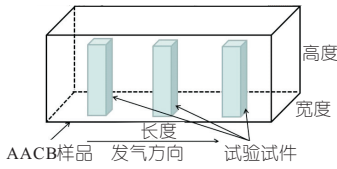


图 1 单轴拉伸试件锯取示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sawing uniaxial tensile specimen

2.2 试验方法

混凝土材料的拉伸试验通常采用劈裂试验、拉伸连接件试验(连接件与试件用结构胶粘在一起)、拉伸螺栓试验(螺栓埋在试件内)3种方法。其中劈裂试验通过理论换算得到材料拉伸强度存在较大误差,不能得到 AACB 的全过程名义应力—应变曲线;由于 AACB 自身的强度较低,在拉伸螺栓试验过程中试件端部易发生应力集中,并出现较大的剪切带,从而导致试件不满足中心起裂假定。因此,参考规范[5]和文献[6],采用拉伸连接件试验,将试件用结构胶与夹具粘在一起,放置1周,待单轴拉伸试件与连接件粘结牢固后再进行试验。将带连接件试件安装到万能试验机上,在试件中间位置放引伸仪,试件的标距100 mm(图2)。试件单轴拉伸采用位移加载,加载速率为1.32 mm/min,对应名义拉伸应变率约为 1×10^{-4} /s。试验的加载方式分为两个阶段。



图 2 试件单轴拉伸试验的加载装置

Fig. 2 Loading device for uniaxial tensile test of test piece

(1)预加载阶段。试件加载前调整好连接件与万能试验机夹具的松紧程度,将试件几何对中;然后对试件以0.13 mm/min均匀施加荷载,达到极限荷载的10%后停止加载并卸载;往复2~3次,以保证连接件与万能试验机夹具加紧,且试件所受的荷载为零。

(2)正式加载阶段。以0.13 mm/min速率对试件进行均匀加载,直到试件拉伸破坏,并记录极限荷载值F。

AACB单轴抗拉强度计算公式为:

$$f_t = F/A \quad (1)$$

式中, f_t 为试件抗拉强度,MPa; F 为极限荷载,N; A 为初始抗拉截面面积, mm^2 。

文献[6]指出,名义应力—应变曲线能够从宏观尺度上反映材料在整个加载过程中的拉伸受力特点、变形特征及损伤演化规律。AACB单轴拉

伸应力、应变计算公式分别为:

$$\sigma = f_t = F/A \quad (2)$$

$$\epsilon = (H_1 - H_0)/H_0 = \Delta l/H_0 \quad (3)$$

式中, σ 为试件抗拉应力,MPa; ϵ 为试件抗拉应变; H_0 为试件初始高度,mm; H_1 为试件初拉伸破坏后高度,mm; Δl 为试件高度的变形值,mm。

3 试验结果与分析

3.1 AACB单轴拉伸试验现象及破坏机理

在AACB单轴拉伸试件初始加载阶段,载荷呈线性变化(图3),在这一阶段,单轴受拉荷载主要由AACB的众多孔壁以弹性变形的方式承受;随着荷载的增大,AACB的荷载—位移曲线开始发生轻微的震荡并呈线性继续增加,此时AACB的细小裂纹开始萌生。随着AACB断裂的孔壁逐步增多,贯通型微裂缝得以进一步延伸和扩展,最终导致AACB宏观上裂缝出现,直到试件突然断裂为两半,并发生清脆断裂声,随后荷载迅速下降。由图3可知,3种不同密度等级的砌块,在加载过程中荷载线性变化,直到破坏也没有明显的非线性变化。

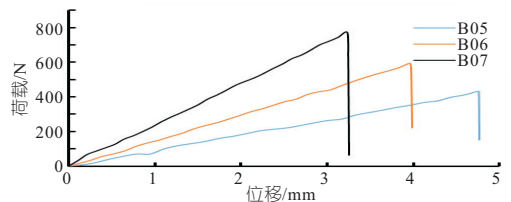


图 3 试件的荷载—位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve of test piece

在单轴拉伸荷载作用下,由AACB试件的两种断裂破坏形态(中间断裂、两端断裂)可看出,单轴拉伸试件具有唯一的断裂面,且与荷载的方向基本垂直。此外,所有有限试件的断裂破坏面均处在AACB试件的有效拉伸区域内,进一步保证了AACB试件这种试验方法的有效性和准确性。同时,与试件的开始形态相比,断裂破坏后的试件并未产生明显的塑性变形,断裂截面仍为40 mm×40 mm。综上所述,AACB材料在单轴拉力作用下的宏观破坏主要由材料受拉损伤机制控制,并表现出明显的脆性破坏特征;另外,不同密度等级的AACB材料的拉伸破坏形态几乎无差异性。

3.2 AACB单轴拉伸强度

根据式(1)~(3)得到AACB试件单轴全过程名义应力—应变曲线,见图4。由图4可知,随着AACB试件的密度逐渐增加,其极限抗拉强度逐渐增大。此外,AACB试件在单轴拉伸荷载作

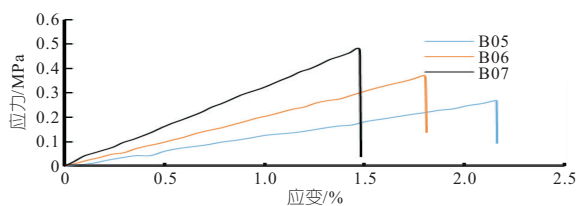


图 4 试件单轴拉伸名义应力—应变曲线

Fig. 4 Nominal stress-strain curve of specimen under uniaxial tension

用下并未产生明显的塑性变形,且在名义应力—应变曲线在达到峰值应力后迅速下降。因此,本文将名义应力—应变曲线的极限应力值作为 AACB 拉伸屈服强度值,极限拉伸应变作为拉伸屈服应变。

由式(2)、(3)得到 AACB 单轴拉伸试验相关力学参数,见表 1。由表 1 可知,随着 AACB 密度的增加,其单轴拉伸屈服强度、弹性模量逐渐增大;然而 AACB 单轴拉伸屈服应变却随密度的增加而减小,表现出相反的变化趋势。B06 级单轴拉伸屈服强度比 B05 级平均提高了 37.41%,B07 级单轴拉伸屈服强度比 B05、B06 级平均分别提高了 78.51%、29.9%。

表 1 AACB 单轴拉伸试验结果

Tab. 1 Uniaxial tensile test results of AACB

材料等级	AACB 单轴拉伸力学参数			
	极限抗拉	屈服强度	屈服	弹性模量
	强度/MPa	/MPa	应变	/MPa
B05	0.270	0.270	0.021 6	12.50
B06	0.371	0.371	0.018 0	20.61
B07	0.482	0.482	0.015 0	32.70

由于试验仅测试了 3 种不同密度 AACB 的单轴拉伸力学参数,难以准确反映材料密度与力学参数间的函数关系,鉴此本文增加文献[6]相关试验结果,从而建立单轴拉伸强度、弹性模量对应 3 种密度的散点图,并拟合出相关曲线,见图 5。由图 5 可知,AACB 单轴拉伸屈服强度、弹性模量随密度的增大而增加,并与材料密度关系呈幂函数形式增加。

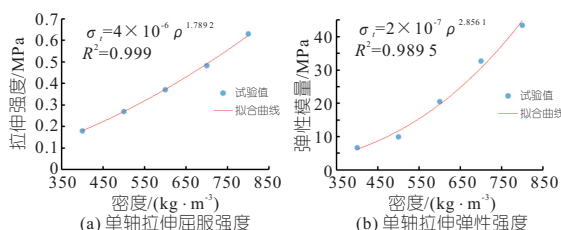


图 5 单轴拉伸屈服强度、弹性模量与密度的关系

Fig. 5 Relationship curve between uniaxial tensile yield strength, elastic modulus and density

3.3 AACB 单轴拉伸强度与孔隙率的关系

由于 AACB 中孔分布不均、形状不同、大小不一等细观参数会引起其力学性能的变化,因此建立一种 AACB 材料的孔隙率与力学性能的量化理论模型,对其分析单轴抗拉强度提供理论指导。在文献[7]建立的理想条件下多孔材料的拉伸强度和孔隙率的计算公式为:

$$\begin{cases} \sigma_t = \sigma_0(1-n)^{K_t} \\ n = 1 - \rho/\rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ_t 为单轴拉伸强度; σ_0 为净浆的拉伸强度; K_t 为孔隙对材料的应力集中系数; n 为 AACB 的孔隙率; ρ 为 AACB 的表观密度; ρ_0 为 AACB 的净浆密度。

将 AACB 研磨成粉末,通过常用净浆密度法测得 AACB 材料的密度值 $\rho_0 = 2\ 395\text{ kg/m}^3$ 。采用本文单轴拉伸试验方法测得 AACB 材料的净浆拉伸强度 $\sigma_0 = 3.689\text{ MPa}$ 。基于表 1 试验结果,对 3 种不同密度 AACB 试件的孔隙率与拉伸强度结果进行拟合,见图 6。

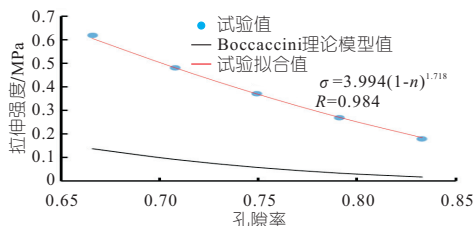


图 6 单轴拉伸强度与孔隙率的关系

Fig. 6 Relationship between uniaxial tensile strength and porosity

由图 6 可知,文献[7]中的基于多孔材料的拉伸强度模型计算值与试验值差别很大,故引入修正系数 α ,则式(4)转换为:

$$\begin{cases} \sigma_t = \alpha\sigma_0(1-n)^{K_t} \\ n = 1 - \rho/\rho_0 \end{cases} \quad (5)$$

基于 AACB 单轴拉伸试验数据及文献[6]的试验数据,对 AACB 的孔隙率与拉伸强度数据进行拟合,将拟合常数值代入式(5)计算得到修正系数 $\alpha = 1.08$,获得适合该试验及文献[6]条件下 AACB 的单轴拉伸强度与孔隙率半经验公式。

3.4 AACB 单轴拉伸强度与抗压、劈裂抗拉强度的关系

由于 AACB 单轴抗拉强度试验测试难度较大,目前尚无通用的试验方法对其进行测试,然而通过 AACB 的抗压、劈裂抗拉强度估算其单轴抗压强度很有必要。本文收集了单轴抗拉强度与抗压、劈裂抗拉强度的相互关系^[8,9]与 AACB 的试

验数据^[3,6,10,11],并对试验数据进行回归分析,结果见图7,拟合得到 AACB 单轴拉伸强度与抗压、

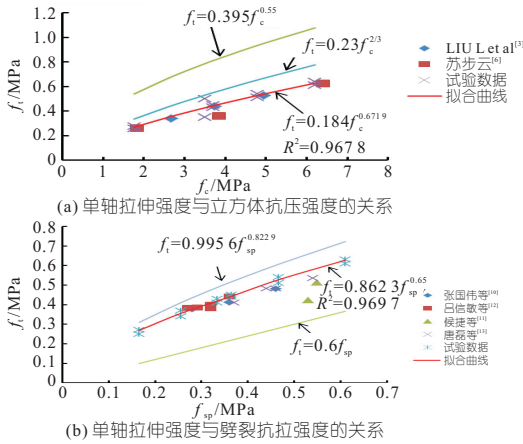


图 7 AACB 单轴拉伸强度与抗压、劈裂抗拉强度关系

Fig. 7 Relationship between uniaxial tensile strength and compressive, splitting tensile strength of AACB

劈裂抗拉强度关系的计算公式:

$$f_t = 0.1840 f_c^{0.6719} \quad (6)$$

$$f_t = 0.8623 f_{sp}^{0.65} \quad (7)$$

由图7可知,现有轻质混凝土的抗拉强度与抗压强度的关系曲线^[8]明显偏离试验数据,且在相同 AACB 抗压强度时,其单轴抗拉强度大于试验结果,而拟合公式(式(6))更接近试验数据;黄勇等^[9]总结了高强、纤维、轻质混凝土劈拉强度与其对应单轴拉伸强度关系,其中幂函数对应 AACB 单轴拉伸强度与劈裂抗拉强度曲线在试验数据上方,而线性函数对应 AACB 单轴拉伸强度与劈裂抗拉强度关系偏离于试验数据下方,且相差很大;而本文拟合得到公式(式(7))较接近试验数据。

4 结论

a. 随着 AACB 的密度增大,其抗拉强度逐渐增大,且 3 种密度的荷载一位移曲线都只有弹性阶段,就达到极限拉伸值,即试件破坏,其极限单轴拉伸强度等于屈服强度;AACB 材料在单轴受拉荷载作用下的破坏主要由于其抗拉损伤因子控制,并表现出脆性破坏特点。

b. AACB 的拉伸强度、弹性模量随 AACB 密度的增大而逐渐增高,并呈幂函数增加,但拉伸屈服应变却随密度增大而减小。

c. 基于多孔材料理想预测模型及试验结果,对其试验数据进行拟合得到修正系数 $\alpha = 1.08$,并获得试验条件下 AACB 单轴拉伸强度与孔隙

率半经验公式;通过对本文 AACB 试验数据回归分析,建立了 AACB 单轴拉伸强度与抗压、劈裂抗拉强度关系的相关公式。

参考文献:

- [1] SONG Y M, GUO C C, QIAN J S, et al. Effect of the ca-to-si ratio on the properties of autoclaved aerated concrete containing coal fly ash from circulating fluidized bed combustion boiler [J]. Construction and building materials, 2015, 83(5): 136-142.
- [2] MALYSZKO L, KOWALSKA E, BILKO, P. Splitting tensile behavior of autoclaved aerated concrete: comparison of different specimens' results [J]. Construction and building materials, 2017, 157(12): 1190-1198.
- [3] LIU L, LIU P, CHEN G X. Mechanical properties and elastic-plastic constitutive model for autoclaved aerated concrete block [J]. Aci materials journal, 2021, 118(2): 127-138.
- [4] 全国水泥制品标准化技术委员会. 蒸压加气混凝土性能试验方法: GB/T 11969-2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [5] 国家能源局. 水工沥青混凝土试验规程: DL/T 5362-2018 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [6] 苏步云. 泡沫混凝土力学性能及其弹塑性损伤本构研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [7] BOCCACCINI A R, ONDRACEK G, MOMBELLO E. Determination of stress concentration factors in porous materials [J]. Journal of materials science letters, 1996, 14(1): 534-536.
- [8] AMRAN Y, FARZADNIA N, ALI A, et al. Properties and applications of foamed concrete; a review [J]. Construction & building materials, 2015, 101(30): 990-1005.
- [9] 黄勇, 史才军, 欧阳雪, 等. 混凝土劈裂拉伸测试方法及性能研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35(1): 1131-1139.
- [10] 张国伟, 陈博珊, 吴继丰, 等. 蒸压加气混凝土基本力学性能试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2017, 44(12): 135-139.
- [11] 侯捷. 高速冲击和三向应力状态下蒸压加气混凝土材料抗压特性试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [12] 吕信敏, 陈国新, 王佳慧, 等. 纤维增强型蒸压加气混凝土砌块力学性能研究 [J]. 混凝土, 2015, 42(2): 114-117.
- [13] 唐磊. 含水率对蒸压加气混凝土砌块性能影响的试验研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2011.

流速分布影响较小,而对喇叭管的流速分布影响甚微。流道进水收缩段的流线分布密集度和喉部流线弯曲度随底面倾角的增大逐渐加大,提高了进水收缩段和喉部流速,增大了流道水力损失。

b. 流道出口流速分布均匀度随底面倾角的减小逐渐提高,而出口水流速度加权平均角随底面倾角无明显的变化;在所研究的底面倾角范围内,流道出口流速分布均匀度和速度加权平均角随流量的变化均基本保持平稳。

c. 在研究的 5 种簸箕形进水流道进水收缩段地面倾角范围内,底面倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 的水力性能满足进水流道水力设计要求。 $\beta = 0^\circ$ 的方案 1 流道水力性能优于其他 4 个方案,为最优方案。

参考文献:

[1] 陆林广,周济人,叶健,等. 簸箕形进水流道的优化水力设计[J]. 水利学报,1997(9):31-36.
 [2] 陈松山,周正富,潘先星,等. 泵站簸箕型进水流道

水力特性试验及数值模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2006,9(4):73-77.
 [3] 李四海,陈松山,周正富,等. 两种簸箕形进水流道泵装置数模分析与比较[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(4):191-195,203.
 [4] 高传昌,孙龙月,董旭敏. 簸箕形进水流道宽度对流道水流流态的影响[J]. 人民黄河,2020,42(1):91-96,104.
 [5] 陈洋. 簸箕型流道泵站水泵振动的处理和技术分析[J]. 水电能源科学,2021,39(11):187-190.
 [6] 王亦晓,秦战生,陈洋,等. 基于 PANS 的轴流泵簸箕形进水流道水力特性[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(6):201-208.
 [7] 郑亚军,王凯,雷兴春,等. 基于 RNG 湍流模型的泵站进水流道三维数值模拟[J]. 水电能源科学,2008,26(6):123-125.
 [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泵站设计规范:GB50265-2010[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

Influence of Bottom Dip Angle of Inlet Contraction Section on Hydraulic Performance of Dustpan-shaped Inlet Passage

GAO Zhi-kai, WANG Shun-sheng, LIU Xin-yang, GAO Chuan-chang

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the bottom dip angle of contraction section of the dustpan-shaped inlet on the hydraulic performance of the passage, the physical model and hydrodynamic model of the inlet structure of the dustpan-shaped inlet were established. The Reynolds N-S equation and RNG $k-\epsilon$ turbulence model were adopted to simulate the flow field of the passage with 5 different underside inclinations in the inlet contraction section. The results show that the bottom dip angle increases has a great influence on the velocity distribution of the inlet contraction section and the throat of the winnowed dustpan-shaped inlet passage, and the scheme of the bottom dip angle increases the density of the streamline distribution and the curvature of the throat, with the increase of flow velocity, the hydraulic loss of the passage is large, and the velocity distribution uniformity of the outlet section of the passage is low; The scheme with small bottom dip angle makes the streamline distribution smooth and the throat streamline curvature becomes slow, the velocity decreases, the hydraulic loss of the passage reduces, and the velocity distribution uniformity of the outlet section of the passage increases; The magnitude of the inclination of the bottom surface of the intake contraction section has no obvious influence on the weighted average angle of the flow velocity of the outlet section of the passage. Hydraulic performance of passage with different bottom dip angles was analyzed. When the bottom dip angle of the inlet contraction section of the dustpan-shaped inlet passage is less than 3° , the water flow in the inlet passage is smooth, the hydraulic loss is small, and the flow pattern at the outlet of the passage meets the water inlet conditions of the pump impeller chamber.

Key words: dustpan shape; inlet contraction section; dip angle; numerical calculation; hydraulic performance

 (上接第 176 页)

Study on Uniaxial Tensile Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete Blocks

LIU Lei^{1a,1b,2}, ZHENG Zhi-hui³, SHI Yang-guang^{1a,1b}

(1a. College of Physical Science and Technology; 1b. Xinjiang Condensed Matter Phase Transition and Microstructure Laboratory, Yili Normal University, Yining 835000, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Technology University, Ningbo 315100, China)

Abstract: In order to study the uniaxial tensile behavior of autoclaved aerated concrete blocks (AACB) in static state, the uniaxial tensile test of AACB with different densities was carried out. The tensile failure characteristics and failure mechanism of AACB were analyzed. The change rules of its tensile strength and elastic modulus under different densities were discussed, as well as the relevant formulas of the relationship between uniaxial tensile strength and porosity, compressive strength and splitting tensile strength. The experimental results show that the tensile yield strength and elastic modulus of AACB increase with the increase of density, but the tensile yield strain decreases gradually. The macroscopic failure of AACB under uniaxial tension is mainly controlled by the tensile damage mechanism of the material. It shows obvious brittle failure characteristics. Based on the ideal prediction model of porous materials and the regression analysis of test results, the semi-empirical formula and correction coefficient of AACB uniaxial tensile strength and porosity under the test conditions were fitted. The conversion relationship between AACB tensile strength and its compressive strength and splitting tensile strength was proposed.

Key words: uniaxial tensile; elastic modulus; porosity; compressive strength; splitting tensile strength