

再生粗骨料混凝土模型化的研究进展

李真玉¹, 林大地^{2,*}

1. 温州职业技术学院, 瑞安学院, 浙江, 温州, 325000
2. 温州理工学院, 建筑与能源工程学院, 浙江, 温州, 325000

摘要: 作为建筑工程中推崇的绿色材料, 再生混凝土正逐步被广泛采用。由于再生粗骨料自身外观和组成的特殊性, 使得因再生粗骨料的特征导致再生混凝土的力学性能变化的研究难度较大, 因此广大研究者们开始关注再生混凝土模型化, 保证再生混凝土细观成分不变的前提下使用可量化分析的再生粗骨料模型以研究再生粗骨料特性对再生混凝土力学性能的影响规律及特点。本文梳理了再生混凝土的模型化及材料力学性能相关研究成果, 从再生粗骨料模型化方法、数字建模等方面总结了目前研究工作的发展趋势, 指出了目前对于再生混凝土力学性能需要积累研究成果的方向, 为今后再生混凝土理想化模型的改进提供思路。

关键词: 再生混凝土; 模型化; 力学性能; 本构关系

Research Progress on the Modeling of Recycled Concrete

Zhenyu Li¹, Dadi Lin^{2,*}

1. Rui'an College, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou, Zhejiang, China, 325011
2. College of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of Technology, Wenzhou, Zhejiang, China, 325011

Abstract: As an environmentally friendly material advocated in construction engineering, recycled concrete is gradually being widely adopted. Due to the unique appearance and composition of recycled coarse aggregates, the study of the mechanical performance changes of recycled concrete caused by the characteristics of recycled coarse aggregates is quite challenging. Therefore, many researchers have started to focus on the modeling of recycled concrete. Under the premise of ensuring the micro-composition of recycled concrete remains unchanged, the study of the impact of the characteristics of recycled coarse aggregates on the mechanical properties of recycled concrete is carried out using quantifiable recycled coarse aggregate models. This paper reviews the research results related to the modeling of recycled concrete and its mechanical properties, summarizes the development trends of current research work from the aspects of modeling methods for recycled coarse aggregates and digital modeling, points out the aspects that need to accumulate research results for the mechanical properties of recycled concrete, and provides ideas for the improvement of idealized models of recycled concrete in the future.

Keywords: Recycled aggregates concrete; Modeling; Mechanical properties; Constitutive relation

作为主要的建筑材料, 混凝土得到了广泛应用, 根据美国联邦公路管理局预计, 2050 年, 全球预计混凝土的需求量将达到 180 亿吨^[1]。同时, 自然灾害导致的混凝土建筑物受损与毁坏, 重新规划与翻新等都会产生大量的废弃混凝土^[2], 在欧洲、美国及日本每年都会产出超过 9 亿吨的建筑垃

圾^[3], 2020 年全国建筑业企业房屋施工面积达 149.47 亿平方米, 同比增长 3.6%, 受新冠疫情影响, 房屋竣工面积 38.48 亿平方米, 同比下降 4.37%。我国每年混凝土产量约 13 亿立方米, 建筑垃圾则达到 4000 万吨, 其中废弃混凝土约占 34%^[4], 目前我国对于废弃混凝土的处理仍没有有效理想的方法, 普遍采取堆放或者掩埋的形式进行处理, 占用大量土地的同时也会引起一系列环境问题^[5-10]。再生骨料混凝土 (Recycled Aggregate Concrete, RAC) 技术的提出, 不仅可以解决传统处理方式的弊端, 同时还可以实现资源的可持续利用^[11]。

再生粗骨料的组成复杂, 且外观不规则, 来源多样, 这导致重新配制的再生混凝土的力学性能的试验结果离散型较大, 同时对于再生粗骨料当中的残余砂浆含量对再生混凝土的力学性能影响的研究难度较大, 因此, 将再生混凝土改进为理想化模型的研究思路逐步产生。再生混凝土模型化的主要手法主要有两种: 一种为直接从废弃混凝土构件中取样后重新浇筑新水泥砂浆后得到的再生混凝土, 另一种为人为定义新旧砂浆强度按照再生混凝土细观组分进行配制的理想化再生混凝土模型。

1 再生混凝土模型化方法

1.1 取样与重浇筑获取模型再生混凝土

早期学者会记录再生粗骨料的来源, 即破碎废旧混凝土前的混凝土 (原生混凝土) 强度及水胶比, 然后将获取的再生骨料浇筑到新的砂浆中制成再生混凝土用于研究其力学性能。有研究表明, 将不同来源的再生粗骨料按照不同设计强度浇筑获得的再生混凝土, 其力学性能相对与普通混凝土会降低 10%~25%^[12]。用强度等级为 30MPa~100MPa 的混凝土制作成再生粗骨料, 用于配置不同强度等级的基体混凝土的再生混凝土, 来研究基体混凝土强度等级对再生粗骨料混凝土性能的影响。用强度等级为 80MPa 和 100MPa 制作的再生粗骨料配置的再生混凝土的抗压强度与同条件下普通混凝土的抗压强度接近, 甚至更高^[13, 14]

其研究重点包含新旧砂浆强度差对再生混凝土力学性能的影响、各细观组分之间 ITZ 的宽度及强度对再生混凝土力学性能的影响等。目前对于再生混凝土模型化的手法有很多种, 部分学者从大块的废弃混凝土钻心取样^[15], 然后将芯样浇筑在新砂浆中实现再生混凝土的模型化 (图 1), 此模型旨在研究再生混凝土中各细观组分的界面结构的损伤机理。

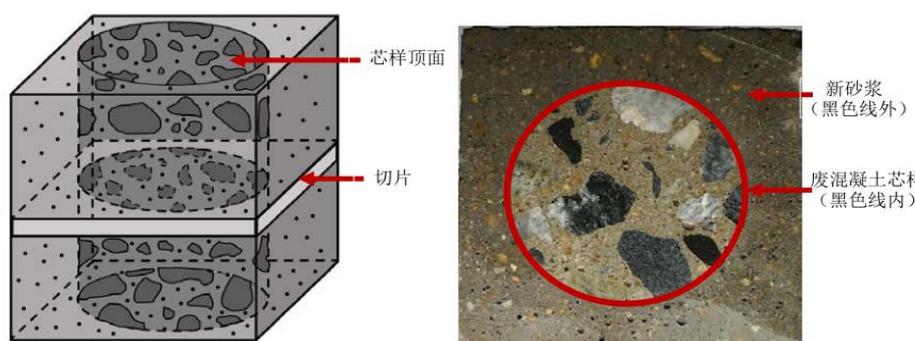


图 1 多重界面重构模型^[15]

Fig. 1 Multiple interface reconstruction model^[15]

1.2 模型再生混凝土

在再生混凝土模型化具有代表性的为肖建庄模型再生混凝土 (图 2), 该模型使用多个加工的岩石柱外包裹相同厚度的模拟旧砂浆, 经过养护后浇筑到新砂浆内制备而成, 以此种制备方式来更好的贴近后续所建立的 2 维有限元分析模型的分析工况与结果, 运用此模型进行了不同的新旧砂浆强度、不同旧砂浆厚度对其力学性能的影响规律, 同时使用纳米压痕和电镜扫描进行了微观力学试验。

此模型探索了不同细观组分的微观力学性能，同时研究了受压过程中试件的损伤特点。

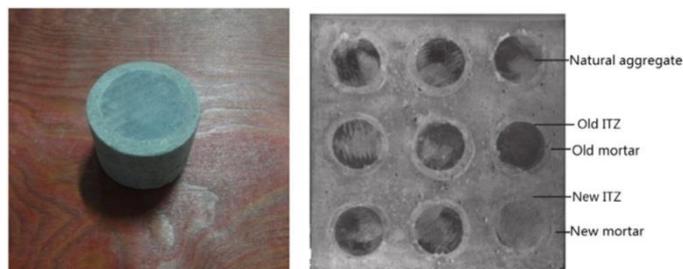


图 2 肖建庄“模型再生混凝土”模型

Fig. 2 Xiao Jianzhuang's "model recycled concrete" model

1.3 再生粗骨料模型混凝土

为了使理想化模型的力学性能结果更具有实际工程意义，将天然骨料按不同深度埋入至砂浆当中，获得具有不同残余砂浆覆盖率的再生粗骨料模型，此类模型最大程度地接近真实再生骨料，可以根据需要控制取代率和粒径，浇筑方法与传统制备再生混凝土方法相同（图 3）。破坏形态与传统制备的再生混凝土非常接近，在保证制备条件与实际工况接近的情况下获取不同残余砂浆覆盖率对力学性能的影响^[16]。

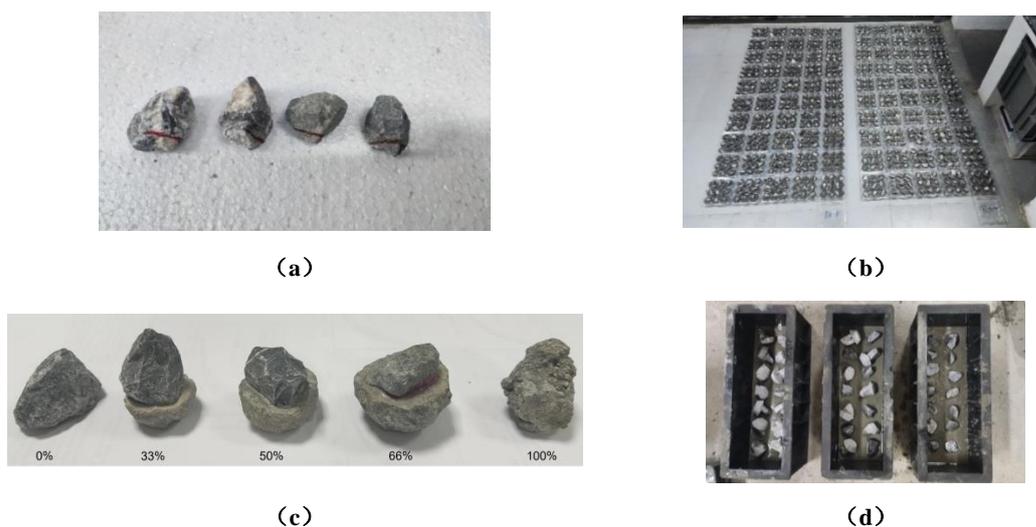


图 3 再生粗骨料模型的制备和再生混凝土浇筑

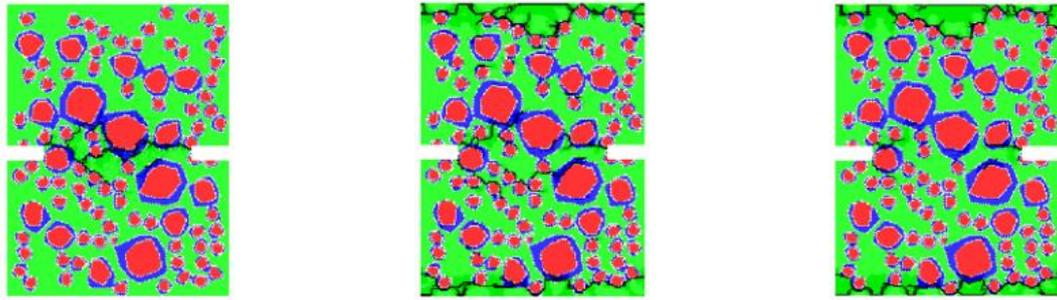
Fig. 3 Preparation of recycled coarse aggregate model and pouring of recycled concrete

2 再生混凝土细观数字建模

2.1 五相再生混凝土数字建模

图 1 显示了不同类型的再生混凝土有限元分析模型。现有的再生混凝土的数值分析模型均为由天然骨料，旧砂浆，新砂浆以及它们之间界面过渡区组成的五相复合材料^[17-20]，此模型在进行力学性能分析时仅涉及旧砂浆取代率、旧砂浆厚度^[17, 21]、投料方式^[20, 22, 23]以及其他外界因素的变化等^[24-27]，目前再生混凝土数值分析理想化模型的相关研究成果十分稀少，肖建庄的模型再生混凝土 Modeled Recycled Aggregate Concrete (MRAC)，即将 RAC 代表性细观组分在二维中理想化为圆形岩石，岩石外包裹的旧砂浆，新砂浆以及它们之间的界面过渡区五部分^[28, 29]。采用此类随机骨料模型的力学性能研究及变参数分析主要集中在取代率、旧砂浆厚度以及 ITZ 厚度对再生混凝土力学性能的影响。Liping Ying 等^[27]基于再生混凝土随机骨料模型，以加载速率为参数，对再生混凝土破坏模式及宏观力学性能的展开研究，建立了双边缺口试件（图 4），同时通过建立简支梁和 L 型试件

的动态拉伸模型，来研究轴向受拉、弯曲受拉和剪切受拉的力学行为。



(a) 0.01/s

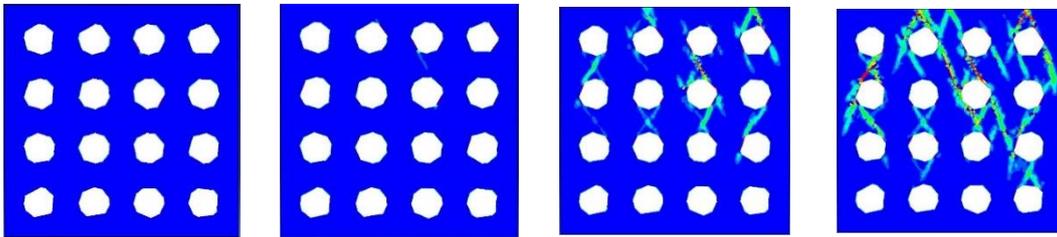
(b) 5/s

(c) 20/s

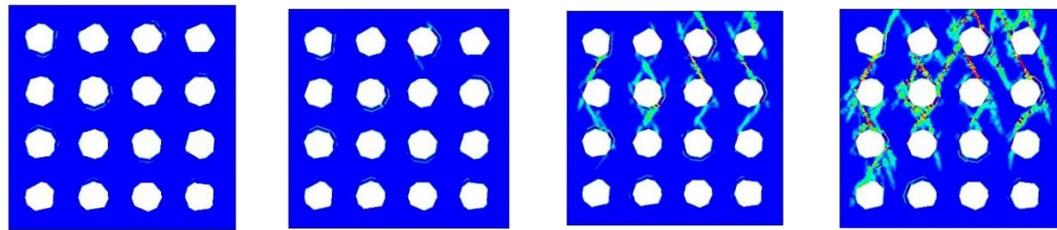
图 4 不同加载速率下双边缺口试件的损伤情况^[27]

Fig. 4 Damage of bilateral notched specimens at different loading rates^[27]

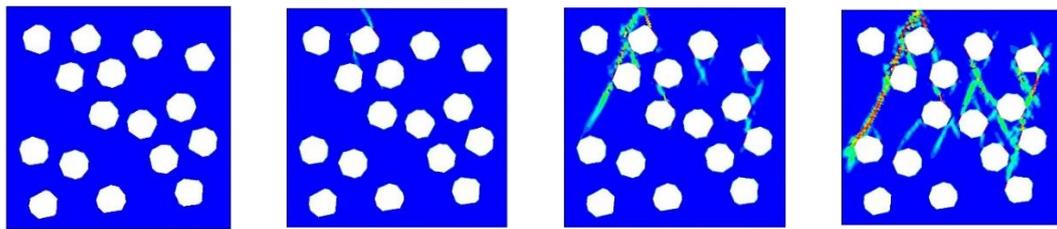
2.2 六相再生混凝土数字建模



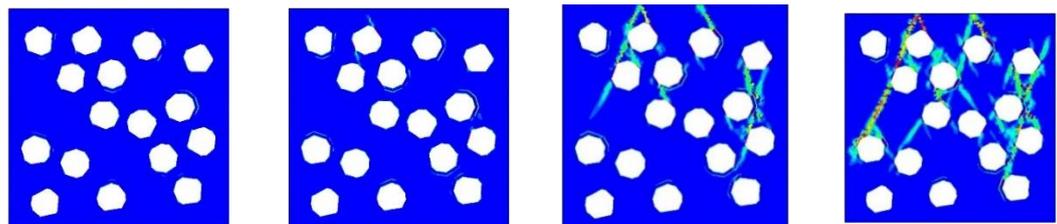
(a) AD-NC



(b) AD-50-5



(c) RD-NC



(d) RD-50-5

图 5 六相再生混凝土力学响应分析

Fig. 5 Mechanical response analysis of six-phase recycled concrete

一些学者则通过 X-CT 等扫描设备扫描后进行图像处理以及转化而生成, 此种模型具有六相再生粗骨料的特征, 但由于获得的再生混凝土数值分析模型的特殊性, 因此能进行的研究十分有限, 若进行多种工况下的研究会大大增加相关的工作量。有学者通过 ABAQUS 有限元分析软件与自编的 python 脚本实现骨料的随机投放, 并将再生骨料由圆形改进为随机多边形, 由五相复合材料改进为六相复合材料, 在满足不同取代率对强度影响研究的同时, 还可实现对不同旧砂浆覆盖程度对骨料受力影响的研究, 图 5 列出了部分再生粗骨料模型混凝土有限元分析模型的受压损伤过程云图, 其中 AD 代表矩阵式排列的粗骨料, RD 代表随机式排列的粗骨料, NC 代表无残余砂浆包裹的骨料, 试件以“排列方式-再生粗骨料取代率-残余砂浆覆盖率”的形式进行编号(图 5), 同时相较于基于真实混凝土图像识别生成的数值分析模型可以更好的研究 RAC 各细观组分的受力情况^[30]。

3 结论

本文简要介绍国内外研究学者对于再生混凝土模型化的方法以及力学响应分析的研究情况, 主要包含对再生粗骨料的理想化模型制备的特点以及再生粗骨料混凝土数字建模和力学性能分析等研究。经过整理与总结, 发现仍存在以下问题:

(1) 目前存在的再生混凝土理想化模型自身形态与实际工况差别甚远, 再生粗骨料模型的制备复杂, 无法制备接近实际工况且旧砂浆规格可控的再生混凝土力学性能研究模型。

(2) 学者们目前已实现了球体、凸多面体等混凝土三相细观结构骨料模型的建立, 但在再生混凝土领域五相或六相再生骨料三维细观结构骨料模型基本没有涉及。

(3) 对于细观组分影响再生混凝土力学性能方面的有限元分析研究中, 多数仅对细观组分的材料属性以及厚度变化进行分析, 因此应重点研究旧砂浆覆盖率以及附着量的统计方法以及旧砂浆覆盖率及附着量对再生混凝土的力学性能影响。

参考文献

- [1] Xiao R, Polaczyk P, Zhang M, et al. Evaluation of glass powder-based geopolymer stabilized road bases containing recycled waste glass aggregate[J]. *Transportation Research Record*, 2020, 2674(1): 22-32.
- [2] Xiao R, Polaczyk P, Jiang X, et al. Cementless controlled low-strength material (CLSM) based on waste glass powder and hydrated lime: synthesis, characterization and thermodynamic simulation[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 275: 122-157.
- [3] Gupta T, Siddique S, Sharma R K, et al. Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 217: 283-291.
- [4] Berger F, Gauvin F, Brouwers H J H. The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119786.
- [5] Shang X, Li J. Manufacturing and performance of environment-friendly lightweight aggregates with core-shell structure[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123157.
- [6] Omer M A B, Noguchi T. A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs)[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101869.
- [7] Tam V W Y, Soomro M, Evangelista A C J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)[J]. *Construction and Building materials*, 2018, 172: 272-292.
- [8] Xia B, Ding T, Xiao J. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study[J]. *Waste Management*, 2020, 105: 268-278.
- [9] Yan P, Wu J, Lin D, et al. Uniaxial compressive stress-strain relationship of mixed recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 350: 148663.

- [10] 杜婷, 李惠强. 再生骨料回收的技术工艺探讨[A]. 云南大学学报绿色建材专辑, 2002.
- [11] 李秋义. 绿色混凝土技术[M]. 中国建材工业出版社, 2014.
- [12] Tabsh S W, Abdeleatah A S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 1163-1167.
- [13] Kou S, Poon C. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 501-508.
- [14] Gonzalez-Corminas A, Etxeberria M, Poon C S. Influence of steam curing on the pore structures and mechanical properties of fly-ash high performance concrete prepared with recycled aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 71: 77-84.
- [15] 岳公冰. 再生混凝土多重界面结构与性能损伤机理研究[D]. 青岛理工大学, 2018.
- [16] Lin D, Wu J, Yan P, et al. Effect of regenerated coarse aggregate model arrangement mode on the axial compressive performance of MRCAC[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 422: 135783.
- [17] Liu L, Shen D.J, Chen H.S, et al. Aggregate shape effect on the diffusivity of mortar: A 3D numerical investigation by random packing models of ellipsoidal particle and of convex polyhedral particles[J]. *Computers and structures*, 2014, 144: 40-51.
- [18] 党娜娜, 彭一江, 周化平, 等. 基于随机骨料模型的再生混凝土材料细观损伤分析方法[J]. *固体力学学报*, 2013, 33(S1): 58-62.
- [19] 蒋宝库. 再生混凝土细观力学及氯离子扩散数值模拟[D]. 济南大学, 2015.
- [20] 段东旭. 基于细观结构的再生混凝土力学性能研究[D]. 西安理工大学, 2018.
- [21] 肖建庄, 李文贵, 刘琼. 模型再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(06): 791-797.
- [22] Zheng J J, Guo Z Q, Pan X D, et al. ITZ volume fraction in concrete with spheroidal aggregate particles and application: Part I. Numerical algorithm[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2011, 63 (7): 473-482.
- [23] Zheng J J, Guo Z Q, Huang X F, et al. ITZ volume fraction in concrete with spheroidal aggregate particles and application: Part II. Prediction of the chloride diffusivity of concrete[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2011, 63(7): 483-491.
- [24] 方金杰. 基于细观模型的再生混凝土拉伸应力-应变全曲线研究[D]. 福州大学, 2018.
- [25] Guo M, Grondin F, Loukili A. Numerical analysis of the failure of recycled aggregate concrete by considering the random composition of old attached mortar[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 28: 101040.
- [26] 赫传凯. 再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟[J]. *绿建节能*, 2019
- [27] Ying L, Peng Y, Kamel M M A. Mesoscopic numerical analysis of dynamic tensile fracture of recycled concrete[J]. *Engineering Computations*, 2020, 37(6): 1899-1922.
- [28] Thomas C, Setián J, Polanco J A, et al. Durability of recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40: 1054-1065.
- [29] 经承贵, 陈宗平, 郑巍. 型钢再生混凝土构件高温损伤分析[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(s2): 51-63.
- [30] Lin D, Wu J, g Yan P, et al. Effect of residual mortar on compressive properties of modeled recycled coarse aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 402: 132511.

¹ **第1作者:** 李真玉 (1996-), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 城市轨道交通管理、交通设施建设、数字孪生与智慧交通等相关基础研究和应用研究。E-mail: 2021000129@wzpt.edu.cn。

* **通讯作者:** 林大地 (1992-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 高性能橡胶混凝土路面材料性能、再生混凝土力学性能、再生粗骨料细观数字建模、多尺度下再生粗骨料模型混凝土损伤机理等研究。E-mail: 20240136@wzut.edu.cn。