

高强韧ECC材料制备理论及工艺研究

Preparation Theory and Process Research of High Toughness Engineered Cementitious Composites

供稿|刘一钉¹, 钟轶峰^{1,2}, 赵子龙^{1,2}, 李帛书¹, 邓兵¹ / LIU Yi-ding¹, ZHONG Yi-feng^{1,2}, ZHAO Zi-long^{1,2}, LI Bo-shu¹, DENG Bing¹

内容导读

进入21世纪以来,随着跨海湾、海峡大桥的建造,超高层、大跨度混凝土构筑物的出现使混凝土材料面临着新的挑战。应运而生的“新型绿色工程材料”——水泥基工程复合材料 ECC则是基于细观力学设计的一种具有超强韧性的三维乱向分布短切纤维增强水泥基复合材料,可以满足这些工程应用对材料性能的特殊要求。ECC材料的良好特性主要表现为以下特征:高延性、高韧性和多缝开裂等。文章从材料设计理论、制备工艺和应用前景对ECC材料进行了研究,经由多种前提的假定、原理分析(二重变分渐近双尺度法、应力应变曲线等方法)并进行模拟实验,建立了ECC水泥多尺度标准模型。实验通过建立不同界面模型,采用理论分析后对模型参数进行校正,提出变分渐近多尺度模型技术路线制备高性能ECC材料的研究理论,为工程复合材料的制备提供了具有一定参考价值的理论模型。

工程用水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)是一种具有高延性、高韧性和多缝开裂特征的纤维增强水泥复合材料,是由密歇根大学Li等在20世纪90年代提出的,是根据细观力学和断裂力学基本原理设计的一种短纤维增强水泥复合材料^[1]。此后,美国、日本等国家对该材料的性能和力学原理进行了大量研究,结果表明,ECC材料不仅具有超高的韧性,而且有较强的能量吸收能力,其极限拉应变值大约为普通混凝土的100~300倍^[2]。

通常情况下,ECC的纤维体积掺量约占砂浆整体体积掺量的2%,但其极限拉应变可超过3%,并且呈多点开裂现象,同时各裂缝宽度不超过100 μm。这说明ECC具有很好的延展性和微裂纹控制能力,解决了混凝土脆性破坏的缺点。可将ECC材料应用于抗震结构、抗冲击结构、水工大坝结构中,能够显著改善结构的耗能性和裂缝控制能力,大大提高结构的安全性^[3]。Li等对PVA-ECC材料的设计和组分选择、材料结构构件性能及施工工艺进行

作者单位: 1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400030

了广泛的实验研究^[4]。Yu等采用扩展有限元法和内聚力裂缝模型相结合，模拟了超高韧度水泥基修复震损剪力中混凝土和ECC材料内部的裂缝开展，以及界面裂缝在ECC与混凝土界面之间开展的力学行为^[5]。还有众多学者对高强韧水泥基复合材料的拉伸、弯曲性能进行实验研究^[6-12]。本文从材料设计理论、制备工艺和应用前景对ECC材料进行了研究，提出变分渐进多尺度模型技术路线制备出高性能ECC材料的研究理论，为复合材料的制备提供一定的参考价值。

材料设计理论

ECC材料设计遵循了能量准则和强度准则，是基于细观力学设计的具有超强韧性的三维乱向分布短切纤维增强水泥基复合材料(ECC材料与普通混凝土、纤维混凝土的性能对比，见图1)。为将各尺度的关系建立在统一的模型下，建立细、宏观尺度之间的联系，我们通过前期的理论技术分析、成分设计和实验模拟来制备高性能材料。在这一过程中，重点是从界面状态(强度和刚度)对宏观应力-应变场的影响机理出发进行设计，这是目前国际前沿交叉学科材料制备中的创新性课题。

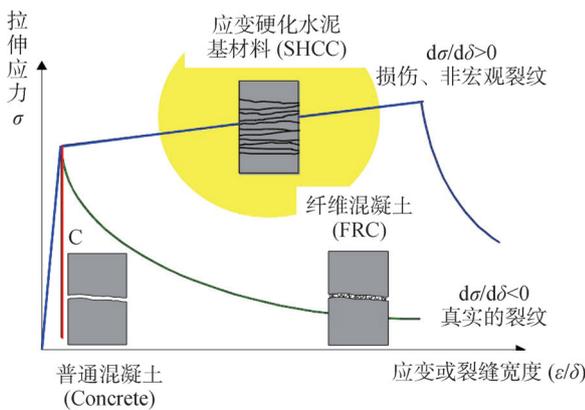


图1 ECC材料与普通混凝土、纤维混凝土的性能对比

采用高通量实验设计理论可对地区企业生产的水泥、砂、粉煤灰、纤维和超塑化剂等材料进行实验设计，在传统材料损伤理论的基础上引入湿-热-力耦合效应。恶劣环境会直接导致混凝土结构的钢筋锈蚀、冻融破坏、盐类侵蚀、溶蚀、碱-集料反应和冲击磨损等，严重威胁工程的安全性和耐久性，

直接影响损伤的产生和扩展，进而使工程材料的韧性、刚度、强度等力学性能发生变化，并影响材料的所有性质和服役行为。针对此类损失，实验拟从微纳尺度对材料的失效行为进行预防，重点采用微观物相对宏观应力-应变场的影响机理来设计，提高材料的可靠性。

近几年来，变分渐进理论在复合材料结构性能分析中得到了广泛应用。ECC变分渐进多尺度模型技术路线(见图2)是材料设计的重要理论，该理论首先推导ECC复合材料湿热弹塑性体的基本方程与边界条件，由热力学定律推导纤维/基体应变能、湿-热-力耦合能和湿热能构成的Gibbs自由能。其次，在此基础上研究ECC材料湿热弹塑性静力学的变分原理。一方面通过引入Lagrange乘子将带有约束条件的含多个自变量函数的泛函极值问题转化为无条件

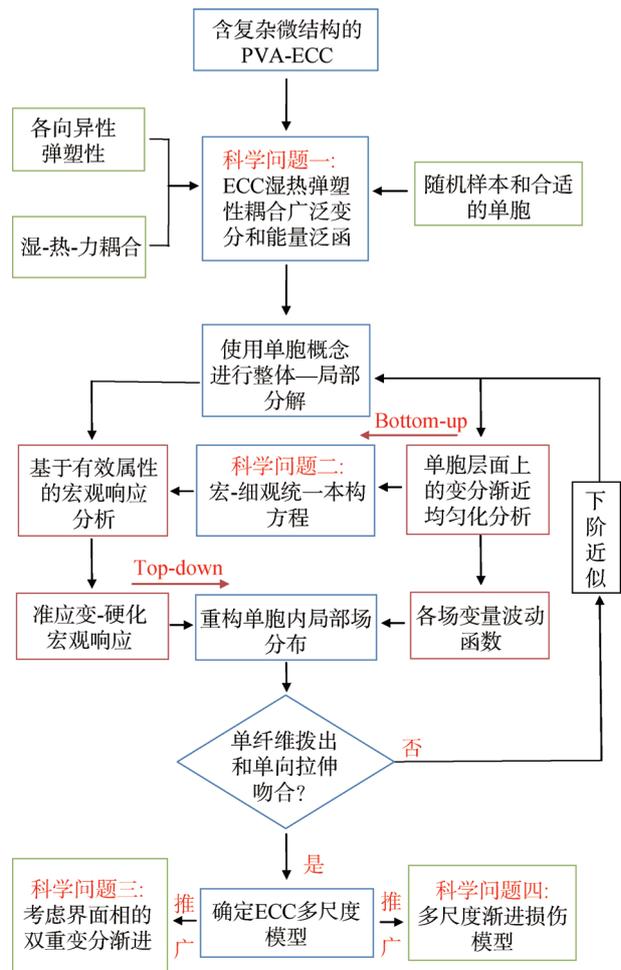


图2 ECC变分渐进多尺度模型技术路线

极值问题, 推导ECC湿热弹塑性体静力学5类变量的势能型广义变分原理。其中, 这5类变量分别为: 位移、应变、应力、温度和湿度。另一方面根据基本方程与边界条件以及本构方程, 采用变积方法推导ECC湿热弹塑性体静力学广义变分原理的泛函和宏-细观统一本构方程, 然后进行模拟实验。解决了破坏性实验成本高、实验环境苛刻等难题, 能实现高通量、低成本、高效率地研发出高性能ECC材料。

制备工艺研究及性能测试

根据ECC材料按照设计的模型和数值模拟的理论结果, 选择不同集料、不同纤维品种(Kuraray PVA、国产PVA纤维、钢纤维)、不同纤维掺杂量和不同水胶比, 制备出不仅能承受复杂、长时效载荷作用, 而且还能承受高温、高湿等苛刻的外部环境因素考验的基体材料。基于Gurtin-Murdoch表/界面理论引入界面应力, 采用非线性弹簧元建立三种不同界面模型(柔性、常响应以及渐近适应模型)模拟不同弱界面的粘结与失效。考虑到界面相尺寸比骨料/纤维尺寸小两个数量级的特征, 建立二重变分渐近双尺度法, 即按照纤维与界面相均匀化纤维。其次, 使纤维在基体中均匀化分布, 并由此推测和预报材料可能有效的力学性能。按照宏观均匀结构→单胞→应力集中区域的顺序, 逐层分析湿-热-力耦合下含界面相ECC材料的变形形状和三维应力-应变场分布。通过改变界面强度和刚度的大小, 进一步分析界面参数对宏观应力-应变场的影响规律。

之后测试材料的应力-应变曲线、冲击功性能和抗湿热氧化性能等, 将模拟结果与实验结果比较, 结合基于微观结构分析的准应变-硬化机理研究, 对模型参数进行修正, 建立基于ECC组分材料属性、测试数据校准和微观结构定义的多尺度模型, 实现对ECC准应变硬化行为的预测。研究各参数对ECC流变性能及力学性能, 例如: 延性、多缝开裂、弯曲性能(见图3)、单周拉伸性能等的影响规律。在此基础上, 可深入研究ECC材料的轴向压缩性能、弹性模量、泊松比以及抗压应力应变曲线等。

最后, 根据ECC多缝开裂满足条件引入稳态开裂准则和开裂强度准则, 将构建的多尺度模型与湿-热-力耦合下的渐近损伤联系起来, 建立从单胞失效



图3 ECC材料的弯曲性能

破坏→多微裂缝开裂→宏观裂缝破坏的多尺度渐近损伤模型。阐明ECC材料的强化机理和耐湿热环境腐蚀机理, 将结合界面的物相和性能表征结果用材料学的理论进行分析, 形成具有参考和推广价值的理论, 可制备出喷射型ECC材料、防火ECC材料、挤出式ECC管道、大坝和挡土墙ECC修复材料、抗渗隧道衬砌等多功能ECC建筑材料。

应用前景

进入21世纪以来, 我国建造了大量的跨海湾、海峡大桥。其中有代表性的是两座超过30 km的超长跨海大桥——东海大桥和杭州湾跨海大桥, 这些桥梁的研究与建设推动了我国大跨度桥梁理论的进一步发展。随着国家“一带一路”和“十三五规划”的实施, 我国将在渤海湾、长江口、杭州湾、珠江口、台湾海峡和琼州海峡等建设巨型跨海工程。

此外, 近年来我国超高层建筑建设速度也进一步加快。超高层、大跨度混凝土构筑物的出现, 尤其是复杂恶劣环境下服役混凝土构筑物的日益增加、自然灾害频繁发生、基础设施老化问题的进一步加剧等, 使混凝土材料面临着新的挑战。自此应运而生的水泥基工程复合材料 ECC则是基于细观力学设计的一种具有超强韧性的三维乱向分布短切纤维增强水泥基复合材料, 其具有良好的高延性性能, 可以满足这些工程应用对材料性能的特殊要求。同时ECC也在进一步向着绿色化、生态化方向发展, 如充分利用工业废渣(粉煤灰, 矿渣等), 这一发展趋势符合对于节约资源和能源、保护生态环境的要求, 可称其为“新型绿色工程材料”。

目前有关于ECC复合材料在实际工程中的应用已经在日本、美国等展开, 并取得了良好的效果。如位于日本岐阜的某挡土墙, 因碱骨料反应引起混

(下转第 26 页)

处理温度的提高, Ti-6Al-4V ELI厚板板材在热处理时板材表层及中心层组织会逐渐产生一定的差异, 尤其是热处理温度高于相变点时, β 晶粒长大速度较快, 因此温度越高, 板材表层与中心层组织差异越大, 这就导致高向拉伸强度及塑性随着热处理温度的提高而下降。

结束语

β 热处理的Ti-6Al-4V ELI钛合金对热处理温度较为敏感。首先, Ti-6Al-4V ELI厚板板材的 β 热处理必须保证热处理温度在相变点以上, 这样才能确保板材组织能够完全转变成魏氏体组织, 无等轴 α 晶粒的存在。在工业化生产过程中必须考虑热处理设备实

际的温度波动, 防止因热处理炉温度波动导致实际板材热处理温度偏低, 从而造成板材组织出现等轴组织或双态组织。其次, Ti-6Al-4V ELI厚板板材的 β 热处理温度选定在1000℃时, 其强塑性匹配较好, 且表层与中心层组织差异小。

参考文献

[1] 莫畏. 钛的金属学和热处理. 北京: 冶金工业出版社, 2009

作者简介: 黄杰(1983—), 男, 陕西宝鸡人, 工程师。2005年毕业于大连理工大学材料工程系材料物理专业, 工作于宝鸡钛业股份有限公司板带厂, 主要研究方向: 钛合金板带材加工技术。E-mail: 17892723@qq.com。

(上接第 22 页)

凝土严重损坏, 产生大量宏观裂缝。采用喷射ECC进行15 mm厚的修复, 修补完成一年后的ECC修复层表面上仅仅看到了少量宽度在50 μm 以下的微裂缝。此外, 在我国的地震多发地带, 抗震设计要求严格的地方需采用延性材料, 遭遇地震时可消耗更大能量, 成为一道防线, ECC复合材料在这方面有独特的优势, 因此对ECC复合材料的研究与应用势在必行。

参考文献

- [1] Zhang J, Gong C X, Ju X C, et al. Bending performance of ductile fiber reinforced cementitious composite. *Engineering Mechanics*, 2010, 27: 112
- [2] Zhang J, Gong C X, Ju X C. Characteristics of high ductility and low shrinkage engineered cementitious composite and its applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42: 1452
- [3] Kunieda M, Rokugo K. Recent progress on HPRCC in Japan. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006 (4): 19
- [4] Li V C. Progress and applications of engineered cementitious composites. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35: 531
- [5] Yu J T, Chen J, Lu Z D, et al. Numerical Analysis on Damaged Reinforced Concrete Shear Wall Repaired with Engineered Cementitious Composites. *Journal of Tongji University*, 2015, 43:

175

- [6] Xu S L, Li H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41: 45
- [7] Xu S L, Cai X R. Experimental study on mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced cementitious composite. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40: 1055
- [8] Gao S L, Xu S L. Experimental research on tension property of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47: 233
- [10] Wu G X, Han X M, Xu S L. Pseudo strain hardening model of ultra high performance cementitious composites under flexural loading. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25: 129
- [11] Zhong Y, Chen L, Yu W. Variational asymptotic modeling of the multilayer functionally graded cylindrical shells. *Composite Structures*, 2012, 94: 966
- [12] Zhong Y, Chen L, Yu W, et al. Variational asymptotic micromechanics modeling of heterogeneous magnetostrictive composite materials. *Composite Structures*, 2013, 106: 502

基金项目: 重庆科学基金资助项目(Nos.cstc2016jcyj A0426)。

作者简介: 刘一钉(1994—), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要从事金属及复合材料的制备与研究。E-mail: 541955183@qq.com。