

基于内聚力失效微观单胞模型的树脂砂拉伸性能的数值研究

冀运东^{1,2}, 郑凯东¹, 王 遥², 钟飞升³, 曹东风²

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430070; 2. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北武汉 430070; 3. 彰武县联信铸造硅砂有限公司, 辽宁阜新 123200)

摘要: 原砂粒度及分布、树脂膜厚度和空隙分布构成树脂砂微细观结构特征决定着树脂砂宏观力学行为。针对原砂/树脂间弱界面脱粘与树脂基体失效这两种失效模式, 构建了基于断裂力学微细观单胞模型, 研究了树脂砂微观结构的失效/断裂演化机制, 以及3类微观结构(即: 树脂包覆层厚度, 砂粒直径和粒径级配)对于树脂砂宏观力学行为的影响。计算结果表明, 所构建的数值模型能够考虑裂纹尖端的应力集中以及砂粒弧面的几何效应, 具备描述在拉伸载荷下树脂砂界面损伤/界面裂纹扩展以及树脂包覆层的内聚失效行为的能力, 为树脂砂失效断裂机理的研究提供了一种更加直接有效的工具; 微细观结构对树脂砂拉伸力学性能影响研究表明, 树脂包覆层厚度、砂粒直径和粒径级配对树脂砂的拉伸强度、比强度、拉伸刚度以及极限拉伸变形量有着不同程度的影响。

关键词: 树脂砂; 微细观结构; 单胞模型; 断裂机理

作者简介:

冀运东(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为纳米和亚微米尺度的复合材料。E-mail: jiyundong@whut.edu.cn

通讯作者:

曹东风, 男, 博士, 助理研究员。E-mail: caodongf@163.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)04-0364-08

基金项目:

中国博士后科学基金(2018M632933); 航空自然科学基金(20152365002)。

收稿日期:

2019-01-02 收到初稿,
2019-01-29 收到修订稿。

作为一种重要的铸造造型材料, 树脂砂的拉伸强度是其核心性能之一, 提高树脂砂的强度是业界长期以来不断追求的目标。树脂砂断裂过程和断裂机理是研究树脂砂强度理论首先要解决的问题。材料的断裂机理研究包含理论分析和实验研究两种途径, 关于树脂砂断裂机理的理论分析研究一般是基于简单的拉伸粘结理论。基于此理论建立的树脂砂强度模型认为树脂砂粘结桥的失效包含三种形式: 树脂薄膜与砂粒表面脱粘而导致的附着破裂, 粘结桥本身断裂形成内聚破裂以及包含两种破裂形式的复合破裂^[1]。一般认为, 树脂砂的强度与树脂自身性能、树脂加入量、原砂粒度及分布、树脂/原砂的界面强度等密切相关。围绕此强度模型, 国内外学者开展了大量研究工作。黄乃瑜^[2-4]等人先后在一系列文章中提到断裂力学在树脂砂中的应用, 认为树脂砂的断裂与树脂砂在变形和断裂过程中所消耗的能量密切相关, 提出了将断裂功作为树脂砂断裂的判据。游敏^[5-6]等人在理想球体、单一粒度的条件下, 研究了在树脂加入量一定的条件下, 原砂粒度对型砂强度的影响, 分析得出影响树脂砂强度的主要因素是结构内应力与树脂膜厚度。朱玉龙^[7]等人在单胞砂粒的理论模型基础上研究了原砂粒度与树脂砂强度的关系, 表明理想球体、粘结剂一定的条件下, 粒度变化引起粘结桥数量的改变和粘结桥面积的增减, 两者对树脂砂强度的影响是相互抵消的。但是, 该模型忽略了微观结构几何特性的影响。首先, 树脂砂是一种特殊的包含空隙的颗粒增强树脂基复合材料, 具有如下特征^[8]: 体积含量高达70%增强颗粒物, 体积含量低至1%的树脂基体, 高体积含量孔隙率30%; 其次, 没有考虑树脂砂结构中树脂完全包裹原砂的结构特点, 忽视了弯曲粘结界面的曲率对于断裂形式的影响, 而砂粒曲率可以一定程度上改变树脂包覆层的特征应力状态, 极有可能导致微观失效模式的改变。试验方面, 张启勋^[9]等人探讨了树脂膜厚度与型砂强度的关系, 通过实验证实存在最佳膜厚。李传斌^[10]研究了原砂性状对自硬树脂砂性能的影响, 指出原砂粒度对型砂强度的影响比砂粒分布的影响小。孙颖、刘国

平^[11]研究了不同粒度原砂对抗拉强度的影响,结果表明,随着砂粒目数的增加,抗拉强度呈现先上升后下降趋势。张永年^[12]指出砂粒与树脂粘结界面由于存在泥份杂质和水分子扩散,在砂粒表面与粘结桥之间形成弱界面层,大大降低了界面附着力,最终导致粘结桥附着破裂。上述实验性研究提供了树脂砂微细结构对于树脂砂力学行为影响规律的数据支持。但是实验研究仅能提供宏观承载能力和宏观的最终破坏形式,而无法捕捉树脂砂内部微细观断裂过程,难以对其失效机理进行解释。

鉴于实验方法的局限性以及现有理论研究过于简单,很难充分考虑微细观结构的几何特征影响的现状,本文拟采用有限元方法对树脂砂失效机理做更微观的研究。为了研究树脂砂可能存在的三种失效模式^[4, 13](即:界面附着破裂、树脂基体内聚破裂和复合破裂),基于断裂力学方法,构建了树脂砂微细观单胞模型。其中,基体相为酚醛树脂,增强相为天然石英砂颗粒。利用商业有限元分析软件Abaqus,研究了砂粒直径(目数)和树脂包覆膜厚度以及粒径级配对树脂砂宏观拉伸强度的影响,并从微细观层次出发,对树脂砂内部的损伤积累、裂纹起始与扩展,粘结桥破坏进行系统的分析。

1 微细观单胞模型、内聚力模型及工况设置

1.1 微细观单胞有限元模型

树脂砂型的微细观结构定义需要考虑如下因素:树脂和天然石英砂的几何形状以及分布,天然石英砂的表面微观结构(和界面粘接性能之间关联)。为了简化计算,本文做出如下假设:①天然石英砂为圆形;②树脂等厚均匀包覆在石英砂表面;③天然石英砂均匀分布;④考虑到表面微观结构比较复杂,界面粗糙度等引起的界面粘接性能采用界面强度和极限断裂能进行描述。

为了考虑细观结构特征,需要建立微米量级单元特征模型,为了减小计算工作量,只提取宏观结构的一个代表性模型胞元,微细观胞元的提取及简化采用了如图1所示的基本思路。基本假设如下:颗粒是均匀分布于宏观块体中,并且每个胞元受力状态一致。假设颗粒均匀分布于基体材料中,那么对于每个特征胞元,其边界都满足周期循环边界条件,故可将其简化为平面应变模型来考虑。该种建立模型的方法已广泛使用于颗粒增强材料的微观-宏观结构力学行为的描述^[14-16],其有效性已经被国内外学者普遍认可。简化后的树脂砂平面单胞模型,边界条件为:下端采用对称边界,上端面为一致性边界条件(即:边界节

点具有相同的 y 方向位移),左端面采用简支约束住 x 方向的位移,右端面采用Smooth Step方式进行位移加载。砂粒与树脂采用CPE4R单元,砂粒与树脂粘结界面采用COH2D4内聚力单元。 h 为包裹在砂粒上树脂膜厚度, r_1 、 r_2 为砂粒半径,砂粒之间粘结桥曲率半径为0.01 mm。树脂与砂粒相关参数^[17-24]见表1。

1.2 内聚力模型

鉴于断裂问题易导致单元应力奇异从而引起收敛性困难,本文采用基于能量的断裂力学方法描述砂粒和树脂包覆层的界面失效和裂纹扩展。内聚力模型(Cohesive Zone Method, CZM)是最具代表性的基于能量的预测方法。CZM模型能够很好的模拟界面损伤及裂纹演化过程,既不需要预置裂纹,也不需要事先判断裂纹的起始点及扩展方向,更适合于复合型断裂模式。

内聚力模型对应的裂纹开裂模式有多种,本文采用双线性内聚力模型^[25-28]模拟了砂粒/树脂粘接界面。粘结界面裂纹模型有张开型(I型)、滑开型(II型)、撕开型(III型)三种,本文平面模型不产生面法线方向的变形,故内聚力本构模型采用I型与II型混

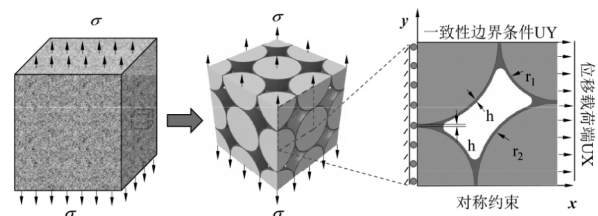


图1 树脂砂模型和轴对称有限元单元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of resin sand model and axisymmetric finite element model

表1 树脂和砂粒脆性断裂材料相关参数
Table 1 Some relative parameters of brittle fracture materials for resin and sand grains

材料项目	参数	数值
树脂脆性断裂材料	杨氏模量 E	1.27 GPa
	泊松比 ν	0.35
	密度 ρ	1 100 kg/m ³
	开裂后的直接应力 σ	16 MPa
	直接开裂应变 ϵ	0.015
	裂纹张开应变 ϵ	0.015
砂粒材料	直接开裂破坏位移 δ	0.000 02 m
	杨氏模量 E	50 GPa
	泊松比 ν	0.13
	密度 ρ	2 630 kg/m ³

合形式,如图 2a所示。在纯I型和纯II型时,牵引力与位移曲线所包含面积分别为I型与II型断裂能。在混合形式下的牵引力与位移可以表示为:

$$T = \sqrt{T_I^2 + T_{II}^2} \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2} \quad (2)$$

式中: T 表示裂纹张开时牵引力, δ 表示裂纹张开时位移。本计算模型在砂粒与树脂粘结界面插入零厚度内聚力单元,采用位移加载方式。由图2b可知,随载荷增加,粘结界面产生相对位移。图2c所示内聚力单元厚度 t 由零开始增加,同时牵引力 T 随界面张开位移呈线性增长。在单元所受应力达到界面内聚力强度时,此时牵引力达到最大值 T_{max} 。继续加载时,牵引力随位移增加呈线性下降趋势,直到界面能量释放率到达临界能量释放率时,界面单元失效,单元上应力降为零,裂纹产生。

树脂基体属于一种脆性材料,采用ABAQUS/Explicit自带脆性开裂模型对树脂基体进行模拟,该模型在基体材料单元某个材料点开裂应变达到定义的材料应变时,材料点失效,该点应力为零。当单元所有材料点都失效时,单元达到删除条件从网格模型中删除^[29-31],从而实现对树脂基体脆性断裂过程的模拟。脂砂界面强度参数的定义参考了相关文献[32],具体参数见表2。

1.3 工况设置

本文设计了13种工况,研究了典型微细观结构(树脂膜厚度、砂粒直径、砂粒的级配)对树脂砂拉

伸强度的影响,几何参数见表3。其中,编号为H₁-H₅的5个模型用于探讨树脂膜厚度对树脂砂结构拉伸强度的影响;编号为D₁-D₄的4个模型用于研究单一粒径($r_1=r_2$)情况下,砂粒直径对树脂砂结构拉伸强度的影响;编号为X₁-X₄的4个模型采用两种不同粒径的石英砂进行混合建模,研究不同粒径之间的级配对树脂砂结构拉伸强度的影响。

2 数值计算结果分析

2.1 树脂砂断裂过程与断裂机理

以典型工况H₃(即:石英砂直径为0.212 mm,酚醛树脂膜厚度为0.005 mm,酚醛树脂加入量6.5%)为例,展示树脂砂微细观结构的断裂过程,并结合相关实验对其失效机理进行解释。

图3为树脂砂在拉伸载荷作用下微结构的损伤和断裂演化过程。由图可知,初始损伤出现在树脂/砂粒的界面处,损伤位置在两砂粒间距离最近的桥接区域(图3a),导致损伤出现的驱动力为I型的界面拉伸应力;在拉伸载荷的持续作用下,损伤不断积累,当损伤度达到1时,界面出现破坏,产生裂纹(图3b)。裂纹沿着界面继续扩展(图3c),当界面裂纹扩展到颗粒弧面1/3处,裂纹开始沿着树脂包覆层进行扩展(图3d)。其扩展主因是:①裂纹尖端的应力集中;②颗粒曲面引起应力状态转变,即,特征应力由界面拉伸应力转变为包覆层树脂的剪切应力。在裂纹尖端的应力集中和剪切特征应力的共同作用下,颗粒间的连接完全失效,树脂砂彻底失去拉伸承载能力。

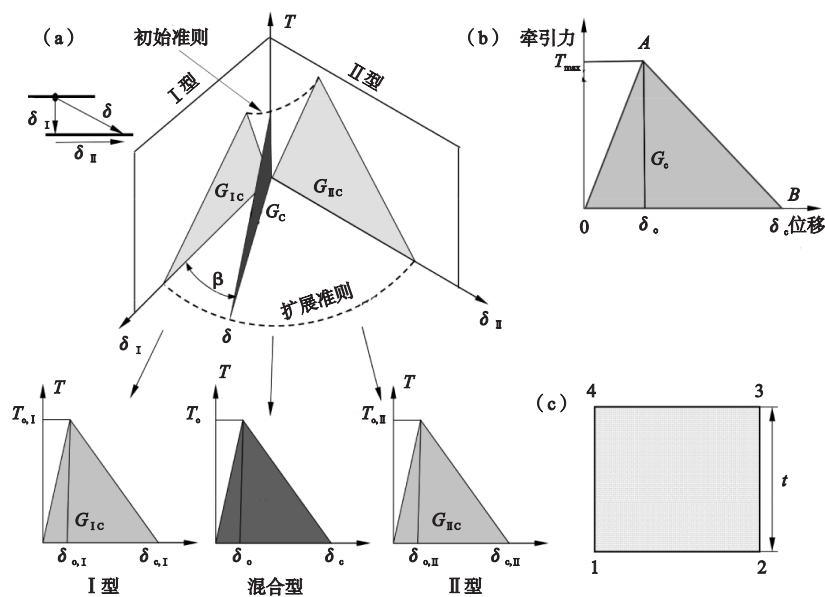


图2 I型、II型和混合模式下的双线性内聚力模型本构关系及内聚力单元

Fig. 2 Constitutive relation and cohesive element of bilinear cohesive element model under type I, type II and mixed modes

图4为型砂拉伸试样断口微观结构失效特征的扫描电镜 (SEM) 图片。图4a中树脂/砂粒粘结合界面破坏状态清晰可见, 同时呈现出一种砂粒/树脂界面脱粘和树脂基体破坏的复合断裂断口。4b展示的是以酚醛树脂包覆层剪切失效为特征的树脂砂微观结构失效形式。

基于有限元模型和SEM的分析, 可以确定本文所构建的有限元模型具备刻画树脂砂微观结构失效的能力。树脂砂结构破坏过程中, 树脂砂粘接桥破坏过程可分为损伤积累、裂纹起始、裂纹扩展、粘接桥破坏四个阶段。对于完全包覆结构的砂粒增强树脂基复合材料, 树脂砂结构中存在三种可能的断裂竞争失效机理: ①当界面结合较强时, 树脂基体率先出现裂纹, 并贯穿树脂颈, 粘接桥破坏; ②当界面结合较弱时, 树脂基体率先出现裂纹并扩展至砂粒/树脂界面, 直至粘接桥破坏; ③当界面结合较弱时, 裂纹起始于粘结合界面, 扩展到一定位置时, 特征应力由界面正应力转变为树脂剪切应力, 树脂基体产生裂纹并扩展, 树脂基体发生破坏后, 粘接桥完全破坏。由数值计算以及实验微观结构表征可知, 本文的拉伸断裂模式属于第③类。

2.2 树脂膜厚度对树脂砂拉伸力学性能的影响

树脂膜厚度与树脂加入量直接相关, 也与树脂砂的成本直接相关。制约树脂膜厚度有三个因素: 成本、强度和发气量。原则上, 在强度满足的条件下, 树脂加入量越低对工程越有利。因此探讨树脂膜厚度与树脂砂拉伸强度的关系有着重要的工程实际意义。在上节所述模型基础上, 固定砂粒直径0.212 mm, 改变树脂膜厚度, 厚度变化见表3中的工况H₁-H₅。取加载端节点加载方向的支反力合力F, 除以加载端高度r₁+r₂+h, 得到型砂等效拉伸载荷, 其等效拉伸载荷-位移曲线如图5a所示。

等效拉伸载荷呈现出典型的3阶段非线性行为。第I阶段, 型砂处于弹性加载状态, 界面完美连接同时

酚醛树脂基体未出现任何程度的损伤, 树脂砂等效拉伸载荷-位移曲线表现为线性增加。但是不同厚度酚醛树脂所对应的斜率不同, 随着酚醛树脂厚度增加, 斜率依次减小, 这意味着型砂的拉伸模量 (即: 拉伸刚度, 后文统称拉伸刚度) 随着树脂厚度的增加而减小。这是由于拉伸方向的酚醛树脂膜厚度较大, 同时酚醛树脂的弹性模量 (1.27 GPa) 远低于比石英砂的弹

表2 零厚度内聚力单元材料参数
Table 2 Material parameters of zero thickness cohesive element

计算参数	数值
法向内聚强度 σ_I	11.2 MPa
切向内聚强度 σ_{II}	9.8 MPa
法向临界断裂能 G_{cI}	8 J/m ²
切向临界断裂能 G_{cII}	22 J/m ²
界面刚度 $E_I=E_{II}$	1×10^6 N/mm ³

表3 工况设置
Table 3 Working conditions

编号	砂粒直径 2r ₁ /2r ₂ /mm	砂粒 目数/目	树脂膜厚 h/mm	树脂 加入量/%
H ₁	0.212/0.212	70/70	0.001 0	1.2
H ₂	0.212/0.212	70/70	0.002 0	2.4
H ₃	0.212/0.212	70/70	0.003 0	3.7
H ₄	0.212/.212	70/70	0.004 0	5.1
H ₅	0.212/0.212	70/70	0.005 0	6.5
D ₁	0.420/0.420	40/40	0.005 0	3.0
D ₂	0.300/0.300	48/48	0.003 6	3.0
D ₃	0.212/0.212	70/70	0.002 5	3.0
D ₄	0.150/0.150	100/100	0.001 8	3.0
X ₁	0.212/0.300	70/48	0.003 2	3.0
X ₂	0.212/0.212	70/70	0.002 5	3.0
X ₃	0.212/0.150	70/100	0.002 3	3.0
X ₄	0.150/0.125	100/115	0.001 7	3.0

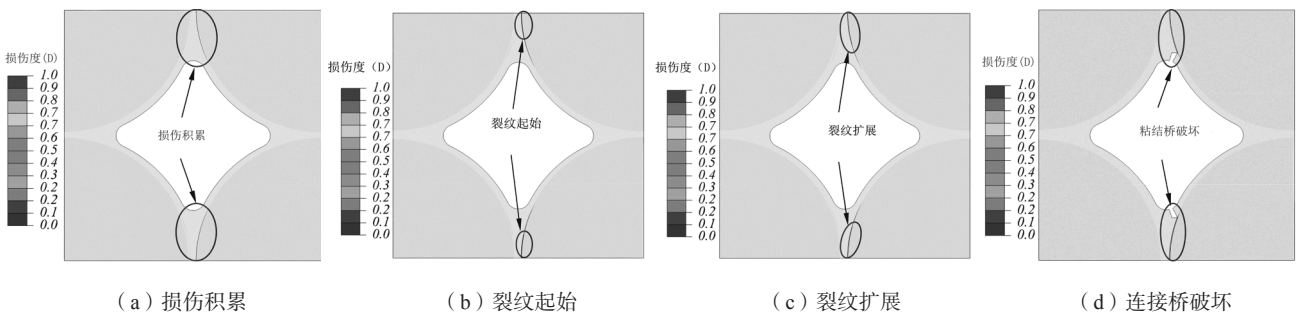
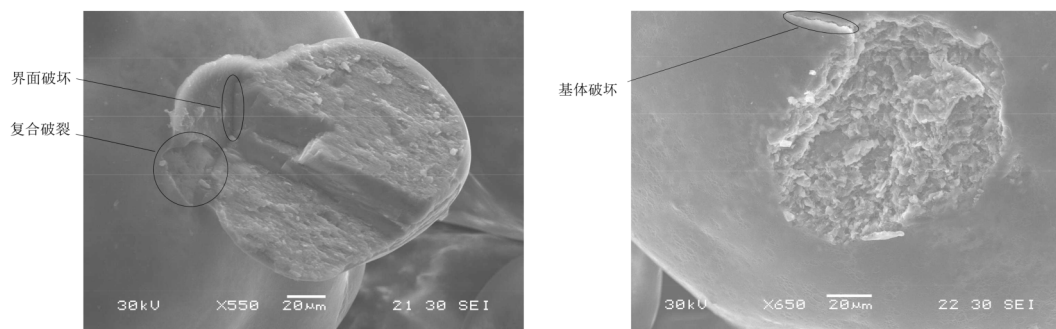


图3 树脂砂断裂过程中裂纹的产生与扩展 (工况H₃, 损伤云图)
Fig. 3 Crack generation and propagation in resin sand fracture process (H₃)

性模型 (50 GPa) 所导致。酚醛树脂膜厚越大, 其在拉伸方向的厚度比例相对越大, 从而导致整体宏观拉伸刚度的下降。第II阶段, 损伤出现和积累阶段。该阶段等效拉伸载荷随着拉伸位移的增加呈现非线性递增的变化规律。拉伸刚度不断衰减, 该衰减趋势依赖树脂膜厚。当树脂膜厚越小, 衰减趋势越显著。数值仿真表明型砂损伤演化都呈现出如下顺序的破坏模式: 界面损伤, 界面裂纹扩展和树脂基体的内聚破坏。第II阶段等效模量的衰减主要由于界面损伤和界面脱粘, 但型砂整体承载能力没有衰减, 未开裂界面约束的树脂基体依然可以承受很大的拉伸载荷。第III阶段, 界面裂纹尖端的应力集中以及曲率引起的应力状态的改变导致界面产生剪切断裂, 表现为等效拉伸载荷出现“断崖式”急剧衰减。此时, 石英砂和树脂基体的相互作用彻底失效, 树脂砂完全丧失拉伸承载能力。我们定义“断崖式”衰减时刻所对应的载荷为极限拉伸强度 (σ_b), σ_b 随着树脂膜厚的增加而增加, 树脂膜厚和极限拉伸强度的对应关系如图5b所示。极限拉伸

强度的极限拉伸变形量, 也随着树脂膜厚的增加而增大, 该结论和文献[1, 4-6, 9]的报道一致。

在型砂铸造行业, 树脂加入量和铸造成本直接相关, 比强度是该领域备受关注的重要指标。按照比强度的定义 (即: 加入1%树脂含量所对应的型砂强度) 绘制比强度与数值膜厚的对应关系曲线, 如图5b所示。在树脂加入量1.2%~6.5%区间, 数值结果显示比强度随着树脂减小而增加, 并没有出现最佳树脂膜厚度, 和前期实验^[4, 9]不同。文献[5-6]报道当树脂含量为3%对应的比强度最高。对此我们做了大量数值仿真和实验的求证工作, 认为只要树脂浸润都能达到本文所述理想模型的包覆效果, 树脂含量越低, 比强度也就越高。但是, 当树脂含量太低时, 实际工艺条件很难做到均匀的树脂包覆结构。认为3%的最佳树脂膜厚是要形成均匀较好包覆结构所对应的最小树脂含量。事实上, 随着工艺条件和树脂性能的提高, 在最新的树脂砂工业应用中, 在保持各项指标不降低的条件下, 树脂含量已经低到0.5%, 也验证了我们的结论。

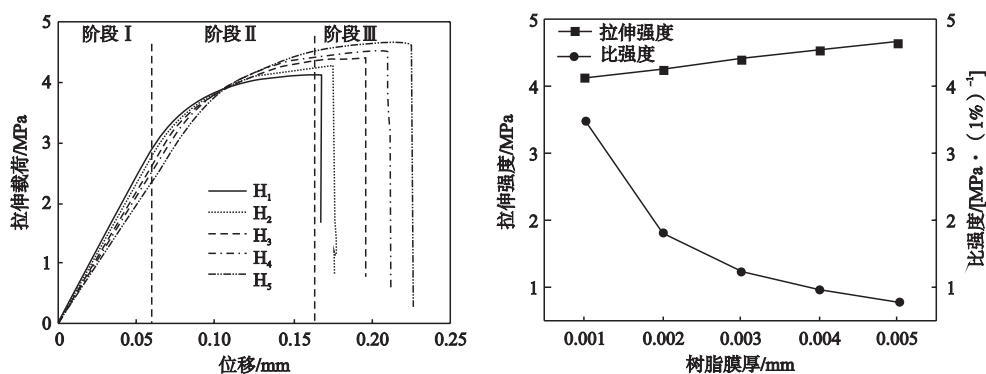


(a) SEM表征的复合断裂

(b) SEM表征的基体破坏

图4 型砂拉伸断口形貌的典型SEM图片

Fig. 4 Typical SEM images of tensile fracture morphology of molding sand



(a) 拉伸载荷-位移曲线

(b) 拉伸强度和比强度与树脂厚度的对应关系

图5 树脂膜厚度对树脂砂拉伸强度的影响

Fig. 5 Influence of resin film thickness on tensile strength of resin sand

2.3 原砂粒径对树脂砂拉伸力学性能的影响

树脂砂工业应用的实践表明,原砂粒径对树脂砂拉伸强度有显著的影响。粒度细化导致砂粒的表面积增大,粘结桥数目增多,有利于提高数值强度。但是,在树脂加入量恒定时,树脂粘结桥数量的增加,意味着砂粒个体间树脂厚度要相应减小。2.2节的数值结果表明,酚醛树脂包覆层厚度的减小,会导致拉伸模量的升高,极限拉伸变形能力降低,同时拉伸强度会相应减小。树脂厚度的减小和连接桥数目的增大两者是竞争关系。我们设计了4种工况,研究了在酚醛树脂加入量不变时,砂粒直径对石英砂/酚醛树脂结构的拉伸力学性能的影响。酚醛树脂的质量含量为3%,砂粒直径由0.42 mm变化到0.15 mm,对应的砂粒目数和树脂包覆厚度等参数见表3的工况D₁-D₄。各工况的等效拉伸载荷与位移的关系、等效拉伸刚度、拉伸强度以及极限拉伸变形量见图6a。拉伸强度以及比强度和砂粒直径的对应关系见图6b。

由图可知,在树脂含量3%条件下,石英砂/酚醛树脂结构的等效拉伸刚度随着粒径的减小而增大,而极限拉伸变形能力随之减小,该数值结果和预期结果一致。拉伸强度随着砂粒直径的减小而明显增大,0.42 mm砂粒直径对应的拉伸强度为3.4 MPa,0.15 mm砂粒直径对应的拉伸强度为4.9 MPa,增幅高达44%。由此可知树脂粘结桥数目增加的强化效应占据主导地位,树脂厚度减小的弱化效应处于次要位置。至于比强度,由于树脂含量一致,比强度呈现出与拉伸强度一致的变化规律。由上述结果可知,砂粒细化可以明显提高树脂砂的拉伸强度、比刚度以及拉伸刚度,但是极限拉伸变形能力有所退化。

需要注意的是,本节的所有结论都基于树脂包覆均匀完美的假设,但是实际铸造工艺中,砂粒细化会导致大量的砂粒团簇现象出现,会在一定程度上削弱

树脂砂的砂粒细化效应。

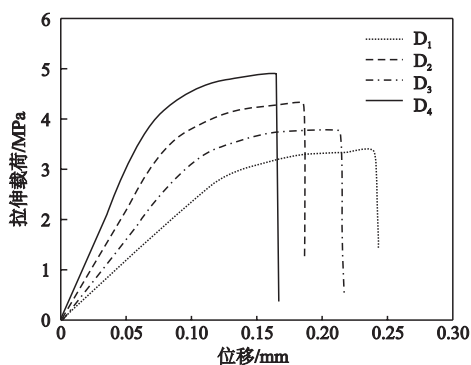
2.4 不同原砂粒径的级配对树脂砂拉伸力学性能的影响

树脂砂铸造工业中,为了获取合适的透气性以及强度,砂粒粒径不可能完全相同,而是在一定目数范围内变化,那么粒径级配对树脂砂拉伸力学行为的影响也是我们比较关心的问题。设计了如下几种砂粒粒径级配工况X₁, X₂和X₃。该三种工况在固定第一种颗粒(基准粒径)条件下,研究了第二种颗粒从0.3 mm变化到0.150 mm时对应树脂砂的拉伸力学性能。工况X₄作为对比工况,研究基准粒径变化时,树脂砂拉伸力学性能的变化。树脂的质量含量为3%,各工况对应的砂粒目数和树脂包覆厚度等参数详见表3的工况X₁-X₄。各工况的等效拉伸载荷与位移的关系、等效拉伸刚度,拉伸强度以及极限拉伸变形量见图7a。拉伸强度以及比强度与砂粒直径级配的对对应关系见图7b。

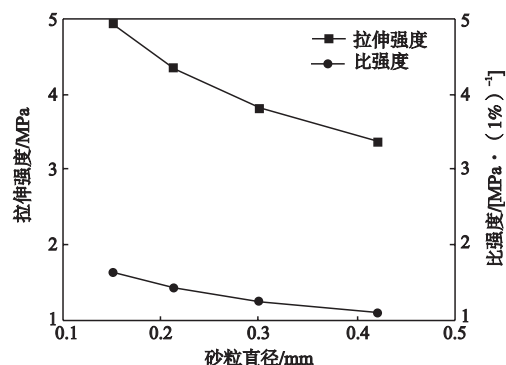
由图7a可知,当基准砂粒直径为0.212 mm时,随着第二种颗粒粒径的减小,等效拉伸刚度逐渐增大,极限拉伸变形逐渐减小,拉伸强度和比强度也逐渐增大。当基准砂粒直径为0.15 mm时,第二种颗粒直径为0.125时(工况X₄),拉伸强度和比强度最大。对比2.3节,砂粒直径级配变化规律主要受到砂粒直径的影响,和砂粒直径影响的数值结果一致。

3 结论

(1)所构建的有限元模型,能够刻画树脂砂在拉伸载荷下的界面损伤/界面裂纹扩展和树脂包覆层的剪切失效行为,这两种失效模式也是实验断口微观表征的主要失效模式。该模型能够考虑裂纹尖端的应力集中以及砂粒弧面的几何效应,为树脂砂失效断裂机理的研究提供了一种更加直接有效的工具。



(a) 拉伸载荷-位移曲线



(b) 比强度和拉伸强度与砂粒直径的对应关系

图6 砂粒直径对树脂砂拉伸强度的影响

Fig. 6 Influence of sand particle diameter on tensile strength of resin sand

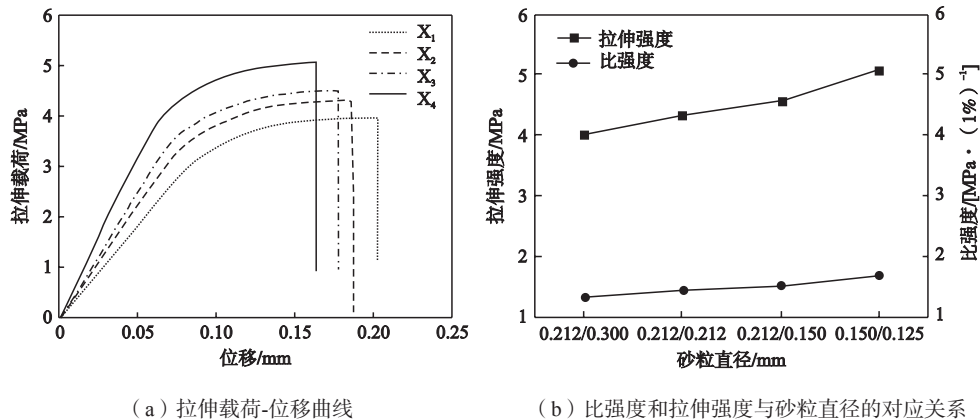


图7 不同砂粒直径的级配对树脂砂拉伸强度的影响
Fig. 7 Influence of grade-matched resin sand with different particle diameters on tensile strength

(2) 树脂包覆层厚度影响的研究表明: 在均匀理想树脂包覆的情况下, 树脂的厚度越大, 拉伸刚度越小, 极限拉伸变形也大, 拉伸强度越高; 但是比强度随着树脂包覆层的厚度增大而减小, 并不存在最佳树脂膜厚。

(3) 砂粒直径影响的研究表明: 树脂含量都为3%的情况下, 砂粒粒径越小, 拉伸刚度越大, 极限拉伸变形也小, 拉伸强度和比强度越高。尽管粒径减小, 树脂包覆厚度减小, 会削弱树脂砂的拉伸强度, 但是连接桥的数目增大, 却更大程度上提高了树脂砂的拉伸强度。树脂连接桥增多产生的强化效应占据主导地位, 树脂砂总体表现出砂粒细化增强效应。但是需要注意的是, 实际工艺条件下, 砂粒粒径越小, 砂粒的团簇就越有可能发生, 会在一定程度上削弱砂粒的细化效应。

(4) 粒径级配影响的研究表明: 树脂含量都为3%的情况下, 树脂砂拉伸力学性能的变化规律和砂粒直径影响的结果相似。

参考文献:

- [1] 杨晶, 李欧卿. PEPSET树脂用量和型砂强度关系的数学模型 [J]. 铸造, 1997 (12): 13-16.
- [2] 黄乃瑜, 游敏, 王文清. 粘结剂添加量对粘接效率的影响 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 1985 (S1): 51-56.
- [3] 黄乃瑜, 罗吉荣, 叶声平. 树脂砂韧度的研究 [J]. 铸造技术, 1992 (3): 42-45.
- [4] 黄乃瑜, 罗吉荣. 树脂砂芯断裂的新判据 [J]. 华中理工大学学报, 1992 (S1): 1-4.
- [5] 游敏, 郑小玲. 原砂粒度对树脂砂强度影响的理论分析 [J]. 铸造, 1999 (2): 40-42.
- [6] 游敏, 黄乃瑜, 曹文龙. 树脂添加量对壳型覆膜砂热性能的影响 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 1989 (S2): 89-94.
- [7] 朱玉龙, 蔡震升. 原砂粒度对树脂砂强度影响的分析 [J]. 铸造, 1996 (12): 35-36.
- [8] 冀运东. 轻合金铸造用EPA改性酚醛树脂及应用的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [9] 张启勋, 汪宝堂. 树脂膜厚度与树脂砂强度的关系 [J]. 铸造技术, 1998 (2): 44-45.
- [10] 李传斌. 原砂性状对自硬树脂砂性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2012, 32 (5): 63-68.
- [11] 孙颢, 刘国平. 树脂砂原砂粒度对强度的影响 [J]. 机车车辆工艺, 1998 (3): 7-9.
- [12] 张永年, 东野英. 弱界面层对树脂砂粘结桥附着力的影响机理研究 [J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 1987 (4): 99-106.
- [13] LI Yanlei, WU Guohua, LIU Wencai, et al. Effect of reclaimed sand additions on mechanical properties and fracture behavior of furan no-bake resin sand [J]. China Foundry, 2017, 14 (2): 128-137.
- [14] XUE Z, HUANG Y, LI M. Particle size effect in metallic materials: a study by the theory of mechanism-based strain gradient plasticity [J]. Acta Materialia, 2002, 50 (1): 149-160.
- [15] TVERGAARD V. Analysis of tensile properties for a whisker-reinforced metal-matrix composite [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1990, 38 (2): 185-194.
- [16] BAO G, HUTCHINSON J W. Particle reinforcement of ductile matrices against plastic flow and creep [J]. Acta Metallurgica Et Materialia Mcmeeking, 1991, 39 (8): 1871-1882.
- [17] IBTIHAL-AI-Namie, AHMED Aladdin Ibrahim, MANAL Fleyah Hassan. Study the Mechanical Properties of Epoxy Resin Reinforced With silica (quartz) and Alumina Particles [J]. Iraqi Journal of Mechanical and Material Engineering, 2011 (3): 486-506.
- [18] ZAMANIAN M, MORTEZAEI M, SALEHNIA B, et al. Fracture toughness of epoxy polymer modified with nanosilica particles:

- Particle size effect [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 97 (1) : 193–206.
- [19] 张大勇, 赵颖, 王刚, 等. 提高酚醛树脂耐热性能的主要途径 [J]. *黑龙江科学*, 2011, 02 (5) : 33–36.
- [20] 吴人洁. 现代分析技术在高聚物中的应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.
- [21] 金日光, 华幼卿. 高分子物理 [M]. 第三版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [22] 黄志雄. 热固性树脂复合材料及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [23] 华南理工大学等编. 地基及基础 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [24] 葛东彪, 王书忠, 胡福增. 聚醚增韧酚醛树脂及其泡沫的研究 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2003 (6) : 22–27.
- [25] HALLETT S. Predicting progressive delamination via interface elements [J]. *Delamination Behaviour of Composites*, 2008, 32 (14) : 367–386.
- [26] GEUBELLE P H, BAYLOR J S. Impact-induced delamination of composites: a 2D simulation [J]. *Composites B Baylor*, 1998, 29 (5) : 589–602.
- [27] REEDY E D, MELLO F J. Modeling the initiation and growth of delaminations in composite structures [J]. *J compos.mater Guess*, 1997, 31 (8) : 315–323.
- [28] CAO Dongfeng, DUAN Qingfeng, HU Haixiao. Computational investigation of both intra-laminar matrix cracking and inter-laminar delamination of curved composite components with cohesive elements [J]. *Composite Structures*. 2018, 192
- [29] 张珂, 齐宇飞, 王贺, 等. 氧化锆陶瓷磨削机理有限元仿真与实验 [J]. *沈阳建筑大学学报 (自然科学版)*, 2014 (3) : 523–529.
- [30] 李琛, 曹小兵, 姚学练, 等. 基于ABAQUS的定切削用量下硬脆材料切削力与材料属性关系研究 [J]. 2014 (9) : 72–74.
- [31] 陈力, 方秦, 还毅, 等. 强动载作用下钢筋混凝土梁破坏模式的有限元分析 [J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34 (6) : 580–585.
- [32] RITTER J E, FOX J R, HUTKO D I, et al. Moisture-assisted crack growth at epoxy-glass interfaces [J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33 (18) : 4581–4588.

Numerical Study on Tensile Behavior of Resin Sand Based on Micro-Scale Unit Cell Model Involving Cohesive Failure Mechanism

JI Yun-dong^{1,2}, ZHENG Kai-dong¹, WANG Yao², ZHONG Fei-sheng³, CAO Dong-feng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Zhangwu Lianxin Foundry Material Co., Ltd., Fuxin 123200, Liaoning, China)

Abstract:

The micro-structure characteristics of resin sand, such as sand grain size, size distribution, resin film thickness and void distribution, determines the macroscopic mechanical behavior of resin sand. In order to describe the two failure modes, i.e., interface debonding between sand and resin as well as resin matrix failure, a micro-scale unit cell model based on fracture mechanism was proposed. The micro-scale structure failure, damage evolution and the effect of 3 kinds of micro-structure (thickness of resin film, sand grain size, and size distribution) on macro-scale behavior of resin sand were studied. The calculation results showed that the proposed model could be used to describe the stress concentration of crack tip and the geometric effect of sand particles with cambered surface, and had the ability to capture interface debonding and resin matrix failure, which would provide a more effective tool for the research of micro-scale failure mechanisms further. The study on the effect of microstructure on the tensile mechanical properties of resin sand, showed that the thickness of resin film, sand grain size and size distribution had impact of different degrees on tensile strength, specific strength, tensile stiffness and ultimate tensile deformation of the resin sand.

Key words:

resin sand; micro-structure; unit cell model; fracture mechanism