

砂浆 - 花岗岩 ITZ 动态直接拉伸力学性能的 试验研究

江 伟¹, 卢玉斌¹, 姜锡权², 段俊舟¹

(1. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;
2. 陆军炮兵防空兵学院 先进材料动力学实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 砂浆 - 骨料的界面过渡区(interfacial transition zone, 简称 ITZ)被认为是混凝土结构的“最薄弱环节”。为探究不同的应变率、试件长径比及骨料表面粗糙度对砂浆 - 花岗岩 ITZ 动态拉伸性能的影响规律, 利用大直径(ϕ 75 mm)分离式 Hopkinson 拉杆(SHTB)装置对砂浆 - 花岗岩复合试件进行动态直接拉伸试验。研究表明: (1) 随应变率的增大, ITZ 的抗拉强度会相应提高, 故表现出一定的率敏感性, 并且其率敏感性与骨料粗糙度密切相关; (2) ITZ 的平均抗拉强度随着骨料表面粗糙度的增大而降低; (3) 相同加载气压下, ITZ 的平均抗拉强度随长径比的增大而明显下降, 且其下降幅度会随骨料表面粗糙度的增大而减小。

关键词: 岩石力学; 界面过渡区; 结构特性; 力学性能; 动态直接拉伸

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)08 - 1905 - 11

Experimental study on dynamic direct tensile mechanical properties of mortar-granite ITZ

JIANG Wei¹, LU Yubin¹, JIANG Xiquan², DUAN Junzhou¹

(1. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Army Artillery Corps Air Defense Academy, Laboratory of Dynamics of Advanced Materials, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: The interfacial transition zone(ITZ) is considered to be the “weakest link” of concrete structures. To study the effect of different strain rates, aspect ratios, and surface roughness of the aggregate on the dynamic tensile properties of the mortar-granite ITZ, a large-diameter(ϕ 75 mm) split Hopkinson tensile bar(SHTB) device was applied in dynamic direct tensile tests to mortar-granite composite specimens. Experimental results showed that the tensile strength of ITZ increased with the growth of strain rate. The tensile strength of ITZ is strain rate sensitive, which is closely related to the surface roughness of aggregates. The average tensile strength of ITZ decreased with the increasing of surface roughness of aggregates. Under the same loading pressure, the average tensile strength of ITZ declined significantly with the growth of aspect ratio, and the descent range was diminished with the increasing of aggregate surface roughness.

Key words: rock mechanics; interfacial transition zone; structural characteristics; mechanical properties; dynamic direct tension

收稿日期: 2017 - 12 - 18; **修回日期:** 2018 - 04 - 24

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 联合基金项目(U1430110); 西南科技大学平台基金项目(14tdzk01)

Supported by the National Natural Science NSAF Joint Foundation of China(Grant No. U1430110) and Southwest University of Science and Technology Platform Foundation(Grant No. 14tdzk01)

作者简介: 江 伟(1989 -), 男, 2015 年毕业于郑州工业应用技术学院机械设计专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石力学及数值模拟方面的研究工作。E-mail: 1587694164@qq.com。通讯作者: 卢玉斌(1980 -), 男, 博士, 现任副研究员。E-mail: yubinluzju@hotmail.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1608

1 引言

随着混凝土应用范围的不断扩大,人们越来越关注混凝土强度的最薄弱环节——界面过渡区,改善界面过渡区的结构和性能是混凝土“变弱为强”的关键因素^[1]。基于 ITZ 结构与性能的研究,目前很多学者也提出了相应的试验技术和研究方法,旨在改善混凝土整体结构性能。因此,研究混凝土的界面结构和力学性能对探索其破坏机制、改善整体性能以及细观力学分析均具有重要意义。

近年来,国内外对混凝土界面特性的研究多集中于对界面结构特征、劣化机制、裂纹扩展等细观层次的研究,而直接涉及 ITZ 本身力学性能的研究还相对较少。在混凝土的力学试验中,由骨料与砂浆交界区域的断裂路径可发现:混凝土的破坏往往先从界面过渡区产生,继而向其他组分扩展,对混凝土的宏观力学性能及破坏模式有重大影响。C. T. Y. Lybimove 和 E. R. Pinns 等^[2]首次从细观层次提出界面过渡区(ITZ)的概念,认为 ITZ 的结构特性是决定混凝土力学性能的主要因素;L. Hong 等^[3]在基于粗骨料类型和表面粗糙度如何影响界面黏结强度的试验研究中,发现劈拉强度、弹性模量和泊松比等均随粗骨料表面粗糙度的增加而增大,且增量逐渐减小;G. H. Rao 和 B. K. R. Prasad^[4]通过采用不同的砂浆强度对砂浆-骨料复合试件进行直接拉伸,结果表明 ITZ 的黏结抗拉强度约为砂浆基体强度的 1/3,且砂浆强度越低,ITZ 的黏结抗拉强度越低;朱亚超^[5]在液压式材料试验机上对 150 mm×150 mm×150 mm 的砂浆-骨料复合试件进行了劈裂拉伸,发现 ITZ 的黏结抗拉强度明显低于砂浆本体强度,并且随着骨料表面粗糙度的增加和砂浆本体强度的提高,ITZ 的黏结抗拉强度也显著增大;王瑶等^[6]利用 MTS 试验机对圆柱体砂浆-花岗岩复合试件进行动态轴向拉伸,发现界面的黏结抗拉强度随应变率的增加而明显增大,并且在不同应变率下交界面的应力-应变曲线上上升段类似,达到强度的 50%之后开始呈非线性变化,但非线性程度随应变率增加趋向不明显;S. Caliskan^[7]通过对砂浆-骨料圆柱体复合试件进行推出试验,得出 ITZ 的黏结抗剪强度随骨料直径的减小而增大且其尺寸效应符合 Weibull 分布;K. N. Feng 等^[8-10]得出了岩石类材料的动态力学性能与应变率有关的结论,即表现出明显的率相关性;Z. L. Wang 等^[11]在拉拔试验机上对

含界面试件进行拉伸试验,结果表明 ITZ 的黏结抗拉强度随着水灰比的降低而升高,并且 ITZ 的黏结抗拉强度接近于砂浆强度的一半;陈兴等^[12]利用 MTS 试验机对砂浆-花岗岩含界面试件进行了准静态劈裂,得出各因素对 ITZ 黏结抗拉强度的影响程度,由大到小依次为:砂浆强度、试件长径比、骨料粗糙度、应变率、试件直径;周翠^[13]利用电液伺服万能试验机对砂浆-玄武岩含界面试件进行准静态拉伸,发现试件的破坏位置多发生在界面处砂浆的内聚层上,并且 ITZ 的黏结抗拉强度远低于砂浆基体强度,仅为砂浆基体强度的 0.2~0.6 倍。考虑到动态直接拉伸试验受加载控制、设备调试、试件与杆端面的黏接等多种因素的影响,导致试验难度增大,因此很多学者对含界面试件的动态拉伸特性研究还多以间接拉伸(劈裂、层裂、三点弯曲等)的试验方式为主,而这并不能反映冲击载荷下其界面的真实力学性能与破坏机制。

鉴于此,本文利用直径为 75 mm 的 SHTB 对圆柱体砂浆-花岗岩含界面复合试件进行动态直接拉伸试验,研究不同加载应变率、骨料表面粗糙度及试件长径比等因素对界面拉伸性能的影响,并为砂浆-骨料界面特性的研究提供一定参考。

2 试验方案

2.1 试验材料

试验所用水泥为 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,细骨料河砂取自绵阳市涪江,细度模数为 2.37,级配良好,属于中砂;试样骨料部分自四川雅安某石材厂加工的花岗岩石材,属于芝麻白系列,其矿物成分主要有钠长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、钾长石(KAlSi_3O_8)、石英(SiO_2)等;水为普通自来水。

2.2 试件制备

本次试验采用一半为砂浆,另一半为骨料的圆柱体含界面复合试件。其中,准静态直接拉伸试验的试件共分 2 组:A 组(骨料在上)和 B 组(骨料在下),每组各 5 个试样,试样尺寸均为 $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,与砂浆接触的骨料表面光滑,浇筑模型如图 1 所示。

动态直接拉伸试验所用试件共 9 组(每组 5 个),尺寸有两种规格:1~3 组为 $\phi 74 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$;4~9 组为 $\phi 74 \text{ mm} \times 74 \text{ mm}$,试验试件采用的是 B 组浇筑模式。与砂浆接触的骨料表面设计了 3 种不同的粗糙度:光滑、粗砂纸和钎,其中光滑界面是通过磨床切割、磨削而成;粗砂纸界面是由砂纸打磨而成;

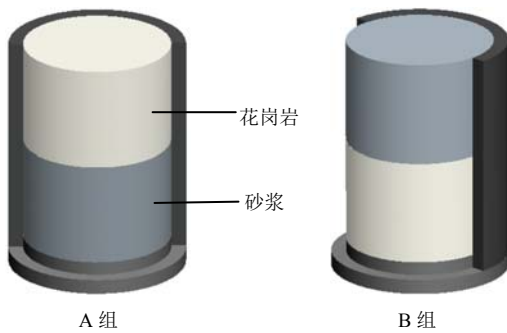


图 1 试件的浇筑模型

Fig.1 The cast model of specimens

钎子界面是利用切割机进行人工处理。骨料表面粗糙度采用灌砂法进行测量，以灌砂的平均深度 Ra 表示，计算公式为

$$Ra = V/A \quad (1)$$

式中： Ra 为平均深度(mm)， V 为灌砂体积(mL)， A 为试件的横截面面积(mm²)。

虽然砂浆的力学性能与砂浆的配合比例密切相关，但本次试验主要是基于粗糙度、应变率和长径比等因素对界面黏结抗拉强度影响的研究，因此试验研究中采用统一的配合比，如表 1 所示。

表 1 砂浆组分配比

Table 1 The mixing proportions of mortar components

编号	质量/kg			强度等级
	水泥	砂子	水	
A	1.00	3.80	0.69	
B	1.00	3.80	0.69	M20
1 [#] ~9 [#]	4.00	15.20	2.76	

为保证试件在浇筑前骨料表面能保持足够的湿度，需先将骨料放入养护箱内浸水放置 24 h。浇筑完毕后，将其放入振动台振捣密实后，在钢模的上表面覆盖一层薄膜，24 h 后脱模并放入养护箱(温度为 20 °C ± 2 °C，湿度 ≥ 95%)标准养护 28 d。由于试验条件的限制，试件在室温(20 °C ± 5 °C)条件下放置了一个月左右才开始进行试验。

2.3 试验方法

(1) 准静态直接拉伸试验

由于试样为上下放置的半砂浆和半骨料圆柱体复合试件，为了改善界面的结构强度，在进行动态直接拉伸试验之前，需先验证骨料放置的位置关系对 ITZ 黏结抗拉强度及界面结构的影响。该试验在微机控制电液伺服万能材料试验机上进行，试验设备与连接装置如图 2 所示。为避免预加载对试验结果的影响，试验前先将黏接钢板两侧涂均高强度结



(a) 试验设备

(b) 连接装置

图 2 准静态直接拉伸试验

Fig.2 Quasi-static direct tensile tests

构胶(ergo1690)并及时与试样黏接并压紧，使之充分接触。待 24 h 后胶水完全固化，再装夹到试验机上(目的是为了减少预载应力)，加载过程中采用位移控制模式，加载速率为 1 mm/min。

(2) 动态直接拉伸试验

动态直接拉伸试验装置采用陆军炮兵防空兵学院先进材料动力学实验室的分离式霍普金森拉杆(SHTB)设备进行试验。整个装置由发射系统、入射杆、透射杆、吸收杆、管状子弹以及数据采集系统组成。杆系直径为 75 mm，入射杆、透射杆和吸收杆的长度分别为 6 000，3 500 和 3 000 mm。其中，杆的弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.25~0.30，密度为 7 800 kg/m³，弹性波速为 5 196 m/s，试验装置实物图，如图 3 所示。



图 3 SHTB 试验装置

Fig.3 The test device of SHTB

考虑到动态拉伸试验中的加载速率较大，在惯性力作用下极易导致试件与端面脱胶，因此为确保试件与杆能够有效黏接，所选用胶水的黏结强度必须大于试件的抗冲击强度。在多种胶水的试用下，最终选 YK - 9811 高强度结构胶用于试验。同时，为了减少试件端面的应力集中，并使试件中间部位(界面)处于单向拉伸应力状态，需在两端面附近沿梯度方向依次环向加黏数层钢丝网进行加固，砂浆 -

花岗岩试件动态直接拉伸示意图, 如图 4 所示。

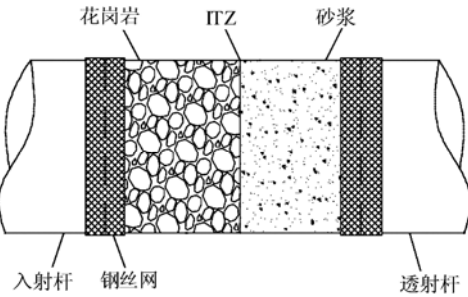


图 4 试件的动态拉伸示意图

Fig.4 A diagram of specimen under dynamic tension

(3) 动态直接拉伸的试验原理

图 5 为 SHTB 的装置示意图。打开进气阀, 使外界气源进入储气室, 当达到所需气压后关闭进气阀, 打开泄气阀。管状子弹在高压气体的推动作用被加速到一定的撞击速度, 并以此速度撞击入射杆顶端的法兰盘, 产生一个入射弹性压力脉冲, 持续时间取决于子弹的长度。此时, 有一部分压缩应力波会被吸收杆捕获, 最后由能量吸收器(阻尼器)吸收, 另一部分应力波则在入射杆自由端面反射成拉伸波, 并传向试件, 使试件拉伸破坏。当入射杆中的入射应力波到达试样端面时, 由于杆系与试件的波阻抗不匹配, 一部分应力波而被反射回到入射杆形成反射应力波, 另一部分则穿过试件传播到透射杆形成透射应力波。

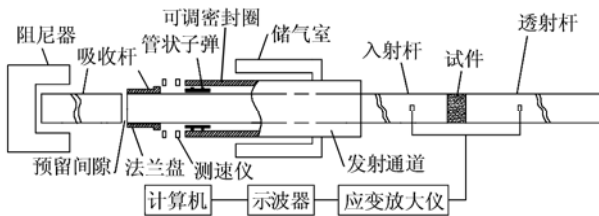


图 5 SHTB 装置示意图

Fig.5 Diagram of SHTB device

SHTB 的试验原理, 如图 6 所示。根据一维弹

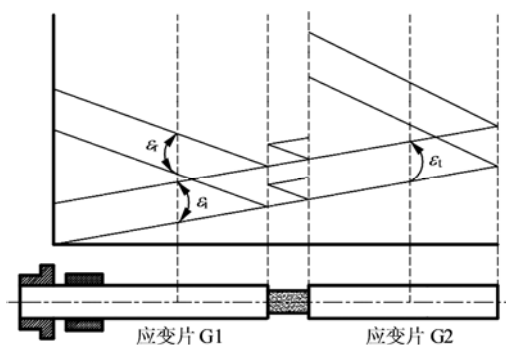


图 6 SHTB 的试验原理图

Fig.6 The working mechanism of SHTB

性应力波的传播理论, 由入射杆和透射杆应变片分别获取的脉冲信号 $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$, 可以计算出试件两端面的力 F_1 , F_2 以及位移 u_1 , u_2 。具体如下式所示:

$$F_1 = E_0 A_0 [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \quad (2)$$

$$F_2 = E_0 A_0 \varepsilon_t(t) \quad (3)$$

$$u_1 = C_0 \int [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)] dt \quad (4)$$

$$u_2 = C_0 \int \varepsilon_t(t) dt \quad (5)$$

当试件内部满足应力均匀假设的条件下, 材料的应力、应变、应变率具有如下关系:

$$\sigma_s = \frac{F_1 + F_2}{2A_s} \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = \frac{u_1 - u_2}{2L_s} \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

根据宋力和胡时胜^[14]所述, 由二波法和三波法比较得知, 三波法有较高的可信度, 更能接近材料的真实测试结果。因此, 本文采用三波法进行数据处理, 由上述关系式(2)~(8)整理可得数据处理公式:

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_0}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (9)$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (10)$$

$$\sigma_s = \frac{A_0 E_0}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (11)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_s$, ε_s 和 σ_s 分别为动态拉伸试验中试件的应变率、应变和应力; $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为电压信号转换之后的入射应变、反射应变和透射应变; C_0 , A_0 和 E_0 分别为杆的弹性波波速、横截面积和弹性模量; A_s 和 L_s 分别为试件的横截面积和长度; t 为应力波在试件内的传播时间。

(4) 数据的采集与处理

信号采集系统主要由应变放大仪(KD6009 型)、示波器(Agilent DSO6014A)和惠斯通电桥盒组成。试验中, 应变片被普遍用于杆中应变信号的采集, 为了减少杆中横向应变产生的误差, 通常将 2 个应变片串联在一起, 并分别对称地贴在杆的左右两侧。在外力作用下, 通过黏结剂和应变片基底传到应变片的敏感栅, 从而引起电阻的变化。这样就将力学参数如应力、应变、位移等转化成与之成比例的电学参数。应变放大仪主要用来测量爆炸、撞击等冲

击载荷下的高频应变和瞬态应力，不仅可以提供稳定的桥压，还具有低通滤波(一般取 100 kHz)和信号输出放大的功用。惠斯通电桥盒的作用是将应变片电阻的变化转化成电流或电压信号。示波器是将采集到的模拟电压形式的信号转化为数字化信号。

若要对材料本构关系进行研究，则需要进行静态标定以求出其电压 - 应变转化系数，即在惠斯通电桥桥臂上并联一个大阻值电阻 R_B 来模拟应变片中应变的改变。本次试验采用 1/4 全等臂桥路连接，如图 7 所示。

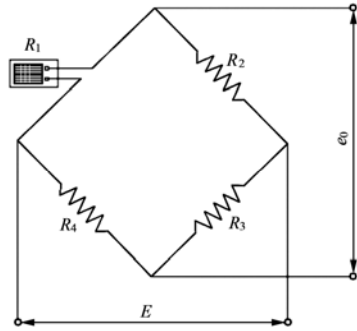


图 7 惠斯通电桥
Fig.7 Wheastone bridge

其中，供桥电压为 E ，输出电压 e_0 ，应变片阻值为 R_1 ，电桥盒中的阻值为 R_2 ， R_3 以及定值电阻 R_4 有如下关系：

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad (12)$$

当任意一个桥臂并联电阻时，电阻值都会发生变化，改变量 ΔR 为

$$\Delta R = \frac{R^2}{R_B + R} \quad (13)$$

然而，电阻值的变化与应变成线性关系：

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (14)$$

电压与应变之间的转换系数 η 为

$$\eta = \frac{\varepsilon}{u} \quad (15)$$

式中： K 为应变片灵敏度系数； ε 为应变值； u ($u = U_0$) 为静态标定时示波器所输出的电压幅值。将式(13)，(14)代入式(15)可得转换系数 η (单位： $\mu\varepsilon$)：

$$\eta = \frac{R}{R_B + R} \frac{1}{U_0 K} \quad (16)$$

一般而言，静态标定需通过 3 个大阻值电阻 R_B 进行标定(每个阻值各标定 3 次，分别取平均值)，然后再取其平均值。

3 试验结果与分析

3.1 砂浆 - 花岗岩界面的准静态拉伸力学性能

在准静态直接拉伸试验中，为研究圆柱体砂浆 - 骨料界面试件在制备时砂浆与骨料两相材料的位置关系对其界面破坏形态及力学性能的影响，分别以 A, B 两组试件(A 为骨料在上, B 为骨料在下, 每组各 5 个且骨料界面光滑)为研究对象，准静态拉伸破坏后的界面形态，如图 8 所示。



(a) 骨料在上



(b) 骨料在下

图 8 不同骨料位置关系下的界面形态

Fig.8 Interface morphologies under different aggregate position relationships

图 9 为准静态拉伸试验中所选取的有效数据的应力 - 应变曲线，从图中可看出，A 组试件 ITZ 的抗拉强度要明显高于 B 组(A 组试件 ITZ 的平均抗拉强度为 2.63 MPa, B 组试件 ITZ 的平均抗拉强度为 1.28 MPa)，且其弹性阶段的应力 - 应变表现为明显的线性增长关系以及较高的杨氏模量，达到一定承载能力后开始发生屈服，整个过程表现为弹塑性变形；而 B 组试件的应力随应变表现为缓慢的非线性增长关系，杨氏模量相对 A 组明显偏低且并未表现出屈服现象。

这是由于骨料位于钢模下方时，在振捣过程中砂浆内的气泡上移而排出浆体之外，从而使得砂浆与骨料界面更加密实光滑且没有气泡存在；反之，当骨料在砂浆基体之上时，振捣中砂浆内部的气泡基本上都排到界面处，形成若干气泡构成的气泡层界面。研究发现，ITZ 的抗拉强度与界面形态有着直接的关系，正是该层气泡的作用使得 A 组试件的抗拉强度远大于 B 组，并且砂浆界面气泡越密集，

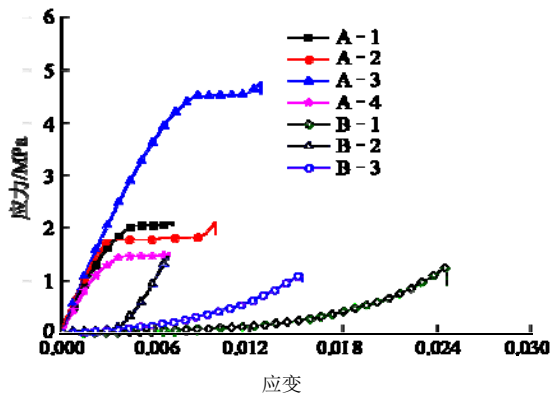


图9 砂浆-花岗岩界面的准静态拉伸应变-应力曲线
Fig.9 Quasi-static tensile strain-stress curves of mortar-granite interface

则砂浆与花岗岩界面的吸附力越大(类似于吸盘作用), 抗拉强度也就越高。此外, 发现 A 组试件破坏后的砂浆界面有明显的拉拔迹象, 其界面形态如图 10 所示。



图 10 A 组试件的砂浆界面形态
Fig.10 Mortar interface morphologies of group A specimens

3.2 砂浆 - 花岗岩界面的动态拉伸力学性能

在准静态拉伸的基础上, 本文对尺寸为 $\phi 74 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$ (试件编号: 1[#]~3[#])和 $\phi 74 \text{ mm} \times 74 \text{ mm}$ (试件编号: 4[#]~9[#])两种类型试件分别在 0.65, 0.85 MPa 加载气压下进行动态直接拉伸, 本次动态直接拉伸试验共分 9 组, 每组各 5 个试样。以试件 6[#] - 5 为例, 其动态拉伸破坏效果如图 11 所示。由于试验试件的骨料表面粗糙度有光滑、粗砂纸和钎子 3 种(界面粗糙度依次递增), 故破坏后试件的界面形态如图 12 所示。



图 11 砂浆 - 花岗岩的动态拉伸破坏
Fig.11 Dynamic tensile damage of mortar-granite

由于 ITZ 本身属于结构的“薄弱环节”, 且界面的黏结抗拉强度较低以及电阻应变片灵敏度不高的缘故, 使得透射信号较难捕捉, 因此在试验中采用半导体应变片(灵敏度系数 $K = 110$)进行数据采集, 以

试件 6[#] - 5 为例, 所得的原始波形如图 13 所示。

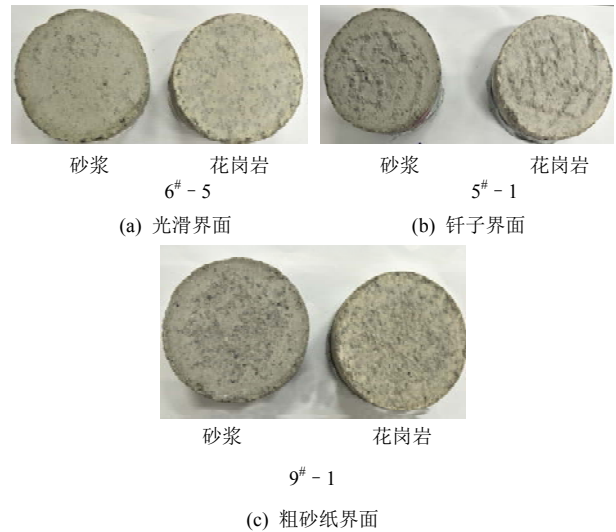


图 12 动态拉伸破坏后的界面形态
Fig.12 Interfacial morphologies after dynamic tensile failure

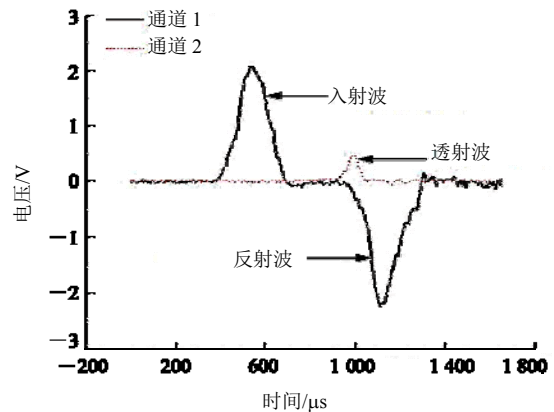


图 13 动态直接拉伸的原始波形
Fig.13 A original waveform of dynamic tension

根据应力均匀性假设, 通常是不考虑试件的长度, 然而这样却忽略了应力波在试件中传播的时间。而事实上试件均是有长度的, 在子弹撞击之后, 应力波按入射杆、试件、透射杆的顺序先后传递, 由于试件与杆的弹性模量不同, 即波阻抗不同, 应力波需要在试件中来回传播多次才能达到应力平衡状态, 故应力波传播到透射杆的时间会相对延迟一些。另外, 在数据处理中, 波头选取准确与否将直接影响到整个动态应力平衡分析及试验结果的可靠性, 波头的选取通常是根据应变片的位置而定, 采用“宁左勿右”的原则, 先确定入射波头, 而反射波和透射波的波头可由下式计算得到:

$$T_r = T_i + \frac{2L_0}{C_0} \tag{17}$$

$$T_t = T_i + \frac{L_0 + L_1}{C_0} \tag{18}$$

式中： T_i ， T_r ， T_t 分别为入射波、反射波和透射波的波头； L_0 ， L_1 分别为入射杆、透射杆上的应变片到试件左右两端面的距离。若以试件 6[#]-5 为例，则入射波、反射波和透射波的对波效果，如图 14 所示。

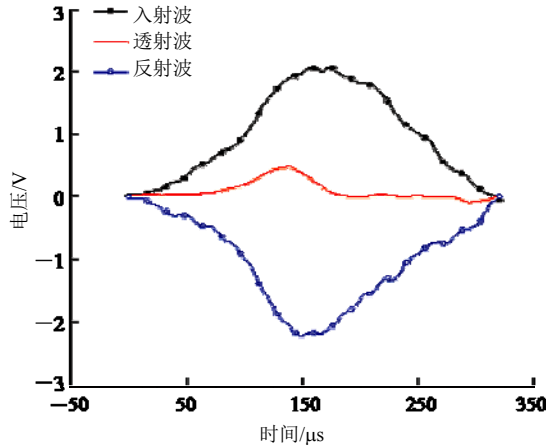


图 14 三波法的对波

Fig.14 The alignment of three waves

基于粗糙度、长径比和应变率等因素对砂浆-骨料 ITZ 的黏结抗拉强度的影响，本次试验对 45 个砂浆 - 花岗岩试件(骨料在下)进行了动态直接拉伸，选取有效试验数据并通过三波法(式(9)~(11))计算出相关力学性能参数如表 2 所示。

图 15 为砂浆 - 花岗岩动态拉伸的典型应力 - 应变曲线。由图可以看出，随长径比的增大，ITZ 的黏结抗拉强度、杨氏模量均有明显下降的趋势，并且达到峰值应力前曲线的波动现象逐渐加剧，可见尺寸效应对界面的力学性能有一定的影响；而随加载气压的增加，ITZ 的黏结抗拉强度、屈服应力均显著增大，表明了砂浆 - 花岗岩界面具有明显的应变率效应；另外，在 3 种不同粗糙度的骨料界面中，光滑界面相对粗砂纸界面和钎子界面表现出明显的屈服现象，而骨料表面粗糙度越大，其屈服现象越不明显且抗拉强度越低。由应力 - 应变曲线可知，在整个加载过程中，弹性阶段的应力 - 应变关系呈线性增长的趋势，达到屈服极限后开始缓慢增长，当应力达到试件的承载极限后开始发生断裂失效，峰值应力迅速下降。

关于试件中的应力均匀性，Y. B. Lu 和 Q. M. Li^[15]提出了应力均匀性的相关判断准则，即以应力平衡因子 $R(t)$ 来判断试件内部的应力均匀程度：

$$R(t) = \frac{\Delta P(t)}{P_{avg}(t)} = 2 \frac{|P_1(t) - P_2(t)|}{|P_1(t) + P_2(t)|} \quad (19)$$

表 2 砂浆 - 花岗岩 ITZ 的动态直接拉伸试验结果

Table 2 The results of dynamic direct tensile test to mortar-granite ITZ

试样编号	粗糙度/mm	抗拉强度/MPa	应变率/s ⁻¹	最大应变/%	加载率/(GPa·s ⁻¹)	平均应力/MPa	长径比	气压/MPa
1 [#] -3	光滑 (0.06)	7.02	54.5	0.92	13.1	6.73		
1 [#] -4		7.40	61.0	1.05	12.5			
1 [#] -5		5.78	50.8	0.91	12.5			
2 [#] -1	粗砂纸 (0.223)	3.78	43.7	0.64	9.19	5.34	0.5	
2 [#] -2		5.92	41.9	0.56	15.3			
2 [#] -3		6.07	47.9	0.81	16.5			
2 [#] -4		4.87	62.2	0.89	19.5			
2 [#] -5		6.07	52.1	0.84	15.1			
3 [#] -1	钎子 (0.412)	4.97	51.2	0.81	18.8	4.62	0.65	
3 [#] -2		4.30	35.0	0.65	18.5			
3 [#] -3		5.64	61.0	0.89	20.3			
3 [#] -4		3.64	49.7	0.87	23.5			
3 [#] -5	4.57	50.0	0.70	26.1	3.85			
4 [#] -1	粗砂纸 (0.223)	4.43	27.6	0.41				8.1
4 [#] -2		3.34	24.4	0.39				14.3
4 [#] -3		4.03	29.0	0.47				10.9
4 [#] -4		3.79	31.4	0.50				12, 8
4 [#] -5		3.64	24.4	0.16	15.6			
5 [#] -1	钎子 (0.412)	3.04	24.4	0.38	14.5	3.14	1.0	0.65
5 [#] -2		3.64	34.6	0.55	20.7			
5 [#] -3		4.48	46.1	0.57	21.5			
5 [#] -4		2.44	21.7	0.34	17.2			
5 [#] -5		2.08	21.2	0.27	22.0			
6 [#] -1	光滑 (0.06)	3.64	24.4	0.51	11.6	4.45		
6 [#] -4		4.86	28.8	0.48	13.7			
6 [#] -5		4.86	27.2	0.41	13.0			
7 [#] -1	钎子 (0.412)	4.25	44.1	0.57	18.7	5.34		
7 [#] -2		6.07	36.8	0.52	17.4			
7 [#] -3		5.48	47.1	0.70	15.2			
7 [#] -4		6.07	38.0	0.51	19.0			
7 [#] -5		4.86	43.7	0.57	9.7			
8 [#] -1	光滑 (0.06)	7.28	47.7	0.71	11.1	7.89	1.0	0.85
8 [#] -2		7.28	44.5	0.70	15.6			
8 [#] -3		9.10	43.7	0.57	11.5			
8 [#] -4		7.89	47.7	0.60	22.6			
9 [#] -1		粗砂纸 (0.223)	6.43	41.8	0.56			
9 [#] -2	6.07		45.7	0.63	10.2			
9 [#] -3	6.07		54.9	0.53	27.5			
9 [#] -4	7.97		47.4	0.74	13.8			
9 [#] -5		9.05	47.5	0.57	10.7			

注：0.06, 0.223, 0.412 分别为光滑、粗砂纸、钎子 3 种骨料表面的粗糙度值。

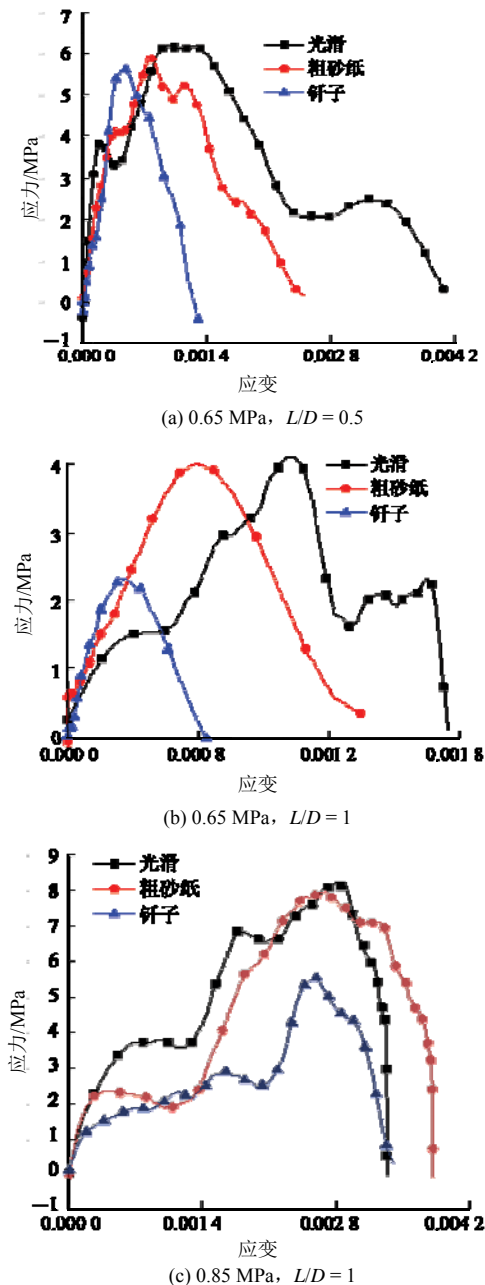
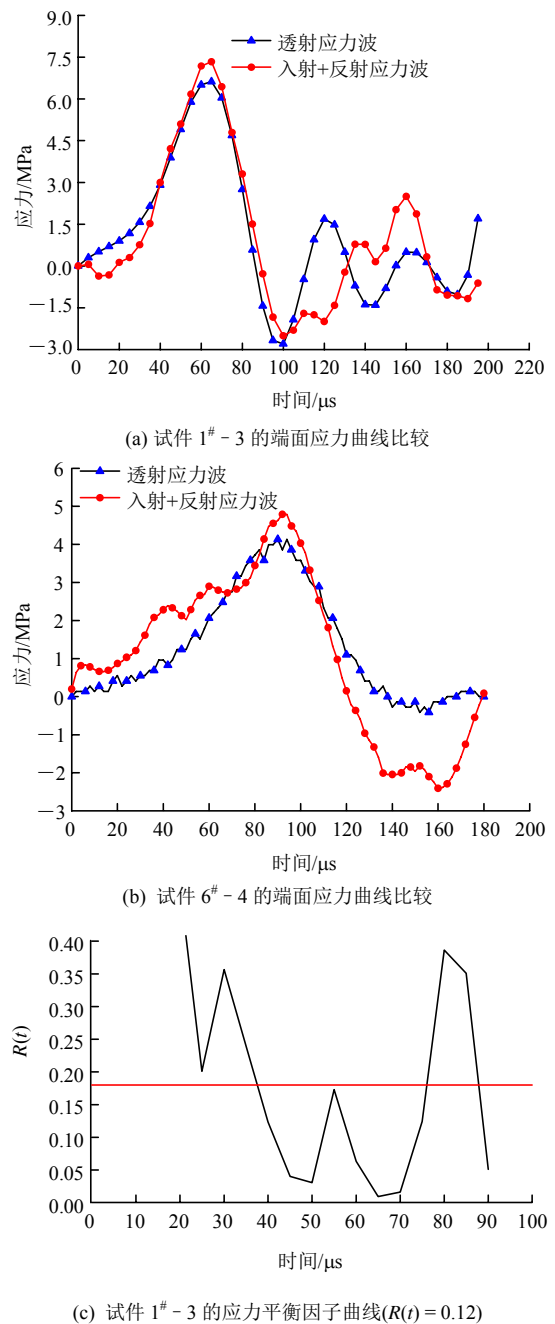


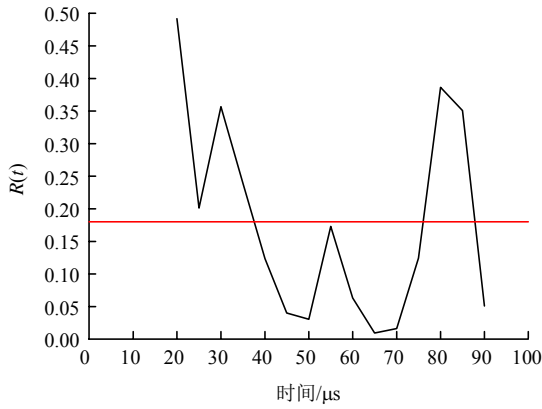
图 15 砂浆-花岗岩 ITZ 动态拉伸的应力-应变曲线
 Fig.15 Stress-strain curves of mortar-granite ITZ under dynamic tension

式中： $P_1(t)$ ， $P_2(t)$ 分别为试样与入射杆、透射杆的端面接触力； $\Delta P(t)$ ， $P_{avg}(t)$ 分别为 $P_1(t)$ 和 $P_2(t)$ 的差与平均值。应力平衡因子 $R(t)$ 越小，则试件中的轴向应力分布就越均匀。一般而言，当 $R(t) \leq 0.05$ 时，认为试件已经达到轴向应力平衡。因此，为验证试件在破坏过程中，其内部应力是否达到平衡，在同一加载气压(0.65 MPa)下对光滑界面试件进行验证，分别从 $L/D = 0.5$ 和 $L/D = 1.0$ 的试件中选取典型有效试件 1[#]-3 和 6[#]-4 进行说明。

图 16(a), (b) 分别为试件 1[#]-3 和 6[#]-4 两端面的应力-时间历程曲线，从图中可以看出，在同一

加载气压下，长径比为 0.5 的试件加载破坏时刻点为 $60 \mu\text{s}$ ，破坏的时间段为 $40 \sim 80 \mu\text{s}$ ，由于峰值应力、峰值应变均在该时间内，故可表明试件在加载破坏中处于良好的应力平衡状态；长径比为 1.0 的试件，加载破坏的时刻点为 $90 \mu\text{s}$ ，破坏的时间段为 $70 \sim 110 \mu\text{s}$ ，在入射杆端面的应力-时间曲线在达到峰值应力前有明显的波动现象，并且加载破坏时间相对长径比为 0.5 的试件有所延迟。由此可见，试件长径比对其端面的应力平衡确实有着重要影响：试件内部应力的均匀性随长径比的增大而降低。这是由于混凝土类材料本来就是非均质材料，增加轴向长度，则会使试件内部结构的密度梯度增大，均匀性降低。





(d) 试件 6[#]-4 的应力平衡因子曲线($R(t) = 0.28$)

图 16 应力平衡验证

Fig.16 The stress equilibrium verification

图 16(c), (d)分别为试件 1[#]-3 与 6[#]-4 的应力平衡因子 - 时间曲线, 加载破坏段通常是整个曲线中数值较小区间。其中, 试件 1[#]-3 的 $R(t)$ 平均值为 0.12, 且在 40~55 μs 时间段内满足 $R(t) \leq 0.05$, 而试件 6[#]-4 的 $R(t)$ 平均值为 0.28, 仅在 70 和 76 μs 满足 $R(t) \leq 0.05$, 故长径比为 0.5 的试件端面应力平衡效果要明显优于长径比为 1.0 的试件。

(1) 应变率对 ITZ 抗拉强度的影响

研究应变率对 ITZ 黏结抗拉强度的影响, 通常会引用动态增强因子 DIF (dynamic increase factor), 即动态拉伸强度与准静态拉伸强度的比值来描述应变率的强化效应, 如下式所示:

$$DIF = \frac{f_{td}}{f_{ts}} \tag{20}$$

式中: f_{ts} 为砂浆 - 花岗岩 ITZ 的准静态抗拉强度, f_{td} 为砂浆 - 花岗岩 ITZ 的动态抗拉强度。

图 17 为砂浆 - 花岗岩的 DIF 值与应变率对数 $\lg(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)$ 之间的关系。其中, $\dot{\epsilon}$ 为动态拉伸中试件的应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率(一般取为 1 s^{-1})。

一般认为, 混凝土的强度随应变率的增大而呈线性增长的趋势, 从图 17 中也可以明显看到, DIF 值随应变率的增加而逐渐增大, 从而再次表明砂浆-骨料界面具有较强的率敏感性。此外, 骨料表面粗糙度越大, DIF 值就相对较小, 这与拉伸过程中界面过渡区的裂纹扩展有着紧密的内在联系, 而加载速率对混凝土中裂纹的演化速度也有着不可忽视的影响, 从而导致混凝土材料的拉伸强度具有显著的应变率效应。关于应变率效应, 卢玉斌等^[16]在宏观尺度上也对此现象作出了解释, 认为混凝土的动态抗拉强度本是材料的固有属性, 而非结构效应引起

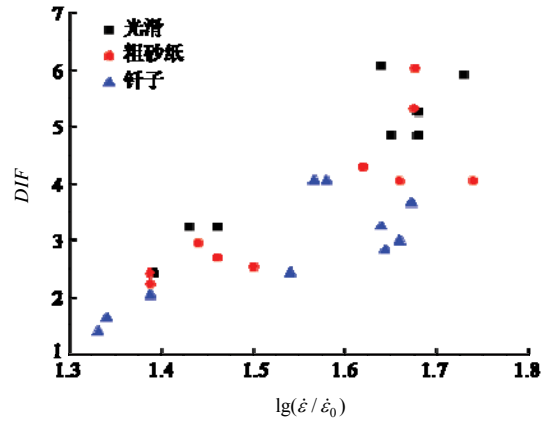


图 17 DIF 与动态拉伸应变率对数之间的关系

Fig.17 Relationships between DIF and logarithmic dynamic tensile strain rate

的。基于试验分析结果, 他提出了一个动态断裂力学的微观模型, 发现该种现象在很大程度上是由微裂纹惯性效应引起的。

(2) 长径比对 ITZ 平均抗拉强度的影响

由于试件数量有限, 故本次试验仅对长径比为 0.5 和 1.0 的试件进行了研究, 在相同加载气压下 (0.65 MPa), 1[#]~6[#]三种不同骨料界面的 ITZ 平均抗拉强度随长径比的变化关系, 如图 18 所示。

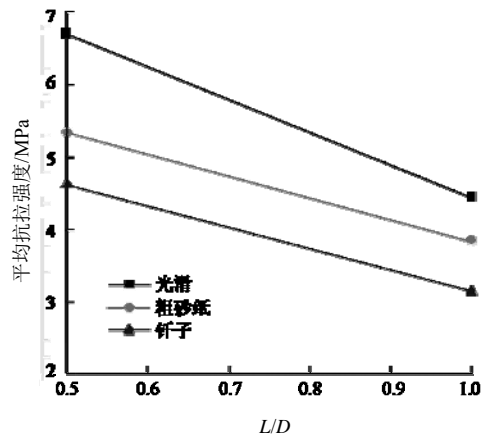


图 18 长径比对 ITZ 平均抗拉强度的影响

Fig.18 Effect of aspect ratio on average tensile strength of ITZ

从图 18 中可以看出, ITZ 的平均抗拉强度随长径比的增大而降低, 且其下降幅度随骨料界面粗糙度的增大而减小。其中, 光滑界面的 ITZ 平均抗拉强度受长径比的影响最为显著, 下降度约为 34%, 而粗砂纸和钎子界面的下降幅度分别为 32%与 28%。关于试件长径比对砂浆 - 骨料 ITZ 抗拉强度的影响, 陈兴等^[12]在对砂浆 - 花岗岩 ITZ 劈裂拉伸的试验研究中也得出了一致的结论, 即砂浆 - 骨料 ITZ 抗拉强度随试件长径比的增大而减小。这是

由于混凝土材料本身为非均质材料，沿轴向方向存在密度梯度，随着试件长径比越大，其内部结构的均匀性就会降低，故到达透射杆的应力波(透射波)就会衰减，抗拉强度降低。

(3) 粗糙度对 ITZ 抗拉强度的影响

图 19 为 1[#]~6[#]不同长径比下，各粗糙度与平均抗拉强度之间的关系，在 0.65 MPa 的加载气压下，分别研究了长径比为 0.5, 1.0 的 2 种情况下骨料表面粗糙度对 ITZ 平均抗拉强度的影响。从图 19 中可以看出，虽然长径比对 ITZ 的抗拉强度有一定影响，但随骨料表面粗糙度的增大，2 种长径比下的 ITZ 平均抗拉强度均呈下降趋势。

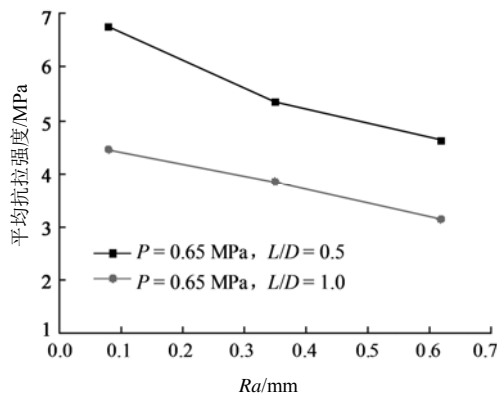


图 19 不同长径比下各粗糙度与 ITZ 平均抗拉强度的关系
Fig.19 Relationships between roughness and average tensile strength of ITZ under different aspect ratios

图 20 为 6[#]~9[#]不同加载气压下，各粗糙度与平均抗拉强度之间的关系，分别在 0.65, 0.85 MPa 两种加载气压下对长径比为 1.0 的试件进行了研究。从图 20 中可以看出，ITZ 的平均抗拉强度随骨料表面粗糙度的增大依然是降低的。其中，0.85 MPa 加载气压下 ITZ 平均拉伸强度的下降幅度为 32.3%，0.65 MPa 加载气压下的下降幅度为 29.4%，即后者下降幅度略高于前者。

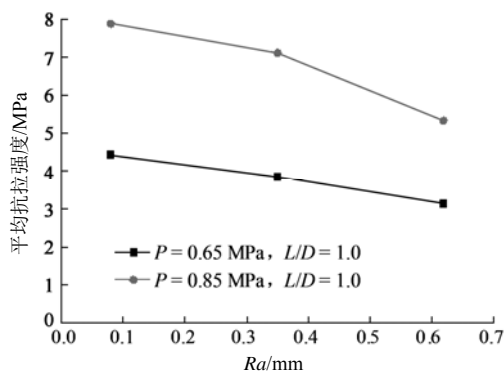


图 20 不同气压下各粗糙度与平均抗拉强度的关系
Fig.20 Relationships between roughness and average tensile strength under different pressures

由粗糙度对 ITZ 抗拉强度的影响可以看出，无论试件长径比、加载气压是增大或减小，而粗糙度对 ITZ 平均抗拉强度的影响规律却是恒定的，即不会因为长径比和应变率的改变而影响其变化规律：ITZ 平均抗拉强度随骨料表面粗糙度的增大而减小。

值得注意的是，砂浆 - 骨料界面试件的直接拉伸试验与压剪切试验有着本质的区别：在砂浆 - 骨料界面试件的压剪试验中，骨料表面粗糙度越大，则砂浆与骨料界面的摩擦作用力就越大，从而导致试件破坏时所需载荷增加；而在直接拉伸试验中，由于砂浆与花岗岩界面的黏结属于交互嵌合的关系，在拉伸载荷下发生分离，并不存在界面之间的摩擦作用力。另外，骨料表面粗糙度越大，也会使得砂浆与骨料界面的黏结处的微裂纹或缝隙相应增多，即增加了界面的“薄弱环节”。X. Q. Zhou 和 H. Hao^[17]通过数值模拟分析也发现，ITZ 厚度会随骨料表面粗糙度的增大而增加，并且厚度越大，其抗拉强度越低，从而间接地影响骨料表面粗糙度与 ITZ 抗拉强度的关系。因此，在砂浆 - 骨料的直接拉伸试验中，增大骨料表面粗糙度都有可能直接或间接地导致 ITZ 抗拉强度降低。

4 结 论

(1) 在准静态拉伸试验中，试件的破坏过程包括弹性变形和塑性变形 2 个阶段。当骨料在上时，其弹性变形阶段的应力 - 应变表现为明显的线性增长关系和屈服现象，并且杨氏模量、抗拉强度要显然大于骨料在下的试件。

(2) 随应变率的增大，3 种砂浆 - 骨料的 ITZ 黏结抗拉强度和 DIF 值均有相应的增大，表现出一定的率敏感性。而且该率敏感性与骨料粗糙度有着密切关系，即相同加载气压下，ITZ 抗拉强度和 DIF 值随骨料表面粗糙度的增大而减小。

(3) 相同气压下，砂浆 - 花岗岩 ITZ 的平均抗拉强度随长径比的增大而有明显下降趋势，且其下降幅度会随骨料界面粗糙度的增大而减小。其中，光滑界面的 ITZ 平均抗拉强度受长径比的影响最为显著。

(4) 无论试件长径比、加载气压是增大或减小，而粗糙度对 ITZ 平均抗拉强度的影响规律却是恒定的，即不会因为长径比和应变率的改变而影响其变化规律：ITZ 平均抗拉强度随骨料表面粗糙度的增大而减小。

参考文献(References):

- [1] 雷 斌, 邹 俊, 扶名福, 等. 混凝土 ITZ 性能及其对混凝土性能影响研究[J]. 混凝土, 2017, (5): 24 - 28.(LEI Bin, ZHOU Jun, FU Mingfu, et al. Research on the Performance of concrete interfacial transition zone and its influence on the concrete[J]. Concrete, 2017, (5): 24 - 28.(in Chinese))
- [2] LYBIMOVE C T Y, PINNS E R. Crystallization structure in concrete contact zone between aggregate and cement in concrete[J]. Colloid Journal, 1962, 24: 491 - 498.
- [3] HONG L, GU X, LIN F. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65(9): 338 - 349.
- [4] RAO G A, PRASAD B K R. Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 253 - 257.
- [5] 朱亚超. 混凝土中砂浆-骨料界面力学性能试验研究[硕士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2011.(ZHU Yacao. Experimental investigation on the mechanical properties of mortar-aggregate interface in concrete[M. S. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.(in Chinese))
- [6] 王 瑶, 吴胜兴, 沈德建, 等. 砂浆-花岗岩界面动态轴向拉伸力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1 319 - 1 332.(WANG Yao, WU Shengxing, SHEN Dejian, et al. Experimental study of dynamic axial tensile mechanical properties of mortar-granite interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1 319 - 1 332.(in Chinese))
- [7] CALISKAN S. Aggregate/mortar interface: influence of silica fume at the micro- and macro-level[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4/5): 557 - 564.
- [8] FENG K N, PAN Z, RUAN D, et al. Strain rate effects for strength of geopolymer concrete[C]// International Composites Conference. [S. l.]: [s. n.], 2012: 405 - 409.
- [9] DAIMARUYA M, KOBAYASHI H, ISHIHATA Y. Impact tensile strength and strain rate sensitivity of concrete material[J]. Journal of the Society of Materials Science Japan, 2004, 53(3): 266 - 271.
- [10] RAO M V K, KUMAR P R, SEKHAR T S. Effect of rate of loading on the strength and stress-strain behaviour of recycled aggregate concrete[J]. Indian Concrete Journal, 2015, 89(9): 26 - 32.
- [11] WANG Z L, GU X L, LIN F. Experimental study on mechanical performance of interface between mortar and aggregate in concrete[C]// The Workshop on Biennial International Conference on Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2010: 3 529 - 3 536.
- [12] 陈 兴, 卢玉斌, 滕 骁, 等. 砂浆-花岗岩界面过渡区的裂拉伸试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016, (4): 10 - 16.(CHEN Xing, LU Yubin, TENG Xiao, et al. Experimental study on splitting tensile tension of mortar-granite interface transition zone[J]. China Concrete and Cement Products, 2016, (4): 10 - 16.(in Chinese))
- [13] 周 翠. 砂浆-天然骨料界面力学性能研究[硕士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2014.(ZHOU Cui. Experimental studies on mechanical properties of mortar-natural aggregate Interface[M. S. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.(in Chinese))
- [14] 宋 力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368 - 373.(SONG Li, HU Shisheng. Two wave method and three wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and shock, 2005, 25(4): 368 - 373.(in Chinese))
- [15] LU Y B, LI Q M. Appraisal of pulse-shaping technique in split Hopkinson pressure bar tests for brittle materials[J]. International Journal of Protective Structures, 2010, 1(3): 363 - 390.
- [16] 卢玉斌, 武海军, 赵隆茂. 混凝土类材料动态拉伸强度的微观力学模型[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 275 - 281.(LU Yubin, WU Haijun, ZHAO Longmao. Micro-mechanical model of dynamic tensile strength of concrete[J]. Explosion and Shock, 2013, 33(3): 275 - 281.(in Chinese))
- [17] ZHOU X Q, HAO H. Mesoscale modeling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates[J]. Computers and Structures, 2008, 86(21/22): 2 013 - 2 016.