文章编号：1006-4710(2011)03-0280-05

脆性材料压剪断裂方向影响因素的宏细观分析

李智慧，师俊平，汤安民
（西安理工大学 土木建筑工程学院，陕西 西安 710048）

摘要： 从物理学中摩擦力和固体力学应力状态的概念出发，讨论了脆性材料受压剪断时断裂面上摩擦力的存在性；基于脆性材料压剪宏观断裂形式和细观断裂机理，分析了影响脆性材料压剪断裂的主要因素。分析结果表明，脆性材料单压剪断时，起裂点上断裂面沿最大切应力方向，而试验中观察到宏观剪切面倾角大于45°。主要原因是，试验中试件端面附近存在摩擦力，且受压时坚硬晶粒楔入软介质，从而在材料内产生附加拉应力，改变了原有的单向压缩应力状态，也改变了后续断裂路径上的最大切应力方向。

关键词： 脆性材料；剪断；剪切面倾角；应力三维度
中图分类号： O346.1　　**文献标志码：** A

Discussions on Fracture Factors of Brittle Materials under the Shear-Compression Condition

LI Zhihui, SHI Junping, TANG Anmin
(Faculty of Civil Engineering and Archtecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on fundamental ideas in tribology and basic concept of stress state in solid mechanics, the existence of frictional force on shear plane is discussed under uniaxial compression of brittle materials. Based on macroscopic fracture forms and mesoscopic fracture mechanism, the key factors influencing shear fracture angle are analyzed. The main conclusions are as follows: when brittle materials are compressed and shear fracture occurs, shear fracture surface at the crack initiation point is consistent with the maximum shear stress. But the reason of shear fracture angle examined in experiment greater than 45° lies in that, frictional force between end face of test piece and pressure head of testing machine, and additional tensile stress produced in the materials when harder crystalline grain wedge in softer medium have changed original unidirectional compression stress state and the direction of maximum shear stress on next fracture path.

Key words: Brittle material; shear fracture; shear fracture angle; stress triaxiality

材料受力后发生断裂破坏的状态受材料特性和应力状态的影响。断裂破坏有两种常见的形式，即拉应力起主要作用引起的拉断和切应力起主要作用引起的剪断[1-4]。脆性材料受压时，主要发生剪断。对现有许多脆性材料单压剪断不沿45°方向的试验结果，早期研究者利用内摩擦力的概念给出了解释[5-8]。但从物理学中摩擦力和固体力学应力状态的概念出发，分析内力、摩擦力及作用方向，得出剪切面上现给出的“内摩擦力”并不存在。本文结合脆性材料压剪宏观断裂形态和细观破坏机理，分析讨论了脆性材料单压剪断时影响剪切面倾角的主要因素。

1 压缩试件断裂面上内摩擦力分析

图1为受压试件任意斜截面上的应力分析图。设轴向压力为 P，横截面上正应力为 σ，材料的内摩擦角为 φ，则任意斜截面上有正应力 σ_α 和切应力

收稿日期： 2011-01-15
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(10972180)；陕西省教育厅科研计划基金资助项目(2010JK745)。
作者简介： 李智慧（1981-），女，安徽阜阳人，博士生，研究方向为脆性材料的变形与断裂。
E-mail: lizhihui@xaut.edu.cn。

τ_α，α 为斜截面方位角。

按岩石力学理论[9]，假设沿试件斜截面还存在由正应力引起的内摩擦力 τ_f，其方向应该按照摩擦物理学原理给出，如图 1 所示。

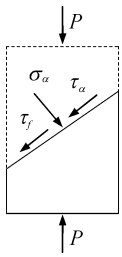

图 1　任意斜截面应力分析图

Fig. 1　Stress analysis on oblique section

其中：

$$\begin{cases}\sigma_\alpha = \sigma\cos^2\alpha \\ \tau_\alpha = \sigma\sin\alpha\cos\alpha \\ \tau_f = \sigma_\alpha\tan\varphi\end{cases} \tag{1}$$

斜截面上的切向力为切应力和内摩擦力，当其组合值达到最大时，即 $\tau = \tau_\alpha + \tau_f$ 达到最大值时，试件破坏。

$$\begin{aligned}&\tau = \tau_\alpha + \tau_f = \\ &\sigma\cos\alpha\sin\alpha + \sigma\cos^2\alpha\tan\varphi = \\ &\sigma\frac{\sin(2\alpha+\varphi)+\sin\varphi}{2\cos\varphi}\end{aligned} \tag{2}$$

将式(2) 对 α 取偏导并令其等于零，即得破坏断面与横截面的夹角 α_0 为：

$$\alpha_0 = 45° - \varphi/2 \tag{3}$$

对于常见铸铁材料[10]，摩擦角 φ 取值范围为 10° ~ 30°。由式(3) 可知，剪切面倾角的范围为 30° ~ 40°，而 HT150、HT200 和 HT250 铸铁的压缩试验中，剪切面倾角分别为56°、51.4°、48°。从晋城一采煤工作面取得的煤块[11-12]，测得其内摩擦角 $\varphi = 39.17°$，由式(3) 可得剪切面倾角 $\alpha_0 = 25.42°$，但试验结果均在 50° ~ 55°。可见，按摩擦物理学基本原理，假设斜截面上存在内摩擦力，得到的剪切面倾角和脆性材料单压破坏试验结果明显不符。

而现有理论在分析脆性材料单压断裂时给出的斜截面内力分析方法如图 2 所示[5-6]，斜截面上总切应力的表达式为：

$$\begin{aligned}&\tau = \tau_\alpha - \tau_f = \\ &\sigma\frac{\sin(2\alpha-\varphi)-\sin\varphi}{2\cos\varphi}\end{aligned} \tag{4}$$

剪断发生在使 τ 取得最大值的 α 斜截面上，将上式对 α 取导并令导数等于零，可得断裂面与横截面间的夹角为 $\alpha_0 = 45° + \varphi/2$。这样就解释了上述试验结果。但比较图 1 与图 2，图 2 中内摩擦力的方向显然违反摩擦物理学的基本常识。

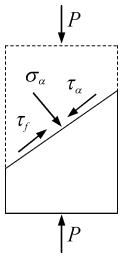

图 2　文献斜截面应力分析图[5-6]

Fig. 2　Stress analysis on oblique section in documents[5-6]

由固体力学中应力状态的概念，内力是由外力引起的，应力是内力的分布集度，应力又可分为沿斜截面法向的正应力与沿斜截面方向的切应力。具体在压缩试件上，压力在试件斜截面上引起的应力，也只有正应力 σ_α 和切应力 τ_α，之外并不存在内摩擦力 τ_f。同时由摩擦力的概念：在外力作用下，两个相互接触的物体，由于相对滑动趋势而在接触面处产生阻碍它们相对运动的力即摩擦力，摩擦力也是由外力引起的。如将此概念引入受力固体内某斜截面上，用截面法将该截面截开，由平衡方程求出保留部分截面上的摩擦力，它就是固体力学中定义的剪力，因此所谓的内摩擦力就是内力概念中的剪力。

由摩擦物理学基本原理和固体力学应力状态的基本概念可知，受力构件内斜截面上并不存在剪力以外的内摩擦力，现行理论中用内摩擦力的概念解释脆性材料单压剪断面倾角大于 45° 是错误的。

2　脆性材料的剪切断裂机理

从宏观试验表象上看，同一脆性材料在单压、两向压缩及三向压缩时均可能发生剪断，而在拉伸、扭转等受力形式下可能发生拉断。而不同脆性材料在相同的压缩受力形式下，可能剪断也可能拉断。剪断是脆性材料常见的一种断裂形式，应力状态对材料断裂的影响是有规律的，用应力三维度 R_σ 作为应力状态参数，R_σ 表达式为[13]：

$$R_\sigma = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \tag{5}$$

其中 σ_m 为平均应力，σ_e 为等效应力，σ_1、σ_2 和 σ_3 为主应力。

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3}$$

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}$$

几种常见应力状态的 R_σ 值见表 1。

表 1 不同应力状态下的 R_σ 值

Tab. 1 The R_σ values in different stress states

应力状态	平面应变拉	双向等拉	单向拉伸	纯剪切	单向压缩	双向等压	平面应变压
R_σ	2.17	0.67	0.33	0	-0.33	-0.67	-2.17

由表 1 可见,当应力状态从三向拉伸向单向拉伸、单向压缩、三向压缩逐渐变化时,R_σ 代数值由大到小(由正向负)变化,它反映了体积弹性变形和剪切弹性变形之比。对于特定材料,在一定范围内,应力三维度值大,应力状态偏于受拉状态;应力三维度值小,应力状态偏于受压状态。对同一脆性材料,受力试件应力三维度 R_σ 较低时,材料易于剪断;应力三维度 R_σ 较高时,材料易于拉断。

对多种材料剪断面的电镜分析研究表明[13],脆性材料发生剪切断裂的物理机制是:在应力三维度较低时,材料内塑性变形较大,大塑性变形限制了已成核孔洞的扩张和聚合,或材料中孔洞很难形成,剪切弹性变形的不断发展最终引起剪断发生。最大切应力是引起材料剪断的主要因素,危险点一般位于构件应力场中应力三维度或形变能密度极大值处,断裂面则沿危险点上最大切应力作用面;不同材料在不同受力形式下发生的剪切断裂,只要机理相同,断裂发生的条件就应相似。

3 影响剪切面倾角的主要因素

3.1 应力状态对剪切面倾角的影响

从脆性材料剪切断裂机理可知,应力状态和材料特性是影响剪断的两大主要因素。对脆性材料压缩剪断时断裂面与横截面的夹角不沿 45° 的试验结果,由于试件端面与试验机压头之间弹性变形的存在,试件压缩时端面上各点有横向位移趋势,不可避免地在两者接触面间产生摩擦力[14-15],该摩擦力在试件端面上产生的分布载荷(见图 3),改变了端面各点原有的单向压缩应力状态,也改变了端面危险点上原有的最大切应力的方位。

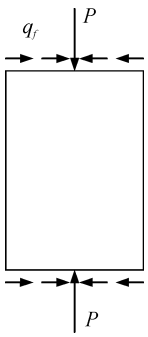

图 3 端面摩擦示意图

Fig. 3 The schematic diagram of end surface friction

摩擦力分布受诸多因素影响较为复杂,其数值应不大于最大静摩擦力,不随压力的不断增大而一直增长。考虑危险点上受由端面摩擦 q_f 引起的切应力 τ 和轴向压力 P 引起的压应力 σ,如图 4 所示,在构件弹性变形范围内,该点上最大切应力作用面方位与横截面的夹角用 α_1 表示,则:

$$\tan 2\alpha_1 = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_x}$$

其中:$\sigma_x = 0$, $\sigma_y = -\sigma$, $\tau_x = -\tau$。

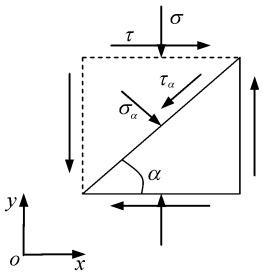

图 4 危险点应力状态

Fig. 4 The stress state of dangerous point

切应力与压应力的比值 τ/σ 在 1/16 ~ 1/4 之间变化时,该点上最大切应力方向与横截面的夹角的计算值见表 2。

表 2 τ/σ 取不同值的最大切应力方向

Tab. 2 The direction of τ_{max} when τ/σ take different values

τ/σ	1/16	1/12	1/8	1/4
α_1/(°)	48.6	49.7	52.0	58.3

铸铁试件单压时,断裂起源于试件中部,初始起裂处断裂面方向沿 45°,从中部起裂后,后续断裂方向发生不同程度的改变,变化趋势是后续断裂角增大(见图 5)。

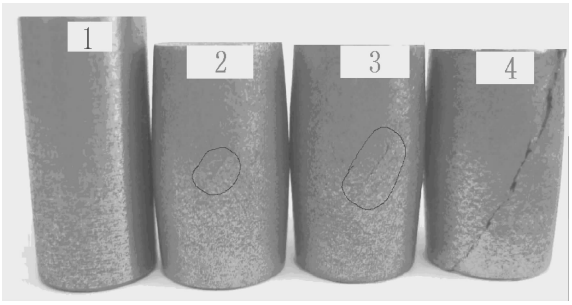

图 5 铸铁单压剪断起裂

Fig. 5 Shear fracture initiation of cast iron compression test

分析认为，受试件端面与试验机压头之间摩擦的影响，试件的端部应力三维度值较小，而中部约束程度弱，应力三维度值较大，成为断裂起裂点。起裂点处于单轴压缩应力状态，最大切应力作用面方向沿 45°，而靠近上下端面处，端面摩擦改变了后续断裂路径上原有最大切应力的方位，后续断裂方向发生改变。以上不同材质铸铁压缩试件剪断时断裂面角度变化与表 2 中给出的端面附近各点最大切应力方向的变化规律基本相符。

3.2 材料特性对剪切面倾角的影响

图 5 是 HT200 灰铸铁单压剪断试件，试件高度与直径比为 4∶1，可消除端面摩擦力对试件中部起裂点应力状态的影响。

试验观察发现，起裂点处，裂纹在 2 ~ 3 mm 时，断裂沿 45°方向，是 τ_{max} 方向。裂纹扩展后，后续断裂面向 48° ~ 53°方向发展，图 6 是起裂点附近断口细观形貌，是剪断机制。对于材质较差的灰铸铁，单压情况下还会出现沿纵向面断裂的情况（见图 7）。

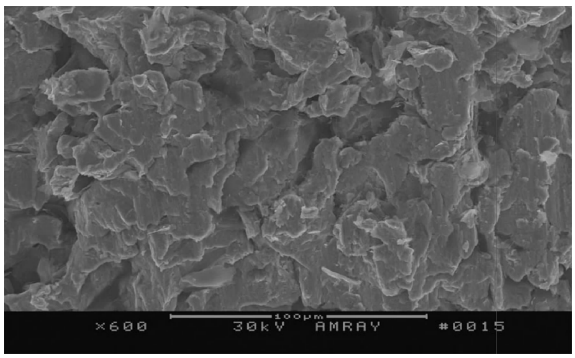

图 6 铸铁单压剪断断口形貌

Fig. 6 Shear Fracture surface of cast iron in compression

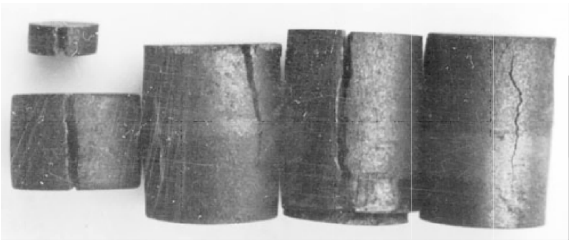

图 7 铸铁单压纵向开裂

Fig. 7 Longitudinal fracture of cast iron compression

砂岩单轴受压发生剪切破坏，破裂角为 65°（见图 8）。同一工地采取的岩石试样，花岗岩受压则纵向断裂（见图 9）。差质铸铁纵断的原因是材料组织晶粒粗大，单压过程中硬的珠光体晶粒楔入软的石墨体中，使试件中细观上产生了附加拉应力，导致材料发生拉断。花岗岩纵断也是由于受压时坚硬晶粒楔入软介质，从而在材料内产生附加拉应力而引起。

图 8 砂岩单压剪断

Fig. 8 Shear fracture of sandstone compression

图 9 花岗岩单压纵断

Fig. 9 Longitudinal fracture of granite compression

材料特性与应力状态一样对脆性材料压缩剪断有着较大影响。对于材质差的材料，其晶粒粗大或存在较多的未知缺陷，其剪断方向受未知缺陷的影响较大，难于直接用宏观应力场说明。这种硬晶粒楔入软介质，在材料内产生附加拉应力的现象，也是对压剪断裂方向的又一影响因素。

4 结 语

剪断面上存在“内摩擦力”的说法，既不符合固体力学应力状态的概念，也违反摩擦力方向的常识。剪切断裂面应是最大切应力作用面。脆性材料单压试验中，压头端面上摩擦力的存在和因楔入变形而产生的附加拉应力，改变了试件断裂点的应力状态，影响了试件断裂面方向，乃至材料断裂形式与机理。

参考文献：

[1] 汤安民，王静. 几种金属材料断裂形式变化规律的试验分析[J]. 实验力学，2003，18(4)：440-444.
Tang Anmin, Wang Jing. Test analysis of the fracture modes for some metal materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(4): 440-444.

[2] Rao Qiuhua, Sun Zongqi, Stephansson O, et al. Shear fracture of brittle rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(3): 355-375.

[3] 王明洋,范鹏贤,李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):234-241.
Wang Mingyang, Fan Pengxian, Li Wenpei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (2): 234-241.

[4] Wong R H C, Tang C A, Chau K T, et al. Splitting failure in brittle rocks containing re-existing flaws under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(17):1853-1871.

[5] 李克安. 承压灰口铸铁构件的强度分析[J]. 力学与实践,1999,(1):47-48.
Li Kean. Intension analysis on press component of gray castion[J]. Mechanics in Engineering, 1999, (1): 47-48.

[6] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1993.

[7] Raoul Costamagna, Jörg Renner, Otto T. Relationship between fracture and friction for brittle rocks [J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(4): 291-301.

[8] 李俊英,李培良. 三轴不等应力场下剪切破裂趋势面方向探析[J]. 地学前缘,2009,16(1):261-269.
Li Junying, Li Peiliang. Analysis of the direction of shear fracture trend surface in triaxial unequal stress fields [J]. Earth Science Frontiers, 2009,16(1): 261-269.

[9] 吴德伦,黄质红,赵明阶. 岩石力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.

[10] 汤安民,韩星明. 传统断裂强度理论存在的问题与几种材料的断裂规律[J]. 西安理工大学学报,2002,18(1):22-25.
Tang Anmin, Han Xingming. Some problems existing in traditional strength theory of fracture and fracture laws of some materials [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2002, 18(1):22-25.

[11] 尤明庆. 岩样三轴压缩的破坏形式和 Coulomb 强度准则[J]. 地质力学学报,2002,8(2):179-185.
You Mingqing. Destroy character and Coulomb criterion of rock specimen in pseudo-triaxial compression[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(2): 179-185.

[12] 尤明庆,华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(3):292-296.
You Mingqing, Hua Anzeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 292-296.

[13] 汤安民,师俊平,卢智先. 几种金属材料断裂条件的试验研究[J]. 力学季刊,2003,24(4):517-521.
Tang Anmin, Shi Junping, Lu Zhixian. Test study of fracture conditions for some metal materials [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2003, 24(4): 517-521.

[14] 潘鹏志,周辉,冯夏庭. 加载条件对不同尺寸岩石单轴压缩破裂过程的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3636-3642.
Pan Pengzhi, Zhou Hui, Feng Xiating. Research on effect of loading conditions on failure processes of rocks with different sizes under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3636-3642.

[15] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学,2005,22(4):112-118.
Yang Shengqi, Su Chengdong, Xu Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112-118.

(责任编辑 王卫勋)