

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.005

脆性材料在超高压磨料射流钻孔过程中的 破损机理研究

张仕进, 陶 辉

(重庆大学 资源与环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对高压磨料水射流对脆性材料进行钻孔时, 脆性材料极易在钻孔初始瞬间及钻孔过程中发生脆性破裂的问题, 进行深入理论研究。通过分析高压磨料水射流的工作原理, 和观察本课题组前期所做的大量实验, 得出钻孔初始瞬间及钻孔过程中水和磨料分别对脆性材料的作用机理为: 1) 钻孔初始阶段, 当喷嘴上方的阀门打开时, 水射流柱与固体表面接触初始瞬间, 水射流束通过压缩波对固体表面产生一个非常高的压力, 如果该动压力超出了材料本身所能承受的临界压力, 材料就会发生脆性破裂; 2) 钻孔过程中, 压缩波传递到水射流柱自由表面, 而磨料从磨料罐进入混合腔需要一定时间(最多为几秒), 这个时间段还是纯水射流对固体材料发生作用, 而产生滞止压力, 如果该滞止压力超过了材料本身所能承受的临界压力, 材料也会发生脆性破裂。

关键词: 高压磨料水射流; 脆性材料; 钻孔; 滞止压力

中图分类号: TP602

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)01-0029-05

Study on the Damage Mechanism of Brittle Material in Piercing Process by Ultra-High-Pressure Abrasive Water Jet

Zhang Shijin, Tao Hui

(College of Resources & Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In view of the problems that the delicate materials often occur cracks at initial piercing moment and during drilling process by high pressure abrasive water jet, carried on the thorough theoretical research. Based on the analysis of high-pressure abrasive water jet operating principle and previous experimental experiences, obtains the water and abrasive effect mechanism on brittle materials at initial piercing moment and drilling process: 1) In the initial phase, when the jet is turned on, at the water jet column and a solid surface contact initial instant, the water jet through the compression waves produces a very high pressure on the solid surface, if the pressure goes beyond the critical pressure that the material could bear, the brittle fracture would happen; 2) In the drilling phase, the compression waves transfer to free surface water jet column, and it takes some time for the abrasive from the tank into the mixing chamber(at most several seconds), in which the water jet acts on the solid material, and produces stagnation pressure, if the pressure is beyond the material critical pressure, the brittle fracture would also happen.

Keywords: abrasive water jet; brittle material; piercing; stagnation pressure

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 国家创新研究群体基金资助项目(50621403), 国家973基金资助项目(2009CB724606)

作者简介: 张仕进(1974-), 男, 云南祥云人, 重庆大学副教授, 主要从事射流理论及应用, 电液脉冲技术方面的研究,

E-mail: zhangshij@hotmail.com

0 引言

高压磨料水射流 (abrasive water jet, AWJ) 是近 20 多年发展起来的一项新型特种加工技术, 是目前唯一的一种冷态高能束切割技术。AWJ 被认为是当前世界上发展最快的主流切割技术。与其它切割加工技术相比, 高压磨料水射流具有很多独特的优越性, 如作用力小 (<40 N)、无热效应、无尘、适应性广、加工柔性强等。

将高压水射流技术用于脆性材料的切割由来已久。从 19 世纪 70 年代初高压水射流技术出现后, 该技术在石材切割^[1]、玻璃切割^[2-3]等方面的应用便相继出现。我国在水射流切割机理和应用的研究主要集中在对 AWJ 切割普通塑性及脆性材料的规律、模型方面的实验研究^[4-6], 这些研究也有力推动了高压水射流切割技术在很多行业的应用。但由于脆性材料的特殊性和多样性, 国内外对脆性材料的高压水射流切割机理研究尚不成熟。且 AWJ 在脆性材料的钻孔过程中经常出现脆性破裂的难题, 极大地限制了高压磨料水射流技术在脆性材料切割中的应用, 特别是高性能陶瓷等难加工材料。

为了避免上述破坏, 学者们先后提出几种解决方法。方法一: 用机械方法预先钻一个小孔, 然后再用水射流完成后续切割。方法二: 控制射流开始时的水压, 一定时间后再逐步增加压力, 这样避免了钻孔初始瞬间射流对材料产生较高的破坏力。方法三: 在高压水从水喷嘴喷出之前, 先用安装在混合腔侧面的真空发生器产生负压, 磨料在负压作用下进入混合腔, 这样, 当高压水从喷嘴喷出时, 高速射流便立即将其能量传递给磨料, 从而避免了高速水射流与材料直接作用的过程。上述几种方法均成功解决了高压水射流钻孔过程中脆性材料的破坏难题, 然而, 在水射流与材料作用的短暂瞬间, 导致脆性材料的破坏因素仍不清楚, 这需要进一步对射流与材料接触的短暂瞬间进行分析。本文在前期大量实验研究及观察的基础上, 对高压磨料水射流在脆性材料钻孔阶段出现的脆性破损进行了理论研究, 揭示了钻孔过程中脆性材料破损的理论根源及机理, 为以后将高压磨料水射流用于脆性材料切割领域提供理论参考。

1 高压磨料水射流的工作原理

高压磨料水射流的工作原理如图 1 所示。当高压泵将普通自来水加压后经直径很小的水喷嘴喷出时, 高压水的压力能转化为水射流动能。根据伯努利

方程, 可得到下列等式

$$P_{at} + \frac{\rho_w V_0^2}{2} + \rho_w g h_0 = P + \frac{\rho_w V_1^2}{2} + \rho_w g h_1, \quad (1)$$

式中: P_{at} 为高压水从喷嘴喷射出来时的压力, 其值接近于大气压; ρ_w 为水的密度 (一般情况下可忽略水的压缩效应); V_0 为水从喷嘴喷射出来后的速度; P 为水喷出之前的压力, 即高压泵提供的压力; V_1 为水从喷嘴喷射出来之前在高压管中的流速; h_0 和 h_1 为计算点对应的高度值。

需要注意的是, 式 (1) 未考虑水的压缩性。同时, 在式 (1) 中, 由于 $P_{at} \ll P$, $V_0 \gg V_1$, $h_0 \approx h_1$, 因此水射流在喷嘴出口处的速度可用式 (2) 近似算出,

$$V_0 = \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}}. \quad (2)$$

考虑到水的压力损失、上游流动干扰及水的可压缩性等问题, 式 (2) 可以修正为式 (3),

$$V_0 = \mu V_0 = \mu \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}}. \quad (3)$$

式中 μ 为依喷嘴的几何参数及水在喷嘴上游流动情况而定的一个系数, 一般可取 0.88~0.90。

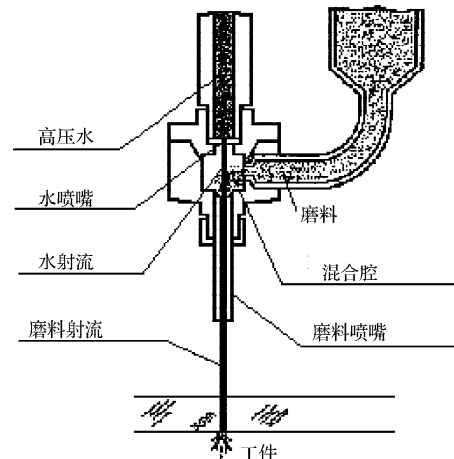


图 1 典型的高压磨料水射流切割头

Fig. 1 Typical abrasive water jet cutting head

当高压水从喷嘴喷出而形成高速射流后, 混合腔中会产生一个负压。由于此负压的存在, 磨料罐中的磨料及部分空气便被吸进混合腔与高速水射流混合。此时, 高速水射流将其动能传递给空气和磨料, 此三相射流共同进入磨料喷嘴完成能量传递及磨料加速过程。根据动量守恒定理, 可得

$$m_{abr} V_{abr} + m_w V_0 + m_{air} V_{air} = (m_{abr} + m_w + m_{air}) V, \quad (4)$$

式中: m_{abr} 为单位时间内进入混合腔的磨料质量; m_w 为单位时间从水喷嘴喷出的水质量; m_{air} 为单位时间内进入混合腔的空气质量; V_{abr} 为与水混合前磨料的速度; V_{air} 为混合前空气的速度; V_0 为混合前水射流的速度; V 为混合后磨料射流的最终速度。

在式(4)中,本文假设水射流将其能量有效传递给了空气和磨料,并且假定了磨料喷嘴的长度足够长,磨料在其长度范围内得到了有效加速,在磨料喷嘴出口处,磨料和水具有相同的速度(实际使用中,磨料喷嘴的长度为100 mm,此长度是通过前期大量的试验得到,故上述假定合理)。 V_{abr} 和 V_{air} 值很小,可忽略不计。同时,和 m_{abr} 、 m_w 比起来, $m_{air} \approx 0$ 。因此,式(4)可简化为

$$V = \frac{m_w V_0}{m_{abr} + m_w} = \frac{V_0}{\left(1 + \frac{m_{abr}}{m_w}\right)} \quad (5)$$

在磨料加速过程中,必然有能量损失。如果把能量损失考虑进去,式(5)可修正为

$$V' = \eta_i V = \eta_i \frac{V_0}{\left(1 + \frac{m_{abr}}{m_w}\right)} \quad (6)$$

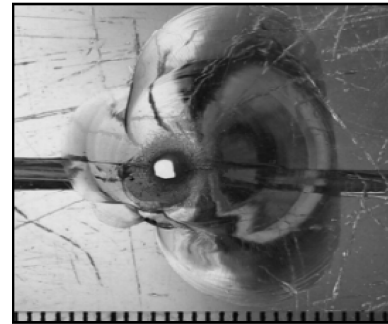
式中 η_i 为动量转换系数,一般可以取0.65~0.85。

2 高压磨料水射流对脆性材料钻孔时的脆性破损机理分析

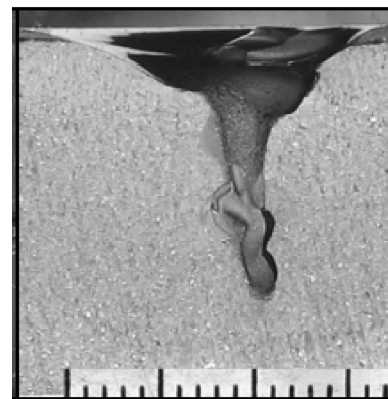
高压磨料水射流对材料的切割可分2个阶段:第一阶段是钻孔阶段,第二阶段是切割阶段。通常,高压磨料水射流切割材料时,水仅仅作作为能量传输介质;切割时,高速水将其能量传递给磨料,使磨料加速;加速后的磨料以极高速度从磨料喷嘴喷出,作用在被加工材料上,磨料对材料进行切割后,与水一起从材料底部排出。此过程中,水对材料不起任何作用;但在钻孔阶段,水的作用不可忽视。钻孔初始瞬间,即位于喷嘴上方的阀门打开时,高压水从水喷嘴喷射而出,并在混合腔内产生负压,在此负压作用下,磨料罐中的磨料就经过一根连接磨料罐和喷嘴的软管进入混合腔。由于软管具有一定长度,相对于水射流而言,磨料进入混合腔的时间总是滞后。因此,在初始钻孔瞬间,磨料射流与被切割材料的作用过程实际上是纯水射流与材料表面的作用过程。此过程虽历时非常短暂,但其破坏性不容忽视。尤其对于脆性材料,如玻璃、石材等,在用AWJ进行钻孔加工时,其脆性破坏通常就发生在钻孔初始瞬间(见图2)。

图2 a为平板玻璃在AWJ钻孔时发生的典型破坏。整块25 mm厚的玻璃在孔的横向上裂成了两半,玻璃已被穿透。尽管玻璃的抗拉强度大约为690 MPa,但由于表面应力集中、制造时的内应力及表面瑕疵等因素,其发生破坏时所需的压力(20~70 MPa)远小于该值,由此造成了AWJ钻孔时

发生的破坏。图2 b为孔未钻穿时的剖视图,表面形貌极为复杂,图2 c为孔钻穿时的剖视图,其下表面有一大块材料裂开,形貌特征与图2 b类似。



a) 俯视图



b) 孔未钻穿时的剖视图



c) 孔钻穿时的剖视图

图2 高速射流对脆性材料钻孔瞬间造成的破坏图

Fig. 2 The damage diagram of brittle material during initial piercing process by high speed jet

2.1 钻孔初始阶段分析

高速水射流与脆性材料表面初始接触瞬间,其相互作用过程可近似为高速水柱与脆性材料表面撞击的过程,由于此高速水柱的速度为超音速,因此,对其破坏机理的分析可参照雨滴、固体小颗粒对高速飞行的航空航天器材的冲蚀破坏。国内外已有多位学者对这种破坏进行了相关研究,如W. Johnson^[7]对冲击破坏,特别是对冲击作用下材料产生的塑性

破坏过程进行了研究; K. L. Johnson^[8]在其接触力学专著中对静态和动态作用下材料的应力分布进行了分析求解; J. S. Rinehart等^[9]研究了脉冲载荷下金属材料的变形; R. Kinslow^[10]系统研究了高速冲击现象,提出了应力波破坏材料的理论; J. E. Field等^[11]深入研究了固体颗粒及液滴对固体表面的冲击过程; S. W. Kang等^[12]也观察到纯水射流破坏固体表面的现象,并指出这种破坏仅发生在喷嘴出口与材料表面的距离足够大的情况下。根据以上学者的研究,本文采用高速水滴冲击固体表面理论来分析初始钻孔瞬间水射流对材料的破坏机理。

为简化计算,作如下假设:1)假设被切割材料是均质的且各向同性;2)水射流柱的前端面为自由表面。因此,当水射流初始冲击固体表面时,水射流柱前端面因速度的急剧改变而被压缩。此压缩以一压缩波的形式向射流周围及上游传播,其传播速度 C 为

$$C=C_0\left(1+\frac{2V_0}{C_0}\right), \quad (7)$$

式中 C_0 为声音在水中的传播速度。根据水锤效应,水射流束初始接触固体表面对固体表面产生的动压力 P 为

$$P=\rho_w CV_0=\rho_w C_0 V_0\left(1+\frac{2V_0}{C_0}\right)。 \quad (8)$$

如果射流速度很慢,式(8)可简化为

$$P=\rho_w C_0 V_0。 \quad (9)$$

根据力的相互作用原理,在水射流束初始接触固体表面瞬间,水射流束一方面对固体表面产生一极高的动压力,另一方面,水射流束自由表面也受到一极高的反作用力。此反作用力以压缩波的形式向射流柱周围及上游传播,并试图向周围释放。然而,当压缩波传至水射流束周围时,压力波的释放速度变为声音在空气中的传播速度(340 m/s),由于此速度远低于射流速度,因此,压力波还来不及释放便被后续高速射流所封堵,并再次向固体表面传播,此过程将一直持续到射流柱开始往周边扩散并形成流场后才结束。上述过程中,射流柱与固体接触表面形成一圆状高压接触区,此接触区的半径 r 可通过式(10)求得,

$$r=\frac{RV_0}{C}, \quad (10)$$

式中 R 为水射流柱半径,可用磨料喷嘴半径近似表示(由于磨料喷嘴出口与固体表面的距离较短,因此,水射流与固体表面接触时,水射流柱直径与磨料喷嘴直径相当,水射流柱半径可近似表示)。

当压缩波最终传递出去后,水射流柱对固体表面产生一个滞止压力。滞止压力可表示为

$$P=\frac{1}{2}\rho_w V_0^2。 \quad (11)$$

从式(8)和(11)可以看出,水射流柱与固体表面接触初始瞬间,水射流柱通过压缩波对固体表面产生一个非常高的压力,此压力一般是水射流柱通过动量传递而产生的滞止压力的好几倍。正是由于此压力值较高,水射流加工脆性材料时,脆性材料的破损一般均发生在初始接触瞬间。然而,尽管通过压缩波产生的压力较高,但其作用时间很短,一般为微秒级,所以它对材料的破坏在很大程度上得以降低。在高速射流动态载荷下,脆性材料的主要破损模式是脆性破裂。由于任何一种特定的脆性材料对应一个临界强度,因此,如果水射流束对材料表面产生的动压力超出了材料本身所能承受的临界压力,材料便发生脆性破裂。

2.2 第二阶段钻孔分析

当压缩波传递到水射流柱自由表面后,由于压缩波传递时间较短,而磨料从磨料罐进入混合腔需要一定时间,因此,此后的一段时间里(最多为几秒),仍然是纯水射流对固体材料发生作用。这种情况下,水射流对固体材料的滞止压力可由式(11)得到。经过短暂的时间后,磨料罐中的磨料进入混合腔,此时,高速水射流将其能量传递给磨料,水射流的速度急剧降低。由于只有水才会对钻孔表面产生滞止压力,因此,随着磨料进入混合腔,由于高速水射流束将其部分能量传递给磨料,水射流束的速度大大降低,因此,它对固体表面所产生的滞止压力也大大降低了。然而,这并不意味着被切割材料不会破裂了。如果此时水对被钻孔材料产生的滞止压力仍然超过了材料本身所能承受的临界压力,材料一样会发生脆性破裂。

3 结果与讨论

高压磨料水射流对脆性材料的钻孔过程是一个非常复杂的过程,它涉及到流体与固体、固体与固体的相互作用。通过上文对高压磨料水射流的工作原理分析,并结合本课题组前期所做的大量实验以及对脆性材料高压磨料水射流钻孔过程的分析,可以得出以下几点结论:

1)在钻孔初始阶段,当喷嘴上方的阀门打开,高压水经过水喷嘴喷射而出,形成一股高速射流并在混合腔产生一个负压,在负压作用下,磨料罐中的磨料通过一根连接磨料罐与喷嘴的软管进入混合腔。然而,从高速水射流的产生到磨料最终进入混合腔有一

段短暂时间。此段时间里,高速水射流直接与材料作用。在水射流柱与固体表面初始接触瞬间,水射流速通过压缩波对固体表面产生一个极高的动压力。如果该动压力超出了材料本身所能承受的临界压力,材料就会发生脆性破裂。当然,压缩波对脆性材料的作用时间极短,一般为微秒级。

2)当压缩波传递到水射流柱自由表面,而磨料从磨料罐进入混合腔需要一定时间(最多为几秒)。这个时间段还是纯水射流对固体材料发生作用,而产生滞止压力。如果该滞止压力超过了材料本身所能承受的临界压力,材料会发生脆性破裂。

3)当磨料最终进入混合腔后,高速水射流将其能量传递给磨料,其自身能量大大减少,因此,对材料产生的滞止压力也大大降低。此时,脆性材料一般不易破裂。

4 结语

本文通过对脆性材料钻孔初始瞬间及钻孔过程中水和磨料分别对脆性材料的作用机理的理论分析,揭示了钻孔过程中脆性材料破损的理论根源及机理,可为高压磨料水射流用于脆性材料切割领域提供理论参考。目前,国内对脆性材料钻孔过程的研究主要集中在理论规律和模型方面的研究。在今后的工作中,本课题组可以从实验的角度出发,进一步探究高压磨料水射流对脆性材料钻孔的机理。

参考文献:

- [1] Hashish M. 超高压磨料水射流岩石钻孔机[J]. 矿业译丛, 1992(3): 3-6.
Hashish M. The Rock Drilling Machine of Ultra-High-Pressure Abrasive Water Jet[J]. Mining Translations, 1992 (3): 3-6.
- [2] Karpinski A. An Introduction to the Diagnosis of the Delamination Process for Glass/Epoxy Composites During High-Pressure Abrasive Water-Jet Cutting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 52(7/8): 532-538.
- [3] Shanmugam D K, Nguyen T, Wang J. A Study of Delamination on Graphite/Epoxy Composites in Abrasive Water-Jet Machining[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(6): 923-929.
- [4] 杨林, 彭中波, 杜子学. 磨料水射流切割质量的参数化模型[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 869-871.
Yang Lin, Peng Zhongbo, Du Zixue. Parameter Model of Abrasive Water-Jet Cutting Quality[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(7): 869-871.
- [5] 刘会霞, 丁圣银, 王霄, 等. 水射流切割模型及其性能分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 122-124.
Liu Huixia, Ding Shengyin, Wang Xiao, et al. Water Jet Cutting Model And Performance Analysis[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 122-124.
- [6] 杨林, 张凤华, 唐川林. 超高压磨料水射流切割质量的实验研究[J]. 制造技术与机床, 2004(5): 72-75.
Yang Lin, Zhang Fenghua, Tang Chuanlin. Experimental Research on Cutting Quality Generated by Ultra High Pressure Abrasive Water-Jet[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2004(5): 72-75.
- [7] Johnson W. Impact Strength of Materials[M]. London: Edward Arnold, 1972: 289-301.
- [8] Johnson K L. Contact Mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 253-324.
- [9] Rinehart J S, Pearson J. Behaviour of Metals Under Impulsive Loads[M]. Cleveland: American Society for Metals, 1954: 185-227.
- [10] Kinslow R. High-Velocity Impact Phenomena[M]. San Diego: Academic Press, 1970: 372-469.
- [11] Field J E, Hutchings I M. Surface Response to Impact [C]//Materials at High Strain Rates. London: Elsevier Applied Science, 1987: 243-289.
- [12] Kang S W, Reitter T, Carlson G. Analysis of Interaction Phenomena Between Liquid Jets and Material[C]//ASME/JSME Fluids Engineering Conference. Hilton Head: INIS Collection, 1995: 523-528.

(责任编辑: 邓彬)