

高压水射流切割水泥砼的数值模拟

张海洋

(湖南路桥建设集团公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 冲击射流因能在被冲击表面滞止点处产生很高的冲击力和局部传热率而被广泛应用于材料切割和表面加热。文中建立圆形喷嘴高压水射流以垂直状态冲击切割水泥砼的流体动力学模型进行数值模拟, 分析得到射流出口压力及射流相对冲击高度与水泥砼在滞止点处压强的关系, 为高压水射流砼破碎设备研制和水泥砼在高压水射流冲击下的破碎机理分析提供理论基础。

关键词: 公路; 高压水冲击射流; 水泥砼; 数值模拟

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

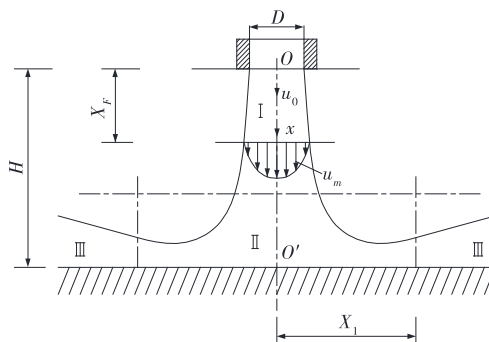
文章编号: 1671-2668(2018)03-0115-03

水泥砼路面虽具有强度高、承载力大、路用寿命长等特点, 但在产生病害后维护工作难度相当大, 如何快速切除病害点而又不损坏周边良好路面是一大难题。目前常用的切除方法有锯片切割、重锤砸板及冲击器破碎等, 不仅劳动强度大, 工作环境差, 而且可能使本来完好的砼产生微裂纹, 加剧砼路面的损坏。另外, 采用这些方法, 刀具磨损很快, 成本高。高压水射流利用冲击射流在滞止点及其附近产生相当高的压强, 当压强超过被切割材料的抗压强度时材料被切割。在美国及欧洲等西方发达国家, 该方法在石料和荒料开采、隧道开挖施工、砼结构物破碎及切割等领域得到了广泛应用。使用情况表明, 采用超高压水射流破碎设备切割或破碎砼结构材料对相邻材料不会产生损坏。

目前关于高压水射流切割的文献中数值模拟和理论分析还不多见。如果能从流体动力学分析入手建立射流冲击相关因变量(冲击压力、相对冲击高度和切割点及其附近的压强)相互关系数学模型, 通过数值分析并求解, 获取被切割材料在超高压水射流冲击下表面滞止点及其附近的压强分布, 就能得到切割破碎质量与射流冲击相关因变量之间的关系, 为高压水射流砼破碎设备研制提供理论依据。

1 高压水射流切割模型

当具有某一流速的高压水冲击射流从喷嘴高压射出, 集中冲击到被切割材料表面时, 会形成一股冲击射流。图 1 为圆形喷嘴以垂直状态高压水射流切割某材料模型。通常将图 1 分成 3 个特征区域: I 区为自由射流区; II 区为冲击(滞止)区; III 区为壁面射流区。



D 为圆形喷嘴直径; u_0 为高压射流自圆形喷嘴出口处几何中心轴线的速度; x 为高压射流断面与圆形喷嘴出口处几何中心的距离; u_m 为高压射流流速; H 为喷嘴与被切割材料表面高度, 即圆形喷嘴出口几何中心 O 与冲击点几何中心 O' 之间的距离。

图 1 圆形喷嘴垂直高压水冲击射流切割模型

在自由射流区, 高压水直接从喷嘴高速射出, 其运动不会受到被切割材料表面的任何影响。而在冲击(滞止)区, 射流直接作用在被切割材料壁面上, 受壁面影响, 区域压强增高, 并在滞止点 O' 处形成最高压强, 之后向四周形成一定压强梯度, 使射流向四周扩散, 形成弯曲射流流线, 在折转后逐渐与壁面平行, 压强也逐渐降低, 最后趋同于周围静压。在壁面射流区, 射流水压已基本恢复为静压, 壁面射流已转化为水的流动。

相关研究表明, 自由射流区与冲击(滞止)区的分界为 $x/H \approx 0.7$, 冲击(滞止)区与壁面射流区的分界为 $x_1/H \approx 0.35$ 。在冲击(滞止)区, 射流流线弯曲, 运动变化不定, 难以用简单的数学公式表达。但在壁面射流区, 射流经壁面的紊动和吸卷, 其流速 u_m 沿程将逐渐降低, 并满足式(1)。高压水射流冲击切割 3 个模块的运动规律各不相同, 其流动特性

与自由射流和壁面射流既有相似性,也有不同,各具特点。

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{2.35}{\sqrt{x/D}} \quad (1)$$

2 高压水射流切割水泥砧数学模型

2.1 模型建立

由于射流喷嘴截面形状为圆形,冲击射流为轴对称射流,射流数学模型坐标系可选取坐标分量为 r, θ (θ 为喷射角,即喷嘴几何中心轴线与冲击面之间的夹角)、 x 的三维圆柱坐标。由于冲击射流为轴对称流动,速度在 θ 坐标方向上的分量为零,三维圆柱坐标转化为图2所示二维平面坐标,即以射流对称轴为 x 坐标,以喷嘴出口截面圆心 O 为坐标原点,射流对称轴的垂直方向为 r 坐标。流场速度 U 在 x, r 坐标上的分量分别为 u, v 。

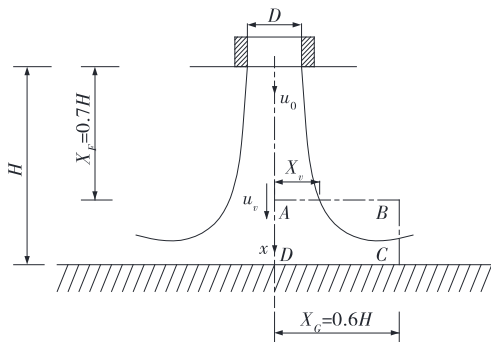


图2 水射流切割水泥砧模型计算区域

另外,通过时均化处理的冲击射流可视为定常流动,模型中的因变量 Φ (代表 u, v 、压强 p 等因变量)只是两个空间坐标 x, r 的函数,与时间 t 无关,即 $\Phi = \Phi(x, r)$ 。

采用标准的 $k-\epsilon$ 模型模拟冲击射流,用 Φ 表示通用变量, U 表示流场中的流速,由其连续性方程、动量方程及 k, ϵ 方程得到高压水射流切割水泥砧的通用 $k-\epsilon$ 数学模型的控制方程为:

$$\text{div}(\rho U \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S \quad (2)$$

式中: $\text{div}(\rho U \Phi)$ 为对流项, $\text{div}(\rho U \Phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v \Phi)$; $\text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi)$ 为扩散项, $\text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma r \frac{\partial \Phi}{\partial r})$; Γ 为扩散系数; S 为源项, $S = \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \eta_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial r})$ 。

2.2 边界条件

高压水射流的理论计算区域主要为图1中的冲击(滞止)区,同时考虑与之相邻的自由射流区及壁面射流区的影响。由于圆形喷嘴射流为轴对称,可取其一半作为计算区域。模型的控制体积为图2中的 $ABCD$,原点从喷嘴中心移至 A 点。

出流边界是流体离开计算区域的边界,其位置在选取计算区域时人为划定。该模型的边界条件将计算区域在 r 方向的长度取为 $X_G = 0.6H$,计算区域的各边界条件为:

(1) 边界 AB ($x=0, 0 \leq r \leq X_G$)分为两段,分别为 $0 \leq r \leq X_v$ (其中 $X_v = 0.5X_H$)段和 $X_v < r \leq X_G$ 段。 $0 \leq r \leq X_v$ 段为自由射流断面,边界值为 $v=0, k=0.04u^2, \epsilon=c_\mu k^{3/2}/(0.03D/2)$ 。 $X_v < r \leq X_G$ 段为射流自由边界, $u, v, k, \epsilon=0$ 。另外,根据自由射流理论,自由射流中的压强等于周围流体压强。因此, AB 段时均压强 $p=0$ 。

(2) 出流边界 BC ($0 \leq x \leq 0.3H, r=0.6H$)的边界条件采用局部单向化条件,出流边界附近区域的 r 坐标具有局部单向性,即边界上的因变量 v, k, ϵ 值不影响 r 方向上游邻点因变量 v, k, ϵ 的值, $\partial v / \partial r = \partial k / \partial r = \partial \epsilon / \partial r = 0$ 。另外,在出流边界 BC 处,速度在 x 方向上的分量 $u=0$,时均压强 $p=0$ 。

(3) 固体边界 DC ($x=0.3H, 0 \leq r \leq 0.6H$)的边界条件为壁面上 $u=0, v=0, \partial k / \partial x = \partial \epsilon / \partial x = 0$ 。

(4) 对称线($0 \leq x \leq 0.3H, r=0$)的边界条件为 $v=0, \partial u / \partial r = 0, \partial p / \partial r = 0, k=0.04u^2, \epsilon=c_\mu k^{3/2}/(0.03D/2)$ 。

3 高压水射流切割水泥砧模型的数值分析

如图3所示,设高压水射流切割水泥砧模型的数值条件为高压水泵压力250 MPa、喷嘴直径0.15 mm、相对冲击高度 $H/D=16$ 。采用 17×26 网格划分计算区域 $ABCD$,除靠近4条边界的第一条网格线与边界的距离取内部相邻网格线距离的一半外,整个网格为均匀划分,主网格中的控制单元刚好可以完全覆盖整个计算区域。计算区域几何尺寸如下: $AD=0.3H=0.72 \text{ mm}, DC=2AD=1.44 \text{ mm}, X_v=0.5AD=0.36 \text{ mm}$ 。喷嘴出口速度 u_0 为:

$$u_0 = f \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (3)$$

式中: f 为高压泵出口到喷嘴入口的压力损失系数, $f=0.9$ 。

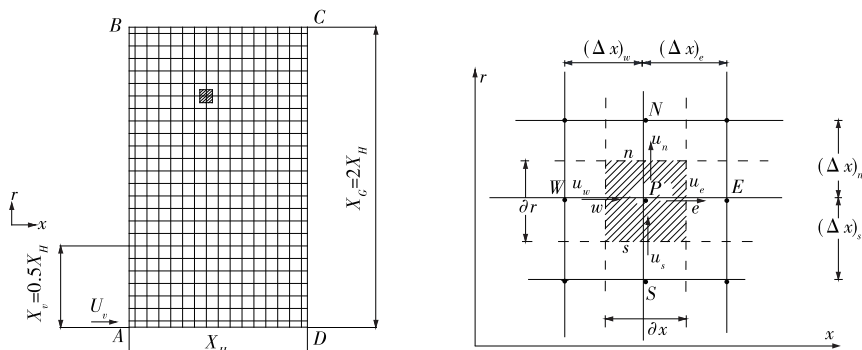


图 3 算例网格划分及主网格控制单元

根据式(3)求得喷嘴出口速度 $u_0 = 636.3 \text{ m/s}$ 。 据前述分析参数,得出不同高压泵出口压力对水泥点 A 处,沿轴线 AD 方向速度 $u_v = 446.8 \text{ m/s}$ 。根 砼表面压强的影响(见表 1)。

表 1 $H/D=16$ 时不同高压泵压力下被冲击水泥砼表面的压强 p 分布

高压泵 压力/MPa	下列 r/H 值下被冲击水泥砼表面的压强 p/MPa										
	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
300	220.0	182.4	99.7	30.20	21.9	12.3	9.8	5.20	2.80	1.70	0.54
250	149.4	106.0	58.3	23.50	12.6	8.7	5.7	2.70	2.00	1.00	0.43
180	88.5	62.0	28.0	11.60	7.5	5.1	2.8	2.00	1.18	0.59	0.28
120	46.3	39.9	18.0	8.87	4.7	3.3	2.1	1.33	0.75	0.38	0.05

同理,可得出相对冲击高度 H/D 分别为 12、16、20 和 25 时水泥砼滞止点处压强随高压泵出口压力的变化趋势(见图 4)。

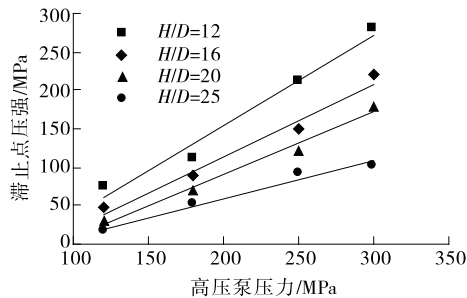


图 4 滞止点压强与高压泵出口压力的关系

由图 4 可知:被切割材料滞止点处所作用的压强大小与高压水泵工作压力呈线性关系,同比提高或降低。此外,冲击相对高度越小,滞止点处压强随泵出口压力增长的速度越快,切割效率越高。

4 结论

(1) 采用标准 $k-\epsilon$ 模型建立高压水射流切割水泥砼数值模型,能较好地模拟并估计砼壁面在滞止点处及周边的压强分布。

(2) 改变相对冲击高度及高压水射流切割压力,水泥砼壁面在滞止点及其周围的压强分布具有相似性,切割受力中心点处压强最大,随后向四周呈梯度降低,离滞止点越远压强越小,最后趋于周围空气压强。

(3) 被切割材料滞止点处所作用的压强大小与高压水泵工作压力呈线性关系,同比提高或降低。同时,相对冲击高度越小,滞止点处压强随高压泵出口压力增长的速度越快,切割效率越高。

参考文献:

[1] 毕鑫.水之刃:水射流破碎技术在路桥养护改造中的应用研讨会纪实[J].中国公路,2012(9).
[2] 孙连军,王火明.一种新的水泥混凝土路面板切割技术[J].路基工程,2008(2).
[3] 胡玉国.公路养护浅谈[J].黑龙江交通科技,2012(5).
[4] 李明毓,杨立新,何志勇.高压水射流切割加工技术及其应用[J].公路与汽运,2007(1).
[5] A W Momber, R Kovacevic, J Ye. The fracture of concrete due to erosive wear by high velocity water flow [J]. Tribology Transactions, 1995, 38(3).