

空气锤进排气噪声产生的机理及其特性研究^{*}

赵升吨 高红娟 史维祥

(西安交通大学 西安·710049)

本文分析了空气锤噪声的基本组成及其基本特性,指出空气锤在工作时不但存在排气噪声也存在进气噪声,并且进排气噪声对操作工人及其周围环境的危害最为严重。深入分析了空气锤4种不同工作循环中的进排气特性,应用声学理论,分析了进排气噪声产生的机理及其特性。指出了空气锤4种不同工作循环进排气噪声特性的差异。明确指出空气锤轻打时产生的排气噪声值最大,并对理论分析的结果进行了实验验证。

关键词:空气锤,进排气噪声,机理,特性

1 引言

空气锤在进行工作时,可产生高达120dB(A)的噪声,大大超过90dB(A)及其以下的国际标准,对工人的身心健康及周围环境造成了极大的危害,故进行治理是极其重要的。分析空气锤噪声可以发现,该噪声是由进排气噪声、机械传动噪声和锻打冲击噪声所组成。机械传动噪声虽然在电动机开动后就一直存在,但在传动系统安装调试润滑正常时,通常较小,远小于其它两种噪声,所以从声音的掩蔽效应来看,主要应对进排气噪声和锻打冲击噪声进行控制。

锻打冲击噪声是由锻打冲击力使有关受力零件产生剧烈的冲击振动从而辐射出的结构噪声和上下锤头及模具之间相对高速接近,将其间的空气高速排挤出产生的犹如拍手的加速度噪声。加速度噪声是一种空气动力性噪声,当空气锤执行冷冲、冷锻或冷剪切下料时这一噪声最高。通常这一锻打噪声可通过在锤砧座下方设置减振器,采用高阻尼的合金材料代替传统的锤头材料及在有关振动辐射面粘贴阻尼减振层的方法来进行控制,但由于造价高,施工不便,寿命短,易失效,降噪量很有限等种种原因,更由于上述这

些方法在降低锻打冲击噪声中的加速度噪声方面收效甚微,故上述措施在实际中未普遍应用。空气锤这一本身工作原理造成的锻打冲击噪声大又不易控制的严重事实,大大限制了其应用。

虽然空气锤进、排气噪声在某些工艺时没有锻打冲击噪声高,但由于该噪声频谱范围广,电动机一开动,该噪声就一直存在,锻打冲击噪声只在锻打工件瞬时产生,而噪声对人的伤害是一个日积月累的迭加过程,这样治理进排气噪声就显得极其重要。为此,本文首先分析了空气锤不同工作循环的进排气情况,应用声学理论分析和研究了不同工作循环中的进排气噪声产生的机理及其特性,并进行了实验验证。

2 4种工作循环的进排气性质

空气锤应具备空行程、悬空、打击和压紧等4种工作循环,其中打击又分为连续打击和单次打击,单次打击又有重打和轻打之分^[1]。这些工作循环是通过气阀和操纵系统来实现的。在各种不同的工作循环中,操纵系统和气阀的配气关系如图1中的4个图所示。为了深入研究空气锤进排气噪声产生的

* 收稿日期:1996-5-6;修回日期:1996-6-16

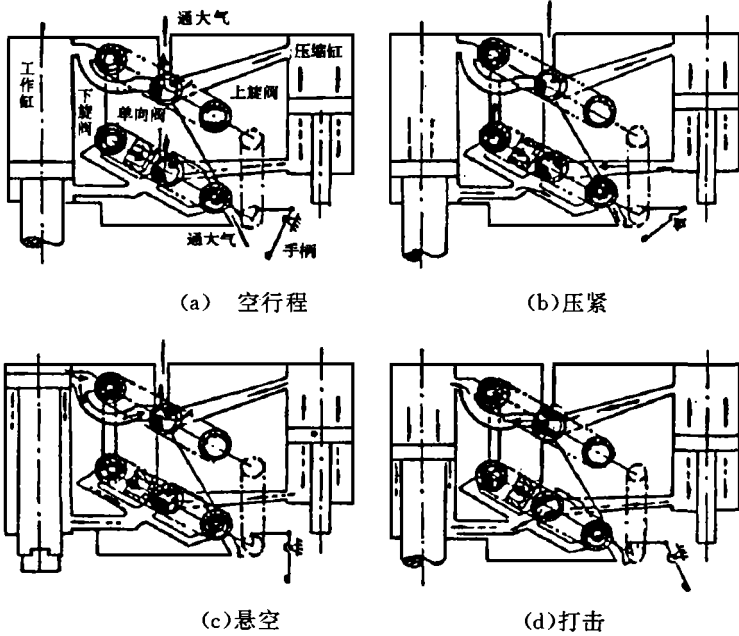


图1 双阀式空气锤的配气操纵示意图

机理, 必须对空气锤不同工作循环时气体流通的道路及气缸内的气压情况进行分析。

2.1 4种工作循环时的进排气特性

2.1.1 空行程

从图1可看出, 在执行空行程工作循环时, 工作活塞不动, 压缩活塞的上下腔均通大气^[1]。考虑到压缩活塞杆直径很大, 所以压缩活塞上腔的活塞圆的面积和下腔活塞杆腔的圆环面积相差较大, 而吸气和排气的气体流通道相通, 这样, 在压缩活塞朝下运动时, 活塞杆腔排出的气体量没有从活塞腔吸入的气体量大, 故在整体上表现为吸气; 同理, 在压缩活塞朝上运动时, 在整体上表现为排气, 并且压缩活塞每完成1次上下运动过程, 在排气口上表现为吸排气各1次, 此外, 由于空行程时, 压缩缸上、下腔保持和进排气口畅通的状态, 所以其上、下腔的压力很接近于1个大气压, 进排气时压力小。

2.1.2 悬空

如图1所示, 悬空时, 工作活塞及压缩活塞上腔均和大气相通, 而两者的下腔相通, 这样当工作活塞悬空到上死点时, 压缩活塞从

上死点运动到下死点时活塞上腔吸气, 其从下死点运动到上死点时进行排气, 所以吸排气时压力很接近于一个大气压, 即进排气压力很小。从图1也可看出, 当压缩活塞向下运动时, 活塞杆腔的空气会被压缩而顶开下旋阀中的单向阀将压缩空气送入工作缸下腔, 从而将锤头提起悬空, 在接近上死点附近, 压缩活塞的下腔通过其活塞杆上的一排吸气孔进行吸气^[1]在进入稳定的悬空工作状态时, 锤头已抬起到最高位置, 并保持不动, 若理想化地认为工作缸和压缩缸无泄漏, 则压缩缸就不从其活塞杆上的小孔中吸气, 压缩活塞下腔的空气犹如一个空气弹簧, 一会儿压缩, 一会儿伸长, 但是空气在压缩后压力升高的同时也往往伴随着温度的升高, 这样, 必然引起气缸温度升高, 从而降低各处的密封程度, 增大了压缩空气泄漏量。同时, 温度高也会降低活塞和气缸壁之间的耐磨性, 增大磨损量, 所以, 实际操作时, 应避免锤头长期悬空。

总之, 在悬空工作循环中, 压缩活塞的上腔进行着吸排气动作, 且吸排气量比空行程时压缩活塞上腔的吸排气量大。而压缩活塞

下腔仅存在少量的从活塞杆中的进气^[1]。

2.1.3 压紧

从图1可看出,在压紧工作循环中,压缩活塞的上腔与工作活塞的下腔和大气相通,下腔的压缩空气通过下旋阀中间流道顶开下旋阀中的单向阀后(图1)再流入上旋阀,进入工作活塞下腔进行压紧动作,即压缩活塞的上腔和大气相通,而压缩活塞的下腔和工作活塞的上腔相通。从上面的工作缸和压缩缸的连通情况可以看出,压紧工作循环时,进入稳定状态后(即可靠不动的压紧后),压缩缸的进排气情况和悬空时完全一样,即压缩活塞上腔在曲柄旋转一周时,吸排气各一次,而压缩活塞的下腔仅存在通过其活塞杆的一排小孔的少量补气吸气。

2.1.4 打击

从图1可以看出,该工作循环中压缩活塞和工作活塞的上腔通过上旋阀中段相通两者下腔通过下旋阀中段相通。曲柄旋转一周,压缩活塞上腔吸气两次,下腔吸气一次^[1]。

打击时,上旋阀中段通大气的窗口是由阀体上的一排斜置小孔构成的^[1],这排小孔用来调节打击能量,打击时压缩缸上腔来的压缩空气分为两路,一路进入工作上腔,一路由阀体上的斜置小孔排入大气。轻打时有较多小孔与阀套上的窗口对正,则排入大气中的空气就增多,进入工作缸上腔的空气就少,实现轻打。重打时,旋阀转过角度大,只有少量压缩空气排入大气,或因小孔全部堵死,压缩空气不排入大气,而全部进入工作缸上腔,实现重打。

因打击时压缩活塞上腔的空气压力很高,通过上旋阀中段的1排斜置小孔排入大气的空气压力则高,流速快。曲柄每回转1周,打击时通过小孔向外排气1次,且打击工作循环时,吸气均来自机身壳体下部进气口,排气在机壳上部,吸排气不是同时进行。

3 空气锤进排气噪声产生的机理

声学技术

理及其特性

3.1 一般气体流场中的波动方程

在气体流场中,由于微团体存在质量流量 $Q(t)$ 和微团体之间的粘滞力的,流体受固体力 $F_i(x, t)$ 的作用等,则由质量方程、动量方程及热力学方程可得非齐次的波动方程^[1]。

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial X_i^2} = \frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial F_i(x, t)}{\partial X_j} + \frac{\partial(\rho V_i V_j)}{\partial X_i \partial X_j} \quad (1)$$

式中: $Q(x, t)$ 表示在时刻 t 位置 x 的单位体积内的质量传入速率; $F_i(x, t)$ 表示在流体中存在相对运动的固体物而形成的单位面积的面力; $\frac{\partial(\rho V_i V_j)}{\partial X_i \partial X_j}$ 表示由于扰动引起的进入单位体积的动量通量; $\partial p / \partial X_i$ 表示静压力梯度,它是气体所受到的单位体积的应力。上式右端项可以看作是激励声场的源函数,它包含了质量流对时间的微分,力对空间的微分和应力的二次空间微分,这3个抽象的数学概念对应着空气动力性噪声的3种声源。

(a)单极子源:媒质中流入的质量或热量不均匀时,即式(1)中存在 $Q(x, t)$ 时形成单极子源,典型的单极子源如高速气流经喷口周期性排放的脉冲气流,稳定气流受到周期性调制的旋笛等。

(b)二极子源:当流体中有障碍物存在时,流体和固体物产生的不稳定反作用力 $F_i(x, t)$ 形成偶极子声源,它是力声源,风吹电线声、空气导流片等形成的噪声是典型的偶极子声源。

(c)四极子源:媒质中没有质量和热量的注入,也没有障碍物存在时,则唯有粘滞应力辐射声波这就是四极子声源,它是应力声源。

3.2 空气锤进排气噪声产生的机理

由上述4种工作循环中进排气情况可以看出,由于压缩缸上下腔定期地从大气中吸气和排气,这样通过吸排气口就会对大气定

期地吸取或注入一定质量的空气。这一空气流量 Q 必然会随着时间的变化而变化。这样,空气锤吸排气时必然存在单极子声源。空气锤定期地吸气产生的单极子声源和活塞式空气压缩机工作时所产生的进气噪声完全一样,而空气锤排气时和内燃机工作时定期从排气管向外排气时产生的噪声完全一样。所以,空气锤吸排气产生的噪声源是一个典型的单极子声源。

此外,空气锤不论在吸气或排气时,都经历了曲折的存在局部扰动装置的流道。例如从压缩缸活塞杆中吸气时,空气从机壳下部进入,流过机械传动系统中的齿轮及曲拐,然后进入活塞杆内,再由活塞杆中进入活塞头部的一排小孔及活塞杆部的一排小孔,再分别流入活塞的上腔或下腔。由于吸气时气体有一定的流速,这样在其流动的途径中,固体的金属块如齿轮、曲柄、连杆、小孔、活塞销及活塞就会对气流产生作用力,并且该作用力在气体流道的不同部分,其大小也不同。这样就产生了犹如风吹电线的偶极子声源。最后,由于空气锤在吸排气口上快速地进行着吸排气的动作。由于空气气体微团体之间存在着粘滞性,特别在相对运动速度较大时,这一粘滞力很大,从而使吸排气口附近的空气产生剧烈地相互扰动剪切,从而产生了犹如气缸排气放空喷注的四极子声源。由文献[3]可知,该噪声的声功率 W 和气室压力 p 当地大气压力 p_0 及喷口直径 D 有关,即当 $0.01 < (p - p_0)/p_0 < 100$ 时

$$W = K \cdot D^2 [(p - p_0)^4 / p_0^2 p^2] \quad (2)$$

喷注 90° 方向上离喷口 1 米处的 A 声级为

$$L_p = 80 + 10 \lg [(p - p_0)^4 / p_0^2 p^2] + 20 \lg D + 10 \lg \left[\frac{2}{\pi} (\text{tg}^{-1} 0.165D - \frac{0.165D}{1 + (0.165D)^2}) \right] \text{ dB(A)} \quad (3)$$

由式(3)可看出,排气时的压力越高,则产生的噪声的声功率 W 越大。由前分析可知,空

行程、悬空和压紧时排气压力接近于当地大气压 p_0 。在打击工作循环中,排气时的压力最高。所以在打击工作循环时声功率最大。而在轻打击时,会有更多的压缩空气通过上旋阀体上的更多的小孔排入大气,相当于增大了总的排气面积即增大了式(2)和式(3)中喷口的直径 D ,而在重打时 D 很小或为零。所以在 4 种工作循环中,以打击工作循环特别是轻打时喷口四极子噪声为最大。

4 进排气噪声的频率

由文献[4]可知,喷口排气噪声区域可分为混合区、过渡区和充分以发展区,混合区的中心部分是喷注的核心,核心长度或者说混合区的延伸距离,大约是喷口直径的 4 ~ 4.5 倍;过渡区扩展到 10 倍直径的地方。沿喷注表面在喷口附近声压级较低,在 3 ~ 4 倍直径的距离内迅速增加至极大值,以后又慢慢降低。喷注噪声主要来自混合区和过渡区的湍流运动,高频噪声主要是在喷口附近产生的,低频噪声主要是在下游产生,频谱峰主要在核心的尖端附近。噪声的最大值与喷口成 30 左右的方向上具体分布与喷口大小和速度高低有关^[2,4]。

这样对空气锤排气时产生的四极子喷注噪声来讲,由于其排气口一般处于机身的压缩缸的顶部,而机身高度一般较高,所以在地面 1 米处的噪声主要是喷口中的下游低频噪声为主,高频噪声在机身顶部的排气口上。

又由排气噪声的指向性可以看出^[2,4],处于空气锤操作位置的人往往在排气轴线的 180 角度范围以外,相对而言,接触的噪声要小一些。故将排气口放在机身顶部从降低空气锤噪声对工人的伤害的角度来考虑是好的。

由文献[3]可知,小孔喷注具有将噪声频率推向高频的功能。所以在排气时,特别在轻打时,由于经过上阀体的斜置小孔排气时会将排气噪声推向高频。所以在空气锤进行轻

打时, 比其余 3 种工作循环时产生的排气噪声具有更高的频率。空行程时曲柄每回转 1 周, 压缩活塞上下腔各吸排气 1 次, 若设空气锤的锤击次数为 n 次/min, 则空行程时吸气或排气的频率为 $f_{\text{空}} = n/60$, 考虑到空气锤吸气和排气共用一个口, 而吸气及排气均在进排气口产生噪声。这样由吸气和排气产生的噪声的基频为: $f_{\text{空0}} = 2f_{\text{空}} = 2n/60 = n/30$ 但考虑到吸气噪声比排气噪声小, 这样噪声的频率可能仍为 $f = n/60$ 。

在悬空和压紧工作循环中, 亦有压缩活塞上腔的吸排气噪声其基频为: $f_{\text{悬空}} = n/30$ 。

而在压缩活塞下腔, 由前述分析可知, 由曲柄回转 1 周, 下腔吸气 1 次, 这样, 下腔的吸气频率即吸气噪声的基频为 $f_{\text{悬吸}} = n/60$ 。

在打击工作循环中, 压缩活塞上腔通过上旋阀体上的斜置小孔排气时, 产生的排气噪声最大, 很显然, 由曲柄回转 1 周, 排气一次。其基频为: $f_{\text{打}} = n/60$ 。

对压缩活塞上腔, 打击工作循环曲柄回转 1 周, 在行程的上、下死点, 上腔各吸气 1 次, 故其吸气噪声的基频为 $f_{\text{打吸}} = n/30$ 。

对压缩活塞下腔, 打击工作循环时, 曲柄每回转 1 周, 仅吸气一次, 故其吸气频率基频为 $f_{\text{打吸}} = n/60$ 。

5 空气锤进排气噪声的实验研究

为了考查空气锤 3 种噪声在空气锤实际锻打工件过程中噪声作用时间的长短, 作者分别对 750kg 空气锤胎模锻造联轴器及 150kg 空气锤自由锻造齿条时的噪声情况进行了两个小时的统计分析, 结果表明锻打噪声作用时间仅占总时间的 4% 而空气锤进排气噪声和机械传动噪声在整个时间范围内均存在, 证明上述的分析是正确的。

从表 1 可以看出, 机械传动噪声明显比前面两种噪声值小, 而重打时比轻打时锻打冲击噪声值大, 这是由于重打时, 锤头下降速度快, 自然就产生较强的加速度噪声, 同时重

打时作用在锤身及锤头上的力大, 由此引起的振动量大, 产生的结构噪声值自然就大。

表 1 不同规格空气锤的噪声值 dB(A)

空气锤规格	循环规范	进排气噪声	锻打冲击噪声	机械传动噪声
750kg	轻打	112	95	82
	重打	92	107	84
150kg	轻打	107	99	80
	重打	90	105	82
75kg	轻打	116	96	79
	重打	91	101	81

从表 1 也可以看出, 进排气噪声值和锻打冲击噪声值较接近, 轻打时进排气噪声明显比重打时的大, 这是由于轻打时排气量大、压力高, 并用轻打时上旋阀的小孔具有升频作用, 因而噪声值大。此外, 实测结果也表明, 较热的工件锻造时锻打冲击噪声比较凉的工件锻造时的噪声值小, 例如 750kg 空气锤, 较热态锻打噪声为 101dB(A), 而较凉态锻打冲击噪声为 110dB(A), 150kg 空气锤较热态锻打噪声为 99dB(A), 而较凉态锻打冲击噪声为 105dB(A), 这是由于较热态比较凉态金属变形抗力小, 而变形量又大, 因而作用到锤头上的力小, 减速度值小, 所以产生的加速度噪声及结构噪声都小。

对 75kg 空气锤实测结果表明, 对进排气噪声来讲, 轻打为 116dB(A), 悬空为 104dB(A), 压紧为 105dB(A), 空行程为 98dB(A), 轻打时噪声最大, 证明了本文前面的分析是正确的。

75kg 空气锤轻打的 A 声级为 117.5dB(A), 悬空时为 111dB(A), 轻打时的进排气噪声明显比悬空时高, 由图 2 可以看出, 两噪声在低频时相差不大, 而在高频时轻打的声压值明显比悬空时高, 这正象前面分析的轻打时上旋阀体上小孔由于具有升频作用, 因而造成了这一现象, 也由于轻打时排气压力高, 由式(2)、(3)可知, 这种排气时产生的噪声值大。

对某 150kg 空气锤实测轻打噪声为

104dB(A), 压紧噪声为 96dB(A), 空行程为

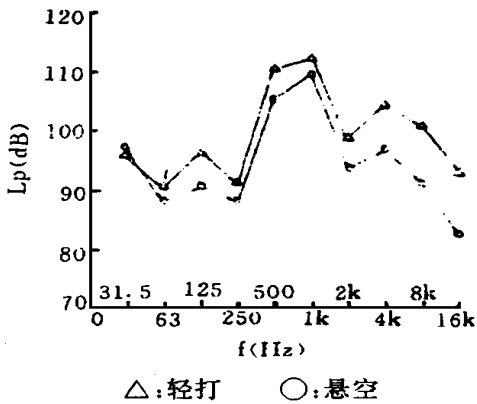


图2 两种操作规范下上进排气口噪声特性

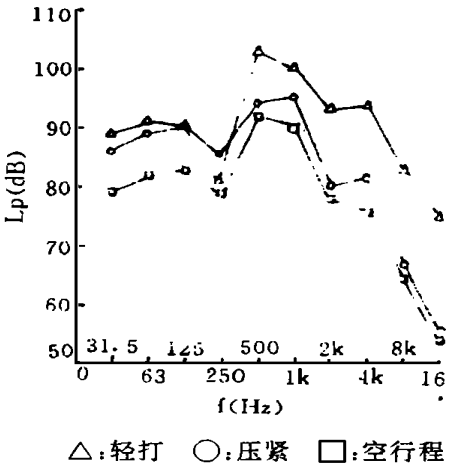


图3 3种操作规范下上进排气口噪声特性
92dB(A), 其噪声频谱如图3所示。由图3可见, 轻打时噪声值最大, 而对空行程和压紧操作规范来讲, 两者在低频时声压值相差比较大, 而在高频时两者很接近, 这是由于空气锤在执行空行程和压紧规范时, 空气锤上进排气口压力均接近一个大气压, 而压紧比空行程时排气压力稍大一些, 故由式(2)、(3)可知, 在高频时两者声功率级、A声级接近, 并且压紧时噪声比空行程时大一些。此外, 从图3可见低频时空行程时的声压级明显比压紧时小, 如前所述, 这是由于空行程时从空气锤上进排气口排出的空气量 $Q(x, t)$ 比压紧时小, 而空气锤压缩缸行程次数一定, 故压紧比空行程时上进排气口 $\partial Q(x, t) / \partial a$ 值大, 故由式(1)可知, 相应地产生的声功率级大, A声

级就高, 由 $Q(x, t)$ 引起的噪声主要是形成以低中频为主的单极子声源, 故在低中频压紧时的声压级比空行程时高。

在同样的条件下, 实测 150kg 空气锤在执行轻打操作规范时, 上进排气口噪声为 104dB(A), 下进排气口噪声为 98dB(A), 其频谱如图4所示, 很显然在高频时上进排气口噪声明显比下进排气口噪声值高, 而在低频时下进排气口的噪声又明显比上进排气口高, 这是由于在轻打时上进排气口的噪声以四极子噪声为主, 所以噪声中高频成分大^[2,4], 而下进排气口的噪声主要以进气噪声为主, 而这时的进气噪声和活塞式压缩机进气噪声特性很接近, 它是以低中频为主, 噪声源为单极子源。

对 C41-150 空气锤, 测试其上、下进排气口在悬空时进排气噪声, 结果表明, 在空气锤上进排气口处噪声为 93dB(A), 下进排气口处噪声为 95dB(A), 其频谱特性如图5所示。很显然, 在低中频处, 下进排气口的声压值明显比上进排气口的声压值大, 例如: 在 31.5、63 和 125Hz 3 个频率上两者声压级平均相差达 18dB(A), 而在高频部分, 两者相差仅为 6dB(A), 这是由于在空气锤执行悬空操作规范时, 上进排气口进气速度明显比下进排气口小, 而进排气噪声主要表现为象活塞式压缩机进气噪声一样的低频特性, 并且悬空时排气压力低、流速小, 如式(1)和(2)

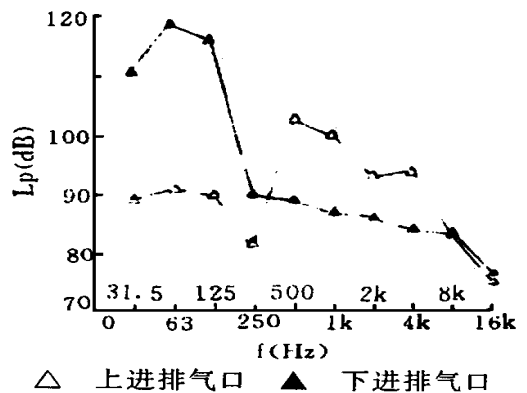
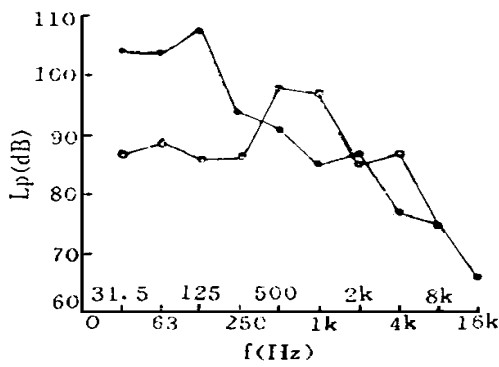


图4 轻打时上、下进排气口噪声特性



上进排气口 下进排气口

图 5 悬空时上、下进排气口噪声特性

所示,所以产生的单极子和四极子声源辐射的噪声值就小,因而在低中频时,上进排气口的噪声明显比下进排气口的噪声值大。此外,两者在高频段声压值接近,是由于进气噪声在高频时值就小,而上进排气口排气时的压力低,产生的四极子源辐射的声功率小,因而上进排气口的声压值小。

使用电容式传声器、声级计、磁带记录、频谱分析仪等记录噪声变化规律并进行分析,结果表明排气噪声明显比进气噪声大,频率高,如图 6 所示。

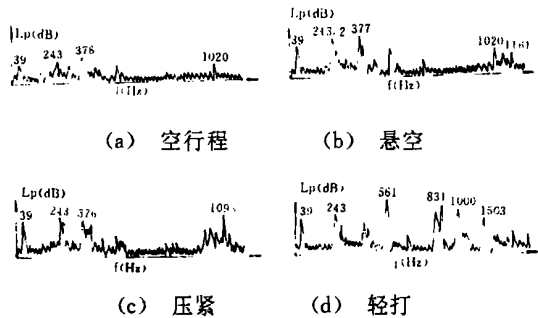


图 6 4 种工作循环的进排气噪声频谱图

由于锤击次数 n 为 180 次,故基频为 $f_0 = 3\text{Hz}$ 而 $2f_0 = 6\text{Hz}$ 。从图 6 可以看出,工作循环频谱图在低频时的峰值正是上述基频的整数值。此外,轻打击时的噪声频率明显高于其它 3 种,这是由于轻打时四极子声源产生的喷注噪声占总噪声中的成份较大,而这一噪声本身频率高,故出现这种现象。同样悬空

和压紧时的频率比空行程时的高也是同样原因所致。

6 结 论

(1) 空气锤工作时噪声是由进排气噪声、机械传动噪声和锻打冲击噪声 3 部分组成的。其中进排气噪声危害最大,并且其工作时不但存在排气噪声,还存在进气噪声。

(2) 空气锤气缸进排气时以打击时排气压力最高,悬空和压紧时次之,空行程时最小。并且悬空和压紧时的进排气量比空行程时要大。

(3) 空气锤气缸进排气噪声为一种空气动力性噪声,产生的机理为其周期性地向进排气口吸取和注入一定量的空气,进排气气流受流道内金属的作用力扰动及气流高速吸入和排出时受周围静止气体的粘滞力等作用而使进排气口的空气产生扰动从而产生空气动力性噪声,该噪声源中存在单极子、偶极子及四极子声源。

(4) 空气锤 4 种工作循环中以打击时产生的进排气噪声最高,悬空和压紧时次之,空行程时最小。而打击时,打击越轻,噪声越大,所以轻打时的排气噪声是其最主要的噪声源。

(5) 空气锤工作时,打击时噪声的频率明显高于其它工作循环,而悬空和压紧时的噪声频率比空行程时的高。

(6) 空气锤在执行打击、悬空、压紧和空行程 4 种工作循环时,产生的进排气噪声的基频为其锤击频率或其 $1/2$ 。并且其排气噪声明显比进气噪声大。

参考文献

1. 高乃光, 锻锤, 机械工业出版社, 1987
2. 马大猷, 噪声控制学, 科学出版社, 1987
3. P. M 莫尔斯, 吕如榆译, 理论声学, 科学出版社, 1984
4. 方丹群, 空气动力性噪声与消声器, 科学出版社, 1987