

根据疲劳强度选择液压元件

[美]Stanley J. Skaistis

原文提要 NFPA额定疲劳压力指出能够提供“无限”疲劳寿命的压力，它们可以用来估计更高压力的缩短寿命效应。但是为了有效地使用这些额定疲劳压力，必须了解如何进行疲劳试验及疲劳试验的含意是什么。

摩擦磨损是许多液压元件现场损坏的主要原因。但是对更高压力和更小尺寸的需要使应力水平越来越高，以致于疲劳看来要成为损坏的主要原因了。传统的额定压力不能可靠地指出疲劳损坏的概率，因为它们主要基于轴承载荷极限、咬合、内部漏油等性能考虑。为了有助于避免疲劳损坏的危险，美国流体动力协会(NFPA)制订了为液压元件提供目前可用的唯一疲劳强度指标的标准T2.6.1。该标准中所描述的试验验证一个元件究竟能否受得住 10^7 次从零压力到额定压力的循环。

某些系统设计师倾向于低估疲劳额定压力的价值，因为他们的设计往往是针对少于 10^7 次高压循环来确定额定压力的。然而，针对较少的循环次数作出的设计，所带来的节省往往不足以抵偿所增加的危险。此外，许多针对较少的循环次数设计出的系统曾很好地使用到超过其预期寿命。当可靠地知道工作压力最大循环次数，且费用或重量考虑要求刚好满足规定寿命的设计时，额定疲劳压力和额定爆破压力往往可以用来估计较短寿命下的耐压能力。

在NFPA标准制订以前，曾经很重视用爆破试验来验证强度，象ASME锅炉标准所做的那样。然而，由于液压元件中的应力集中在从稍大于1直到4左右之间变化，所以爆破压力与疲劳压力的关系甚至都不是近似恒定的。按照锅炉标准的规定，需要进行四倍于工作压力的静压试验，这样做恐怕会接受某些疲劳寿

命短得不能令人满意的元件，同时却拒绝某些疲劳寿命足够长的元件。另一方面，要进行五倍于工作压力的静压试验（象保险商实验所和加拿大标准协会所做的那样）将几乎消除疲劳寿命短的危险，但却肯定会拒绝许多更为安全的产品。

强度何时降低

材料强度取决于所施加的载荷循环次数。这种关系通常用强度-寿命曲线即S-N曲线表示。该曲线适用于在规定的冶炼条件下、具有特定的表面粗糙度并处于规定的载荷形式下的给定材料。因为NFPA额定疲劳压力关系到许多不同的材料和表面粗糙度，所以它必须以能从典型的S-N曲线引出的一般规律为基础。

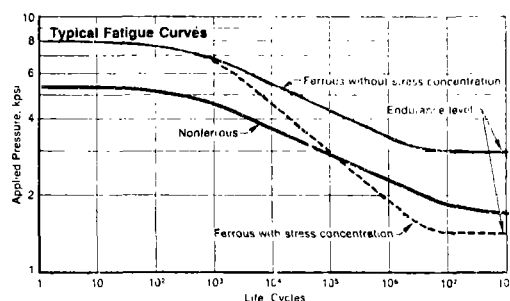


图1 典型的疲劳曲线

黑色金属结构的“耐久压力级”是对疲劳寿命有影响的最小载荷。结构中的应力集中能使之降低。有色金属结构没有耐久压力级，任何周期载荷最终都引起疲劳损坏。

图1中的实线代表具有用所加压力表示的“强度”的一个典型的黑色金属液压元件。曲

线中段表明强度是如何随着载荷循环次数的增加而降低的。该曲线在液压元件实际寿命范围的大部分里具有比较恒定的斜率。在 10^6 与 10^7 次循环之间,曲线平坦了并变成水平线,说明低于该值的交变压力不会引起疲劳损坏。小于 10^3 次循环时曲线也变得平坦,但继续上升到 10^7 次循环。该点表示等于元件强度极限即爆破压力的静载荷。

虚线曲线说明结构中应力危险点处的应力集中引起的疲劳寿命变化。曲线的少循环次数高应力端不变,因为在此应力下的屈服变形减少了应力集中的影响。另一方面,在较低应力作用下并不发生屈服变形,所以应力集中降低较多循环次数下的强度,从而在更低的压力下达到疲劳极限。

对黑色金属来说,曲线右端是水平的。但是有色金属的类似曲线却不会变成水平的,而是保持略微下降的斜率,这说明如果延续到足够的循环次数,则任何压力级都将引起疲劳损坏。

NFPA额定疲劳压力证实,在额定压力下元件可以用到 10^7 次循环。由于黑色金属材料的S-N曲线在 10^6 至 10^7 次循环之间变成水平线,全用黑色金属制造的元件可以用到甚至超过该界限。但若应力危险元件是有色金属的,而应用场合又要求多于 10^7 次的压力循环,则系统的峰值压力应限制在额定疲劳压力的85~95%以补偿更长的所需寿命。

加快疲劳试验

针对液压元件建立精确的S-N曲线的一种方法是对试样施加不同压力进行试验。但是,这种方法很费时间也很费钱。此外,对许多应用来说,只对静压力点和疲劳压力点有兴趣;在这两点之间的压力数据仅在已知有限寿命和对最小重量有苛刻要求时才有意义。

因此,NFPA标准只要求额定静压力和额定疲劳压力。制订标准时已经决定额定疲劳压力应以 10^7 次循环为基础,因为有色金属材料没有确切的疲劳极限。但是运转 10^7 次试验循

环可能很费钱,所以制订了加快试验方法。

加快试验法的原理是提高试验压力以便疲劳损坏出现得更快些。遗憾的是,大幅度地提高压力是不现实的,因为应力集中随着压力载荷有很大变化,还因为在低压下不发生屈服。

当试验仅缩短到 10^6 次循环时,加快试验是比较好办的。因为S-N曲线的拐弯处出现在 10^6 与 10^7 次循环之间,只需要增加不大的载荷。此外, 10^7 与 10^6 次循环下的压力之间的比值要比 10^7 与少得多的循环次数下的压力之间的比值更接近于常数。

为了确定压力比值,对有关 10^6 与 10^7 次循环下的疲劳强度的一切可以得到的数据进行了研究。结果发现疲劳强度比值分成两组,一组适用于黑色金属,另一组适用于有色金属。

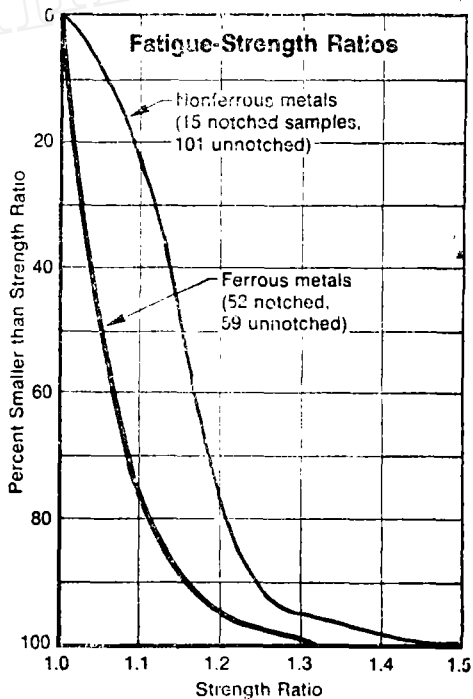


图2 疲劳强度比值

10^6 次循环下的疲劳强度与 10^7 次循环下的疲劳强度的比值确定了加快疲劳试验中所用的提高了的载荷。这种累积曲线表明90%的强度比值对有色金属来说为1.25以下,对黑色金属来说为1.15以下。

根据此数据,该标准要求加快试验所用试验压力的提高量大于90%数据点的强度比值。

该强度比值对黑色金属来说为1.15,对有色金属来说为1.25。例如,用 10^6 次循环试验来验证黑色金属液压缸的疲劳强度时,如果 10^7 次循环的试验压力为1000磅力/英寸²,则须在1150磅力/英寸²的压力下进行试验。尽管所选择的比值对10%的数据来说不够保险,但那10%主要由具有很高的应力集中的试样组成,这样高的应力集中在液压元件中是比较少见的。

经验表明, 10^6 次循环试验通常要比 10^7 次循环试验苛刻大约5~10%以,致于通过了较长的试验的元件有可能通不过较短的试验。在这种情况下可根据 10^7 次循环试验来验收元件。

对零件加压

NFPA标准规定液压元件疲劳试验中可以用任何脉冲形状,言外之意等于说脉冲形状与疲劳寿命无关。有些批评该标准的人坚持认为脉冲形状和加载时间都影响疲劳寿命,但是他们的主张与证据不符。

在60年代后期,用正弦波、三角波和矩形波脉冲进行了一系列疲劳试验。目的是想证明疲劳寿命是脉冲振幅均方根的函数。然而试验数据却表明疲劳寿命取决于应力振幅和平均应力这样一些传统因素。用精确的正弦波脉冲进行的另一些试验证明,脉冲频率对疲劳寿命没有影响。

然而,存在着循环速度的某些不容忽视的实际影响。如果用 10^6 次循环疲劳试验来试验液压元件,则振幅小于基波峰值振幅但大于S-N曲线拐弯处的二次压力谐波可能引起疲劳损坏。较高的试验速度会使这种谐波加剧。数学分析表明二次谐波小于峰值振幅的60%就不会引起疲劳损坏了,因此试验标准规定不得有振幅较大的谐波。

此外,脉冲重复率、流量限制、夹头滑动及温升都倾向于把试验循环速度限制在低于该标准规定的30赫极限值的数值。每台试验设备似乎都有个临界值,速度再高将使试验脉冲不稳定,以致于不能保持在所要求的 $\pm 2\%$ 的范

围内。

当被试元件的受压腔是由间隙或小孔来充油时,循环速度必须低到使元件能承受压力脉冲的整个振幅。同理,当夹头能滑动时,在滑动结束前是承受不到满幅应力的。试验循环速度必须足够低以保证每次循环中都滑完。此外,为了避免过高的温升,某些试验中的循环速度也必须受到限制。该标准把试验温度限制在 -20°F 到 $+200^{\circ}\text{F}$ 的范围内。

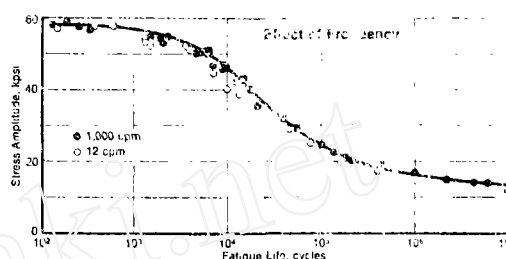


图8 频率的影响

在1000周/分和12周/分下对Alclad243-T3铝板进行的疲劳试验表明,试验频率不影响疲劳寿命。

理解额定压力

为了避免和与疲劳强度无关的传统额定压力相混淆,新的额定压力在试验报告、样本、销售文献中用如下语句加以说明:“压力包迹的额定疲劳压力、额定静压力的验证方法符合NFPA推荐标准NFPA/T 2.6.1-1974,类别x/y的规定”。x和y是分别表示保险度等级和置信度等级的数字。

x值可以是1,表示90%的保险度等级;可以是2,表示99%的保险度等级;也可以是3,表示99.9%的保险度等级。保险度等级表示可望比额定值更强的元件的百分比。例如,当额定疲劳压力为3000磅力/英寸²、保险度等级为90%时,有90%的元件能受得住 10^7 次以上的从0到3000磅力/英寸²的压力循环。不过,90%的保险度等级并不意味着10%的现场损坏率。只有当所有的元件在每次循环中都承受100%的额定疲劳压力时,这一命题才成立。根据工作中承受的实际压力载荷的不同,当保险度等级为90%时损坏率可能为1.5~6.6%,当保险度等级为99%时损坏率可能为0.04~

0.12%。

y值可以是90或99,表示90%或99%的置信度等级。置信度等级是对确定额定压力的试验的置信度的一种统计学度量。90%的置信度等级表示对一批新元件进行试验时,试验结果有90%的机会给出相同的或更高的额定疲劳压力。

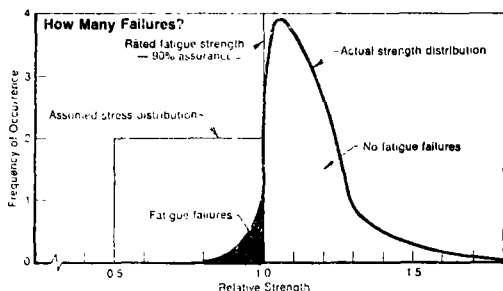


图4 有多少损坏

所经历的疲劳损坏的数目取决于元件所受到的实际载荷及其实际强度分布。如果载荷不超过额定疲劳强度,则疲劳的百分比总是小于(通常远小于)1~保险等级。

提高液压元件的额定压力

额定疲劳压力的一个主要优点是可以用它来估计在压力高于额定疲劳压力时的元件寿命。没有额定疲劳压力是不可作出这项估计的。

作出这样的估计的详细的背景材料见SAE《疲劳设计手册》。整个方法很简单,并在NFPA标准中给出。元件的S-N曲线被保守地画成双

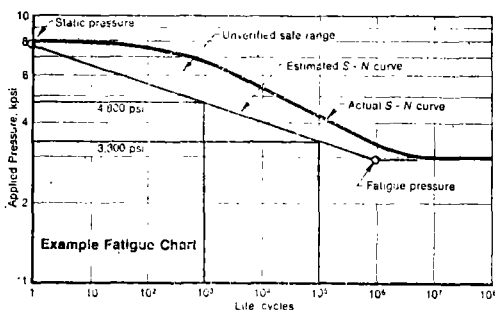


图5 疲劳曲线示例

由于液压元件的实际S-N曲线很难得知,通常标出 10^6 次循环下的疲劳压力点和1次循环下的静压力点,然后画出连接此二点的直线,以便对液压元件进行估计。这种方法是很保守的,但费用要比试验大量元件以确定实际S-N曲线的方法低得多。

对数纸上连接疲劳压力点和静压力点的直线。预计的寿命直接由此线读出。

从图5很容易看出这种方法所固有的保守性。实际S-N曲线本质上指出比直线近似值更长的寿命。然而,大多数液压元件的实际S-N曲线很难得知。接受直线近似所固有的保守性的费用通常要比详细确定S-N曲线所需要的试验费用低得多。

对于涉及到多种压力的应用场合,根据直线近似查得每种压力下的疲劳寿命,然后将每种压力下的使用寿命分数加在一起。如果和小于1,则在拟用的压力载荷下元件不会疲劳损坏。数学表达式为

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

式中 n_i —压力 P_i 下的需要循环寿命, N_i —压力 P_i 下的预计循环寿命。

作为例子,考虑额定疲劳压力为3000磅力/英寸²、额定静压力为8000磅力/英寸²的一个液压缸。

1. 在4800磅力/英寸²下它能受得住多少次压力循环,在3300磅力/英寸²下多少次?

2. 如果承受500次4800磅力/英寸²下的循环和30000次3300磅力/英寸²下的循环,该液压缸会不会疲劳损坏?

3. 如果该液压缸每承受300次3300磅力/英寸²的循环就得承受5次4800磅力/英寸²的循环,则其疲劳寿命是多长?

第一个问题可以根据图5直接回答。该液压缸可以在4800磅力/英寸²下受得住 10^3 次循环,或在3300磅力/英寸²下受得住 10^5 次循环。第二个问题需要进行一点计算:

$$\frac{500}{10^3} + \frac{30000}{10^5} \leq 1$$

$$0.8 \leq 1$$

因为0.8小于1,所以在指定的双压载荷下该液压缸不会疲劳损坏。

第三个问题用同一个式子解答,但要稍加变换以表示两种压力下的循环次(下转48页)

固的基础上。如果整个压力机的重量比冲头重量大得多,而且安装时垫以防振胶垫等的话,也可以装在差一点的基础或台子上。

用高能打击力一次打击不能完成加工时,通过2次、3次反复打击可以达到目的。例如,清除铸件毛边的作业中有时遇到非常大的毛边,这种情况下用戴纳马克就可提高效果。

这样利用高能打击力,与普通的压力加工相比有很大的优点,老式冲击气缸因为仅有打击动作而有种种不足之处,戴纳马克因为先使压紧活塞以适当速度下降之后再行打击,而且压紧活塞能够快速回程,所以对操作者没有危险,并且也不用担心工件反跳等。另外,还能使压紧活塞缓慢下降,便于合模。仅有打击动作的老式冲击气缸中,打击时发出很大的冲击声,但戴纳马克中由于是在压紧活塞内部进行打击,所以冲击声被减弱。当然更不会产生撞击工具那种噪声,而在弯曲加工时,由于是在靠压紧力大致弯曲之后再给予打击而变形,所以即使用小型的戴纳马克气缸也能进行准确的弯曲加工。

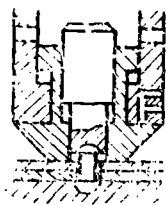


图5 用戴纳马克进行铆接

把若干个零件重叠起来进行铆接时,工具座部分制成图5所示的结构。用工具座把零件压紧后,由于铆接使零件互相压紧,由于铆钉在铆钉孔内膨胀而得到牢固的联接。

进行打击加工时,往往对周围的机械或装置有所影响。把戴纳马克气缸装在自动机内时,最好把放置工件的工作台与其他装置分开,或用防振胶垫等消除其影响。使用可更换的压印模时,宜简化模座的形状,压印模宜用橡胶等轻质材料衬垫。一般来说,用螺钉装配起来的结构复杂的工具或装置对戴纳马克来说是不适

用的。

戴纳马克气缸的改进

图1所示的戴纳马克气缸,压紧力取得相当大,缸径与冲头直径之比约为3。把式(6)对V微分求出使E最大值的V/V₀,虽然随使用压力而变化,但大体上为0.5。如此看来,如果尽量加大冲头直径对缸径之比,就可以提高单位空气消耗量的输出能量。实际上,如果这样设计的话,在与图1相同的缸径、行程之下输出可以提高到3倍。对于冲裁、铸件去毛边、整形等不那么需要压紧力的场合来说,这种设计是有利的。

结 束 语

对压紧之后再行打击的戴纳马克高能气缸的理论分析尚不充分,不少问题尚未搞清。在实用方面,在压印、铆接、整形、冲裁、铸件去毛边等作业中已经得到好评。可以认为这是由于戴纳马克所具有的特点造成的。

(冯长印译自日刊《油压化设计》第13卷第4号,李军校)

(上接64页) 数之间的关系:

$$n_1 = \frac{5n_2}{300}$$

$$\left(\frac{5n_2}{300} \right) \frac{1}{10^3} + \frac{n_2}{10^5} = 1$$

$$n_2 = 37500 \text{ 次循环}$$

$$n_1 = 625 \text{ 次循环}$$

该液压缸的预计疲劳寿命为37500次3300磅力/英寸²的循环加上625次4800磅力/英寸²的循环。

(徐达立译自《Machine Design》July 20, 1978, 宋学义校)