多级离心泵叶轮切割后的性能影响分析

研究超低比转速 BB4 型多级离心泵叶轮切割后对性能的影响——本文利用 PumpLinx 软件对超低比转速 BB4 型多级离心泵首级叶轮外径切割进行了数值模拟，分析了不同切割量下的性能和内部流场的变化，并根据分析结果预测了超低比转速 BB4 型多级离心泵的切割指数。研究结果表明：随着叶轮外径的减小，泵的扬程和轴功率都有所下降；在切割量为 1% 时，效率略有升高，切割量越大，效率下降越明显，高效点向小流量方向偏移；在小流量点工况时，随着切割量的增加，效率呈先上升后下降的趋势。

文 / 樊昊民 李永龙 刘宇宁

PROCESS-Tip
* 更多信息请扫描二维码：
chem.vogel.com.cn
* 反馈编码：A210334

在API610 标准中把单壳径向剖分多级两端支撑式泵，称为 BB4 型泵。BB4 型多级离心泵由吸入段、吐出段、中段、叶轮以及径向导叶等过流部件组成。

用户总希望能够有完全符合自己工况条件的泵，然而对于泵企业来说设计量大、种类繁多以及成本上升等问题导致这种理想泵是不可能存在的。不过通过切割叶轮外径的方法来改变泵的性能是最经济、最有效的方法。很多学者和设计人员通过理论、实践和数值模拟的方法对叶轮的切割做了大量的研究，根据离心泵叶轮比转速的不同提出了一些新的切割公式，或者利用数值模拟的方法来预测切割后的性能变化。

本文作者供职于西安泵阀总厂有限公司。

离心泵比转速的范围通常为：$30<n_s<300$，当 $30<n_s<80$ 时称为低比转速离心泵；当 $14<n_s<30$ 时称超低比转速离心泵。经过大量文献的研究分析，发现鲜有专家学者对超低比转速 BB4 型泵叶轮切割后的性能变化进行研究。因此，本文利用 PumpLinx 软件来探究超低比转速 BB4 型多级离心泵首级叶轮切割后的性能变化，对今后离心泵的生产和设计有很大的参考价值。

几何模型和数值模拟

几何模型

由于考虑到超低比转速 BB4 型多级离心泵叶轮切割后对性能的影响因素较多，无法准确说明径向导叶式压水室叶轮切割后的性能变化，故本文选取首级叶轮单独作为研究对象。本文采用 Pro/E 三维软件对吸入段、叶轮、导叶和导叶的延伸段进行三维建模，几何模型如图 1 所示。本文以某型号的 BB4 型多级离心泵为研究对象，采用切割首级叶轮的方法来研究叶轮切割后对性能的影响。

模型泵的设计参数为：叶轮外径 D_2=200 mm，叶片数 Z=6，正反导叶叶片数均为 4 枚，流量 Q=7 m^3/h，单级扬程 H=50 m，转速 n=2950 r/min，比转速 n_s=25.3。

数值模拟

本文采用 PumpLinx 软件进行定常数值计算，为了数值模拟

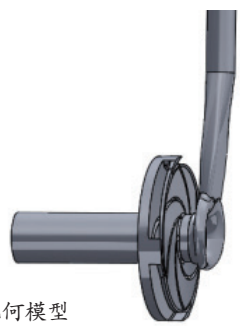

图 1 几何模型

更加准确，采用 PumpLinx 软件中的扩展模式（Extended Mode）进行数值分析，壁面粗糙度设置为 25 um，收敛精度设置为 10^{-5}，网格采用 PumpLinx 软件内置的基于二叉树算法的笛卡尔网格技术生成。由于模拟时忽略了泄漏损失、轴承、机械密封处的机械损失，故模拟后的效率值偏高，但并不影响叶轮切割后性能的变化趋势。

切割参数和切割指数

叶轮外径的切割参数

蔡礼权 2009 年在陕西科技大学学报发表的《IS 50-32-200 型离心泵叶轮切割研究》给出的离心泵叶轮允许切割量与比转速 的关系如表 1 所示。本文根据表中给出的最大切割量为 20% 的范围内进行了 6 次切割，切割参数如表 2 所示。

切割指数的预测

一般低比转速离心泵叶轮的切割定律为：

$$\frac{Q'}{Q}=(\frac{D_2'}{D_2})^2 \quad \frac{H'}{H}=(\frac{D_2'}{D_2})^2 \quad \frac{P'}{P}=(\frac{D_2'}{D_2})^4$$

式中：Q，Q'：为切割前后的流量；H，H'：为切割前后的扬程；

表 1 比转速和允许切割量

n_s	$(D_2-D'_2)/D_2$
≤ 60	0.2
60 ~ 120	0.15
120 ~ 200	0.11
200 ~ 300	0.09
300 ~ 500	0.01

表 2 叶轮切割参数

切割量（%）	叶轮外径 D_2（mm）
0	200
1	198
2.5	195
5	190
7.5	185
10	180
12.5	175

P，P'：为切割前后的功率。

对于超低比转速离心泵来讲，叶轮切割前后的出口速度三角形不在保持相似。因此，对于超低比转速离心泵利用切割定律来切割叶轮会产生很大的误差。本文通过叶轮切割后的性能变化来反推切割指数，假设叶轮切割后的扬程和功率的切割指数分别为 a,b。如（1）式所示：

$$\frac{H'}{H}=(\frac{D_2'}{D_2})^a \quad \frac{P'}{P}=(\frac{D_2'}{D_2})^b \quad (1)$$

两边同时取对数为：

$$\ln\frac{H'}{H}=a\ln(\frac{D_2'}{D_2}) \quad (2)$$

$$\ln\frac{P'}{P}=b\ln(\frac{D_2'}{D_2})$$

则有：

$$a=\ln(\frac{H'}{H})/\ln(\frac{D_2'}{D_2}) \quad (3)$$

$$b=\ln(\frac{P'}{P})/\ln(\frac{D_2'}{D_2})$$

计算结果及分析

切割叶轮外径对效率的影响

由图 2 可以看出，切割量较小时，泵的效率稍有提高；随着切割量的增加，效率下降，切割量越大，效率下降越明显，高效点向小流量方向偏移。

超低比转速离心泵叶轮流道长而窄，致使圆盘摩擦损失和流道内的流动损失较大，而圆盘摩擦损失与叶轮外径的 5 次方成正比。圆盘摩擦损失随着叶轮外径的减小而减小。所以在叶轮切割量较小时，机械效率升高的程度大于水力效率下降的程度，因此泵的效率稍有升高。随着切割量的增加，效率显著下降的原因由以下几点：

1. 随着切割量的增加，叶轮和导叶之间的径向间隙增大，叶轮出口和导叶入口之间形成一定厚度的液流环，同时随着切割量的增加，叶轮对流体的控制能力随之减弱，间隙处的液流环消耗能量，导致损失增加。所以在径向导叶式离心泵切割量较大时，只切割叶片，而不车削前后盖板，以保持叶轮外径与导叶之间的间隙对液体的引导作用。

2. 在设计工况下，叶轮出口流速的大小和方向与导叶进口流速的大小和方向有较好的一致性，随着切割量的增加，叶轮和导叶的匹配性被破坏，叶轮出口和导叶入口之间的冲击损失增加，效率降低。

3. 随着叶轮外径的减小，叶片变短，流道内的扩散损失增加，从而导致效率下降。

切割叶轮外径对扬程和功率的影响

由图 3 和图 4 可以看出，随着叶轮外径的减小，扬程下降很明显，功率也随着切割量的增加而减小。

切割叶轮外径对小流量工况的影响

本文对小流量工况（Q=4 m^3/h，Q=5 m^3/h，Q=6 m^3/h）进行模拟时，发现随着切割量的增加，效率呈先上升后下降的趋势，最大升量为 3.1%。如图 5 所示。

当偏离额定流量点在小流量工况运行时，叶轮出口的绝对速度增大，而导叶内流速较低。所以，在小流量工况时叶轮出口流速的大小和方向与导叶入口流速的大小和方向相差较大，造成冲击损失，消耗能量。随着切割量的增加，叶轮和导叶之间的径向间隙增大，叶轮出口和导叶入口之间形成一

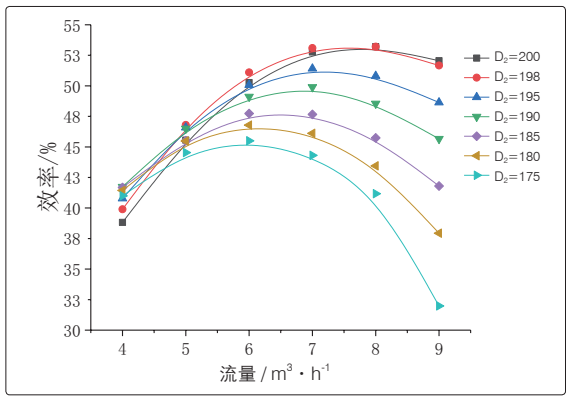

图 2 不同叶轮外径时的流量 - 效率曲线

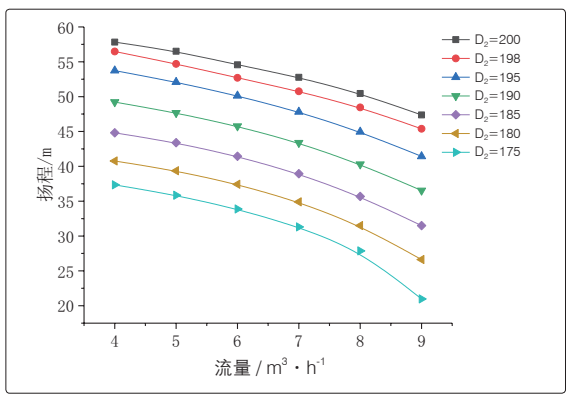

图 3 不同叶轮外径时的流量 - 扬程曲线

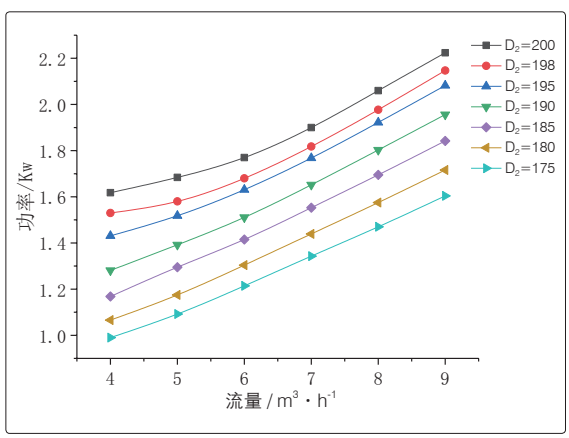

图 4 不同叶轮外径时的流量 - 功率曲线

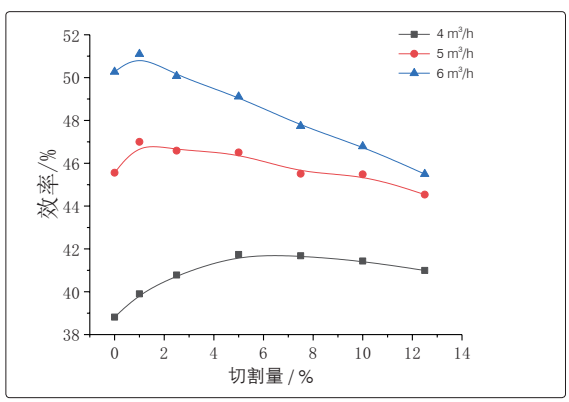

图 5 小流量工况不同切割量下的效率曲线

定厚度的液流环。当切割量较小时，形成的液流环对叶轮出口的高速流体有一定的缓冲作用，致使冲击损失减小，效率有上升的趋势。

切割叶轮外径对内部流场的影响

图 6 为设计流量点（Q=7 m³/h）在不同叶轮外径下的静压云图，从图 6 可以看出随着切割量的增加，叶轮内部的静压分布基本相似，切割量的增加对叶轮进口部分的影响很小，低压区变化不明显，对叶轮出口部分的影响较大；随着切割量的增加，导叶的压力分布变化很明显。在相同的叶轮半径处工作面的压力高于背面的压力。

从静压云图可以看出，当切割量超过 5% 时，导叶扩散段的压力明显降低。其主要原因是随着切割量的增加，高效点向小流量方向偏移，此时设计流量点（Q=7 m³/h）属于大流量点，而扩散段的流速和流量成正比，所以流速增加，压力下降。

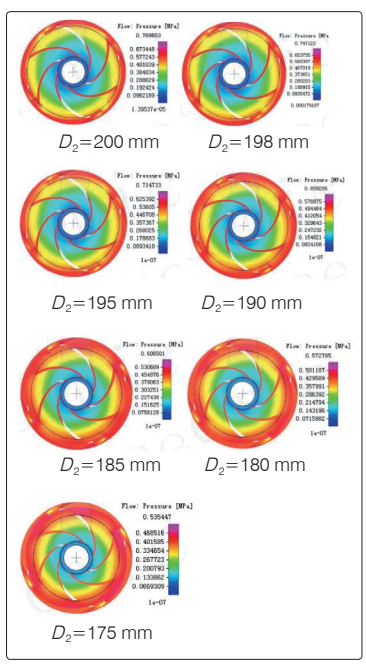

图 6 不同叶轮外径下设计流量点（Q=7 m³/h）的静压云图

切割指数的计算

叶轮外径经过 6 次切割后，得到了每次切割后高效点的扬程和功率值。通过（3）式计算出 a 和 b 的值，如表 3 所示。取掉最大值和最小值计算其平均值，得到 a=2.8,b=4.4。

总结

本文通过数值计算的方法对超低比转速 BB4 型多级离心泵首级叶轮外径切割进行了数值模拟分析，结果表明：

表 3 切割指数的计算

切割量（%）	a	b
1	4.01	4.1
2.5	2.11	5.32
5	2.94	4.3
7.5	2.52	4.82
10	2.83	4.34
12.5	2.98	3.96

1. 随着叶轮外径的减小，泵的扬程和轴功率都有所下降；在切割量为 1% 时，效率略有升高，效率随着切割量的增加而下降，并且随着切割量的增加高效点向小流量方向偏移；

2. 切割量的增加对叶轮进口部分的静压分布影响很小，变化不明显；对导叶的静压分布影响很大，压力分布变化很明显；

3. 本文通过叶轮切割后的性能变化来反推切割指数，得到了切割定律中扬程和功率的切割指数分别为：a=2.8,b=4.4。由于本模型的设计流量小，所以，切割量的增加对流量影响较小；

4. 超低比转速 BB4 型多级离心泵的切割量不宜过大，笔者建议切割量不宜超过 5% ；

5. 在小流量工况时，随着切割量的增加，效率呈先上升后下降的趋势，最大升量为 3.1%。