

# 弯矩作用下内压球壳大开孔接管区应力状况研究

高炳军 闫胜咎 王俊宝

河北工业大学化工学院 天津 300130

**摘要：**利用北京火箭软件有限公司产品有限元程序自动生成系统 FEPA3.0 开发了弯矩作用下内压球壳大开孔平齐接管区应力状况分析的有限元计算程序，考察了球壳与接管区的应力状况，发现接管根部存在较大的应力，重点讨论了接管根部附近球壳上的应力分析与计算方法。认为可以分别计算内压和接管弯矩单独作用时的应力分量，并根据分析设计思想，进行线性化处理得出各应力分量的薄膜应力及弯曲应力，然后进行叠加，并求出主应力及应力强度，按分析设计准则进行应力评定。

对不同参数大开孔结构进行了大量计算，整理出内压和接管弯矩单独作用时各应力分量的薄膜应力与弯曲应力系数曲线，讨论了可用于工程设计的应力计算与评定方法。

**关键词：**大开孔接管 球壳 有限元 应力分析 应力评定

通常压力容器行业把开孔率 ( $d_i/D_i$ ) 大于 0.5 的开孔结构称为大开孔结构，这种开孔结构的分析与设计超出了 GB150-1998《钢制压力容器》<sup>[1]</sup>及 JB4732-95《钢制压力容器-分析设计》<sup>[2]</sup>正文范围。压力容器受内压作用时大开孔结构的应力分析已有不少学者在进行研究，但在局部载荷作用下压力容器大开孔接管区应力状况的研究尚未见报道。而早期文献如 WRC 第 107 公报、297 公报及 BS5500 等对在局部载荷作用下压力容器大开孔接管区应力的计算仅适用于开孔率小于 0.5 或更小的情况<sup>[3]</sup>。笔者以大开孔内压球壳为研究对象，利用有限元法考察在接管弯矩作用下大开孔接管区的应力状况，对不同参数下大开孔结构进行计算，并绘制相关图表以用于工程设计。

## 1. 弯矩作用下内压球壳大开孔接管区应力状况的有限元分析

利用北京火箭软件有限公司产品有限元程序自动生成系统 FEPA3.0 开发了弯矩作用下内压球壳大开孔平齐接管区应力状况分析的有限元计算程序，受内压作用时，采用了 4 接点等参元，轴对称模型（如图 1），受接管弯矩作用时，采用了 8 接点体单元，三维模型（如图 2）。



图 1 轴对称模型

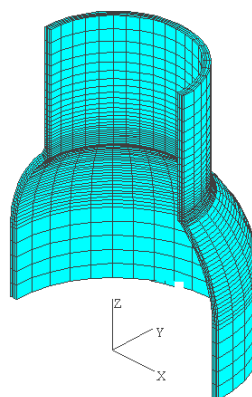


图 2 三维模型

### 1.1 模型分析

为简化起见，仅考虑接管或球壳整体补强的情况。接管与球壳外壁以圆弧光滑过渡，圆弧与球壳的切点在球壳开孔处的法线方向，以避免有限元计算的奇异现象，并保证不同参数计算时的几何相似。为了减小边界效应对分析区域的影响，接管及与球壳连接的柱壳都具有一定的长度。模型沿厚度方向剖分为 4 层，为了提高分析精度，接管与球壳连接区剖分网格加密。

轴对称模型中柱壳底部加轴向约束，模型内表面施加内压，接管端部加轴向面力模拟封闭端部效应。

由于弯矩载荷具有对称性，三维模型选用  $xoz$  对称面，对称面上的接点加  $y$  向约束，柱壳底部接点加在  $z$  向约束，接管端部  $yoZ$  两侧加等值反向面力模拟接管弯矩。

### 1.2 模型参数

球壳内半径  $R=500\text{mm}$ ，厚度  $\delta_s=10\text{mm}$ ，接管内半径  $R_i=325\text{mm}$ ，厚度  $\delta_s=10\text{mm}$ ，接管高度  $500\text{mm}$ ，柱壳高度  $300\text{mm}$ 。内压  $p=1.0\text{MPa}$ ，接管弯矩  $M_y=1000\text{N}\cdot\text{mm}$ 。

### 1.3 计算结果

受内压作用时，根据轴对称模型有限元计算结果，绘制了模型的第三强度理论相当应力的图谱（如图 3）。受接管弯矩作用时，根据三维模型有限元计算结果，绘制了模型的变形及应力等值线着色图（如图 4）。

由图 3 可见，最大应力发生在过渡区，而球壳上的最大应力位于过渡圆弧与球壳的切点所在位置。

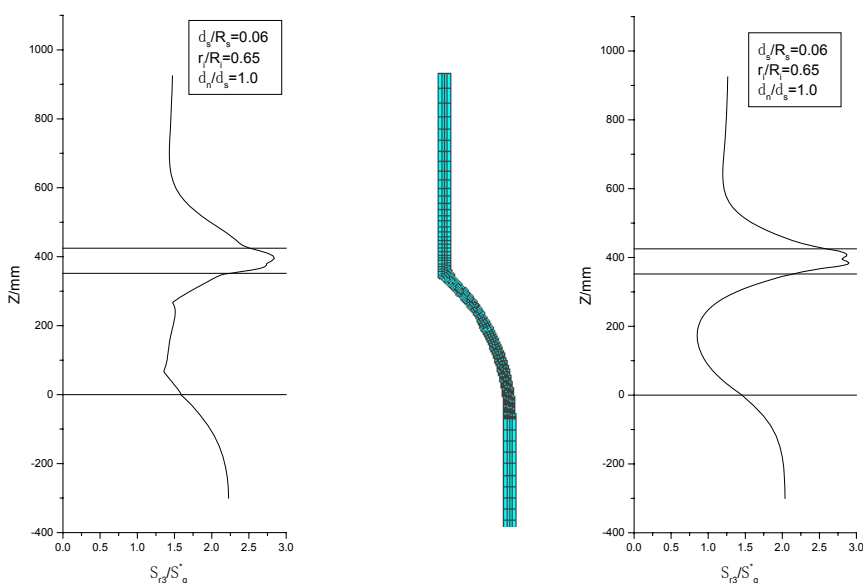


图 3 受内压作用时轴对称模型的应力图谱

由图 4 可见，应力应变趋势与文献[3]分析一致，对称面上接管根部一侧为双向拉伸，另一侧为双向压缩，且进一步应力分析发现，既存在薄膜应力也存在弯曲应力，两侧应力值大

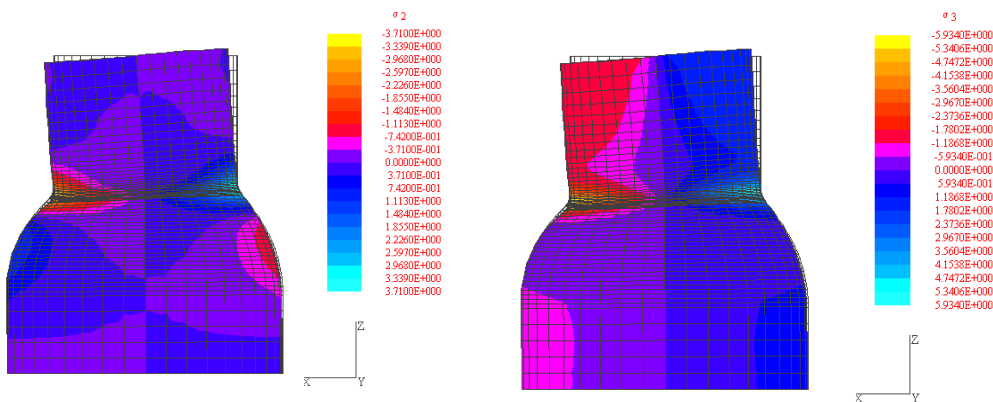


图 4 二维模型应力应变

小相等符号相反。最大应力发生在对称面上过渡区内，而球壳上的最大应力位于过渡圆弧与球壳的切点所在位置。

本文将研究重点暂放在后者，过渡区内的应力状况及其对球壳上的应力影响将另文讨论。

## 2. 弯矩作用下内压球壳大开孔接管区应力计算方法讨论

根据国内外有关现行标准，对于压力容器大开孔结构应按照分析设计准则应力分析与评定，严格来讲对于弯矩作用下内压球壳大开孔接管结构应按实际工况与结构，进行应力计算并做评定。但在小变形范围内，可根据叠加原理，分别计算内压与弯矩单独作用时的应力，而后再性叠加。

为此，笔者根据载荷性质，分别采用轴对称及三维有限元模型对大开孔结构进行计算，按分析设计的观点，对所重点考察的位置进行线性化处理，得出 4 个应力分量（所考查位置上有两个剪应力较小被忽略）沿球壳壁厚方向的薄膜应力与弯曲应力。

这样就可以进行不同大开孔参数下的应力计算，并整理出相关图表，工程设计时只要根据工况及结构参数查取有关应力系数，计算出各应力分量的薄膜应力与弯曲应力值，按照弹性力学计算公式求出主应力及应力强度，即可进行应力评定。

## 3. 不同参数下应力计算及数据整理

笔者对球壳内径为 1000mm；开孔率分别为 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.8；球壳厚度分别为 10, 20, 30, 40, 50；接管与壳体的厚度比为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 共计 420 个模型进行了计算，并以应力系数的形式绘制了曲线，附录图 1 至图 16 给出了部分应力系数曲线。

### 4. 曲线的使用及应力评定

首先根据大开孔结构参数  $\delta_s/R_s$ 、 $R_n/R_s$ 、 $\delta_n/\delta_s$  查取各应力分量的薄膜应力与弯曲应力的

$$\begin{array}{cccc} \text{应} & & & \text{系} \\ \text{力} & & & \text{数} \\ \sigma_r^p / \sigma_\theta^* & \sigma_{rb}^p / \sigma_\theta^* & \sigma_{\theta r}^p / \sigma_\theta^* & \sigma_{\theta b}^p / \sigma_\theta^* \\ \sigma_\phi^p / \sigma_\theta^* & \sigma_{\phi b}^p / \sigma_\theta^* & \tau_{r\phi}^p / \sigma_\theta^* & \tau_{r\phi}^p / \sigma_\theta^* \\ \sigma_r^M & \sigma_{rb}^M & \sigma_\theta^M & \sigma_{\theta b}^M \\ \hline M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) & M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) & M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) & M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) \\ \sigma_\phi^M & \sigma_{\phi b}^M & \tau_{r\phi}^M & \tau_{r\phi b}^M \\ \hline M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) & M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) & M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) & M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}) \end{array}$$

然后，根据内压  $p$  及接管弯矩  $M$  进行应力叠加求出各应力分量的薄膜应力与弯曲应力值。

$$\sigma_r = \frac{\sigma_r^p}{\sigma_\theta^*} \frac{pR_s}{2\delta_s} + \frac{\sigma_r^M}{M_1 / (\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s})} \frac{M}{\delta_s^2 \sqrt{R_s \delta_s}} \dots\dots$$

并可求出内外壁应力值

$$\sigma_r^{i(o)} = \sigma_r \pm \sigma_{rb} \dots\dots$$

根据各应力分量求出主应力及应力强度，根据薄膜应力的应力强度按  $P_L \leq 1.5S_m$ 、根据内外壁应力强度按  $P_L + Q \leq 3S_m$  进行应力评定。

这些工作完全可以编制相应的计算程序，只要输入必要的参数及所查数据，即可进行应力计算与评定。

## 5. 算例（略）

## 6. 结论

利用北京飞箭有限元公司产品有限元生成系统 FEEN3.0 开发了弯矩作用下内压球壳大开孔平齐接管区应力状况分析的有限元计算程序，考察了球壳与接管区的应力状况，发现接管根部存在较大的应力，重点讨论了接管根部附近球壳上的应力分析与计算方法。认为可以分别计算内压和接管弯矩单独作用时的应力分量，并根据分析设计思想，进行线性化处理得出各应力分量的薄膜应力及弯曲应力，然后进行叠加，并求出主应力及应力强度，按分析设计准则进行应力评定。

对不同参数大开孔结构进行了大量计算，整理出内压和接管弯矩单独作用时各应力分量的薄膜应力与弯曲应力系数曲线，讨论了可用于工程设计的应力计算与评定方法。

参考文献:

1. GB150-1998 《钢制压力容器》
2. JB4732-95 《钢制压力容器-分析设计》
3. 丁伯民. 美国压力容器规范分析-ASME VIII-1 和 VIII-2. 华东理工大学出版社. 1995

附录：应力系数曲线

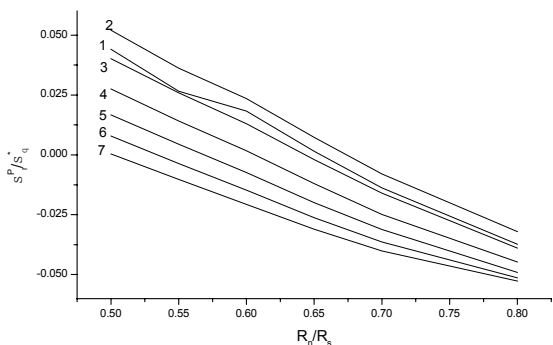


图1 内压作用下薄膜应力系数( $d/R_s=0.6$ )

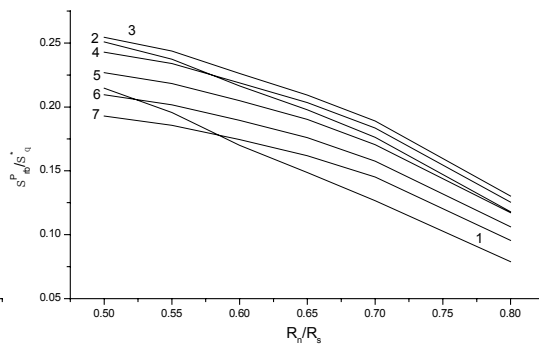


图2 内压作用下弯曲应力系数( $d/R_s=0.6$ )

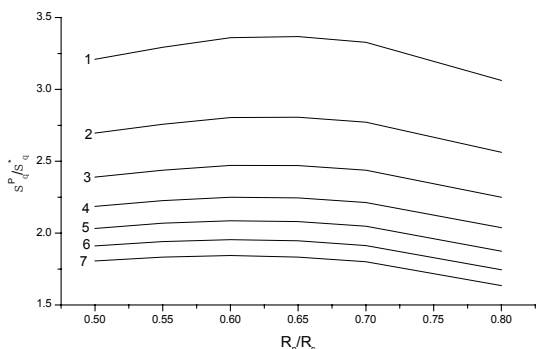


图3 内压作用下薄膜应力系数( $d/R_s=0.6$ )

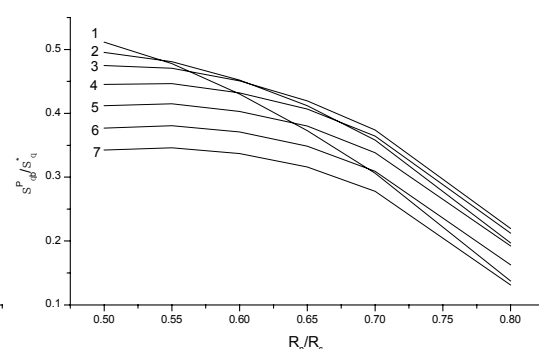


图4 内压作用下弯曲应力系数( $d/R_s=0.6$ )

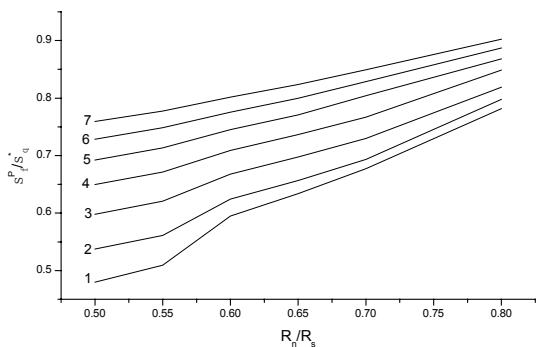


图5 内压作用下薄膜应力系数( $d/R_s=0.6$ )

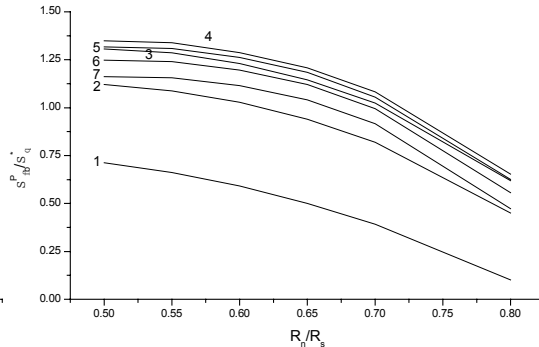


图6 内压作用下弯曲应力系数( $d/R_s=0.6$ )

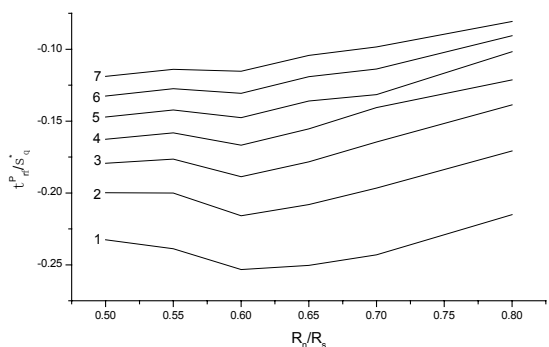


图7 内压作用下薄膜应力系数( $d/R_s=0.6$ )

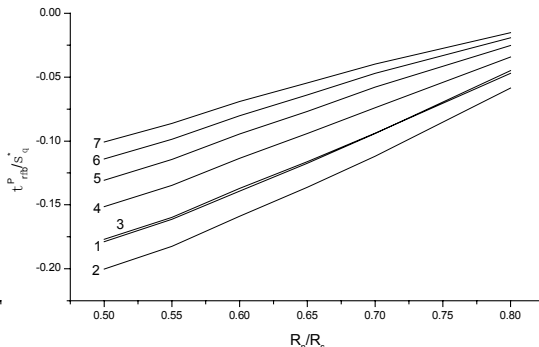


图8 内压作用下弯曲应力系数( $d/R_s=0.6$ )

注：1- $dn/d_s=0.4$  2- $dn/d_s=0.6$  3- $dn/d_s=0.8$  4- $dn/d_s=1.0$   
 5- $dn/d_s=1.2$  6- $dn/d_s=1.4$  7- $dn/d_s=1.6$

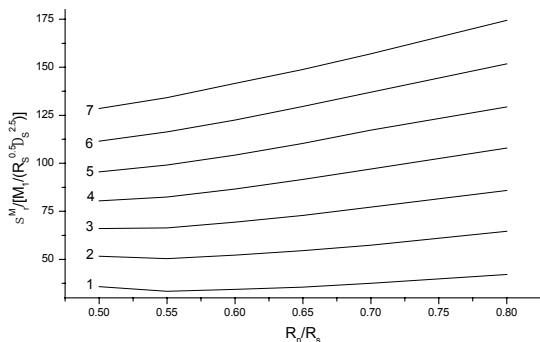


图9 弯矩 作用 下薄膜 应力系数 $d/R_s=0.6$

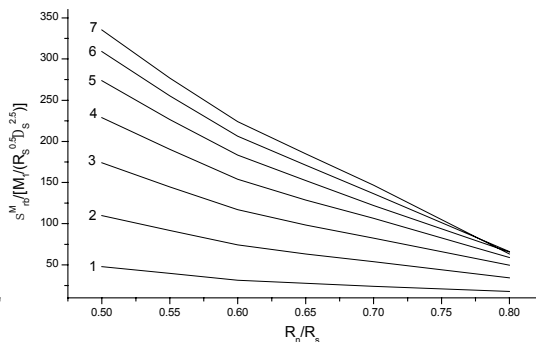


图10 弯矩 作用 下弯曲 应力系数 $d/R_s=0.6$

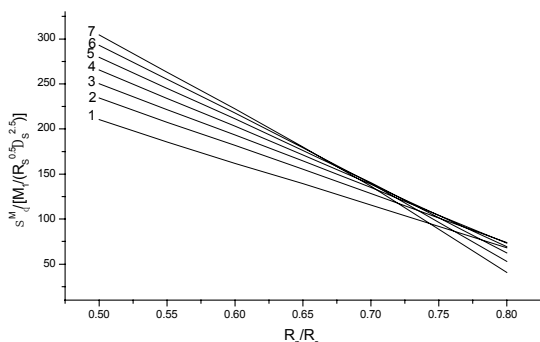


图11 弯矩 作用 下薄膜 应力系数 $d/R_s=0.6$

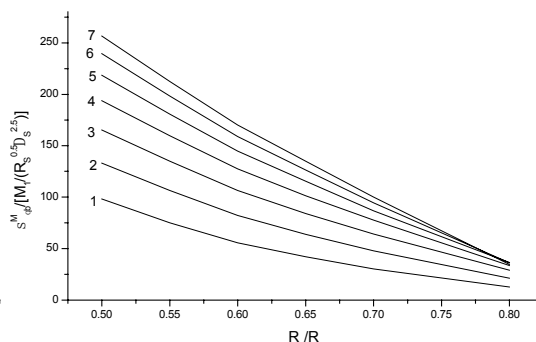


图12 弯矩 作用 下弯曲 应力系数 $d/R_s=0.6$

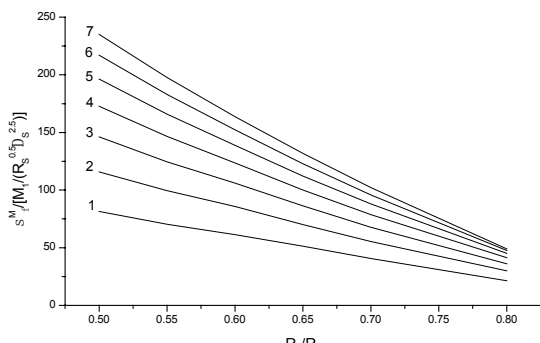


图13 弯矩 作用 下薄膜 应力系数 $d/R_s=0.6$

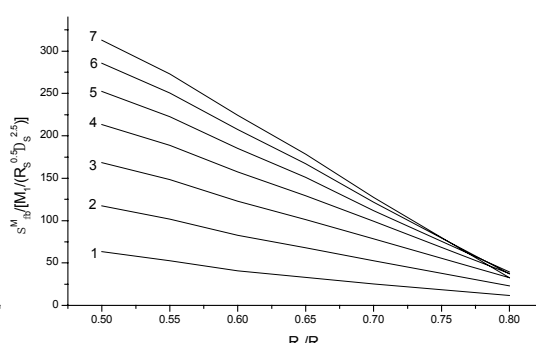


图14 弯矩 作用 下弯曲 应力系数 $d/R_s=0.6$

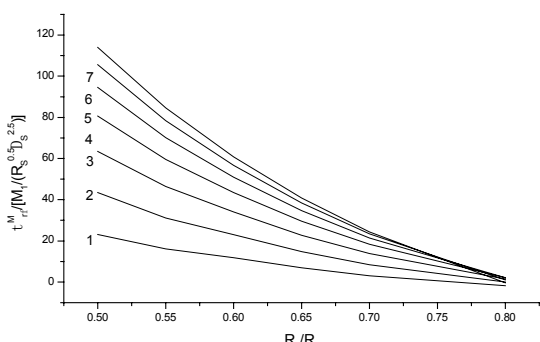


图15 弯矩 作用 下薄膜 应力系数 $d/R_s=0.6$

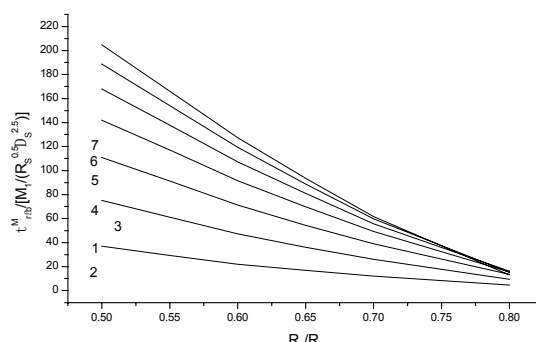


图16 弯矩 作用 下弯曲 应力系数 $d/R_s=0.6$

注：1- $dn/d_s=0.4$  2- $dn/d_s=0.6$  3- $dn/d_s=0.8$  4- $dn/d_s=1.0$   
5- $dn/d_s=1.2$  6- $dn/d_s=1.4$  7- $dn/d_s=1.6$

