

# 研究课题



活塞第一环岸和第二环岸局部断裂。活塞采用偏置燃烧室设计，无冷却油腔，内部采用喷嘴喷射冷却方法，断裂区域为偏置对侧方向的环岸，无明显摩擦磨损痕迹。



# 课题分析

- ▶ 活塞环岸断裂的直接原因主要有：
  - ▶ (1) 环槽底部应力集中；
  - ▶ (2) 区域温度过高，材料强度迅速下降；
  - ▶ (3) 活塞环粘着，环开口端上下振动引起环岸断裂；
  - ▶ (4) 活塞环与环槽配合间隙过大，活塞运动过程中活塞环和环槽平面剧烈碰撞引起环岸疲劳断裂；
  - ▶ (5) 铸造缺陷；
  - ▶ (6) 摩擦磨损严重；
  - ▶ (7) 装配不合理，活塞运动受阻引起环岸疲劳断裂。



# 活塞参数

## 活塞几何参数

| 参数        | 参数的值             |
|-----------|------------------|
| 缸径/冲程     | 90/90mm          |
| 最高燃烧压力    | 6MPa             |
| 额定工况      | 25.8kW/2200r/min |
| 活塞销孔直径    | 30mm             |
| 活塞销座外直径   | 42.5mm           |
| 活塞高度      | 80.5mm           |
| 销孔中心距顶部距离 | 46.25mm          |
| 燃烧室偏置距离   | 5.4/1mm          |

## 活塞材料参数

| 参数    | 参数的值                  |
|-------|-----------------------|
| 密度    | 2770kg/m <sup>3</sup> |
| 热膨胀系数 | 2.3e-5/ °C            |
| 杨氏模量  | 7.1e10Pa              |
| 泊松比   | 0.33                  |



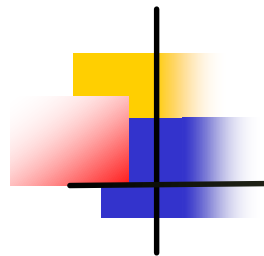
# 热边界条件

| 位置      | 对流换热系数/ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ | 环境温度/ $^\circ C$ |
|---------|--------------------------------|------------------|
| 燃烧室中心   | 370                            | 700              |
| 燃烧室左侧   | 520                            | 680              |
| 燃烧室左侧底部 | 570                            | 680              |
| 燃烧室左侧喉口 | 620                            | 680              |
| 燃烧室右侧   | 500                            | 700              |
| 燃烧室右侧底部 | 550                            | 700              |
| 燃烧室右侧喉口 | 600                            | 700              |
| 活塞顶部    | 400                            | 700              |
| 火力岸     | 350                            | 150              |
| 第一环上和下  | 2000                           | 150              |
| 第一环侧面   | 500                            | 150              |
| 第一环岸    | 300                            | 120              |
| 第二环上和下  | 1800                           | 120              |
| 第二环侧面   | 500                            | 120              |
| 第二环岸    | 300                            | 100              |



# 热边界条件

| 位置      | 对流换热系数/ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ | 环境温度/ $^\circ C$ |
|---------|--------------------------------|------------------|
| 第三环上和下  | 1500                           | 100              |
| 第三环侧面   | 500                            | 100              |
| 第三环岸    | 300                            | 80               |
| 活塞裙部及销孔 | 300                            | 80               |
| 活塞内腔上   | 500                            | 80               |
| 活塞内腔中   | 400                            | 80               |
| 活塞内腔下   | 300                            | 80               |
| 活塞底部    | 300                            | 80               |

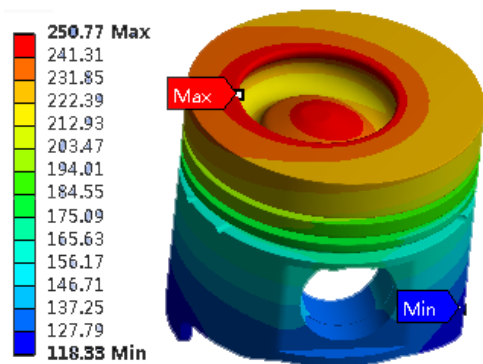


# 收敛性分析

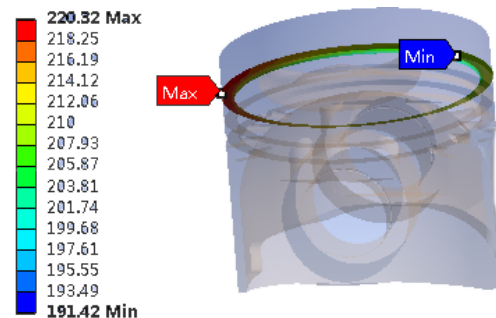


| Defeature Size<br>/Proximity Min Size/mm | 最高温度/℃ |
|------------------------------------------|--------|
| 3                                        | 250.60 |
| 1                                        | 250.75 |
| 0.5                                      | 250.77 |
| 0.1                                      | 250.77 |

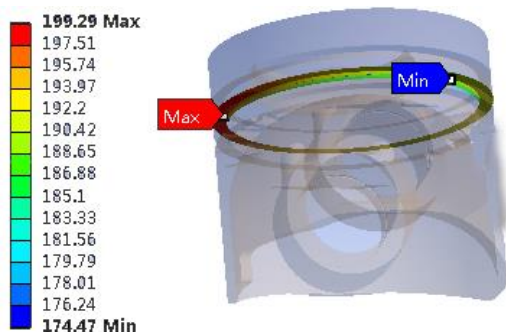
# 温度场分析



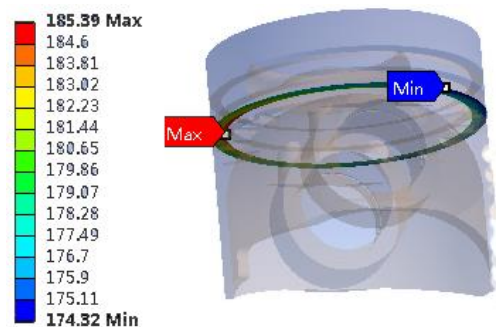
活塞温度



第一环槽温度



第二环槽温度



第二环岸底部温度

2018/12/5



# 温度场分析

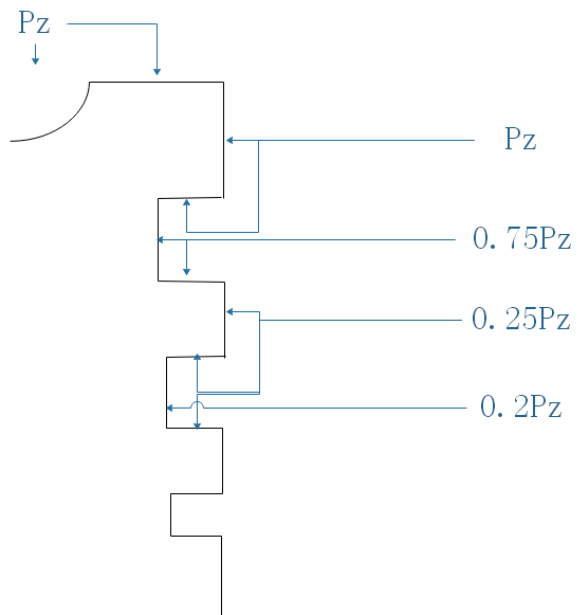
## 活塞温度

| 活塞部位 | 最高温度/℃ | 最低温度/℃ |
|------|--------|--------|
| 燃烧室  | 250.77 | 217.40 |
| 火力岸  | 236.05 | 208.98 |
| 第一环槽 | 220.32 | 191.42 |
| 第一环岸 | 199.08 | 191.14 |
| 第二环槽 | 199.29 | 174.47 |
| 第二环岸 | 181.38 | 174.32 |
| 第三环槽 | 191.88 | 156.92 |
| 活塞裙部 | 168.27 | 118.33 |
| 内腔   | 235.31 | 118.34 |



# 应力场分析

气体压力



气体压力分布

惯性力

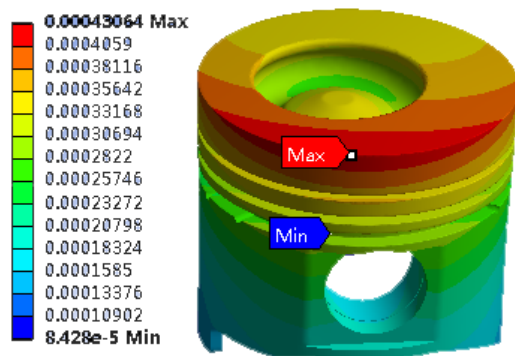
$$a = r\omega^2 (\cos \alpha + k \cos 2\alpha)$$

$$a = 3084.9 \text{ m/s}^2$$

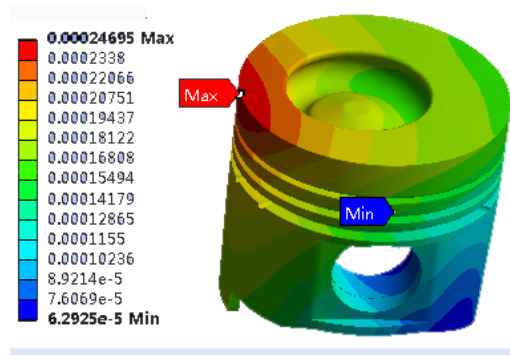
侧推力

$$N = 3728.04 \text{ N}$$

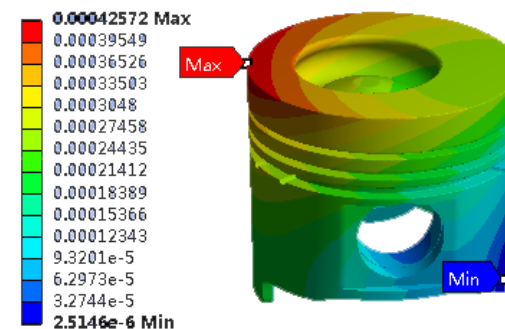
# 应力场分析



热变形  
Max=0.43mm

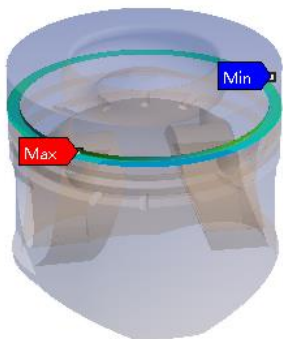
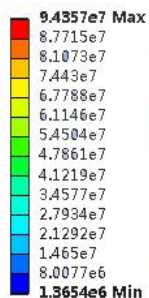


机械变形  
Max=0.25mm

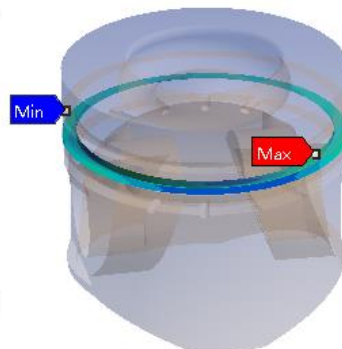
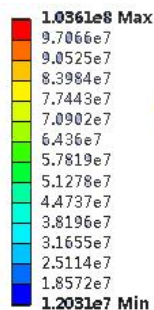


耦合变形  
Max=0.43mm

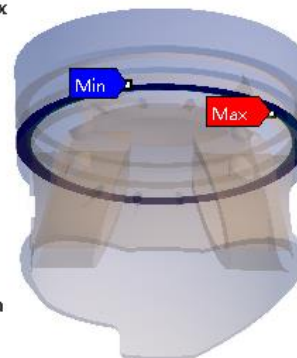
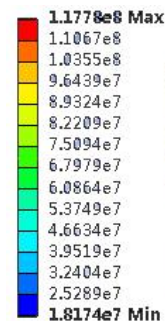
# 应力场分析



第一环槽应力



第二环槽应力



第二环岸底部应力

| 位置     | 最大热应力/MPa | 最大机械应力/MPa | 最大耦合应力/MPa |
|--------|-----------|------------|------------|
| 燃烧室    | 59.86     | 33.24      | 58.73      |
| 第一环槽   | 56.42     | 98.64      | 94.36      |
| 第二环槽   | 43.22     | 113.88     | 103.61     |
| 第二环岸底部 | 39.78     | 118.03     | 117.78     |



# 改进研究

增强环岸可靠性的措施主要有四个方向：减小应力负荷、减小应力集中、增加强度和减小热负荷。

减小应力负荷：燃烧室结构设计；

减小应力集中：增大环槽底部圆角；

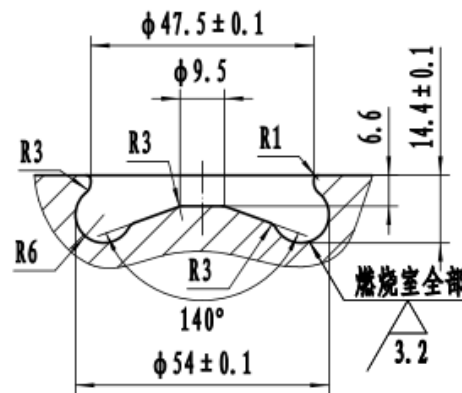
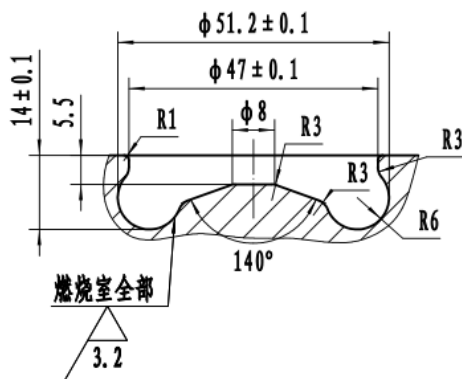
增加强度：增加环岸高度和增设镶圈；

减小热负荷：增设隔热槽、降低冷却油温和热障陶瓷涂层。



# 改进研究——燃烧室设计

|         | 扩缸前<br>/mm | 扩缸后<br>/mm | 放大比例  | 改动后/mm |
|---------|------------|------------|-------|--------|
| 缸径      | 85         | 90         | 1.059 | 90     |
| 燃烧室长度   | 51.2       | 54         | 1.054 | 54     |
| 燃烧室喉口长度 | 47         | 47.5       | 1.011 | 49.5   |
| 燃烧室中央长度 | 8          | 9.5        | 1.188 | 8.5    |
| 燃烧室中心深度 | 14         | 14.4       | 1.029 | 14.7   |



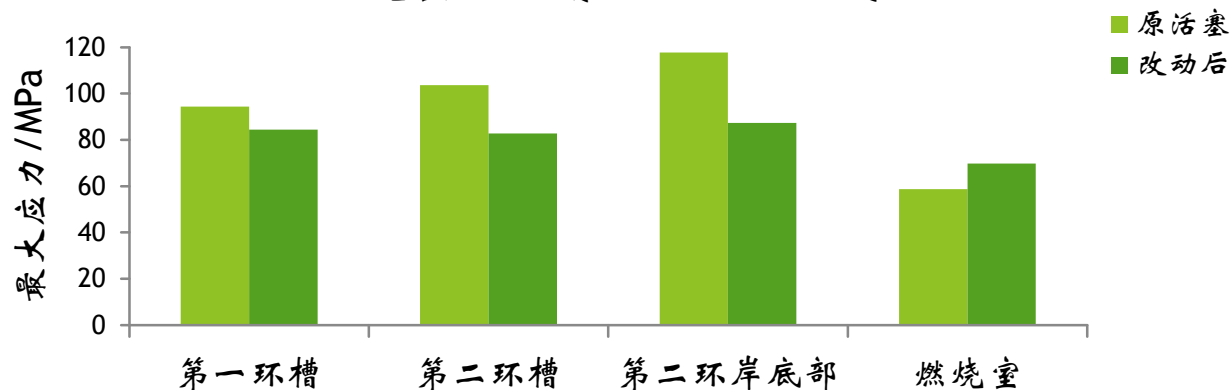
2018/12/5

13



# 改进研究——燃烧室设计

燃烧室改动前后耦合应力对比



|                | 原活塞    | 对比活塞  |
|----------------|--------|-------|
| 最大变形/mm        | 0.43   | 0.42  |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 94.36  | 84.42 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 103.61 | 82.77 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 117.78 | 87.39 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 58.73  | 69.79 |



# 改进研究——燃烧室设计

## 燃烧室改动热应力对比

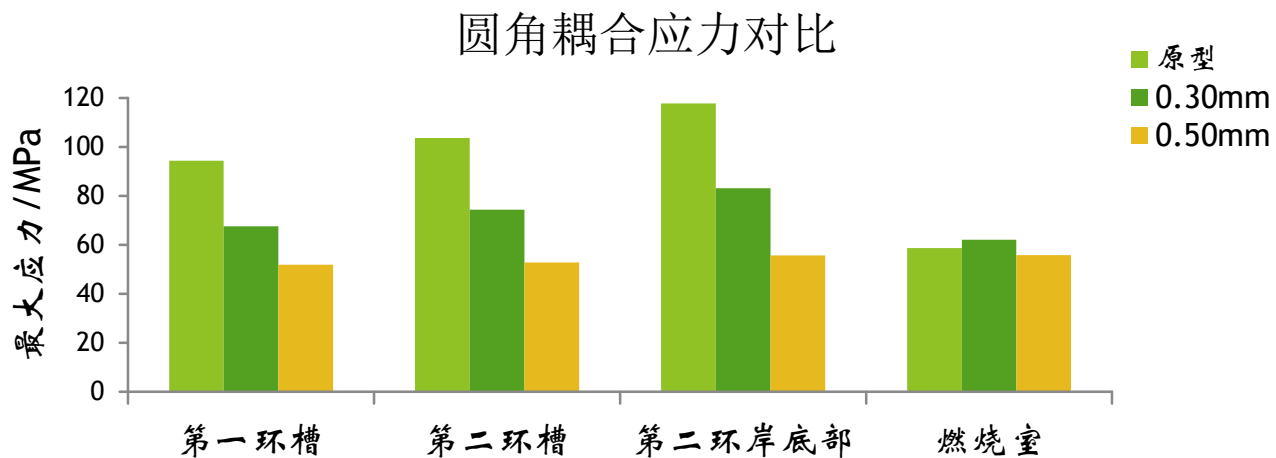
|                | 原活塞   | 对比活塞  |
|----------------|-------|-------|
| 最大变形/mm        | 0.43  | 0.42  |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 56.42 | 56.90 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 43.22 | 58.21 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 39.78 | 37.29 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 59.86 | 69.21 |

## 燃烧室改动机械应力对比

|                | 原活塞    | 对比活塞  |
|----------------|--------|-------|
| 最大变形/mm        | 0.25   | 0.25  |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 98.64  | 94.63 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 113.88 | 99.48 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 118.03 | 96.13 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 33.24  | 35.80 |



# 改进研究——环槽圆角



|                    | 原型<br>(0.10mm) | 0.30mm | 0.50mm |
|--------------------|----------------|--------|--------|
| 最大变形/mm            | 0.43           | 0.43   | 0.42   |
| 第一环槽最大应力/MPa       | 94.36          | 67.63  | 51.91  |
| 第二环槽最大应力/MPa       | 103.61         | 74.36  | 52.79  |
| 第二环岸底部最大应力<br>/MPa | 117.78         | 83.06  | 55.67  |
| 燃烧室最大应力/MPa        | 58.73          | 62.06  | 55.88  |



# 改进研究——环槽圆角

圆角热应力对比

|                | 原型<br>(0.10mm) | 0.30mm | 0.50mm |
|----------------|----------------|--------|--------|
| 最大变形/mm        | 0.43           | 0.43   | 0.42   |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 56.42          | 36.51  | 31.80  |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 43.22          | 32.22  | 29.13  |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 39.78          | 31.95  | 28.99  |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 59.86          | 58.53  | 66.15  |

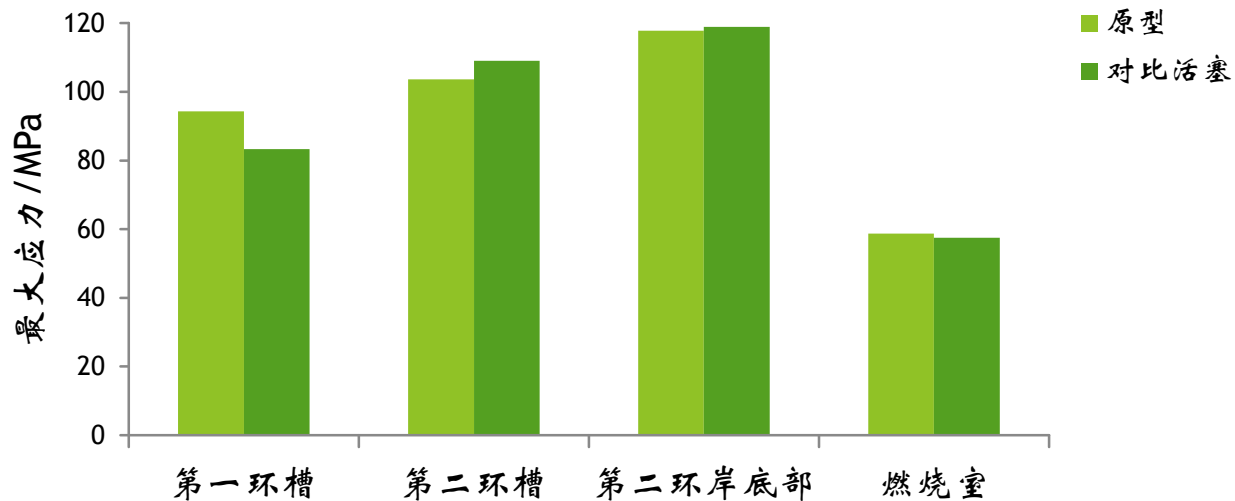
圆角机械应力对比

|                | 原型<br>(0.10mm) | 0.30 mm | 0.50 mm |
|----------------|----------------|---------|---------|
| 最大变形/mm        | 0.25           | 0.25    | 0.24    |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 98.64          | 69.95   | 56.03   |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 113.88         | 80.35   | 58.72   |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 118.03         | 81.29   | 53.86   |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 33.24          | 33.03   | 30.88   |



# 改进研究——环岸高度

环岸高度耦合应力对比



|                | 原活塞    | 对比活塞   |
|----------------|--------|--------|
| 最大变形/mm        | 0.43   | 0.42   |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 94.36  | 83.37  |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 103.61 | 109.01 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 117.78 | 118.97 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 58.73  | 57.54  |



# 改进研究——环岸高度

## 环岸高度温度对比

|              | 原活塞    | 对比活塞   |
|--------------|--------|--------|
| 最高温度/℃       | 250.77 | 246.28 |
| 第一环槽最高温度/℃   | 220.32 | 223.94 |
| 第二环槽最高温度/℃   | 199.29 | 202.10 |
| 第二环岸底部最高温度/℃ | 185.39 | 184.92 |
| 裙部最高温度/℃     | 168.27 | 166.73 |
| 内腔最高温度/℃     | 235.31 | 232.55 |

## 环岸高度热应力对比

|                | 原活塞   | 对比活塞  |
|----------------|-------|-------|
| 最大变形/mm        | 0.43  | 0.42  |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 56.42 | 41.26 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 43.22 | 57.87 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 39.78 | 42.30 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 59.86 | 62.36 |



# 改进研究——环岸高度

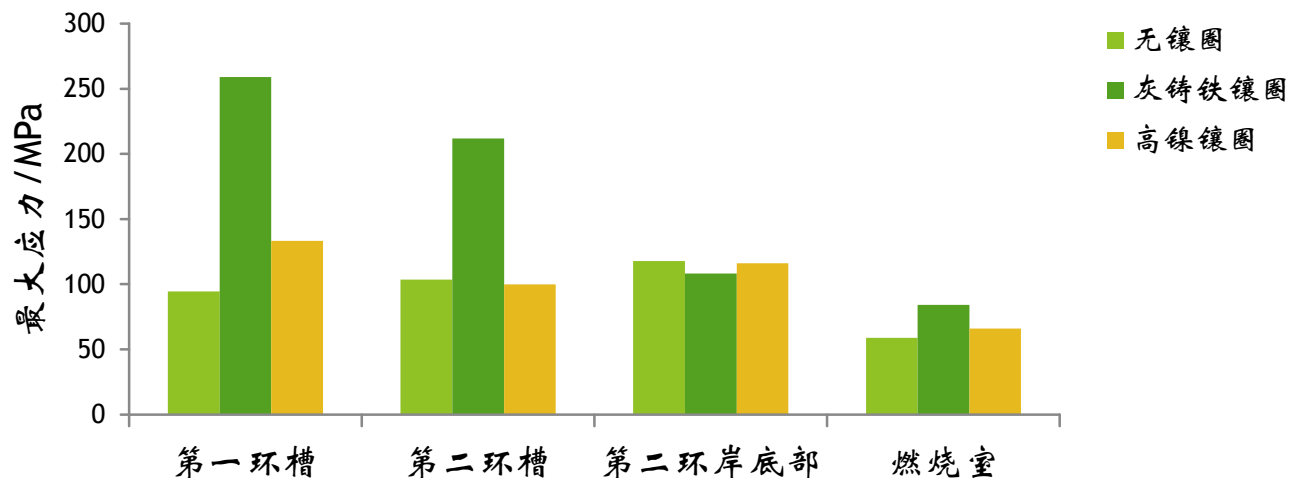
环岸高度机械应力对比

|                    | 原活塞    | 对比活塞   |
|--------------------|--------|--------|
| 最大变形/mm            | 0.25   | 0.25   |
| 第一环槽最大应力<br>/MPa   | 98.64  | 79.54  |
| 第二环槽最大应力<br>/MPa   | 113.88 | 117.12 |
| 第二环岸底部最大应<br>力/MPa | 118.03 | 126.27 |
| 燃烧室最大应力/MPa        | 33.24  | 31.22  |



# 改进研究——镶圈

镶圈耦合应力对比



|                | 原活塞    | 灰铸铁镶圈  | 高镍镶圈   |
|----------------|--------|--------|--------|
| 最大变形/mm        | 0.43   | 0.45   | 0.44   |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 94.36  | 259.01 | 133.31 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 103.61 | 211.81 | 99.88  |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 117.78 | 108.21 | 115.98 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 58.73  | 84.21  | 66.05  |



# 改进研究——镶圈

镶圈温度场对比

|              | 原活塞    | 灰铸铁镶圈  | 高镍镶圈   |
|--------------|--------|--------|--------|
| 最高温度/℃       | 250.77 | 262.46 | 257.92 |
| 第一环槽最高温度/℃   | 220.32 | 231.63 | 223.18 |
| 第二环槽最高温度/℃   | 199.29 | 204.12 | 195.77 |
| 第二环岸底部最高温度/℃ | 185.39 | 193.43 | 184.63 |
| 裙部最高温度/℃     | 168.27 | 176.92 | 167.98 |
| 内腔最高温度/℃     | 235.31 | 243.60 | 236.44 |

镶圈热应力场对比

|                | 原活塞   | 灰铸铁镶圈  | 高镍镶圈   |
|----------------|-------|--------|--------|
| 最大变形/mm        | 0.43  | 0.45   | 0.43   |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 56.42 | 267.05 | 136.03 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 43.22 | 231.99 | 99.54  |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 39.78 | 59.58  | 38.91  |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 59.86 | 88.33  | 69.40  |



# 改进研究——镶圈

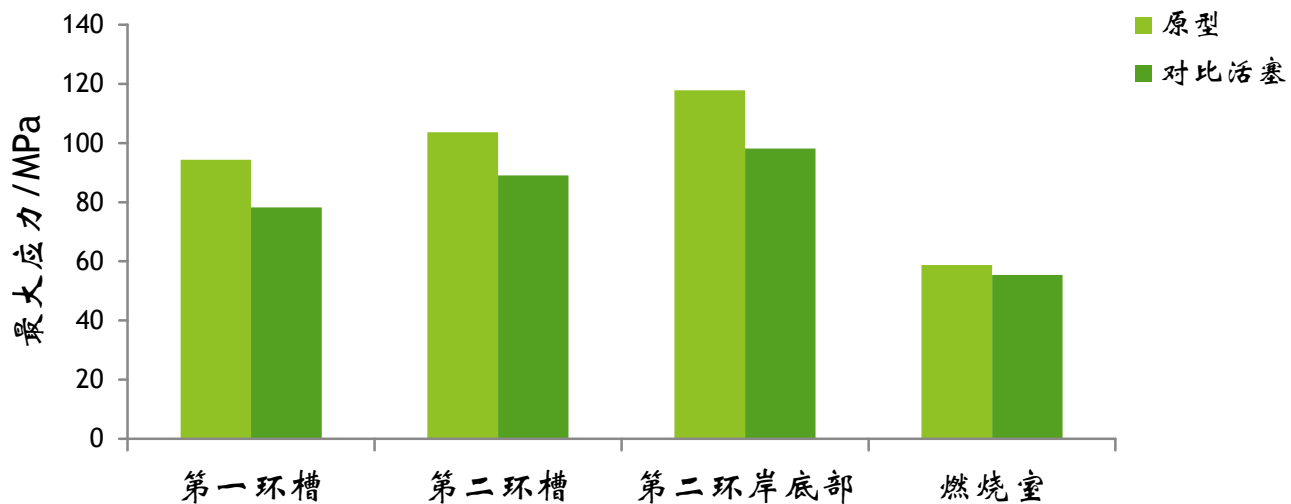
镶圈机械应力场对比

|                | 原活塞    | 灰铸铁镶圈  | 高镍镶圈   |
|----------------|--------|--------|--------|
| 最大变形/mm        | 0.25   | 0.25   | 0.25   |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 98.64  | 73.58  | 77.27  |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 113.88 | 112.67 | 114.03 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 118.03 | 119.57 | 119.72 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 33.24  | 35.11  | 35.17  |



# 改进研究——隔热槽

隔热槽耦合应力对比



|                | 原活塞    | 对比活塞  |
|----------------|--------|-------|
| 最大变形/mm        | 0.43   | 0.43  |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 94.36  | 78.26 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 103.61 | 89.00 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 117.78 | 98.18 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 58.73  | 55.36 |



# 改进研究——隔热槽

隔热槽温度对比

|              | 原活塞    | 对比活塞   |
|--------------|--------|--------|
| 最高温度/℃       | 250.77 | 253.18 |
| 第一环槽最高温度/℃   | 220.32 | 210.35 |
| 第二环槽最高温度/℃   | 199.29 | 195.73 |
| 第二环岸底部最高温度/℃ | 185.39 | 182.70 |
| 裙部最高温度/℃     | 168.27 | 166.18 |
| 内腔最高温度/℃     | 235.31 | 233.27 |

隔热槽热应力对比

|                | 原活塞   | 对比活塞  |
|----------------|-------|-------|
| 最大变形/mm        | 0.43  | 0.37  |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 56.42 | 30.24 |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 43.22 | 31.57 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 39.78 | 32.60 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 59.86 | 55.69 |



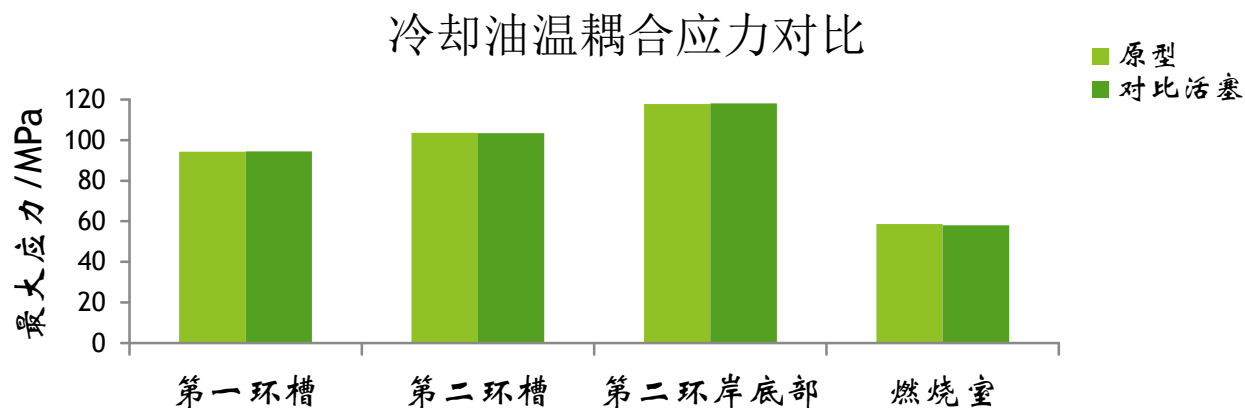
# 改进研究——隔热槽

隔热槽机械应力对比

|                | 原活塞    | 对比活塞   |
|----------------|--------|--------|
| 最大变形/mm        | 0.25   | 0.25   |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 98.64  | 75.15  |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 113.88 | 101.34 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 118.03 | 105.57 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 33.24  | 30.69  |



# 改进研究——冷却油温



|                | 原活塞    | 对比活塞   |
|----------------|--------|--------|
| 最大变形/mm        | 0.43   | 0.42   |
| 第一环槽最大应力/MPa   | 94.36  | 94.41  |
| 第二环槽最大应力/MPa   | 103.61 | 103.46 |
| 第二环岸底部最大应力/MPa | 117.78 | 118.07 |
| 燃烧室最大应力/MPa    | 58.73  | 57.97  |



# 改进研究——冷却油温

## 冷却油温温度场对比

|              | 原活塞    | 对比活塞   |
|--------------|--------|--------|
| 最高温度/℃       | 250.77 | 246.36 |
| 第一环槽最高温度/℃   | 220.32 | 218.91 |
| 第二环槽最高温度/℃   | 199.29 | 197.77 |
| 第二环岸底部最高温度/℃ | 185.39 | 183.66 |
| 裙部最高温度/℃     | 168.27 | 166.36 |
| 内腔最高温度/℃     | 235.31 | 233.06 |



# 改进研究——热障陶瓷涂层

## 涂层物性参数

|          | 导热系数<br>$/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | 热膨胀系<br>数/ $10^{-6} \text{K}^{-1}$ | 弹性模量<br>$/\text{MPa}$ | 泊松比   |
|----------|------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------|
| Mg-PSZ陶瓷 | 0.80                                     | 8.000                              | 46000                 | 0.200 |
| 过渡层一层    | 3.54                                     | 9.781                              | 52042                 | 0.219 |
| 过渡层儿层    | 10.45                                    | 11.102                             | 56526                 | 0.233 |
| 过渡层三层    | 22.32                                    | 12.570                             | 61504                 | 0.249 |
| 过渡层四层    | 42.54                                    | 14.328                             | 67470                 | 0.268 |

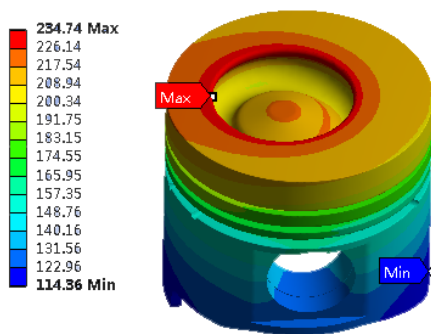


# 改进研究——热障陶瓷涂层

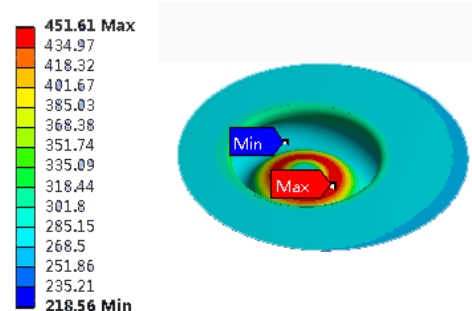
## 收敛性分析

| 网格大小<br>/mm | 活塞最高<br>温度/℃ | 基体最高<br>温度/℃ | 第一环槽<br>最高温度<br>/℃ | 第二环槽<br>最高温度<br>/℃ | 第二环岸<br>底部最高<br>温度/℃ |
|-------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 2           | 384.06       | 237.93       | 206.89             | 187.71             | 175.05               |
| 1           | 434.81       | 234.96       | 205.71             | 186.47             | 173.75               |
| 0.8         | 451.61       | 234.74       | 205.42             | 186.17             | 173.46               |

# 改进研究——热障陶瓷涂层



基体温度



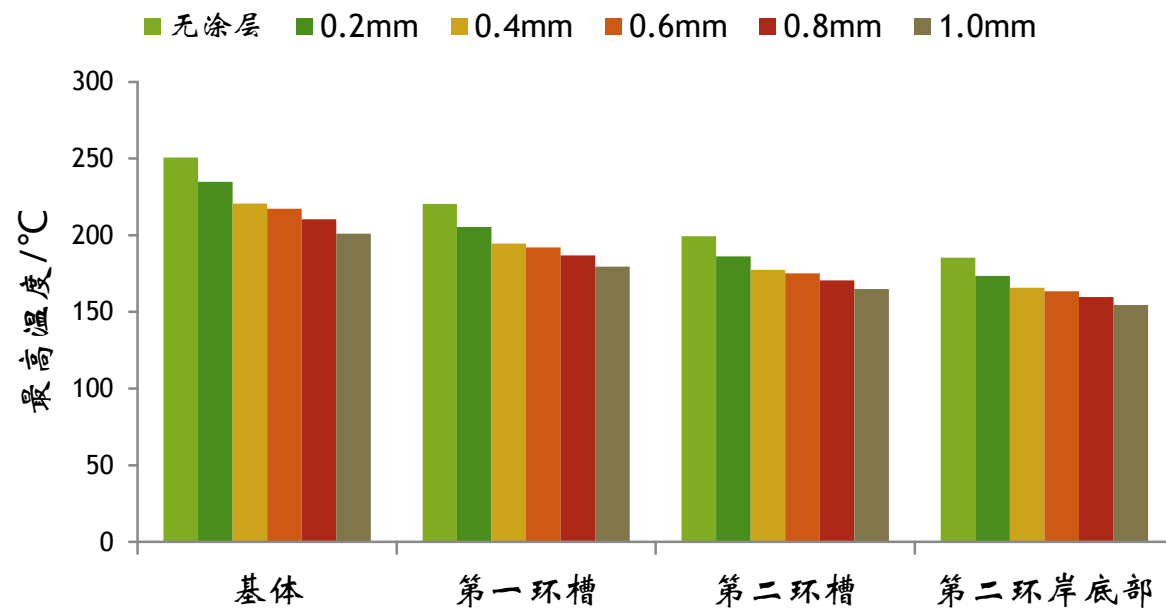
涂层温度

|              | 原活塞    | 对比活塞铝合金基体 |
|--------------|--------|-----------|
| 最高温度/℃       | 250.77 | 234.74    |
| 第一环槽最高温度/℃   | 220.32 | 205.42    |
| 第二环槽最高温度/℃   | 199.29 | 186.17    |
| 第二环岸底部最高温度/℃ | 185.39 | 173.46    |
| 裙部最高温度/℃     | 168.27 | 158.55    |
| 内腔最高温度/℃     | 235.31 | 211.65    |



# 改进研究——热障陶瓷涂层

不同涂层厚度温度对比





# 改进研究——热障陶瓷涂层

|                  | 无涂层    | 0.2mm  | 0.4mm  | 0.6mm  | 0.8mm  | 1.0mm  |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 最高温度/℃           | 250.77 | 451.61 | 460.47 | 471.76 | 481.16 | 489.14 |
| 基体最高温度<br>/℃     | 250.77 | 234.74 | 220.63 | 217.38 | 210.47 | 200.97 |
| 第一环槽最高温<br>度/℃   | 220.32 | 205.42 | 194.55 | 192.03 | 186.74 | 179.43 |
| 第二环槽最高温<br>度/℃   | 199.29 | 186.17 | 177.42 | 175.04 | 170.65 | 164.82 |
| 第二环岸底部最<br>高温度/℃ | 185.39 | 173.46 | 165.75 | 163.54 | 159.64 | 154.52 |
| 裙部最高温度<br>/℃     | 168.27 | 158.55 | 151.99 | 150.32 | 147.07 | 142.72 |
| 内腔最高温度<br>/℃     | 235.31 | 211.65 | 200.62 | 196.48 | 190.47 | 183.12 |



# 结论

通过本文研究及参考类似文献，本文提出的结构改进措施为：一方面通过设计改善应力分布，例如燃烧室尺寸设计等，另一方面通过增大环槽圆角减小应力集中和活塞顶部增加热障涂层降低温度，增加可靠性。