

# H13钢分流挤压模具模桥断裂分析



案例制作：林高用 教授

中南大学材料科学与工程学院

# 内容提纲

---

- ◆ 案例来源与背景
- ◆ H13钢分流模的受力分析
- ◆ 应力集中基本理论
- ◆ 总结与思考

# ◆ 1、案例来源与背景

- **案例来源：** 本案例来源于江苏省某模具公司
- **案例背景：**

分流模是生产空心、半空心型材以及大悬臂型材的核心，且用分流模挤压的型材因为变形量大而具有更好的综合力学性能。目前国内分流模普遍采用**H13钢**。该钢种在使用前经过适当的淬火+回火等热处理，可获得优良的综合性能，如良好的热强性、红硬性、较高的韧性、抗疲劳性和抗热振性，工作温度可达600℃。但是分流模工作条件极其恶劣，模具极易因磨损和疲劳而失效，从而降低模具使用寿命。如果将其使用寿命提高一倍，则产品成本降低约20%。

**模具寿命**是评价模具的设计与制造质量、挤压方法经济可行性的决定性因素，也是实现挤压生产高产、优质、低能耗的最重要保证。因此分流模的早期失效问题日益受到关注。

# ◆ 1、案例来源与背景

---

## ➤ 案例背景：

针对H13钢分流模模桥**疲劳**断裂现象，在有限元方法的基础上对模具失效和寿命问题进行广泛而深入的探讨。相比于基于试验实验的传统方法，与有限元**模拟**计算相结合的疲劳分析手段能够提供模具表面的应力-应变、温度的分布，可在设计阶段判断模具疲劳寿命的薄弱位置，通过修改模具设计或者挤压工艺可以准确的**预测**模具疲劳寿命，以及有效地降低模具的疲劳失效率，因而能**缩短**模具开发周期，降低开发成本。

## ◆ 2、H13钢分流模的受力分析

### 2.1 分流焊合挤压过程的数值模拟

本案例利用Deform3D有限元软件对一种6063铝合金方管的分流焊合挤压过程进行了数值模拟。

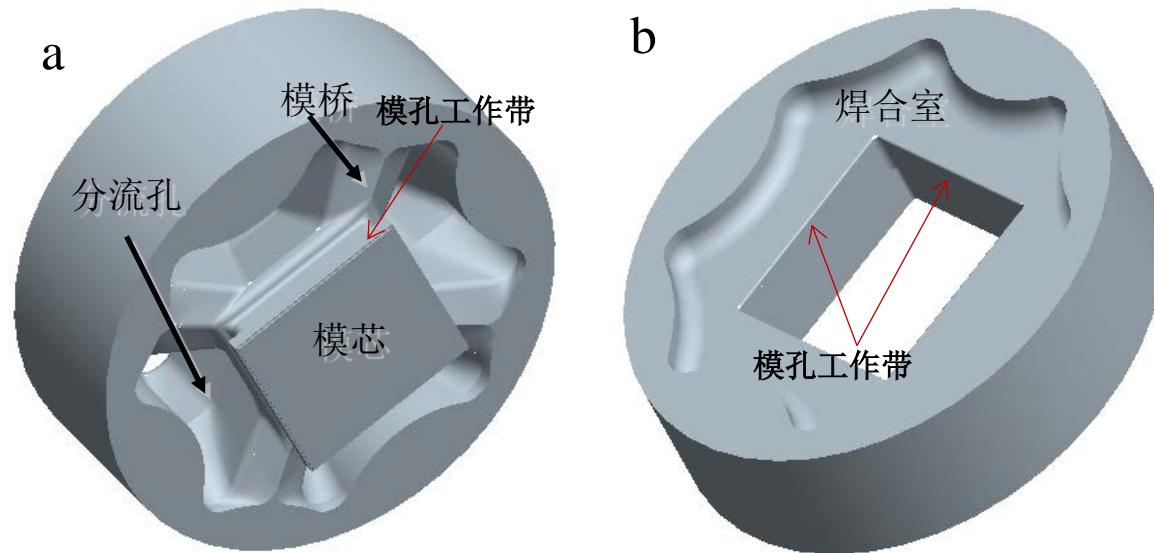


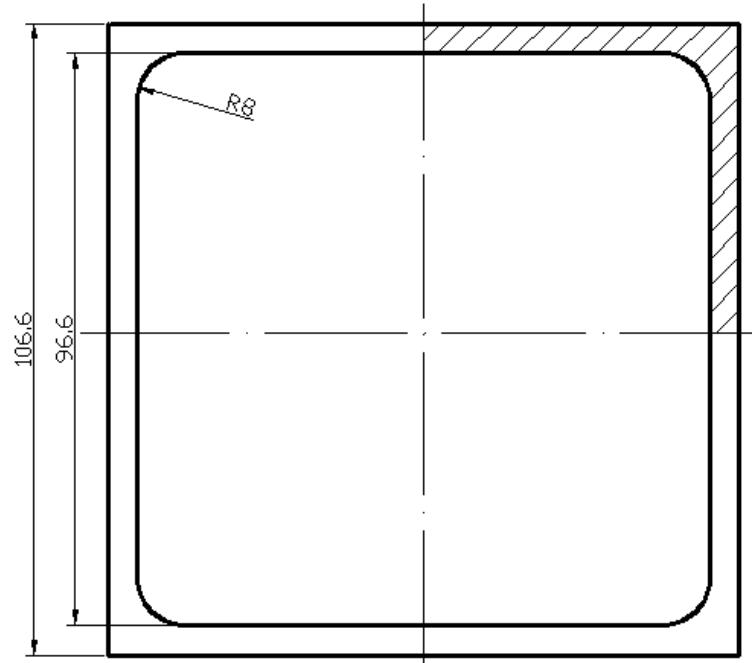
图1 方管型材分流模结构示意图

(a) 上模; (b) 下模

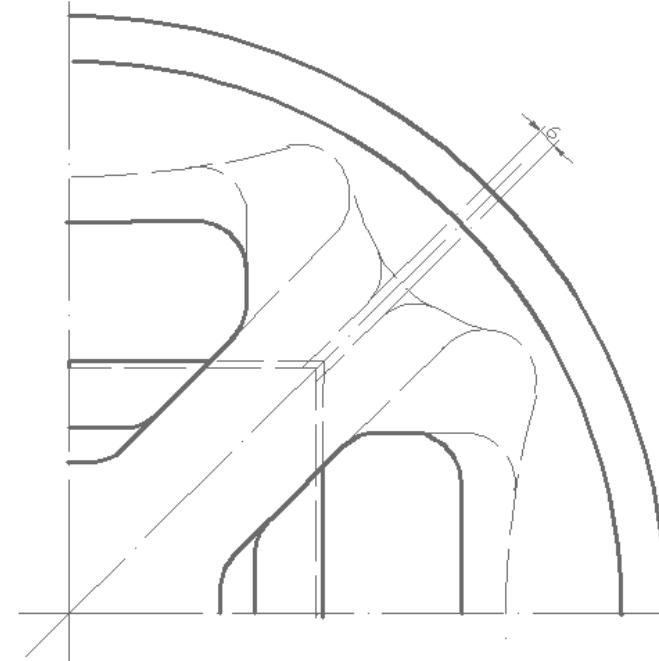
## ◆ 2、H13钢分流模的受力分析

表1 数值模拟初始条件

模具预热温度/℃	疲劳预热温度/℃	环境温度/℃	剪切摩擦因子	库伦摩擦系数	挤压速度(mm/s)	挤压比
450	480	20	0.8	0.5	10	19.2



(a) 型材横截面(模拟取阴影部分)



(b) 上模俯视图(1/4)

图2 模具和型材几何模型

## ◆ 2、H13钢分流模的受力分析

模型均采用四面体网格，并设置热交换。为得到特殊部分的精确结果，在模桥和模口周围对锭坯进行了网格局部细化（图3），最小网格尺寸1.2mm（约等于型材最小壁厚的1/3），因此步长设置每步0.4mm，总网格数为25332个。

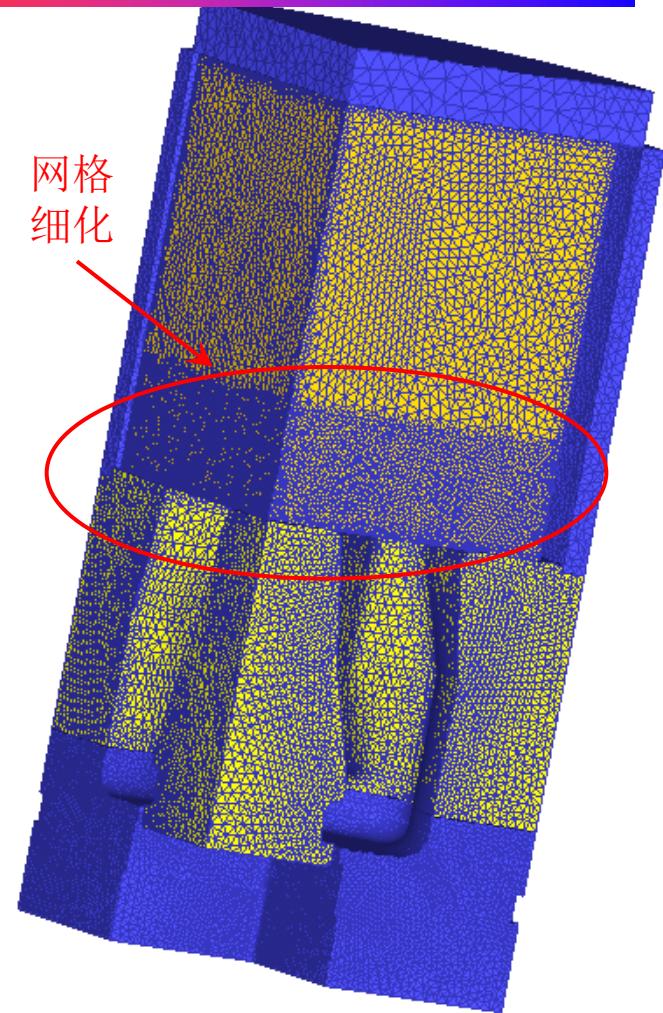


图3 模具和坯料的有限元模型

## 结果分析

挤压实验工艺参数来自数值模拟计算的初始条件。实验在800T挤压机上完成，在挤压机控制台上实时追踪挤压力的变化，总共试挤压3根铸锭，取后2根实验结果的平均值。

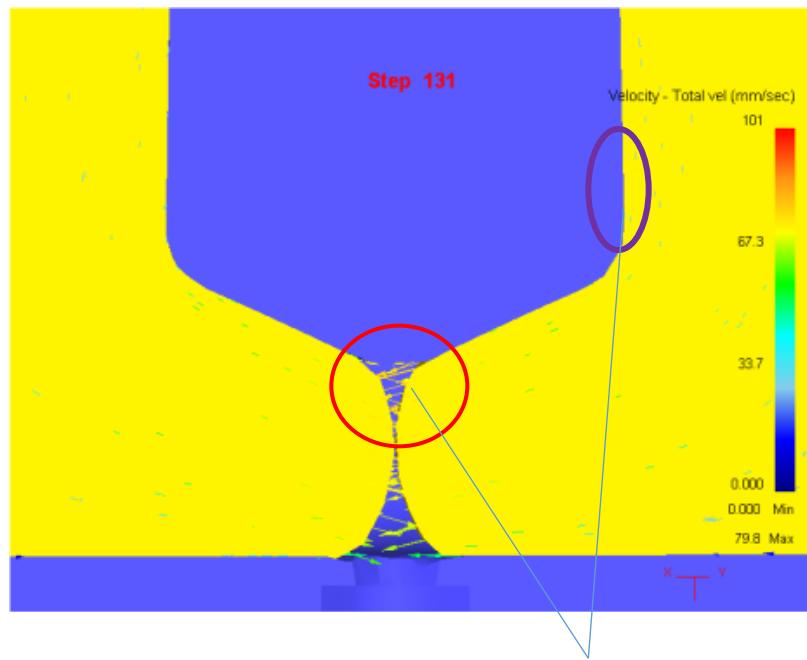


图4 挤压实验结果

## ◆ 2、H13钢分流模的受力分析

### 2.3 模具受力分析

在上述有限元分析的基础上对分流模进行受力分析。模具网格划分如图5, 将挤压载荷谱导入, 经再次有限元分析得到分流模上模的应力-应变分布如图6所示。

H13钢本构方程:

$$\begin{cases} \sigma_e = E(T)\varepsilon, (\varepsilon \leq t\%) \\ \sigma_p = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A(\varepsilon)} \right)^{\frac{1}{n(\varepsilon)}} + \left[ \left( \frac{Z}{A(\varepsilon)} \right)^{\frac{2}{n(\varepsilon)}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, (\varepsilon > t\%) \end{cases} \text{ MPa}$$

$$E(T) = 438.57 - 1.41T + 2.61 \times 10^{-3}T^2 - 1.59 \times 10^{-6}T^3 \quad \text{MPa}$$

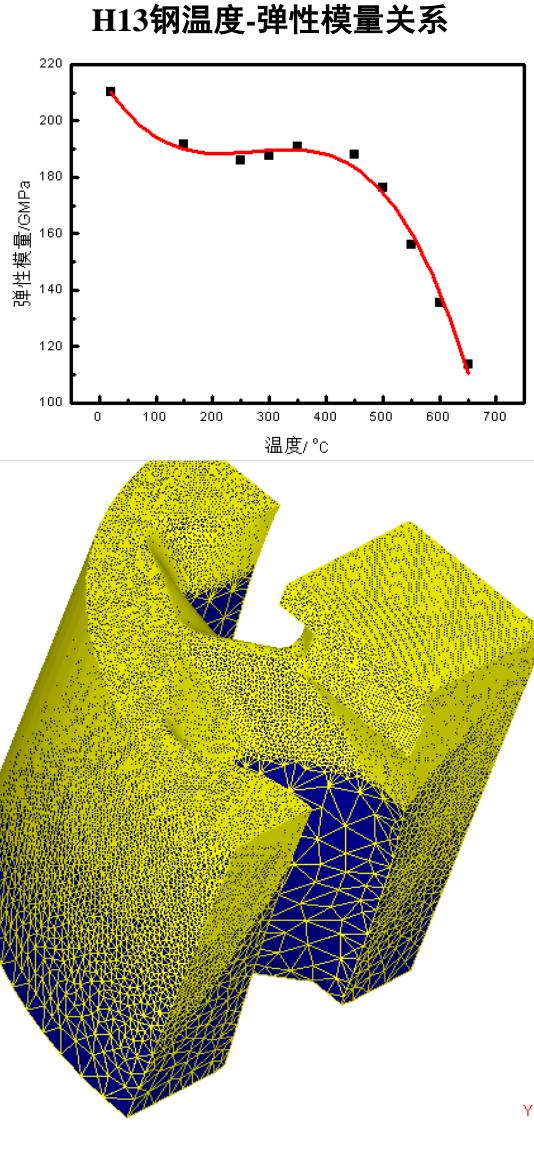


图5 上模有限元模型

# H13钢真应力-应变曲线及本构方程的建立

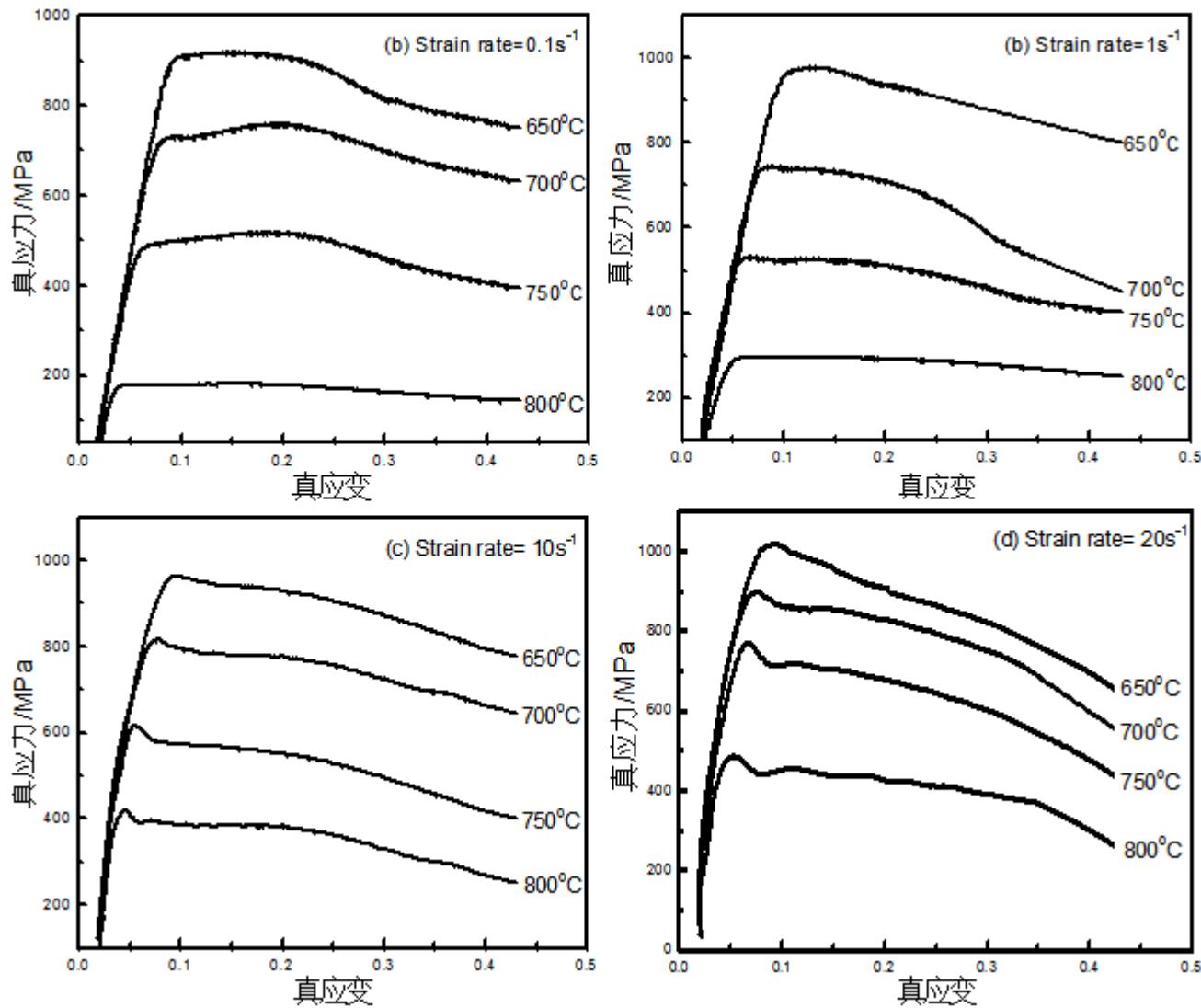
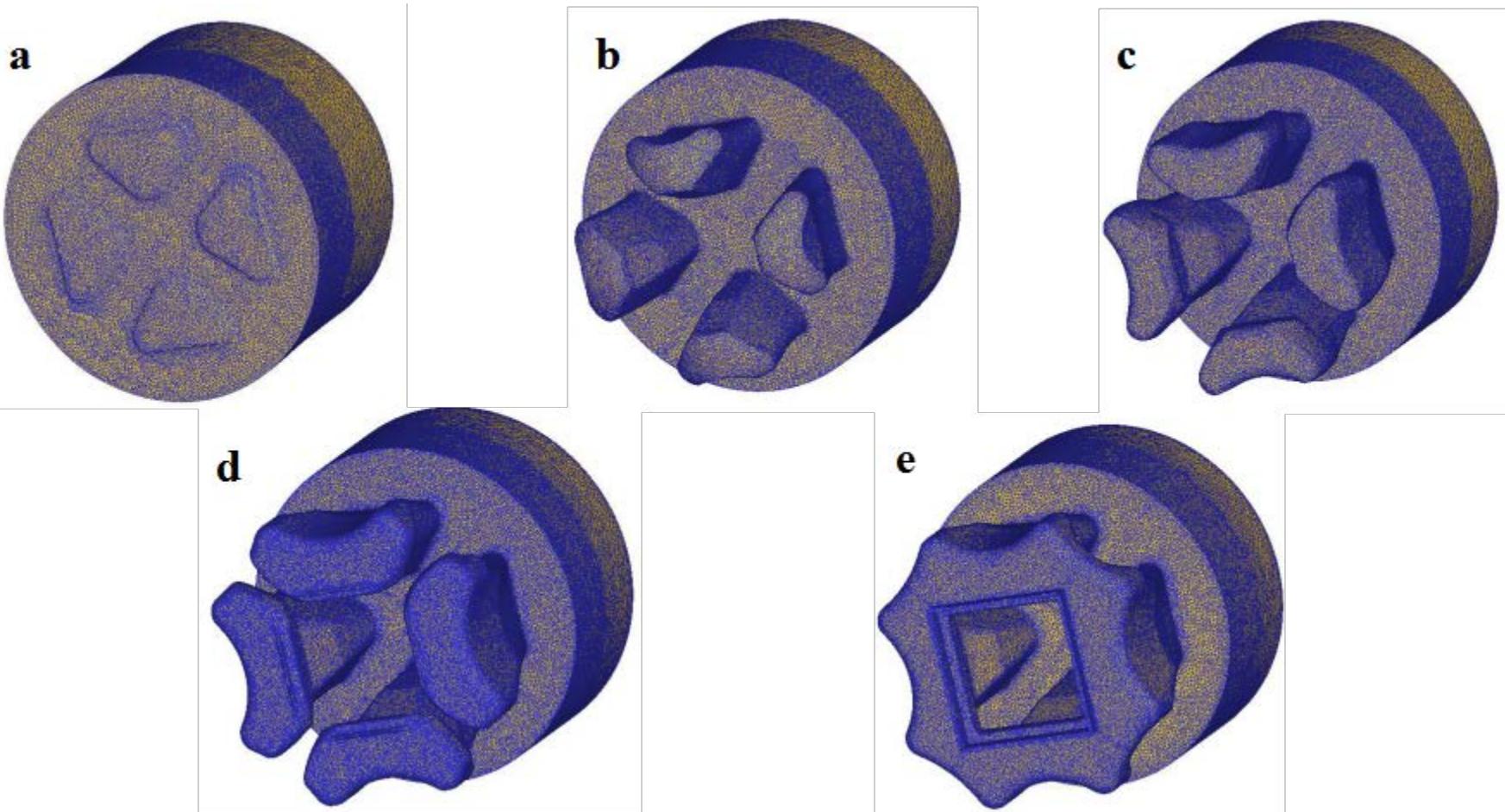
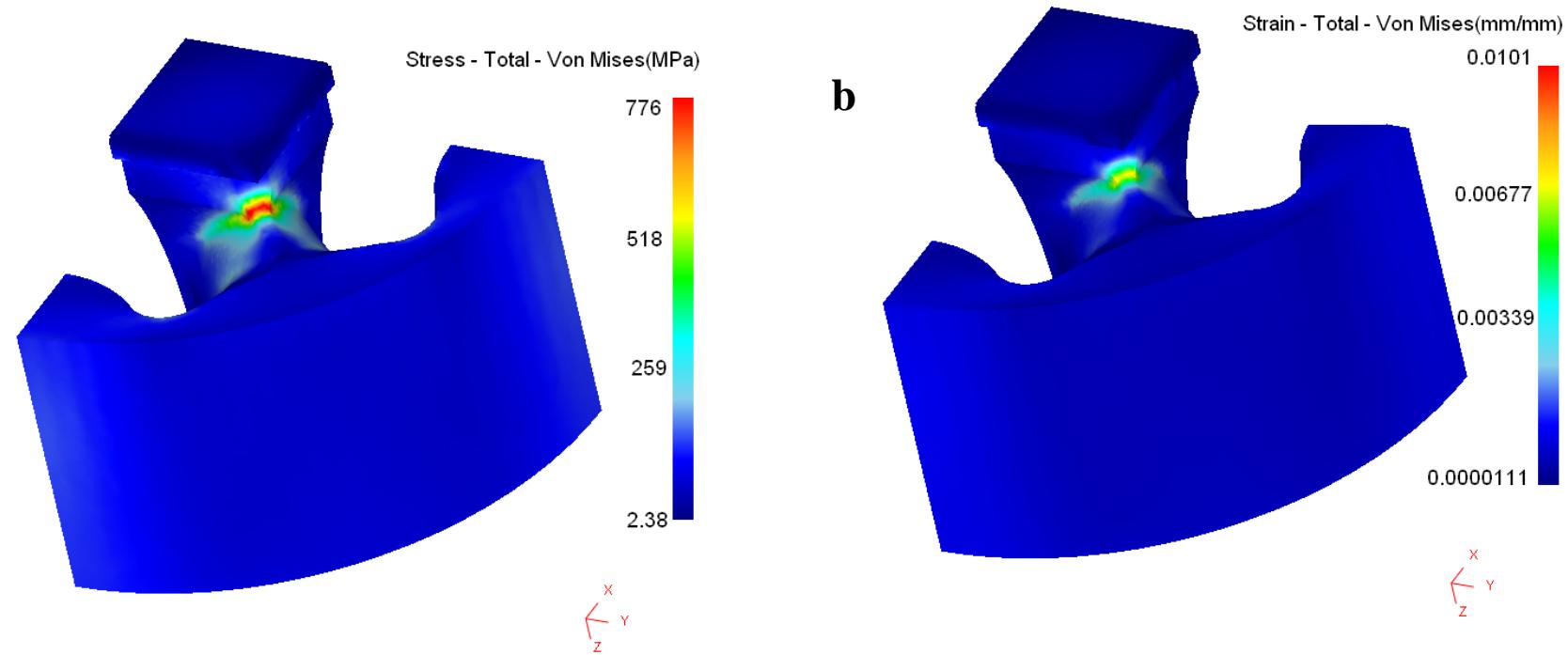


图6 分流模上模的应力-应变分布

➤ 纵向焊缝的形成



a 镊粗; b 分流; c 填充分流孔间隙; d 焊合; e 稳态挤压



上模应力应变分布云图

(a) Von Mises等效应力; (b) Von Mises等效应变

除模桥与模芯的结合部位外,分流模的平均等效应力在 200 至 250 MPa 之间,最大应力位于模桥根部,其中最高等效应力已经达到了 776 MPa,是平均应力的 3 倍左右[见图 (a)],这就是典型的**应力集中**。

模桥根部的等效应力远远超过模具材料在 500°C 下的疲劳强度 508 MPa;最大应变同样位于模桥根部, 达到了 0.0101[见图 (b)]。

模具受力分析表明：模桥根部存在严重的**应力集中**现象，导致最大应力和应变都位于模桥根部（见图6）。挤压是个反复进行的高温加载过程，在交变外载荷作用下，多次热应力、应变的循环极易导致应力集中部位的损伤积累，进而引起模桥根部的**低周疲劳失效**。

图7所示为典型的模桥断裂实例，验证了上述模具受力分析的正确性。

目前，我国挤压行业的普遍现象就是如此，大部分分流挤压模具，尤其是小型分流模，都是以**模桥根部开裂**为主要失效方式。

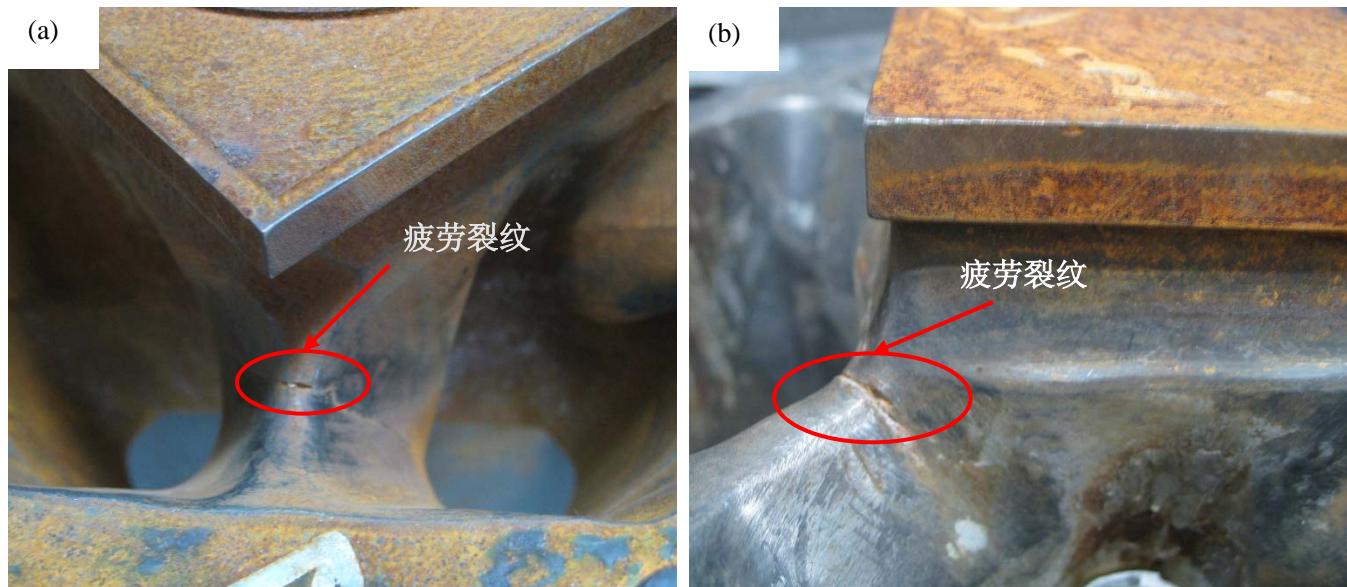


图7 疲劳断裂

# ◆ 3、应力集中基本理论

## 3.1 应力集中与裂桥现象

对于分流组合模来说，分流桥和模芯结合部位为结构**形状激变处**，如图8所示。

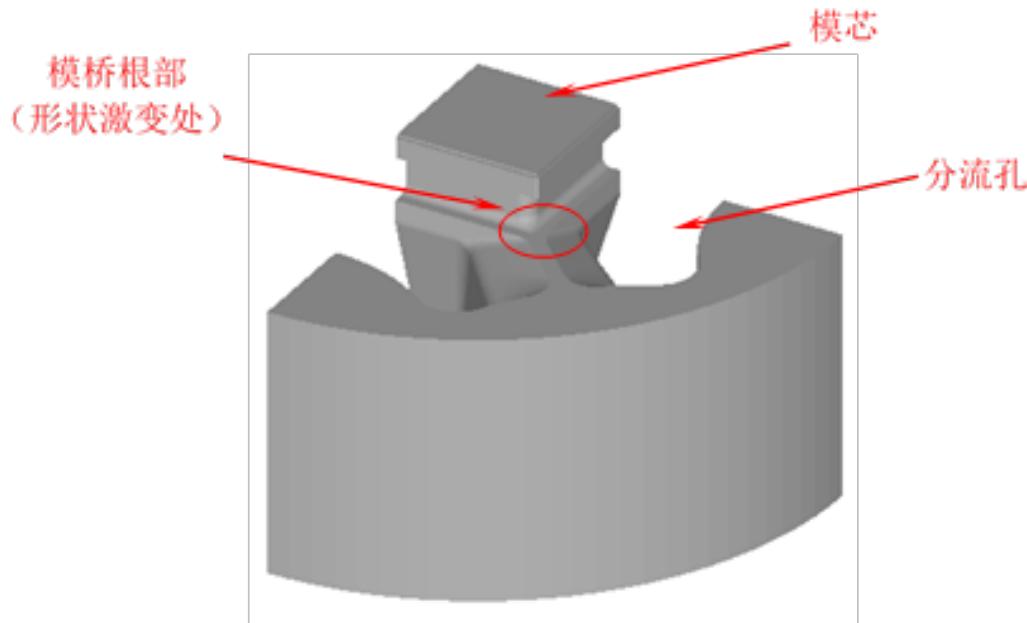


图8 分流组合模上模示意图 (1/4)

# ◆ 3、应力集中基本理论

## 3.2 应力集中系数和基准应力

引入“应力集中系数”一词，该系数通常用 $\eta$ 表示，由最大应力或者**峰值应力** $\sigma_m$ 对基准应力 $\sigma_0$ 之比表示，即 $\eta=\sigma_m/\sigma_0$ 。对于给定形状和载荷的情况，峰值应力是一定的，但基准应力的确定存在变数，不同的基准应力对应不同的应力集中系数。基准应力的选取大体上分为如下两种：

- (1) 假定没有圆孔、凹口和外形激变等应力集中因素存在，取基体可能产生的应力为基准应力，即不考虑截面的减小；
- (2) 考虑应力集中因素引起的基体截面减小，取在该截面上应力的平均值。



## ◆ 3、应力集中基本理论

### 3.3 带矩形凸肩的带板受弯曲载荷时的应力分布状态

在一侧有矩形凸肩的带板的弯曲，如图9所示，凸肩根部有曲率半径为R的圆角。对于此截面外形的弯曲模型，日本学者西田正孝通过系统的光弹性试验得出了经验值。若以窄带板（或细圆棒）部分产生的均布应力 $\sigma_0$ 或者最大边界应力 $\tau_0$ 为基准应力，则最大应力 $\sigma_A$ 或者 $\tau_A$ 通常产生在从圆弧和直线的接点E略向圆弧靠近的点A，如图10所示。

假设 $\sigma_A/\sigma_0$ ,  $\tau_A/\tau_0$ 为应力集中系数 $\eta$ ， $\eta$ 通常取决于 $A/B$ 、 $H/B$ 、 $R/B$ 三个形状因子， $R/B$ 越小， $H/B$ 越大，则 $\eta$ 值越高。但是对于 $H/B$ 来说，当其他形状的因子给定时， $H/B$ 即使增加到某一极限值以上时， $\eta$ 也保持一定。这是因为比长度A高的多的凸缘上部完全处于闲置状态，所以不难想象它在应力上不起作用，产生与 $H/B$ 有关的应力饱和； $\eta$ 随着 $A/B$ 的增大而增大，若 $A$ 大于 $H$ ，则 $\eta$ 保持在定值。



## ◆ 3、应力集中基本理论

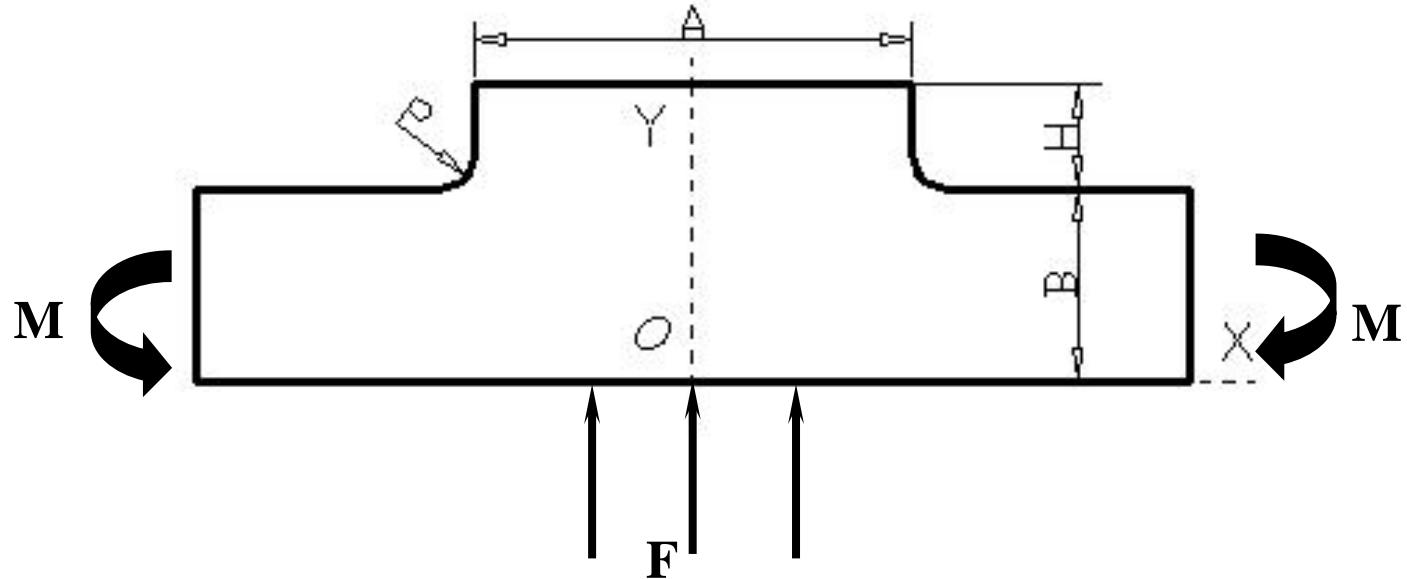


图9 带凸肩带板的弯曲

## ◆ 3、应力集中基本理论

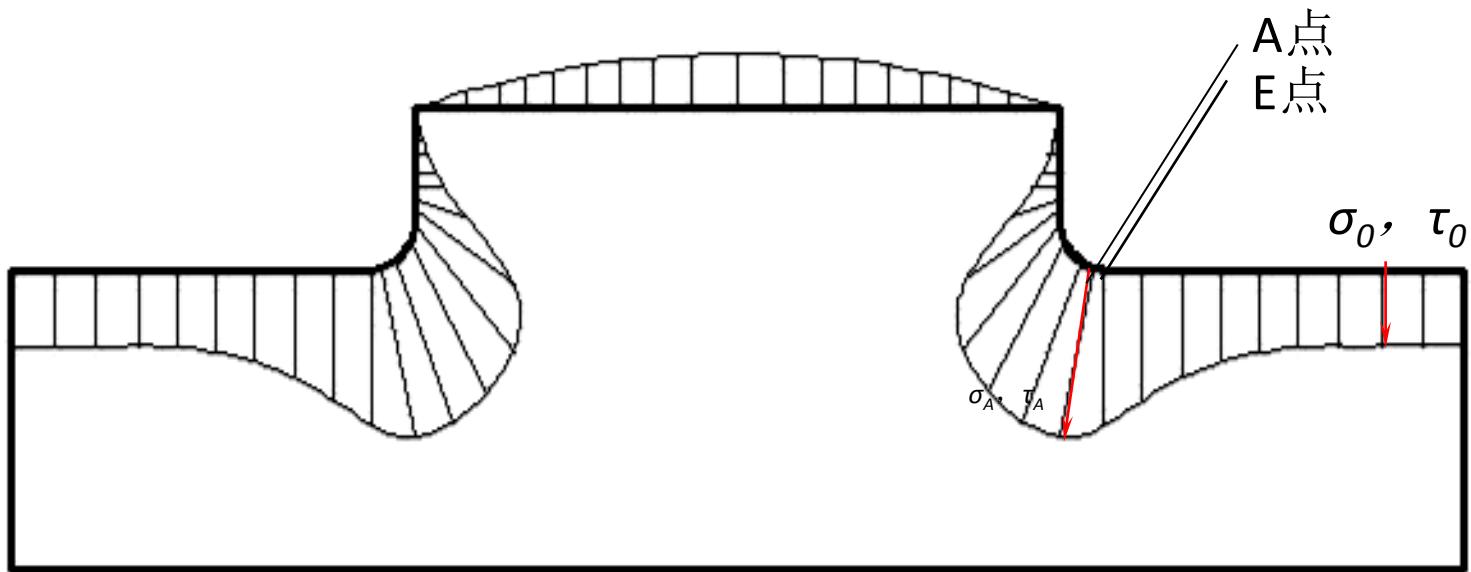


图10 受弯曲载荷时的应力分布

# ◆ 3、应力集中基本理论

## 3.4 应力集中公式

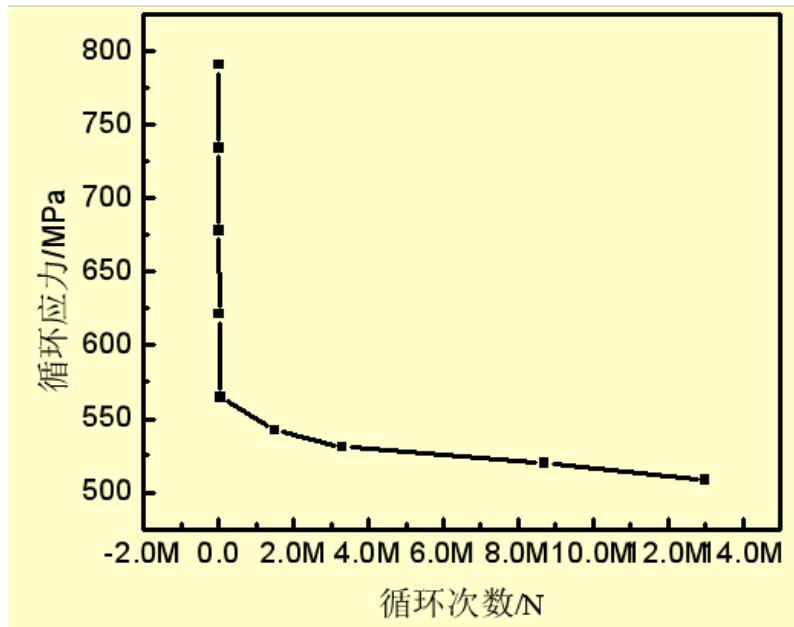
关于应力集中公式，日本学者西田正孝等人对上述带凸肩的带板承受弯曲载荷的情况进行光弹性实验而得到了经验公式：

$$\alpha = 1 + 0.19 \left( \frac{R}{B} \right)^{-0.69} \tanh \left( \frac{A}{B} + \frac{3R}{B} \right) \coth \left( 1 + \frac{3R}{B} \right) \tanh \frac{100H}{B} \quad (1)$$

对于图2的模具结构来说，按上述公式计算，其**应力集中系数已达2.8**。因此，即使在基准应力较低的情况下，模桥根部的局部应力也可能达到很高的水平，极易导致模具的**低周疲劳断裂**。

由此可见，在模具设计、模具强度校核以及挤压工艺的制定中，应该充分考虑应力集中程度对模具局部部位受力的影响，适当增大模桥根部的圆角，可有效降低由应力集中程度，降低由应力集中导致的模具局部应力水平，从而降低分流模的低周疲劳失效或早期断桥。

## H13钢S-N疲劳曲线

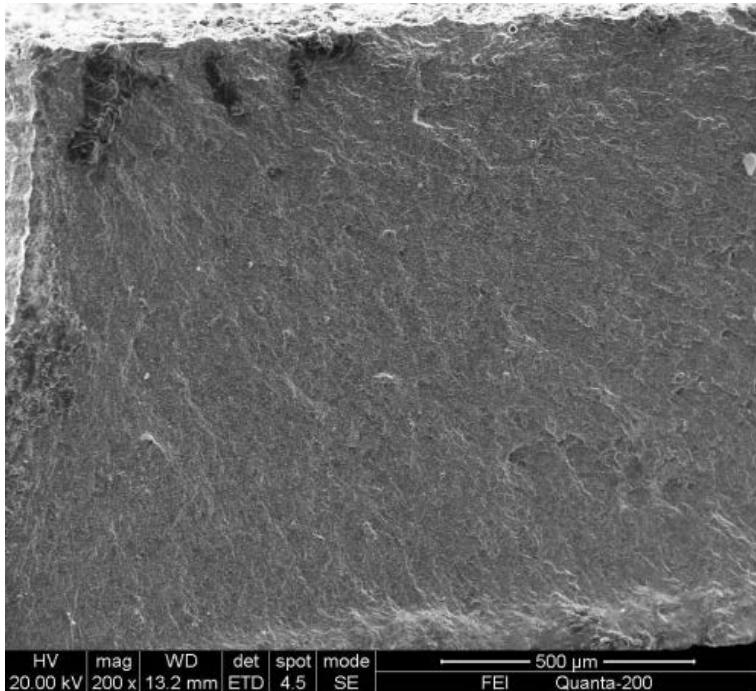


模具的实际服役温度约为500℃。取 $\sigma_b=1129.3\text{ MPa}$ ，按照疲劳实验的要求，依次选取500℃下 $0.7\sigma_b$ 、 $0.65\sigma_b$ 、 $0.6\sigma_b$ 、 $0.5\sigma_b$ 、 $0.45\sigma_b$ 五个应力加载水平。采用单点测试法，并对实验数据采用曲线拟和绘出H13钢的应力幅与断裂循环次数的关系曲线，即获得H13钢的S-N曲线。对于基数为 $10^7$ 的疲劳循环次数，H13钢的疲劳极限为 $\sigma_{-1P}=508\text{ MPa}$ 。

### 工业实验与计算结果比较

$r$ (mm)	$N$ (工业试验)	$N$ (预测结果)
2	31	38
5	146	131
6	450	476
8	尺寸超差失效	25765

## H13钢疲劳断口形貌



由实验结果的分析可知，H13钢的疲劳裂纹源都处于试样的棱角处，没有发生于试样内部的裂纹源，在表面裂纹源处也未见第二相及夹杂物。实验结果证明，H13钢的纯净度较高，在正常状态下不会出现粗大第二相和夹杂物；该试样在圆弧处，存在明显的应力集中现象。据此推断，裂纹源起源于试样侧表面的应力集中部位。如果表面存在粗大夹杂物或脆性相，则更容易引起应力集中和疲劳开裂。

## ◆ 4、总结与思考

---

- 疲劳失效是H13钢分流挤压模最主要的早期失效形式，该失效形式主要表现为分流桥根部的**低周疲劳断裂**。**应力集中**是H13钢分流挤压模具低周疲劳失效的最主要原因。
- 在模具设计、模具强度校核以及挤压工艺的制定中，应该充分考虑应力集中程度对模具局部部位受力的影响。适当增大模桥根部的圆角，可有效降低由应力集中程度，从而降低分流模的**低周疲劳失效或早期断桥**。
- **应力集中**是一个极其普遍的力学现象。但是，企业技术人员对**力学问题**的理解远远不能满足工作的需要，这是我国各企业普遍存在的现象。
- 采用**CAE技术**进行挤压模具的受力分析，技术难度很高，目前国内仍然只有极少数人能够开展该项工作。无论对模拟软件的操作和二次开发，还是对力学问题的理解，仍然是任重而道远！
- **力学基础差**也是我们材料学科大学生的普遍问题！一看到力学公式就害怕，以致不敢学、不愿学。但在未来工作中，无论是在企业开展技术工作还是在科研机构从事科研工作，永远无法逃避力学问题。不能从力学角度去分析和解决问题，必然给我们的工作带来许多困惑！



謝謝！

