

# 轮胎定型硫化机连杆应力集中系数研究

黄书伟

(中化(福建)橡塑机械有限公司,福建 三明 365000)

**摘要:**研究机械式轮胎定型硫化机连杆应力集中系数。利用 origin 软件对实验中的连杆应力集中系数进行函数化;利用有限元软件参数化进行分析,得到关于  $d/H$  与应力集中系数  $K$  的函数关系;将以上函数代入实例比较应力集中系数数值差异。

**关键词:**硫化机;连杆;有限元;应力集中;带孔矩形板;响应面

**中图分类号:**TQ330.44

**文献标识码:**B

**文章编号:**1009-797X(2025)12-0010-06

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.12.003

随着汽车工业的发展,对制作轮胎的定型硫化机的研究也逐步加深,如张启深<sup>[1]</sup>对蒸汽室的调模机构和导槽进行改进,增加了蒸汽室运行平稳性;张志等<sup>[2]</sup>应用有限元软件对硫化机底座分析,得出底座刚度对合模精度的影响;杨胜龙等<sup>[3]</sup>应用有限元分析硫化成型过程中充模问题,解决轮胎成型中的积气问题;AHAMEED 等<sup>[4]</sup>对硫化机框架进行模态分析,得到稳定安全的主框架结构;李晓红等<sup>[5]</sup>对硫化机横梁运动进行分析,综述了硫化机 3 种运动形式;吕柏源等<sup>[6]</sup>对曲柄连杆硫化机传动功率进行计算,根据实测的结果得出了开模启动功率、开模过程最大功率、闭模启动功率和锁模功率;王亮<sup>[7]</sup>对硫化机进行受力分析,得出在合模并施加合模力后连杆被拉长且其两端向外挠曲等结果。连杆作为机械式轮胎定型硫化机的主要构件,连接横梁和底座,与曲柄齿轮和墙板构成曲柄滑块机构,是传递主传动中重要一环。因此,正确计算连杆应力是保证连杆设计的关键,连杆轴承孔截面设计作为典型带孔矩形板问题,存在应力集中,在计算连杆应力时,需要正确选取连杆应力集中系数。本文研究机械式轮胎定型硫化机连杆应力集中系数,旨在函数化连杆应力集中系数,利用有限元软件参数化工具和响应面方法探索连杆应力集中系数变化规律,对以上两类函数代入实例进行比较应力集中系数数值差异。

## 1 分段函数拟合连杆应力集中系数

见图 1 连杆的结构<sup>[8]</sup>,对于连杆应力的分析,主要分析连杆轴承孔  $I-I$  截面和主板  $II-II$  截面,主板

$II-II$  截面为规则截面,理论计算该部分应力能够满足工程应用,轴承孔  $I-I$  截面是典型带孔矩形板受力问题,在理论计算过程中需乘以应力集中系数以考虑应力集中的影响,本文主要研究轴承孔  $I-I$  截面的应力集中系数问题。

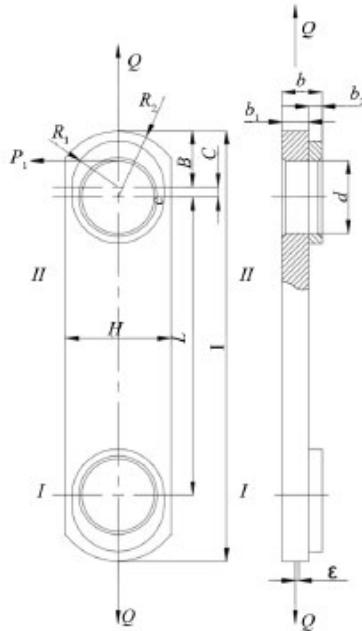


图 1 连杆的结构

对于带孔矩形板的应力集中系数问题的研究,理论和有限元都已经有所成果<sup>[9-11]</sup>,得到应力集中系数在截面上的分布规律,但其受力工况为两端受拉与连

**作者简介:**黄书伟(1990-),男,机械工程师,工学硕士学位,主要从事橡塑机械设计研发仿真工作。

杆的工况有差异，而无法直接使用，因此有必要专门对此工况进行探究，以了解轴承孔受拉的带孔矩形板应力集中问题。

见图 2 为连杆应力集中系数<sup>[8]</sup>，此系数为《橡胶工业手册》第 9 分册中专门研究轴承孔受力的应力集中系数问题，将应力集中系数  $K$  与连杆的轴承孔径  $d$ 、主板宽  $H$ 、孔径与边缘距离  $B$ ，3 个参数进行关联；可以看出，该实验为无加强板的矩形板，在轴承孔中插入轴，对轴两端同向受拉，矩形板另一端反向受拉的工况得出的数据图。

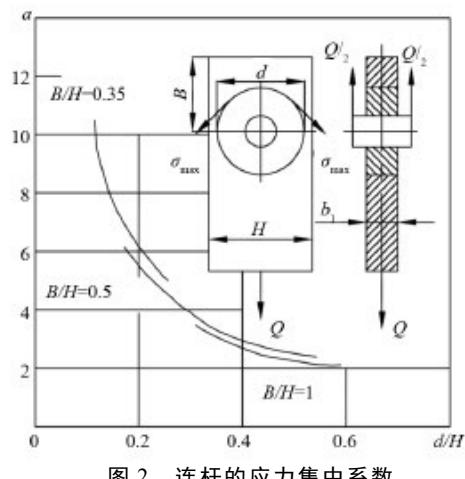


图 2 连杆的应力集中系数

以上虽然给出了应力集中系数的数据图，但未给出该工程试验中应力集中系数的函数关系，因此在选取应力集中系数  $K$  时，需要根据  $d/H$ 、 $B/H$  两个系数进行比对取值，过程不仅繁琐，取得数值也没有唯一性。

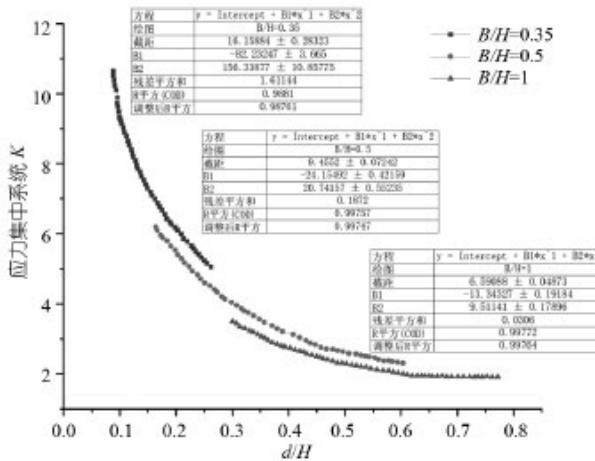


图 3 连杆的应力集中系数函数拟合

为解决以上难题，本文利用科研和数据分析软件

origin 的图像数字化工具，截取手册中连杆应力集中系数图片，插入 origin 中，设定图片坐标轴数据，即可获得图片中函数关系，见图 3 连杆的应力集中系数函数拟合，即为 origin 对手册中应力集中系数的函数复现，得到连杆应力集中系数分段函数（以下简称分段函数）如下：

当  $B/H=0.35$  时候： $y=16.15884-82.22047x+15.338877x^2$ ,  $x \in (0.09, 0.26)$ ；

当  $B/H=0.5$  时候： $y=9.4552-24.15492x+20.74157x^2$ ,  $x \in (0.16, 0.6)$ ；

当  $B/H=1$  时候： $y=6.59088-13.34327x+9.51141x^2$ ,  $x \in (0.3, 0.77)$ 。

以上公式中： $x=d/H$ ,  $y=K$ 。

使用二次函数进行拟合，分段函数的决定系数  $R^2$  分别为 0.9881、0.99757、0.99772，该值也叫拟合优度，描述的是自变量对应变量的贡献度或解释程度，其值在 0 到 1 之间，越接近 1，说明自变量对因变量的贡献度越高，拟合程度越好。因此使用该分段函数拟合效果好，用以替代传统描图比对的方法，获取连杆应力集中系数更便捷，获取数值具有唯一性。

## 2 有限元参数化连杆应力集中系数

与图 2 连杆的应力集中系数数值进行对比分析，建立连杆有限元模型，见图 4 连杆参数化应力集中有限元模型，设定矩形板一端固定约束 Fixed support，轴承孔加载轴承载荷 Bearing load 为 1 000 000 N，设置过轴承孔  $I-I$  截面的平面，可以求解得到轴承孔  $I-I$  截面的平均应力  $\sigma_m$  和最大应力  $\sigma_{max}$ ，从而得到理论应力集中系数  $K$ ：

A: 连杆参数化应力集中研究  
Static Structural  
Time: 1. s

■ Fixed Support  
■ Bearing Load: 1e+006 N

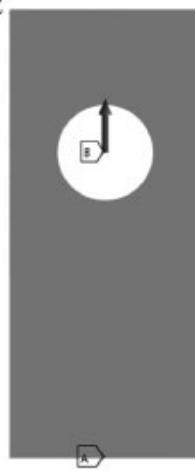


图 4 连杆参数化应力集中有限元模型

$$K = \sigma_{\max}/\sigma_m^{[12]} \quad (1)$$

见表 1 连杆几何模型参数, 为连杆有限元模型的具体几何参数。

表 1 连杆几何模型参数

| 项目           | 代号    | 数值    |
|--------------|-------|-------|
| 轴承孔径 /mm     | $d$   | 250   |
| 轴承孔到边缘距离 /mm | $B$   | 375   |
| 主板宽 /mm      | $H$   | 500   |
| 主板厚 /mm      | $b_1$ | 50    |
| 总长度 /mm      | $L$   | 1 300 |

对以上有限元模型进行参数化建模, 参数包含轴轴承孔径  $d$ 、轴承孔到边缘距离  $B$ 、截面的平均应力  $\sigma_m$ 、截面最大应力  $\sigma_{\max}$ 。为避免连杆头在拉伸和弯曲而引起高应力的作用下, 不致发生太大的变形, 太大的变形会使轴颈轴承卡住, 故应使:  $B/H > 0.6$  <sup>[13]</sup>, 因此本文只研究  $0.5 < B/H < 1$  的情形; 另外考虑当  $B/H=1$  时候,  $0.6 < d/H < 0.8$ ,  $K \approx 2.3$ ; 当  $d/H > 0.8$  时候,  $K \approx 1$ ; 为简化模型计算, 本文有限元参数化分析中限定  $0.5 < B/H < 1$ ,  $0.2 < d/H < 0.6$ , 主板宽 500 mm, 则  $250 < B < 500$ ,  $100 < d < 300$ 。

见图 5 连杆参数化应力集中研究项目流, 建立有限元参数化模型、响应面分析和参数相关性分析。实验设计应用中心复合法 (CCD), 使用全二阶多项式方法 (Standard Response Surface-Full2nd Order Polynomials) 建立响应面, 最后传输到参数关联性进行参数分析。全二阶多项式方法建立响应面, 其评判回归分析结果可通过拟合优度 (Goodness of fit) 来评价, 如果拟合优度指标较差, 则说明选择的响应面类型不适合于所求解的问题, 需要更改响应面方法。

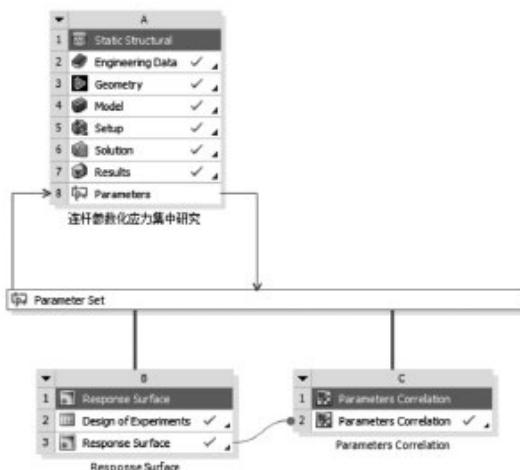
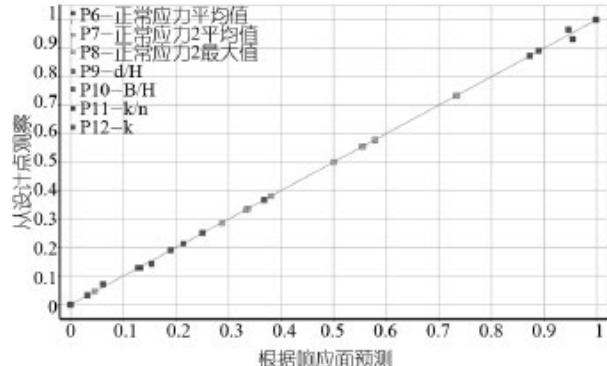


图 5 连杆参数化应力集中研究项目流

拟合优度里面的散点图 (Predicted versus Observed Chart) 可以直观地显示设计点数值和响应

面预测取值的差异, 见图 6 响应面的散点图曲线, 横轴为设计点计算值, 纵轴为响应面预测值, 如果预测结果较好, 则散点基本位于  $45^{\circ}$  线的附近, 反之则响应面的质量较差, 从图中可以看出使用全二阶多项式方法建立响应面回归结果较好, 可以使用该方法进行回归分析。



(注: 由于颜色所限, 如需高清图请联系本刊)

图 6 响应面的散点图曲线

通过响应面进行参数相关性分析, 见图 7 参数相关灵敏性图, 可以得到参数轴承孔径  $d$  对应力集中系数参数  $P12-K$  的灵敏性达到  $-0.94$ , 基本接近  $-1$  的状态, 表现为强负相关关系; 同时, 表明应力集中系数  $K$  与轴承孔到边缘距离  $B$  的敏感性接近 0, 几乎无相关。见图 8 参数相关散点图, 参数相关散点图取横坐标为  $P9-d/H$ , 纵坐标为应力集中系数  $P12-K$ , 得到二次函数关系为  $y=25.751x^2-28.394x+10.617$  (以下简称拟合函数), 其决定系数  $R^2=96.765\%$ , 表明拟合程度好,  $d/H$  对应力集中系数  $P12-K$  的贡献高; 轴承孔到边缘距离  $B$  对应力集中系数  $K$  几乎无贡献。

### 3 分段函数与拟合函数讨论

见图 9 拟合函数与分段函数对比, 连杆应力集中系数的拟合函数整体高于分段函数, 3 条曲线近似平行。根据  $d/H$  的比值取应力集中系数, 则拟合函数得到数值比分段函数计算的数值更大。见图 10 拟合函数与分段函数误差百分比, 拟合函数与分段函数 ( $B/H=0.5$ ) 整体相差  $10\% \sim 15\%$ , 拟合函数与分段函数 ( $B/H=1$ ) 整体相差  $20\% \sim 45\%$ 。拟合函数与分段函数误差的存在, 说明在有限元分析中, 仍有未考虑因素, 由于《橡胶工业手册》中关于连杆应力集中系数的实验方法无进一步描述, 无法具体判断分段函数与拟合函数差异性在哪, 但其得到的拟合函数公式, 仍有实际工程意义, 尤其拟合函数只是关于  $d/H$  与应力集中系

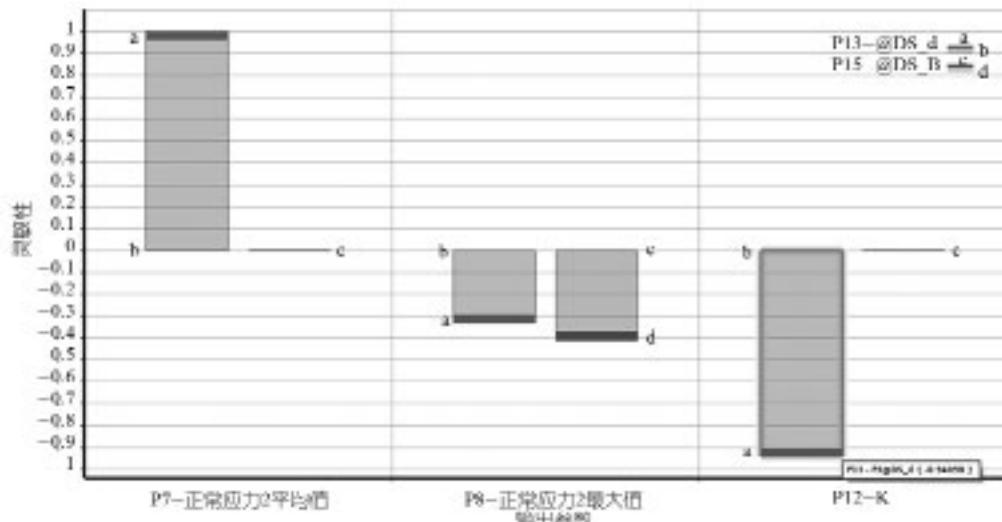


图 7 参数相关灵敏性图

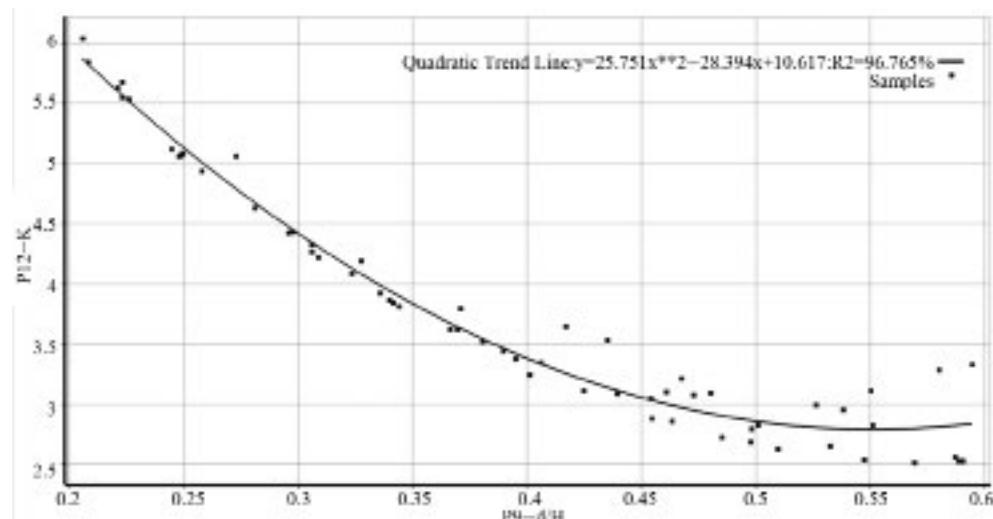


图 8 参数相关散点图

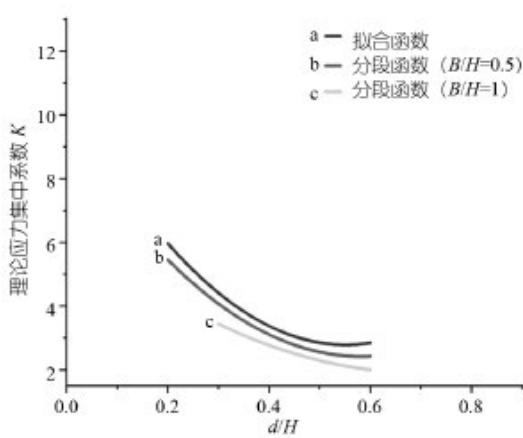


图 9 拟合函数与分段函数对比

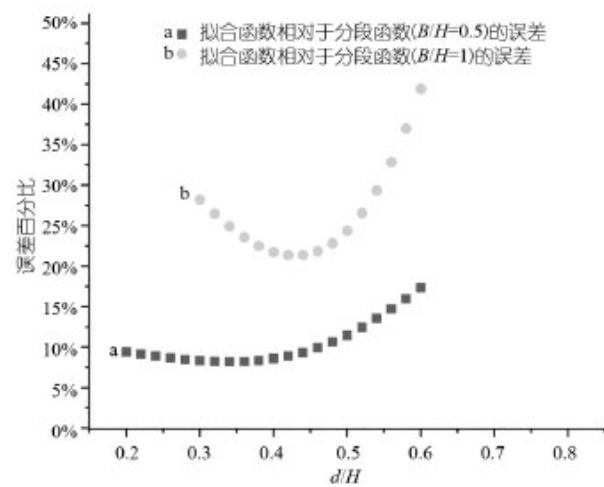


图 10 拟合函数与分段函数误差百分比

数的函数，比分段函数更简洁，更容易得到连杆应力集中系数；此外，参数化连杆应力集中的有限元模型

分析也丰富了轴承孔受拉的带孔矩形板应力集中问题的研究。

表 2 各规格连杆数据组

| 组 | 型号              | $d$ | $B$ | $H$ | $d/H$ | $B/H$ | $K(B/H=0.5)$ | $K$ (拟合) <sup>2</sup> | ( $E^3$ ) |
|---|-----------------|-----|-----|-----|-------|-------|--------------|-----------------------|-----------|
| 1 | LL-A1030/1.36×2 | 233 | 315 | 413 | 0.56  | 0.763 | 2.091)       | 2.79                  | 34%       |
| 2 | LL-A1170/1.76×2 | 259 | 277 | 483 | 0.54  | 0.573 | 2.47         | 2.80                  | 13%       |
| 3 | LL-B1310/2.95×2 | 320 | 420 | 560 | 0.57  | 0.750 | 2.43         | 2.80                  | 15%       |
| 4 | LL-AB1400/3×2   | 340 | 330 | 560 | 0.61  | 0.589 | 2.44         | 2.87                  | 18%       |
| 5 | LL-B1525/4.3×2  | 381 | 385 | 684 | 0.56  | 0.563 | 2.44         | 2.79                  | 14%       |
| 6 | LL-B1900/6.6    | 340 | 385 | 600 | 0.57  | 0.642 | 2.43         | 2.80                  | 15%       |

注：(1) 数值由  $B/H=1$  的分段函数计算得出；(2) 该列数值由拟合函数计算得出；(3)  $E$  表示拟合函数计算的应力集中系数与分段函数计算得到的应力集中系数的相对误差；

以《橡胶工业手册》第 9 分册中表 2-4-23 连杆的主要尺寸对比分段函数和拟合函数计算应力集中系数，因表 2-4-23 第二组数据有缺失，因此只提取其余 6 组连杆数据整理可得各规格连杆数据组，见表 2 各规格连杆数据组，计算各组数据的应力集中系数  $K$ ，如  $K(B/H=0.5)$  表示由  $B/H=0.5$  的分段函数计算得到的应力集中系数， $K$  (拟合) 表示应用拟合函数计算得到的应力集中系数，得到拟合函数与分段函数关于应力集中系数的相对误差值  $E$ 。对比表 2 误差值  $E$  与图 10 拟合函数与分段函数误差百分比，可以得到各规格连杆的  $d/H$  的误差值  $E$  也符合以上关于拟合函数与分段函数 ( $B/H=0.5$ ) 整体误差在 10%~15% 判断。

## 4 结论

利用科研和数据分析软件 origin 的图像数字化工具，对《橡胶工业手册》中连杆的应力集中系数进行函数化，得到分段函数，为后续连杆应力集中系数的选取提供便利，可以替代传统描图比对的方法，获取连杆应力集中系数数值具有唯一性。

通过对连杆的有限元参数化建模，进行响应面和参数相关性分析，得到关于  $d/H$  与应力集中系数  $K$  的二次函数，该拟合函数比分段函数更简洁，参数更少，为单一变量函数。同时，研究结果表明应力集中系数  $K$  与参数  $d/H$  比值强相关，而与参数  $B$  无关，这明显区别于分段函数。此外，参数化连杆应力集中的有限

元模型也丰富了轴承孔受拉的带孔矩形板应力集中问题的研究。

## 参考文献：

- [1] 张启深. 轮胎硫化机蒸汽室的优化设计 [J]. 橡塑技术与装备, 2025, 51(06):69~72.
- [2] 张志, 侯文超, 张晓琳, 等. 基于 CAE 的机械式双模轮胎定型硫化机底座结构分析与优化 [J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(06):65~69.
- [3] Yang S, Wang Y, Zhou Y, et al. Numerical investigation of mold filling in vulcanizing of green tire using finite element method. Polym Eng Sci. 2025, 1~12.
- [4] AHAMEED C A, BABU P H, RASHEEDA P. Finite Element Analysis of Hydraulic Tire Curing Press Frame [J]. 2018.
- [5] 李晓红, 李玉炳. 连杆式定型硫化机横梁运动形式 [J]. 橡塑技术与装备, 2003, (04):9~11.
- [6] 吕柏源, 马占兴. 曲柄连杆传动内胎硫化机功率计算方法探讨 [J]. 山东化工学院学报, 1982, (01):17~24.
- [7] 王亮. 轮胎定型硫化机受力分析 [J]. 轮胎工业, 2010, 30(12):751~754.
- [8] 杨顺根, 白仲元. 橡胶工业手册 修订版 第 9 分册 橡胶机械 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1992:841~844.
- [9] 冯占闯, 张翼, 苗会, 等. 理论应力集中系数的有限元计算方法研究 [J]. 河北农机, 2014, (10):44~46.
- [10] 张富强, 杨清, 申传瑞. 带孔薄板应力集中的有限元模拟分析 [J]. 四川水泥, 2016, (04):263.
- [11] 李云松, 陈小安, 江德智. 带孔薄板孔边应力集中系数的改进算法 [J]. 机械设计与制造, 2017, (06):42~45.
- [12] R E 彼德森. 杨乐民译. 应力集中系数 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988:104~105.
- [13] 华南工学院橡胶机械教研组, 橡胶机械设计. 轮胎定型硫化机 [M]. 1978:74~76.

## Study on the stress concentration factor of the connecting rod in the tire shaping and curing press

Huang Shuwei

(Sinochem (Fujian) Rubber Machinery Co. LTD., Sanming 365000, Fujian, China)

**Abstract:** This study focuses on the stress concentration factor of the connecting rod in a mechanical tire curing press. Origin software is used to perform functionalization processing on the stress concentration factor of the connecting rod in the experiment; finite element software is employed to conduct parametric analysis, thereby obtaining the functional relationship between  $d/H$  and the stress concentration factor  $K$ ; the aforementioned function is applied to an actual case to compare the numerical differences in the stress concentration factor.

**Key words:** curing press; connecting rod; finite element; stress concentration; perforated rectangular plate; response surface

(R-03)

# 黄山论剑：环氧树脂应用新未来

Huangshan Forum: New future of epoxy resin application

10月22~25日，以“协同破内卷，践新促发展”为主题的第二十六次全国环氧树脂应用技术学术交流会，在黄山新华联丽景酒店隆重召开。本次会议由中国合成树脂协会环氧树脂分会主办、安徽新远科技股份有限公司承办，华东理工大学华昌聚合物有限公司作为协办单位深度参与，全方位展现其在环氧树脂领域的硬实力与创新力。

共商行业大计，贡献华昌智慧

行业理事会是本次交流会的关键环节。华昌公司总经理张慧杰与行业专家、学者、协会领导及企业领袖齐聚，围绕环氧树脂应用技术的核心问题与发展方向展开探讨。针对当前行业竞争激烈、“内卷”加剧的现状，各方深入交流破局之法，达成“加强技术交流与资源共享、推动产学研深度融合”的共识。华昌凭借丰富经验与前瞻思维，分享研发、生产、市场应用等方面的见解，为行业健康可持续发展提供有价值的建议。

展会吸睛不断，技术实力圈粉

在展会现场，华昌展位凭借简洁设计与前沿技术展示，成为焦点。展位全方位呈现适用于高压 RTM、拉挤、缠绕等多种成型工艺的复配环氧树脂体系，以及应用于船舶、航空航天、轨交、汽车等领域的高性能复合材料，同时提供成型工艺树脂基定制化解决方案。此外，华昌还通过展板展示了在轻量化高性能复合材料基体树脂研发上的技术突破与应用案例，吸引众多行业专家、企业代表及科研人员驻足交流，进一步扩大了行业影响力。

## 重磅报告揭秘，引领技术方向

在学术交流会的主题报告会环节，张慧杰总经理带来《轻量化高性能复合材料基体树脂研发进展及应用》的精彩报告，引发广泛关注。报告深入分析了轨道交通、新能源汽车、航空航天等领域对轻量化高性能复合材料的迫切需求，指出基体树脂研发应用是行业发展的关键。同时，结合实际案例展示华昌技术成果：应用于列车车身和内饰件的基体树脂，有效减重并提升运行效率；适用于高压 RTM 工艺的 MERICAN3317，助力新能源汽车电池包提升安全性与轻量化水平；为航空航天飞行器结构件提供可靠轻量化解决方案，赋能飞行器性能提升。

协办赋能行业，未来持续发力

作为协办单位，华昌不仅为会议成功举办提供有力支持，更借此机会拓展行业视野、加强同行合作，树立了良好企业形象。一直以来，华昌深耕基体树脂 67 年，依托华东理工大学与上海华谊集团，坚持研发创新。未来，华昌将继续以“协同破内卷，践新促发展”为己任，深化行业合作，提升技术与市场竞争力，为环氧树脂行业繁荣发展贡献更多力量。

摘编自“博创”

(R-03)