

注塑机动模板的可靠性设计

© 易恒光 潘佐梅 恒生机器（深圳）有限公司工程部

内容摘要：本文以实例进行注塑机动模板的强度和刚度设计，提出了以 P-S-N 近似线图进行疲劳强度计算，按照应力—强度模型进行刚度的可靠性设计方法。对注塑机设计有一定的使用价值。

关键词： 注塑机 模板 可靠性

动模板是注塑机合模机构中安装模具、设置顶出机构的重要零件。工作中承受全部合模力的作用，而由于顶出机构，特别是多点顶出机构的设置，既要考虑动模板的强度和刚度，同时要考虑结构的紧凑性。因此，结构的合理设计显得尤为重要。图 1a) 及 1b) 所示为恒生机器（深圳）有限公司 JT 系列注塑机所采用的后拉式多点顶出机构的动模板。其肋板布置形式有利于载荷均匀分布和力的传递；壁厚均匀、铸件热节点少、铸造工艺性好；顶出机构所占空间少，大大提高了动模板的刚度。在结构设计的基础上进行可靠性设计。

动模板的失效形式主要是工作受脉动循环应力作用下产生的弯曲疲劳破坏或弯曲变形超过许用挠度。因此，对动模板进行强度和刚度的可靠性设计。

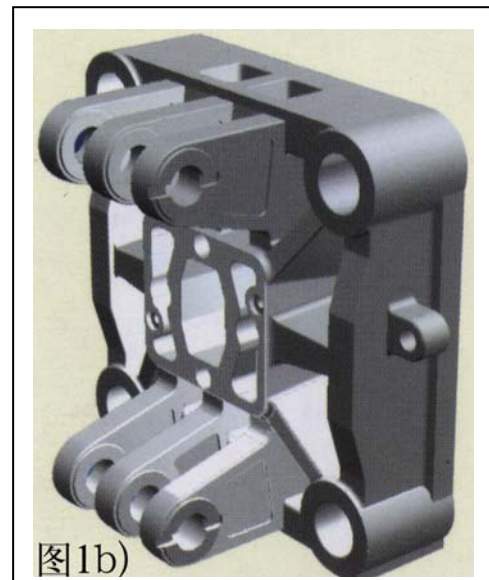
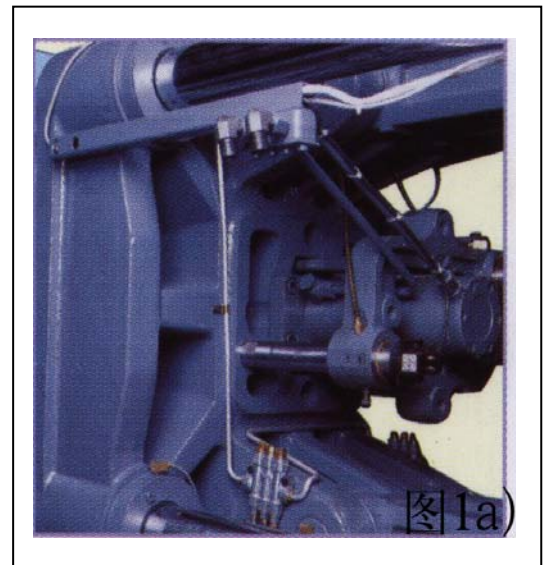
锁模力 $P=1300\text{KN}$ 注塑机动模板结构尺寸如图 2 所示：

$$V_1 \times H_1 = 430 \times 430 \text{ mm}$$

$$V_0 \times H_0 = 500 \times 500 \text{ mm}$$

$$V \times H = 630 \times 630 \text{ mm}$$

危险断面尺寸如图 3 所示：



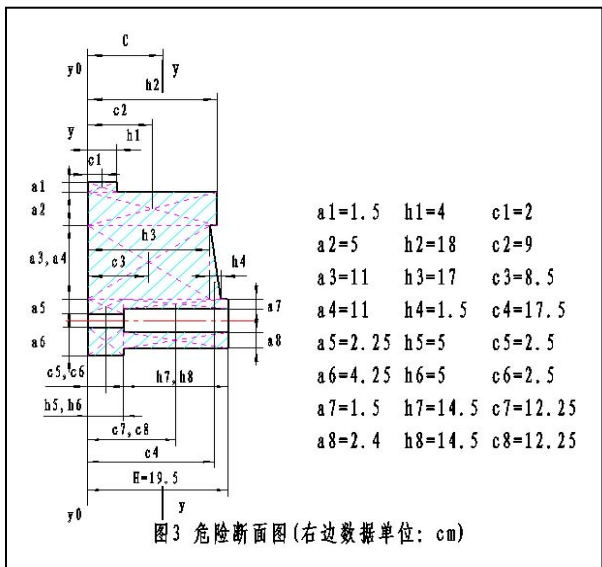
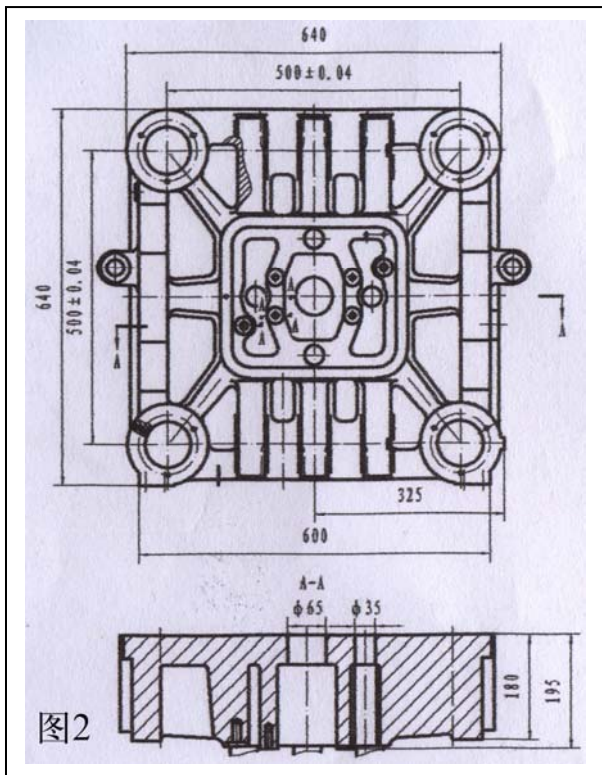
材料为 QT500-7

$$\sigma_b = 500 \text{ Mpa} \quad \sigma_s = 320 \text{ Mpa}$$

$$E = 1.73 \times 10^5 \text{ Mpa} \quad G = 6.8 \times 10^4 \text{ Mpa}$$

1. 动模板强度的可靠性计算

动模板的疲劳强度按 P-S-N 线图进



行可靠性计算。

1.1 绘制标准平滑试件的近似 S-N 曲线

$$N = N_{\infty} = 10^6 \text{ 时}$$

QT500-7 的金相组织为铁素体+珠光体，取抗拉强度均值为

$$\bar{\sigma}_b = 1.07 \sigma_b = 535 \text{ Mpa}$$

$$\text{疲劳强度 } \bar{\sigma}_{-1} = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b} \right) \bar{\sigma}_{-1}$$

$$= 216.675 \text{ Mpa}$$

式中: $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}$ — 抗弯疲劳极限与抗拉疲劳极

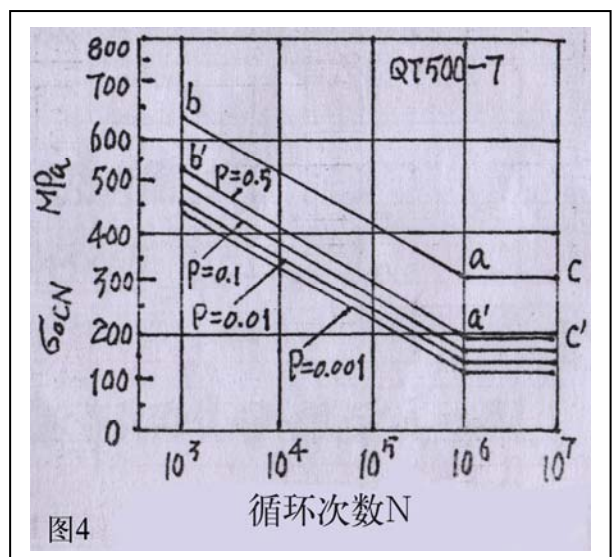
限比值，按金相组织取 $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b} = 0.405$

动模板的应力状态为脉动循环应力，故取

$$\bar{\sigma}_0 = 1.4 \times \bar{\sigma}_{-1} = 303.345 \text{ Mpa}$$

$N_0 = 10^3$ 时的疲劳极限，按金相组织取 $\bar{\sigma}_{0N_0} = 0.85 \times 1.4 \bar{\sigma}_b = 636.65 \text{ Mpa}$

在半对数坐标系上描点后连成 S-N 曲线 b-a-c (如图 4)。



1.2 绘制动模板的近似 S-N 线图

(1) 确定有效应力集中系数疲劳的有效应力集中系数。

$$\begin{aligned} \bar{K}_{\sigma} &= 1 + q_{\sigma} (\alpha_{\sigma} - 1) \\ &= 1 + 0.7(2.18 - 1) \\ &= 1.83 \end{aligned}$$

式中: q_{σ} — 材料对应力集中的敏感系数，按 QT500-7 及动模板结构取 $q_{\sigma} = 0.7$

α_{σ} — 理论应力集中系数，按模板结构取 $\alpha_{\sigma} = 2.18$

(2) 确定 $N = N_{\infty}$ 时的综合修正系数

$$\bar{K}_{\sigma_c} = \frac{\bar{K}_{\sigma}}{\bar{\varepsilon}_{\sigma}} + \frac{1}{\beta} - 1$$

$$= \frac{1.83}{0.73} + \frac{1}{0.79} - 1$$

$$= 2.77$$

式中： $\bar{\varepsilon}_\sigma$ —尺寸系数，查得 $\bar{\varepsilon}_\sigma=0.73$
 $\bar{\beta}$ —加工系数，按铣削取 $\bar{\beta}=0.79$
 $N=N_\infty$ 时动模的疲劳强度均值，按

$$\bar{\sigma}_{0c} = \frac{\bar{\sigma}_0 \cdot \bar{\beta}_\sigma}{\bar{K}\sigma_C} = \frac{303.345 \times 1.8}{2.77}$$

$$= 197.12 \text{Mpa}$$

式中： $\bar{\beta}_\sigma$ —表面强化系数，动模板作表面喷丸处理，取 $\bar{\beta}_\sigma=1.8$

$N=N_0$ 时的有效应力集中系数，按

$$\bar{K}_{\sigma N_0} = (\bar{K}_\sigma - 1)q_{N_0} + 1$$

$$= (1.83-1) \times 0.25 + 1$$

$$= 1.21$$

式中： q_{N_0} — $N=N_0$ 时的修正系数，查得 $q_{N_0}=0.25$

$N=N_0$ 时的疲劳强度均值为：

$$\bar{\sigma}_{0CN_0} = \frac{\bar{\sigma}_{0N_0}}{\bar{K}_{\sigma N_0}} = \frac{636.65}{1.21}$$

$$= 526.16 \text{Mpa}$$

在图 4 上描点后连成动模板 $P=0.50$ 时的 S-N 曲线 $b' - a' - c'$ 。

(3)绘制动模板的近似 S—N 曲线，暂定 $P=0.10, 0.01, 0.001$ ，由正态分布表可查得 $Z_p=-1.282, -2.326, -3.090$ 。

$N=N_\infty$ 时疲劳强度变异系数按

$$V_{\sigma_0c} = \left(V_{\sigma_0}^2 + V_{\beta\sigma}^2 + V_{K\sigma_C}^2 + V_{\sigma_0} V_{K\sigma_C} + V_{\beta\sigma} V_{K\sigma_C} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中： V_{σ_0} —标准平滑试件疲劳强度的变异系数，按资料取 $V_{\sigma_0}=0.125$

$V_{\beta\sigma}$ —强化系数的变异系数，未强

化， $V_{\beta\sigma}=0$

$V_{K\sigma_C}$ —综合修正系数的变异系数，

近似取

$$V_{K\sigma_C} \approx V_{\alpha\sigma} = 0.4V_p$$

$V_{\alpha\sigma}$ —理论应力集中系数的变异系数

V_p —引起应力集中圆角半径 ρ 的变异系数。如图 2 所示，动模板中心顶杆孔 $d = 65_0^{+0.25}$ $\rho = 32.5_0^{+0.125}$

按“3S”原则，其标准差 $S_\rho = 0.0417$

$$V_p = \frac{S_\rho}{\rho} = \frac{0.0417}{32.5} = 0.00128$$

则 $V_{K\sigma_C} = 0.4V_p = 0.0005$ ，因此，

$$V_{\sigma_0c} = \left[(0.125)^2 + (0.0005)^2 + 0.125 \times 0.0005 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0.125$$

疲劳极限的标准差按

$$S_{\sigma_0c} = \bar{\sigma}_{0c} V_{\sigma_0c}$$

$$= 197.12 \times 0.125$$

$$= 24.64 \text{Mpa}$$

不同失效率 p 的疲劳强度，按式

$$(\sigma_{0c})_\rho = \bar{\sigma}_{0c} - Z_p S_{\sigma_0c}$$

则有： $(\sigma_{0c})_{0.1} = 165.53 \text{Mpa}$

$$(\sigma_{0c})_{0.01} = 139.81 \text{Mpa}$$

$$(\sigma_{0c})_{0.001} = 120.98 \text{Mpa}$$

$N=N_0$ 时疲劳强度的变异系数按式

$$V_{\sigma_0CN_0} = \left(V_{\sigma_0N_0}^2 + V_{K\sigma N_0}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 0.05$$

其中取： $V_{\sigma_0N_0} \approx V_{\sigma_b} \approx 0.05$

$$V_{K\sigma N_0} = V_{K\sigma_C} = 0.00005$$

疲劳强度的标准差，按

$$S_{\sigma_0CN_0} = \bar{\sigma}_{0CN_0} V_{\sigma_0CN_0}$$

$$= 526.16 \times 0.05$$

$$= 26.31 \text{ Mpa}$$

不同失效率 ρ 的疲劳强度，按式

$$(\sigma_{0CN_0})_{\rho} = \bar{\sigma}_{0CN_0} - Z_{\rho} S_{\sigma_0CN_0}$$

$$\text{则有: } (\sigma_{0CN_0})_{0.1} = 492.43 \text{ Mpa}$$

$$(\sigma_{0CN_0})_{0.01} = 464.96 \text{ Mpa}$$

$$(\sigma_{0CN_0})_{0.001} = 444.86 \text{ Mpa}$$

将上述计算点描在图 4 上，并将 P 相同的点用直线相连得动模板近似的 P-S-N 曲线。

1.3 验算动模板的可靠度

动模板工作中所受的应力按均布载荷。

$$\bar{\sigma}_w = \frac{M_{\max}}{W} = 65.7 \text{ Mpa}$$

式中： M_{\max} — 危险断面处的最大弯矩

W — 抗弯断面模量

要求动模板寿命 $N \geq 10^6$ ，由图 4 的 P-S-N 近似图可见， $\sigma_w < (\sigma_{0c})_{0.001}$ ，失效率 $P < 0.001$ ，则不疲劳失效的可靠度

$$R > 1 - P = 0.999$$

2. 动模板刚度的概率计算

注塑机模板除应满足强度要求以外，还应具有足够的刚度，以保证模具锁紧后，在注射成型过程中不开缝溢料，保

证制件质量。因此，对模板的弯曲挠度有严格的要求，工作中不满足刚度要求则认为失效。

模板刚度的可靠性计算，采用应力——强度模型，应力为工作中的变形，强度则是允许的变形。工作时的变形量由材料力学求挠度，并近似地假定为正态分布，允许的变形量视为确定值。依注塑机规格 JT130 允许的弯曲挠度 $[f] \leq 0.15 \text{ mm}$

2.1 动模板的挠度

$$f = f_b + f_s = 0.122 \text{ mm}$$

$$f_b = \frac{P}{6EJ} \times \frac{57}{512} B^3 = 0.09 \text{ mm}$$

$$f_s = \frac{21}{80} \times \frac{PB}{G \cdot F_s} = 0.032 \text{ mm}$$

式中： f — 动模板的总挠度 mm

f_b — 由弯曲应力引起的挠度 mm

f_s — 由剪力产生的挠度 mm

B — 动模板上连杆铰支座中心距

mm

P — 锁模力 N

E — 弹性模量 Mpa

G — 剪切模量 Mpa

J — 惯性矩 mm^4

F_s — 危险截面面积 mm^2

2.2 求各随机变量的均值和变异系数

(1) 影响变形量的随机变量的精度

$$P = 1300000_0^{+65000} \text{ N}$$

$$B = 500 \pm 0.04 \text{ mm}$$

$$E = 1.73 \times 10^5 \text{ Mpa}$$

$$G=6.8 \times 10^4 \text{ Mpa}$$

$$\text{标准差 } S_{[\bar{f}]} = 0.003$$

$$J=19934_{-0.10}^0 \text{ cm}^4$$

由联接方程

$$F_s = 760_0^{+0.6} \text{ cm}^2$$

$$Z_R = \frac{[\bar{f}] - \bar{f}}{\left[S_{[\bar{f}]}^2 + S_f^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = 3.5163$$

(2)求各随机变量的均值和变异系

数,按“3S”原则:

$$\bar{P} = 1332500 \text{ N} \quad V_P = 0.0163$$

$$\bar{B} = 500 \text{ mm} \quad V_B = 0.000027$$

$$\bar{E} = 1.73 \times 10^5 \text{ Mpa} \quad V_E = 0.03$$

$$\bar{G} = 6.8 \times 10^4 \text{ Mpa} \quad V_G = 0.03$$

$$\bar{J} = 19954_{-0.10}^0 \quad V_J = 0.000002$$

$$\bar{F}_s = 760 \quad V_{F_s} = 0.00026$$

由标准正态分布表可得动模板可靠度

$$R = \Phi(Z_R) = 0.9998$$

5. 结语

(1) 注塑机模板的疲劳强度,采用近似 P-S-N 线图进行可靠性验算, JT130 动模板的抗疲劳强度足够;

(2) 注塑机模板刚度,采用应力-强度模型进行概率计算, JT130 动模板在许用挠度为 $[f] \leq 0.15\text{mm}$ 条件下,可靠度 $R > 0.9998$;

(3) 采用上述方法进行模板设计,其强度和刚度的可靠度均大于 0.999,可靠度是足够的。但应注意肋板的合理布置,表面强化的应用。

2.3 求在 P 力作用下的挠度均值和标准差

$$\bar{f}_b = 0.122 \text{ mm} \quad \bar{f}_s = 0.09 \text{ mm}$$

$$\bar{f}_s = 0.032 \text{ mm}$$

f_b 的变异系数和 f_s 的变异系数按

$$V_{f_b} = \left[V_P^2 + 3^2 V_B^2 + V_E^2 + V_J^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.034$$

$$V_{f_s} = \left[V_P^2 + V_B^2 + V_G^2 + V_{F_s}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.034$$

f_b 和 f_s 的标准差

$$S_{f_b} = \bar{f}_b \cdot V_{f_b} = 0.00306 \text{ mm}$$

$$S_{f_s} = \bar{f}_s \cdot V_{f_s} = 0.001088 \text{ mm}$$

$$S_f = S_{f_b} + S_{f_s} = 0.004148 \text{ mm}$$

2.4 验算可靠度

$$\text{由 } [f] = 0.13 \sim 0.15 \text{ mm}$$

$$\text{则许用挠度的均值为 } [\bar{f}] = 0.14 \text{ mm}$$

参考文献:

(1) 朱文予 机械可靠性设计 上海: 上海交通大学出版社 1992.08

(2) 凌树森 可靠性在机械强度设计和寿命估计中的应用 北京: 宇航出版社 1988.06

(3) 北京化工大学、华南理工大学 塑料机械设计 北京: 中国轻工业出版社 1979. 11

(4) 冯良为、岑运福 注射成型机五孔斜排式合模机构的优化设计 北京: 橡胶工业. 1999, 46 (10)