

钢锭模的热疲劳

冯钧一 陈剑南

(材力教研室)

摘要 本文从热疲劳角度研究钢锭模的破坏。通过模型试验模拟了钢锭模的热疲劳破坏,提出了改善热疲劳性能的改进模型,用有限单元法分析了实际钢锭模和改进型钢锭模在铸钢—水浴过程中的热应力变化,说明了热疲劳破坏的机制及改进型钢锭模的有效性。

关键词 热疲劳, 钢锭模, 高温疲劳

Thermal Fatigue of Ingot Mould

Feng Junyi Chen Jiannan

ABSTRACT: To improve thermal fatigue properties an improved mould was suggested based on thermal fatigue and simulated tests. Thermal stress changes in both the practical and the improved ingot moulds in the processes of casting steel and water bath were analyzed by the finite element method. The result shows that thermal stress is main reason to destroy the ingot mould. The effectiveness of the improved ingot mould was also explained.

KEY WORDS: thermal fatigue, ingot mould, high temperature fatigue

提高钢锭模的寿命,降低其消耗量一直是钢铁生产中的重大课题之一。在过去的几十年中,多是从材料的角度进行研究,本文将从热疲劳的角度研究钢锭模的破坏。

钢锭模的破坏是典型的热疲劳破坏,特别是一些中型炼钢厂,因为场地狭窄,钢锭模的使用周期短,钢锭模不允许作缓冷处理,而是将高温的钢锭模置于水槽中水浴,进行强制冷却。这一快速冷却过程,在钢锭模表面产生很大的热应力,热应力的值将超过材料的屈服强度而产生塑性变形。钢锭模每一次铸钢—水浴过程,就在模内产生一次热应力循环,经多

次热应力循环就会在模子表面产生微细的网状裂纹——龟裂。随着热应力循环多次反复进行，龟裂进一步发展，裂纹不断加深和扩展，最后在钢锭模内壁表面掉块形成凹坑，导致脱模困难而使钢锭模报废。这就是钢锭模的热疲劳破坏的一种典型症状。本文将着重研究这种因热疲劳而产生龟裂破坏的情况。另一种因热疲劳而产生贯穿性裂缝，导致钢锭模破坏的情况将另行研究。

1 试 验

1.1 温度测试

在唐山钢铁公司第二炼钢厂对中型钢锭模的浇铸过程进行了现场测试，得到钢锭模内壁、外壁、以及模子纵向和横向在铸钢过程中的温度变化。主要结果是：

(1) 模子的最高温度位于模子的内壁侧面的中部，距浇铸底板约250mm处，温度为860°C，此处的外壁温度为700°C。

(2) 模子的内壁在横向有80°C温差，外壁在横向有110°C温差（浇铸底板以上250mm处）。

(3) 模子在浇铸完成后20min时温度达到最高值。

温度测试的数据是进行模型试验和分析计算的主要依据。

对钢锭模的温度测试否定了钢锭模内壁的破坏是由于钢水的熔蚀和冲刷的观点。现场观察到大量报废的模子，其破坏处没有任何被熔蚀和冲刷的痕迹。

1.2 模型试验

通过对唐钢使用的钢锭模破坏情况的调查和观察，看到大多数钢锭模都在距底板200~300mm处（温度最高处）破坏最严重。破坏的形式是严重的表面龟裂，并形成凹坑，造成脱模困难而报废。现在我们用模型热疲劳试验，来模拟钢锭模内壁的热疲劳破坏。

模型Ⅰ用灰口铸铁铸造而成，截面尺寸与原钢锭模的比例为1:4。模型Ⅰ在箱式加热炉内均匀加热到850°C。然后在50~60°C的水槽中水浴，冷却25s，此时模型降温到100°C左右，然后再加热，再水浴，反复进行，每进行5次热循环观察一次表面龟裂。模型水浴时用X-Y仪测量模型表面以及壁厚中心处的温度变化，为计算模型内瞬态温度场和应力场提供数据。

模型Ⅰ在几何尺寸、材料、温度、水浴冷却几个方面模拟了钢锭模的热疲劳情况，但还不能模拟钢锭模在横向及厚度方向存在的温度差，在冷却速度上也稍有差别。

用上述模型和方法进行热疲劳试验后，在模型的内外壁都产生了热疲劳龟裂。模型经70次热疲劳后，表面龟裂的情况和实际钢锭模初期的龟裂情况是一致的。因此可以认为：在实验室条件下用模型试验的办法来研究钢锭模的热疲劳破坏是可行的。

1.3 改进结构后的模型试验

为了减小钢锭模在水浴过程中的热应力，可以在模子的最高温度处，开一窄缝，以减轻周向约束。为此设计了模型Ⅱ（图1）。用钼丝线切割在模型上开一条宽为0.2mm的窄缝，未开缝部分可体现原来模具的结构而产生的热应力情况。开缝部分体现放松周向约束影响而产生的热应力情况。同一试件，在同一条件下经受反复的热应力循环，以此来比较开缝与不开缝对表面龟裂的影响。为了减少沿着窄缝开裂的可能性，在缝的端部钻一圆孔以减小应力

集中的影响（开窄缝和小圆孔都不会影响实际钢锭模的使用）。

用上述加热和冷却条件对模型Ⅰ进行热疲劳试验，并观察龟裂的情况。

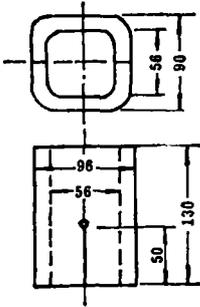


图1 模型Ⅰ
Fig.1 Mould I

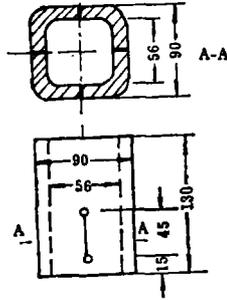


图2 模型Ⅲ
Fig.2 Mould III

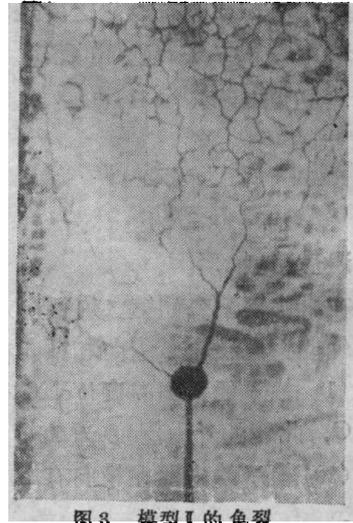


图3 模型Ⅰ的龟裂
Fig.3 Checking of mould I

经 38 次热循环后，模具的未开缝部分开始出现微细的龟裂，而开缝部分的表面尚无龟裂产生，经 57 次热循环后，模型未开缝部分表面有明显的龟裂产生，而开缝部分表面刚开始有微裂纹产生，如图 8 所示。

由此可知：模型经过开缝处理，放松了部分周向约束以后，表面的龟裂可以得到明显的延缓和改善，但是也产生了新的问题：

(1) 在缝的端部圆孔处，产生了与缝的方向基本一致的扩展裂纹，这裂纹的扩展可以导致钢锭模的破坏严重而报废。

(2) 窄缝经多次反复地加热和水浴，缝口变宽。这可能导致实际钢锭模在浇钢时钢水外溢。

为此设计了模型Ⅲ（见图 2），对模型Ⅰ作出了改进。模型Ⅲ的窄缝在下部不贯通。在两端圆孔处塞入松配合的金属圆柱体，以防止水浴时，水对孔边的热冲击。

在与前述同样的试验条件下进行热疲劳试验，经 76 热疲劳循环，由模型Ⅲ的表面龟裂破坏情况（照片从略）可以看出：

- (1) 模型的开缝部分龟裂程度比未开缝部分龟裂程度明显减轻。
- (2) 圆孔周围不再出现粗大的裂纹，仅有沿各方向微细裂纹出现。
- (3) 缝口的变形明显减小。

因此由模型试验可以说明：经开缝处理的模型Ⅲ，由于放松了周向约束，明显延缓和降低了模子的龟裂的产生和发展，为钢锭模结构的改进提供了实验依据。

2 试验模型和实际钢锭模的应力分析

为了弄清模型Ⅲ能够减缓热疲劳龟裂破坏的原因，对模型Ⅲ和未开缝的模型（模型Ⅰ）

在水浴过程中的应力变化进行了分析，应力分析时 2 种模型都作为平面应变问题来处理，应力分析涉及到：

(1) 由于水浴时的激烈冷却，热应力已超过材料屈服点，所以该问题属于弹塑性应力问题。

(2) 水浴过程中，温度变化很快，模型内的温度场是瞬态的温度场，应力场也是瞬态的应力场。

(3) 水浴过程中温度变化范围很大，从 $100\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，必须考虑材料性质随温度变化而变化的问题。

温度场及热应力分析用有限单元法进行计算。采用 8 结点等参数单元，模型Ⅲ和模型Ⅰ的温度场分析和应力场分析计算均用同一单元和结点的划分，将该瞬态非线性过程按时间进行变时间步长的划分，每个阶段按准静态问题处理。单元划分如图 4(表示截面的 1/4 部分)。

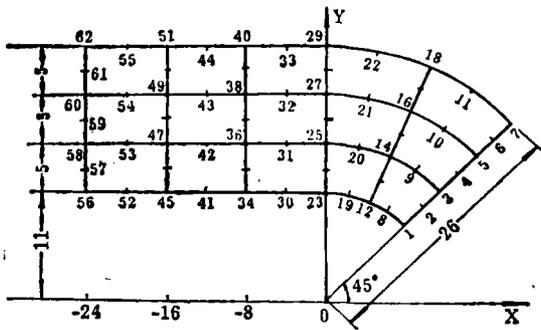


图 4 温度场及应力场有限元计算的单元划分

Fig. 4 The finite element mesh for the computation of temperature and stress field

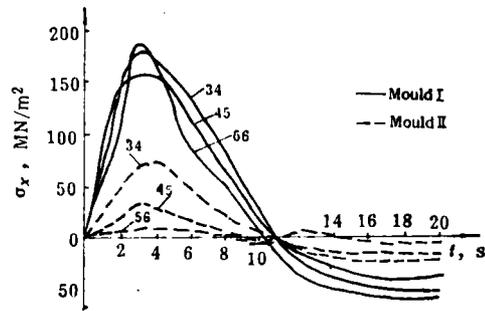


图 5 水浴时 σ_x 的度化

Fig. 5 Change of σ_x at bath

由于温度场和应力场分析的原理和过程的内容较多，将另文论述，本文仅将分析结果表述如下：

(1) 模型Ⅰ、Ⅲ中应力 σ_y 很小不起主导作用。 σ_x 较大是引起龟裂的主要因素，模型Ⅰ和Ⅲ各自的内、外壁，因热传导条件相似，应力大小和方向相差不大，模型表面应力分布规律以内壁情况为例进行分析讨论。

(2) 模型Ⅰ和模型Ⅲ的 σ_x 的分布见图 5，可以看出；模型Ⅲ的内表面 σ_x 明显减小，特别是在缝的附近， σ_x 趋近于零。

(3) 由图 5 看出内表面（外表面也一样）在水浴初期受拉应力，水浴结束后残余应力为压应力。而模壁内部各点在水浴初期受压应力，后期受拉应力。

(4) 计算表明模型Ⅰ内外表面的应力已超过材料的屈服强度，而模型Ⅲ在窄缝附近的内外表面应力低于材料的屈服强度。

因此，可以看出水浴过程初期的应力 σ_x 是造成龟裂的主要原因，进行开缝处理以放松周向约束的模型Ⅲ，在缝的附近 σ_x 大大低于模型Ⅰ，这样就减缓了热疲劳龟裂的形成和发展。

同样，还对唐山钢铁公司第二炼钢厂使用的钢锭模进行了应力分析（分原型的钢锭模和经开缝处理的钢锭模 2 种），实际钢锭模和模型Ⅰ、Ⅲ的计算有一大的区别是：模型是均匀加热，因而对模型进行应力分析时认为：水浴前模型内处于零应力状态。在实际钢锭模的分

析中, 考虑到浇铸时钢锭模上温度分布不均匀, 壁厚上有 160°C 的温度梯度, 模的横向有 80°C 温差。因此, 在脱模后水浴前模内已有一个不均匀分布的温度场, 产生了不均匀的应力场。水浴过程的应力是把脱模后的热应力作为该过程的初始应力来进行分析的。

实际钢锭模在水浴过程中的应力变化见图 6, 它说明模的内壁应力较大, 已超过材料屈服强度许多。这里屈服应力是对应于塑性应变为 0.05% 的应力, $\bar{\sigma}$ 为应力强度

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

这个分析说明了实际钢锭模在底板上部 200~300mm 处, 内壁中部破坏最为严重的原因。

图 7 说明实际钢锭模进行开缝处理, 放松周向约束后, 水浴过程中模内壁的塑性应变减小, 并可以提高钢锭模的寿命。这里 $\bar{\epsilon}_p$ 为塑性应变强度 ϵ_1^p 、 ϵ_2^p 、 ϵ_3^p 为主方向的塑性应变

$$\bar{\epsilon}_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1^p - \epsilon_2^p)^2 + (\epsilon_2^p - \epsilon_3^p)^2 + (\epsilon_3^p - \epsilon_1^p)^2}$$

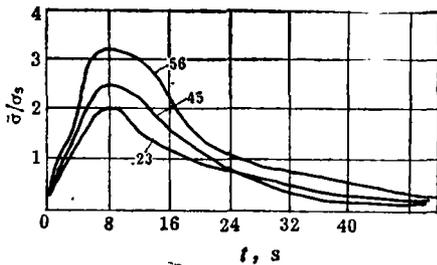


图 6 钢锭模中 $\bar{\sigma}$ 的变化

Fig. 6 Change of $\bar{\sigma}$ in the ingot mould

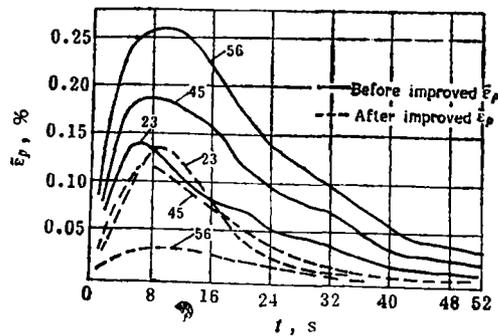


图 7 钢锭模中 $\bar{\epsilon}_p$ 的变化

Fig. 7 Change of $\bar{\epsilon}_p$ in the ingot mould

(注: 图 5 ~ 图 7 曲线上的标号, 即图 4 上的结点号)

3 结 论

- (1) 可以在实验室条件下用模型试验来模拟钢锭模的热疲劳破坏。
- (2) 中型钢锭模水浴冷却时, 热应力值很高, 早已超过材料的屈服强度 σ_x (周向应力), 是引起热疲劳破坏的主要原因。
- (3) 用开缝处理放松钢锭模的周向约束, 可以大大降低热应力, 减缓热疲劳龟裂的产生和发展。

参 考 文 献

- 1 Young R M. *The Society of Die Casting Engineers, INC.* 1975; (3); 1 ~ 8
- 2 Young W. *The Society of Die Casting Engineers, INC.* 1979; (3)