

热应力对金属棒料内部损伤的机理研究

张立军¹, 赵升吨², 唐勇²

(1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 257061, 山东东营; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对棒料热应力变频振动的下料方法,建立了带V型槽棒料在分段强制冷却过程中的热应力耦合模型,利用ANSYS有限元软件,获得了棒料在强制循环水冷却过程中内部应力场的分布.数值模拟结果表明,棒料内部最大拉应力点位于V型槽尖端正下方0.34 mm附近,该处的轴向拉应力已超过材料的强度极限,在V型槽所在棒料断面上靠近尖端点处产生一条环形损伤带,在水流速度下,该损伤带随着绝热边界宽度的增加先增大后减小,存在一个大约2 mm宽的最佳绝热边界,可使损伤的程度达到最大.在等绝热边界宽度下,损伤带随着水流速度的增加逐渐地增大,当水流速度大于5 m/s时,对棒料的内部损伤较小.实验结果表明,有热应力作用比无热应力作用的棒料下料时间减少了15%以上,从而验证了热应力损伤对棒料下料作用的有效性.

关键词: 热应力;金属棒料;损伤带

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0099-04

Inner Damage Mechanism of Metal Bar with Thermal Stress

ZHANG Lijun¹, ZHAO Shengdun², TANG Yong²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To obtain the inner damage mechanism of a new type of thermal stress precision cropping bar. A thermal stress coupling model of the bar with an annular V-shaped notch in the course of cooling was established. The stress field in the inner of the bar was evaluated by means of ANSYS software. The numerical simulation results show that the axial tension stress gets maximum at 0.34 mm from the bottom of the tip of the V-shaped notch on the bar cross-section. As the maximal stress and its nearby stress exceed the ultimate yield strength of the material, an annular damage strip in the bar cross-section of the V-shaped notch and close to V-shaped notch tip appears. At the same cycle cool water velocity, the damage strip increases and then decreases with the increase of width of adiabatic boundary, and reaches to the maximum when the width of adiabatic boundary is 2 mm. With the same width of adiabatic boundary, the damage strip increases with the increase of water velocity, and it changes feebly when the water velocity is greater than 5 m/s. The damage strip disappears when the water velocity is equal to 1 m/s. The cropping experimental results show that the cropping time, by heat stress prefabricating an ideal crack at V-shaped notch bottom, is reduced by 15% compared with the simplex variable-frequency vibration cropping method without the action of the heat stress, which validates the thermal stress behaviors.

Keywords: thermal stress; metal bar; damage strip

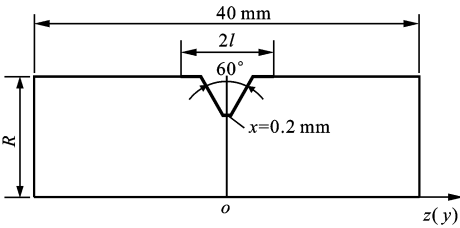
金属棒料的下料被广泛地应用于工业生产中,目前传统的下料方法均不同程度地存在着材料利用率低、下料力大、能耗高、生产效率低以及下料断面质量差等问题^[1-2]. 为此,课题组研究人员在全面深入地分析了金属棒料常见下料方法存在问题的基础上,基于“削强增脆”的下料思想,提出了一种综合利用热应力、变频振动和疲劳裂纹扩展等原理的新的下料方法,即热应力变频振动下料法^[3-4]. 该方法是将预制好 V 型槽的金属棒料放入中频电加热炉中加热到规定的温度^[5],出炉后采用分段快速强制循环压力水冷却的方法,在棒料的轴向分段形成不同的温度场在其内部造成热应力. 由于 V 型槽的应力集中作用,该热应力使 V 型槽尖端的轴向拉力较大,因此将在 V 型槽底部产生微小裂纹,然后利用变频疲劳振动下料机进行低应力下料.

由于产生微小裂纹的热应力会直接影响下料时间,因此本文提出了棒料内部本质点和非本质点损伤的概念. 利用数值模拟技术,探讨了带 V 型槽棒料在分段强制冷却时内部不同点的热应力变化规律,同时分析了绝热边界的宽度和水流速度参数对由热应力作用所带来的棒料内部损伤量的影响规律,并通过对 45 钢和 20 钢棒料的下料实验,进一步验证了本文提出的损伤机理的正确性.

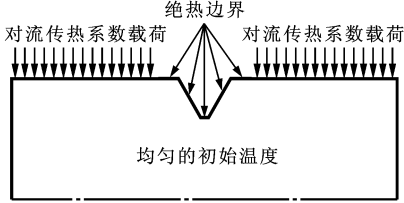
1 棒料内部冷却时热应力场的分析

为了探讨热应力预制棒料 V 型槽尖端微小裂纹的形成机理,本文利用 ANSYS 有限元软件对其进行了研究,棒料在冷却过程中的有限元轴对称模型及边界条件如图 1 所示. 在棒料初始加热温度为 500 ℃、冷却水温度为 20 ℃、水流速度 v 为 2 m/s、绝热边界宽度 l 为 2 mm、棒料的半径 R 为 7.5 mm 的条件下,对 20 钢棒料进行实验,在开始的几秒钟内,棒料内部热拉应力变化最快,数值最大的均为 926 节点,而且该点所处区域正好位于 V 型槽尖端 2 节点的正下方附近(大约 0.34 mm 处).

通过对棒料 V 型槽尖端附近处的温度场、应力场进行多次耦合分析,得到棒料内部 926 节点与 2 节点轴向拉应力 σ_y 与冷却时间 t_c 的曲线如图 2 所示. 从图 2 中可以看出,在开始喷水时,由于没有受到冷却的棒料表面的急剧收缩,V 型槽底部附近的 926 节点从整体上表现为受拉应力,并且迅速达到峰值. 随着冷却时间的增加, σ_y 在水平方向逐渐降低,并逐渐转变为压应力,随后压应力水平越来越高,直到逐渐趋于稳定值,即表现为棒料内部的残余



(a)数学分析模型



(b)边界分析和载荷的施加情况

图 1 带 V 型槽棒料的有限元分析模型^[6]

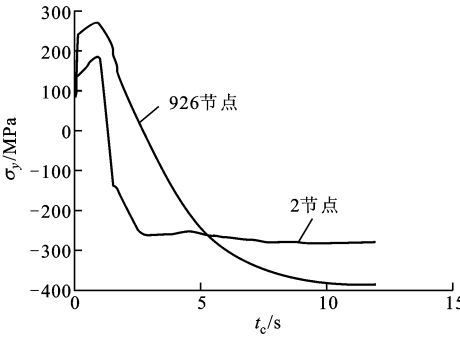


图 2 926 节点和 2 节点的轴向拉应力与时间曲线

压应力. 从图 2 中还可以看出,926 节点轴向拉应力的峰值明显大于 2 节点. 对 926 节点和 2 节点的轴向拉应力和 Von Mises 等效应力进行了比较,结果分别如图 3 和图 4 所示.

由图 3 可知,2 节点的轴向拉应力没有越过其强度极限,而 926 节点的拉应力已经越过强度极限. 由图 4 可知,位于 V 型槽底部的 2 节点很快就进入了屈服区,而 926 节点基本上没有进入屈服区,由于缺口三向应力的存在,使缺口附近的屈服强度提高,最大轴向拉应力的点不是其尖端点,而是最接近于

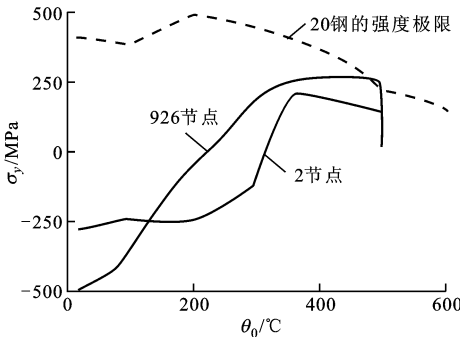


图 3 轴向拉应力与温度曲线

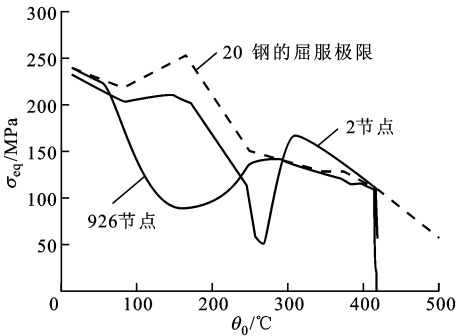


图 4 Von Mises 等效应力与温度曲线

弹塑性边界区域的点,这与文献[6-7]中的结论也是相一致的。

2 棒料内部热应力损伤机理的探讨

棒料本身存在的微孔或微洞等近似点状的损伤为本质点损伤,而由热应力造成的棒料内部微小损伤则属于非本质点损伤. 在热应力的作用下,当材料内部某点的轴向拉应力达到强度极限时,即认为该点产生了热应力损伤. 这种非本质点损伤的影响主要体现为:当棒料内部中某点产生损伤后,随着冷却过程的进行,在该损伤点周围,其轴向热应力达到材料强度极限的其他一些点也将会产生损伤,而其轴向热应力不能达到材料强度极限的一些点虽然在此时没有对棒料内部产生实际损伤,但却属于潜在损伤. 在 $v=4\text{ m/s}$ 、 $l=2\text{ mm}$ 时,以棒料中最大轴向拉应力 926 节点为基准,取有限元模型径向上最靠近 926 节点的 927、913、1 113 和 1 659 节点分别进行热应力分析,其轴向拉应力与材料的强度极限之间的关系如图 5 所示. 从图 5 中可以看出,棒料内部 926 节点的轴向拉应力随温度的变化曲线是先与材料的强度极限随温度的变化曲线相交,然后再与 926 节点左右两侧最近的 1 113 节点和 913 节点相交,此时 1 659 和 927 节点都没有与材料的强度极限随温度的变化曲线相交,则认为没有在该处产生裂纹,但它们由于距离 926 节点很近,因此属于潜在的热应力损伤点,但不包括在损伤带中.

由损伤力学^[8]可知,各向同性损伤变量为

$$D = 1 - \frac{A_1}{A} = \frac{(r_0 - x)^2 - (r_0 - x - w)^2}{r_0^2}$$

式中: w 为损伤带的宽度; r_0 为 V 型槽所在截面处棒料的直径; A_1 、 A 分别为 V 型槽所在截面的面积和未被损伤的面积; x 为棒料内部损伤带的最外侧点在径向上与相应 V 型槽尖端之间的距离,如图 6 所示.

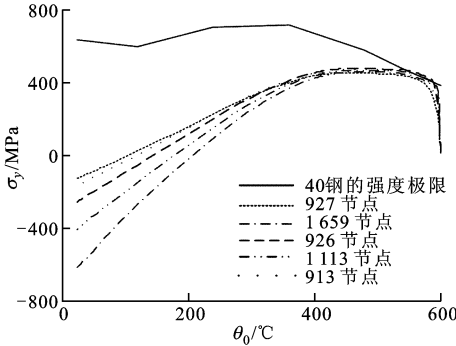


图 5 轴向拉应力与强度极限的关系

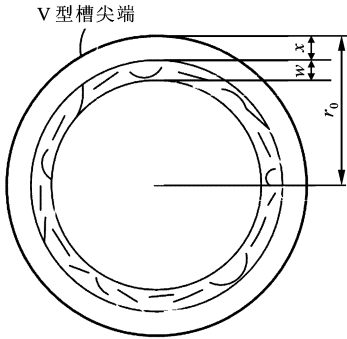


图 6 棒料的内部损伤带示意图

2.1 绝热边界的宽度对损伤量的影响

在 $v=4\text{ m/s}$ 、 $l=1, 2, 3, 4\text{ mm}$ 时,由热应力造成的棒料内部损伤的情况如表 1 所示. 当 $l=5, 0\text{ mm}$ 时,棒料内部均没有产生损伤.

表 1 不同绝热边界宽度下棒料内部的损伤

l/mm	w/mm	x/mm	D
1	0.078 9	0.328 5	0.024 7
2	0.114 3	0.259 1	0.036 1
3	0.093 5	0.245 8	0.029 6
4	0.076 2	0.250 2	0.024 2

从表 1 中可以看出,在相同的水流速度下,随着绝热边界宽度的增加,由于热应力的作用,棒料内部的损伤是先增大后减小,因此有一个最佳的绝热边界能使损伤的程度达到最大.

2.2 水流速度对损伤量的影响

在 $l=2\text{ mm}$ 、 $v=2, 3, 4, 5\text{ m/s}$ 时,由热应力造成的棒料内部的损伤如表 2 所示. 从表 2 中可以看出,棒料内部损伤量的总变化趋势是在相同宽度的绝热边界下,随着水流速度的增加,棒料的损伤程度也在逐渐地增大,但随着水流速度的不断增加,损伤量增加的幅度却越来越小,在 $v=1\text{ m/s}$ 时,棒料内部没有产生损伤,当 v 大于 5 m/s 时,棒料内部的损

伤量变化并不大.

表 2 不同水流速度下棒料内部的损伤

$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	w/mm	x/mm	D
2	0.046 4	0.293 7	0.014 6
3	0.104 5	0.248 3	0.033 1
4	0.114 3	0.259 1	0.036 1
5	0.122 8	0.250 2	0.038 8

3 棒料热应力的下料实验

棒料的几何参数与数值模拟时相同,每次的频率递减量 $\Delta f=0.01\text{ Hz}$,每个频率的持续时间 $\Delta t=20\text{ ms}$.在不同的初始频率下,对每节 45 钢棒料在同一圆周表面的不同位置处施加激振力进行下料实验,得到的在有无热处理作用下的实验结果如表 3 所示.在初始频率为 25 Hz 、 $\Delta f=0.01\text{ Hz}$ 以及不同 Δt 的作用下,对每节 20 钢棒料的下料实验如表 4 所示.

实验发现,在同一圆周表面的不同位置上对每节棒料施加激振力后,所得到的下料时间均相同,证明了在棒料 V 型槽上存在着环形损伤带.通过表 3 和表 4 中的实验结果还可以看出,经过热处理的棒料下料所需的时间明显比未经过热处理直接下料所需的时间要少,均减少了 15% 以上.棒料实验装置现场如图 7 所示,包括箱式电阻加热炉和循环水强制冷却系统,将热应力作用后的棒料采用线切割的方法沿直径方向剖切开后,观察热应力作用后的损伤情况.从图 8 中可看出,热应力作用后已在棒料 V 型槽底部产生了裂纹,从而验证了热应力损伤对棒料下料作用的有效性.

表 3 45 钢棒料变频振动下料的实验结果

热应力状态	f_0/Hz	$\Delta f/\text{Hz}$	$\Delta t/\text{ms}$	耗时/s
有	25	0.01	20	20.14
无	25	0.01	20	26.06
有	30	0.01	20	27.47
无	30	0.01	20	32.65

表 4 20 钢棒料变频振动下料的实验结果

热应力状态	f_0/Hz	$\Delta f/\text{Hz}$	$\Delta t/\text{ms}$	耗时/s
有	25	0.01	20	21.08
无	25	0.01	20	25.06
有	25	0.01	50	46.50
无	25	0.01	50	62.89

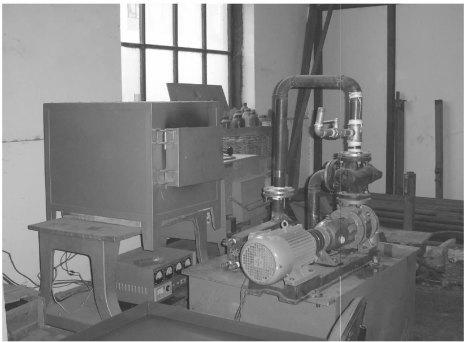


图 7 棒料热应力实验装置

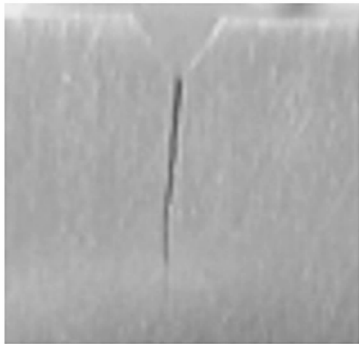


图 8 V 型槽底部的损伤剖面

4 结 论

(1)棒料内部热应力变化最快的节点也正是最终的轴向拉应力的最大值点,该点最接近于弹塑性边界区域,并位于 V 型槽尖端正下方 0.34 mm 处.

(2)定义了热应力作用下带 V 型槽棒料内部本质点的损伤和非本质点的损伤.采用热应力方式在棒料内部 V 型槽尖端附近产生的微小热裂纹实际上是一条具有一定宽度的微小损伤带.

(3)由于热应力的作用,在相同的水流速度下,损伤带随着绝热边界宽度的增加先增大后减小,存在 2 mm 宽的最佳绝热边界,因此可使损伤的程度达到最大.在相同宽度的绝热边界下,损伤带随着水流速度的增加逐渐地增大,当水流速度大于 5 m/s 时,棒料内部损伤量的变化不大,而水流速度等于 1 m/s 时则不产生热应力损伤.

(4)对 20 钢和 45 钢棒料的下料实验结果表明,带有 V 型槽的棒料存在热应力损伤的下料时间比无热应力作用的棒料的下料时间减少了 15% 以上.

参考文献:

[1] 顾海澄,何家文. 节约金属材料手册 [M]. 北京:机械

工业出版社,1995:128-166.

[2] CHAN L C, LEE T C. Experimental study on the shearing behaviour of fine-blanking versus bar cropping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 8(80/81):126-130.

[3] HUA Chunjian, ZHAO Shengdun, ZHANG Lijun, et al. Investigation of a new-type precision cropping system with variable-frequency vibration [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48 (12): 1333-1340.

[4] ZHANG Lijun, ZHAO Shengdun, LEI Jing, et al. Investigation on the bar clamping position of a new type of precision cropping system with variable frequency vibration [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7/8):1125-1131.

[5] 潘天明. 工频和中频感应炉 [M]. 北京:冶金工业出版社,1983:45-46.

[6] 张立军, 赵升吨, 柳伟, 等. 棒料热应力预制裂纹的数值模拟研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (23): 2512-2516.

ZHANG Lijun, ZHAO Shengdun, LIU Wei, et al. Numerical investigation of ideal fracture caused by thermal stress [J]. China Mechanical Engineering, 2006,17(23):2512-2516.

[7] 石德珂. 材料力学性能 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1998:50-52.

[8] 楼志文. 损伤力学基础 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1991:56-57.

(编辑 管咏梅)