

马氏体相变对堆焊冷却切向应力影响的数值模拟

周野飞¹, 韩超¹, 刘利刚², 杨育林², 杨庆祥¹

(1. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要: 采用红外热像仪和 X 射线应力仪分别测定了热轧辊钢堆焊过程的温度场和残余应力场, 根据试验数据和材料的物理、力学参数, 采用二维有限元计算方法, 建立了堆焊应力场模型, 对切向残余应力进行了数值模拟, 模拟结果与测量结果相吻合, 证明所建立的模型有效性。根据这一模型, 对热轧辊钢堆焊冷却过程发生马氏体相变前后切向应力进行了数值模拟。模拟结果表明, 在堆焊冷却过程中, 当发生马氏体相变时, 试样表面出现切向压应力, 随着冷却时间的延长, 马氏体数量增多, 试样表面开始出现较大的切向拉应力, 并保持到室温。

关键词: 热轧辊钢; 堆焊; 切向应力; 数值模拟; 马氏体相变

中图分类号: TG421 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)02-0073-04



周野飞

0 序 言

热轧辊是轧钢生产过程中的关键部件。热轧辊因热疲劳和磨损而报废。报废的热轧辊可以采用堆焊的方式修复, 以恢复其形状、尺寸, 并获得更优异的使用性能^[1]。热轧辊钢由于碳当量较大, 其堆焊金属的硬度较高, 而塑性差。同时堆焊快速冷却条件下还必然在低温时发生马氏体相变, 使堆焊焊后易产生裂纹^[2]。堆焊裂纹不仅在残余应力场的作用下产生, 而且在堆焊冷却过程中动态应力的作用下也可能产生。因此研究堆焊后的残余应力场和冷却过程的应力场是非常重要的。然而到目前为止仅能测量堆焊后表面残余应力^[3], 而堆焊冷却过程中随时间变化的切向应力难以测量, 特别是对热轧辊钢冷却过程中发生马氏体相变对应力状态的影响尚无报道。同时, 堆焊开裂还与应力状态有关。一般情况下, 堆焊裂纹主要在切向应力的作用下生成^[4]。因此文中首先对热轧辊钢堆焊温度场和残余应力场进行测量, 然后建立有限元模型, 对其进行数值模拟, 并与测量结果进行比较, 证明其有效性。在对热轧辊钢堆焊冷却过程中发生马氏体相变前后径向应力场进行数值模拟基础上^[5], 对切向应力场进行了数值模拟。

1 试验方法

试样为 90 mm × 90 mm × 24 mm 的典型热轧辊 60CrMnMo 钢, 在试样中央钻一个 $\phi 22$ mm × 2 mm 的小孔, 选用添加稀土和金属镍的高抗开裂焊条, 采用焊条电弧焊填充小孔。堆焊时间为 16 s, 焊接电流为 100 A。

采用 Thermal-vision 780 型的红外热像仪, 垂直于试样表面进行堆焊后冷却过程温度场的测量。堆焊冷却后残余应力场是采用 ASTX2001 型高级 X 射线应力分析仪测量。将堆焊试样从中间切开, 采用准直器沿半径方向等间距测量截面上切向残余应力。采用 ANSYS 软件对试样堆焊冷却过程的温度场和应力场进行了有限元模拟计算。在计算过程中, 正方形的试件可简化为以边长为直径的圆盘。在这种情况下, 温度场和应力场可作为轴对称模型来处理, 其单元划分及边界条件如图 1 所示。在对有限元模型进行网格划分时, 为提高运算精度, 堆焊区域的网格进行了细分; 为缩短运算时间, 远离堆焊区的基体区域的单元尺寸较大, 共划分 241 个网格, 节点总数为 263, 其中带点划线的区域为加热单元, 即为堆焊区域。

在模拟过程中, 密度(ρ)、弹性模量(E)和泊松比(ν)等参数可视为常数, 且 $\rho = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$, $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$ 。其它参数见表 1^[6-8]。传热系数按下列方程进行计算^[9], 即

收稿日期: 2010-11-24

基金项目: 河北省科技支撑计划资助课题项目(09215106D); 河北省百名优秀人才支持计划(SPRC021)

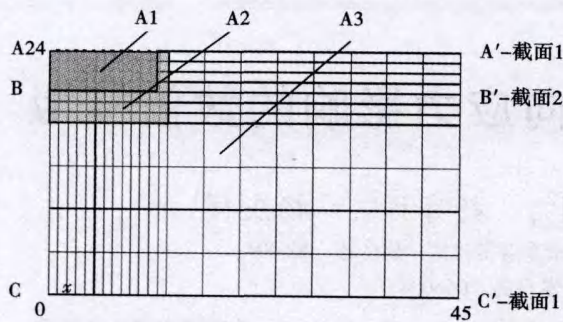


图1 单元划分及约束条件

Fig. 1 Mesh division and restrained condition

$$k = 2.2(T_w - T_c)^{0.25} + 4.6 \times 10^{-8}(T_w^2 + T_c^2) \quad (T_w + T_c) \quad (1)$$

式中: T_w 是试样温度; T_c 是环境温度。

在模拟过程中,考虑了马氏体相变的影响. 母材和堆焊金属的马氏体相变点从 Formaster-D 型全自动快速膨胀仪上获得的曲线上测定的. 试样尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 一端有 $\phi 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 小孔. 使用切线法测量了基体 60CrMnMo 钢和采用添加稀土和金属镍元素的焊条堆焊金属马氏体相变开始温度 (M_s) 和结束温度 (M_f), 见表 2. 为了简化计算, 取加热温度为 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$, 用于应力计算的不同区域的线膨胀系数 (α_l) 列于表 3. 基于马氏体相变, 试样截面 (图 1) 可以分为三个区域, 即发生马氏体相变的堆焊区 (A1)、发生马氏体相变的热影响区 (HAZ) (A2) 和基体 (A3).

表 1 用于有限元计算的 60CrMnMo 钢力学和热物理参数

Table 1 Mechanical and thermo-physical parameters of 60CrMnMo in FEM

温度 $T/^\circ\text{C}$	热导率 $\lambda/(10^{-3} \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	平均比热容 $c/(10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	比焓 $H/(10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1})$	传热系数 $k/(10^{-6} \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
200	41.9	0.502	100	18.85
400	39.4	0.536	214	33.44
600	32.3	0.586	352	55.95
800	29.1	0.695	557	88.92
1 000	26.5	0.674	674	134.6
1 200	29.4	0.670	804	195.4
1 400	29.4	0.670	804	273.4
1 600	29.4	0.670	804	370.9

表 2 不同材料马氏体的相变温度

Table 2 Martensite transformation temperature at different peak temperatures during thermal circulation process

材料	温度 $T/^\circ\text{C}$	相变开始温度 $M_s/^\circ\text{C}$	相变结束温度 $M_f/^\circ\text{C}$
60CrMnMo 钢	800	230	135
	1 000	225	130
	1 200	215	125
堆焊金属	800	330	228
	1 000	325	223
	1 200	322	160

堆焊冷却切向应力的变化还与材料的屈服强度有关. 在堆焊过程中, 当发生由奥氏体向马氏体转变时, 材料的屈服强度会发生突变. 如 A1 区, 当冷却到马氏体相变温度时, 将发生由奥氏体向马氏体的转变, 屈服强度发生跃变, 并且随着马氏体量的增多, 屈服强度增大. A2 区与 A1 区类似. A3 区为调质状态, 不发生相变, 仅随温度降低, 屈服强度增大. 根据材料屈服强度随温度的变化关系^[7], 材料塑性转变温度选为 $600\ ^\circ\text{C}$, 当材料开始处于塑性状态时, 屈服强度为 0 MPa .

表 3 用于应力场计算的线膨胀系数

Table 3 Expansion coefficient for stress simulation

A1 区		A2 区		A3 区	
温度 $T_1/^\circ\text{C}$	线膨胀系数 $\alpha_{l1}/10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	温度 $T_2/^\circ\text{C}$	线膨胀系数 $\alpha_{l2}/10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	温度 $T_3/^\circ\text{C}$	线膨胀系数 $\alpha_{l3}/10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
50	10.5	50	10.5	50	10.5
100	11.8	125	11.8	100	11.8
150	12.9	130	-11.7	150	12.9
220	13.9	200	-11.7	200	13.9
225	-11.7	225	-11.7	250	14.7
300	-11.7	230	14.7	300	15.4
325	-11.7	300	15.4	350	15.9
330	15.9	350	15.9	400	16.2
600	16.7	600	16.7	600	16.7
1 600	16.7	1 600	16.7	1 600	16.7

2 试验结果与分析

2.1 堆焊后温度场的测量和计算结果

图 2 为在不同位置试件表面温度分布的实测结

果和计算结果. 可以看出, 实测结果和计算结果二者之间相差不大, 验证了温度场模型的正确性, 能够用于进一步计算堆焊后试样的应力场.

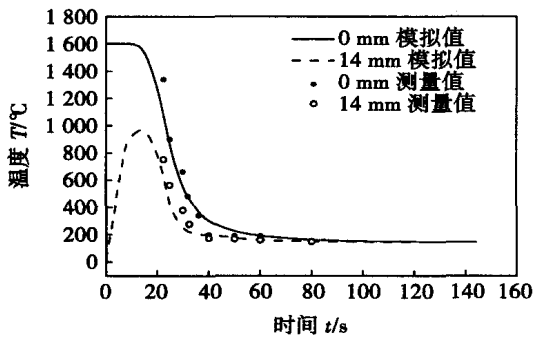


图2 不同位置实测与模拟温度循环曲线

Fig. 2 Temperature field measured and simulated at different positions

2.2 堆焊后残余切向应力场的测量和计算结果

堆焊后切向残余应力场的实测结果和计算结果如图3所示. 从图3可以看出, 试验结果和模拟分析结果在分布趋势上基本吻合. 因此这一过程可以用于堆焊后冷却过程的进一步模型化计算.

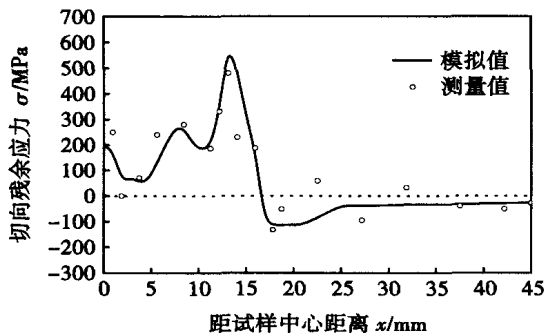


图3 实测与计算切向残余应力的比较

Fig. 3 Comparison of measured and calculated of tangential residual stress

2.3 马氏体相变对堆焊冷却过程切向应力的影响

在堆焊过程中, 当试样由奥氏体向马氏体转变时, 一方面由于体积膨胀将会产生压应力; 另一方面奥氏体转变为马氏体, 其屈服强度急剧增大, 随温度的降低, 将会产生拉应力. 对发生马氏体前后的切向应力状态进行了数值模拟. 使用表1中的参数, 考虑冷却过程中的马氏体相变, 对冷却过程中的切向应力变化进行了计算.

当堆焊熔池开始凝固时 ($t = 16$ s), 试样中心和热影响区的温度高于 600 °C, 由于 600 °C 被认为是

金属弹塑性转变温度, 因此其所受应力为零. 而母材由于受热膨胀而承受较大的压应力, 如图4所示.

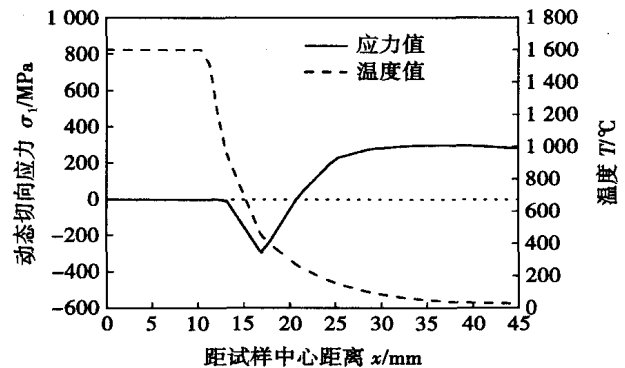


图4 $t = 16$ s 时试件上表面的动态切向应力变化

Fig. 4 Tangential stress on upper surface when $t = 16$ s

当冷却到 31 s 时, 热影响区开始发生马氏体转变, 金属膨胀, 引起压应力. 因此在这一区域压应力开始增大, 如图5所示.

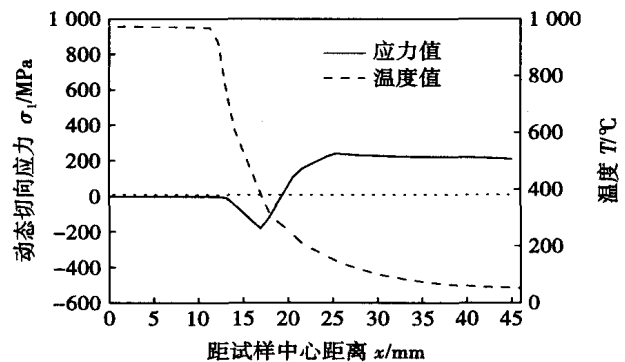


图5 $t = 31$ s 时试件上表面的动态切向应力变化

Fig. 5 Tangential stress on upper surface when $t = 31$ s

随温度进一步降低, 由于马氏体数量不断增加, 使堆焊金属的强度不断增加, 从而使压应力减少, 而拉应力不断增加. 当冷却到 36 s 时, 堆焊金属的温度已低于金属弹塑性转变温度, 出现拉应力. 随着进一步冷却, 拉应力值逐渐增大, 如图6所示.

随着温度进一步降低, 马氏体数量增加, 堆焊金属的压应力逐渐减少, 并且逐渐转变为拉应力. 当冷却到 180 s 时, 整个试样温度分布趋于一致, 达到室温, 因此此时的应力可视为残余应力, 如图7所示.

2.4 堆焊冷却过程切向应力随时间变化规律

分析了堆焊金属中心 (A1)、近离母材热影响区 (A2) 和远离母材热影响区 (A3) 三个位置点的应力变化, 如图8所示.

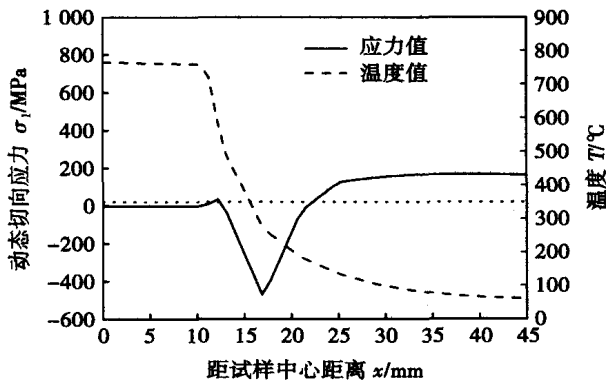
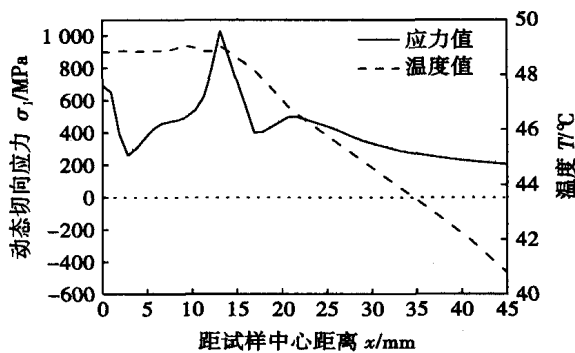
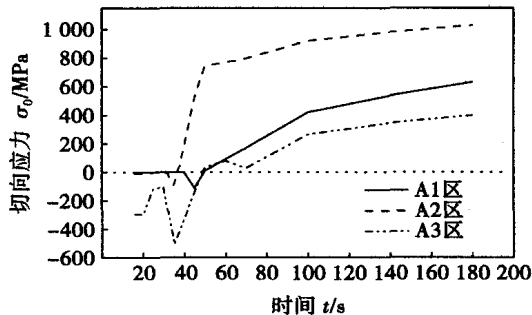
图6 $t=36$ s时试件上表面的动态切向应力变化Fig. 6 Tangential stress on upper surface when $t=36$ s图7 $t=180$ s时试件上表面的动态切向应力变化Fig. 7 Tangential stress on upper surface when $t=180$ s

图8 堆焊金属心部及热影响区切向应力冷却时随时间变化

Fig. 8 Tangential stress of hardfacing metal center and HAZ with different cooling time

在堆焊后冷却初期,由于温度较高,三个位置的切向应力都接近于零.随着温度降低,母材热影响区先发生马氏体相变,出现切向压应力.在母材热影响区压应力达到最大值后,堆焊金属开始发生马氏体相变,出现压应力.随着时间延长,马氏体数量增多,堆焊金属强度不断增加,切向拉应力急剧增加.由图8还可以看出,对于母材热影响区,在冷却接近40 s时,切向拉应力急剧升高,到45 s时,拉应

力的数值已经接近残余切向拉应力(室温)的数值.

3 结 论

(1) 模拟的温度分布和残余应力分布与实测结果相吻合,证明采用二维有限元所建立的温度场模型和应力场模型是有效的.

(2) 模拟结果表明,在堆焊冷却过程中,发生马氏体前后的切应力有较大的变化,当发生马氏体相变时,试样表面出现切向压应力,随着冷却时间的延长,转变为较大的切向拉应力,并直到室温.

参考文献:

- [1] 沈凤刚,刘景凤.冶金轧辊堆焊技术综述[J].中国表面工程,2006,19(3):14-22.
Shen Fenggang, Liu Jingfeng. Summarization of hard surfacing technology for metallurgical rollers[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(3): 14-22.
- [2] 杨庆祥,任学军,廖波,等.稀土氧化物对堆焊金属抗开裂性的影响[J].稀土学报,1998,16(4):295-299.
Yang Qingxiang, Ren Xuejun, Liao Bo, et al. Effect of RE oxide on cracking resistance of hardfacing metal[J]. Journal of Rare Earths, 1998, 16(4): 295-299.
- [3] Mochizuki M, Hayashi M, Nakagawa M. Residual stress estimation at welded point of a pipe penetrating a thick plate[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1996, 62(5): 1250-1255.
- [4] Wikander L, Karlsson L, Nasstrom M. Finite element simulation and measurement of welding residual stresses[J]. Materials Science and Engineering, 1994, 2(4): 845-864.
- [5] Li Da, Liao Bo, Liu Ligang, et al. Process stress simulation of medium-high carbon steel after hard-face-welding during martensite transformation[J]. Computational Materials Science, 2008, 44(2): 280-385.
- [6] Argyris J H, Szimmat J, Willam K J. Computational aspects of welding stress analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 33(1-3): 635-665.
- [7] 工程材料实用手册编辑委员会.工程材料实用手册(一)[M].北京:中国标准出版社,1988.
- [8] Wohlbiel F H. Mechanical properties of metal and alloys[M]. Ohio: Trans Tech Publications, 1978.
- [9] Touloudian Y S. Thermo-physical properties of matter[M]. New York: IFL/Plenum, 1970.

作者简介:周野飞,男,1985年出生,博士研究生.主要从事特种焊接材料的研发与焊接过程数值模拟方面的工作.发表论文4篇.
Email: yfzhou@ysu.edu.cn

通讯作者:杨庆祥,男,教授,博士研究生导师. Email: qxyang@ysu.edu.cn