

## 带有相变的三维温度场数值模拟

姚国凤<sup>1</sup>,陈光南<sup>1</sup>,张凌雯<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所,北京 100080;2. 吉林省交通学校 基础科学系,长春 130021)

**摘要:**以激光熔凝表面强韧化处理为背景,应用空间的弹塑性有限单元和高精度的数值算法,同时考虑材料组织性能的变化来模拟材料的温度场。主要研究激光熔凝加工中瞬时温度场数值模拟,同时考虑相变潜热的影响,为第二步热应力场及残余应力的数值模拟做准备。最后用算例验证了模型的正确性,并给出了不同时刻温度场的分布。

**关键词:**激光熔凝加工;温度场;数值模拟

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2002)05-0014-03

## Numerical Simulation of 3D-thermal Field with Phase Transformation

YAO Guo-feng<sup>1</sup>, CHEN Guang-nan<sup>1</sup>, ZHANG Ling-wen<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Department of Basic Science, Jilin College of Traffic Profession Technique, Changchun Jilin, 130021, China)

**Abstract:** The numerical simulation of thermal field in laser processing has been studied in this paper. The 3D (three dimensions) finite element model of transient thermal calculation has been given by thermal conductive equation. The effects of latent heat of transformation have been considered. Finally numerical example was given to verify the model.

**Key words:** laser melting process; thermal field; numerical simulation

随着对材料表面的高硬度、耐腐蚀、抗氧化、抗疲劳等性能的要求,表面强化处理及表面改性的研究已成为世界的研究热点之一,主要采用高能束流表面改性技术,其中激光束占有重要地位,激光熔凝加工是材料表面强韧化处理的一种手段,激光熔凝加工是一个快速加热快速冷却的过程,与普通表面处理有本质区别,现在激光熔凝加工技术还不够完善,主要表现是加工过的表面常出现微裂纹,从而使表面加工达不到工艺要求,其主要诱导原因之一是残余应力,为了使激光熔凝加工具有可控性,就必须研究在不同工况、不同激光参数和不

同加工参数条件下,材料的组织形态及残余应力的分布状态,在国内外,研究低能量注入焊接的熔凝过程比较多,而研究高能束注入的熔凝过程相对比较少,因为二者的熔凝速度有明显差别,而残余应力主要是由材料组织结构转变和温度梯度引起的,有关这方面的研究有法国的 J. B. Leblond<sup>[1]</sup> 研究组、S. Denis<sup>[2]</sup> 研究组及国内的一些研究工作者。

本文由热传导方程应用有限元方法建立三维瞬时温度计算模型,同时考虑液固、固固相变潜热的影响<sup>[3,4]</sup>,为残余应力的数值模拟做准备,这为激光材料表面改性提供力学指导奠定了良好的基础。为开发高能束强化加工工艺技术提供理论依据,从而为开发出更好的应用领域提供良好条件。

## 1 有限元模型建立

根据热传导方程及泛函表达式,并应用伽辽金方法或变分原理,假定  $t$  时刻的一切条件已经得到,可得到关于温度在  $t + \Delta t$  时刻的平衡方程为<sup>[3,5]</sup>:

(3) H13 钢 1100 淬火后强度及断裂韧度最高;提高回火温度,原淬火组织的差别减小,材料韧性提高,强度降低。

## 参考文献:

- [1] 黄细藻. 国外铝和铝合金挤压模具的发展[J]. 模具工业, 1988, (12): 55-59.
- [2] 刘以宽. H13 钢铝合金铸模的研制和使用[J]. 金属热处理, 1990, (2): 51-55.
- [3] 刘以宽, 李润宝. 热作模具的选材及 H13 钢的应用[J]. 上海金属, 1986, 8(6): 13-20.
- [4] Hans P Nichols. Tool Failures from the Perspective of Heat Treatment[J]. Heat treatment, 1988, (8): 25-28.
- [5] 李炯辉, 施友方, 高汉文. 钢铁材料金相图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 256.
- [6] 杨永俐, 孟庆昌, 冯晓曾. 热处理制度对 4Cr5MoSiV1 钢显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 1990, 15(6): 28-32.
- [7] 李仁顺. 金属的延迟断裂及防护[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1992: 124.

**作者简介:** 姚国凤(1962.9—),男,吉林长岭人,副教授,工学博士,现在中国科学院力学研究所作博士后研究工作,主要从事计算结构动力学、激光熔凝加工温度场及残余应力的数值模拟,在国内外发表论文 30 余篇。联系电话:010-62547527-5

**基金项目:** 国家自然科学基金(59836220)

**收稿日期:** 2001-08-16

从图 4c 可以看到断裂韧度的波动变化,这反映了回火温度、先生成的  $B_{\text{T}}$  对晶粒细化的综合作用。回火温度低,残留奥氏体及基体中的  $M$  相没有完全回复、长大,  $M/B_{\text{T}}$  中的碳化物的析出也不充分,冲击韧度受原淬火组织状态的影响明显,不同的等温时间,  $M$  与  $B$  形态及含量的不同,导致力学性能变化显著。640 回火后,原淬火态组织中残留奥氏体减少。

相充分回复和长大,  $B$  和  $M$  分解,析出的细小碳化物弥散分布于基体中,这在很大程度上消除了原淬火组织的差别,提高了组织的韧性。

## 3 结论

(1) H13 钢随等温温度的升高,淬火后  $B_{\text{T}}$  的针叶长度和  $B_{\text{L}}$  的条片随之长大,贝氏体转变也愈充分。

(2) H13 钢随等温时间的延长,贝氏体转变量及其条片宽度均增加,并且低温等温时比高温等温时增加明显。

$$\int_V \rho C \frac{dT}{dt} + \int_{S_c} K \nabla T \cdot \mathbf{n} \, ds = \int_V Q \, dV + \int_{S_c} h(T - T_e) \, ds + \int_{S_r} \epsilon \sigma (T^4 - T_e^4) \, ds \quad (1)$$

其中  $T$  是温度变量;  $s$  是表面温度;  $e$  是环境温度;  $h$  是表面对流换热系数;  $S_c$  为对流散热区域;  $S_r$  为辐射散热区域;  $\epsilon$  是辐射系数;  $\nabla T$  是温度梯度;  $K$  是热传导系数矩阵。

$$(\rho C \mathbf{K}^K + \rho C \mathbf{K}^c + \rho C \mathbf{K}^r) \mathbf{T}^{(i)} = \mathbf{T}^{(i-1)} \mathbf{Q} + \mathbf{T}^{(i-1)} \mathbf{Q}^{c(i-1)} + \mathbf{T}^{(i-1)} \mathbf{Q}^{r(i-1)} - \mathbf{T}^{(i-1)} \mathbf{Q}^{K(i-1)} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{K}^K$ 、 $\mathbf{K}^c$  和  $\mathbf{K}^r$  分别对应热传导、对流传热和辐射传热矩阵;  $\mathbf{T}^{(i)} \mathbf{Q}$  是有关外部热输入、内部热源、潜热及热导率的向量;  $\mathbf{T}^{(i)} \mathbf{Q}^{c(i-1)}$  是迭代第  $i-1$  步关于对流传热的向量;  $\mathbf{T}^{(i)} \mathbf{Q}^{r(i-1)}$  是迭代第  $i-1$  步关于辐射传热的向量;  $\mathbf{T}^{(i)} \mathbf{Q}^{K(i-1)}$  是迭代第  $i-1$  步关于热传导系数的向量。

假设在  $t$  时刻的温度分布及  $t + \Delta t$  时刻的第  $i-1$  次迭代的温度分布已得到, 解方程(2)可得到第  $i$  次迭代的温度分布:  $\mathbf{T}^{(i)} \mathbf{T}^{(i-1)} = \mathbf{T}^{(i-1)} \mathbf{T}^{(i-1)} + \mathbf{T}^{(i-1)} \mathbf{T}^{(i-1)}$  (3)

根据以上算法可以计算出瞬时温度分布状态, 以此为基准编制了一套激光熔凝加工温度场数值模拟软件分析程序。

## 2 数值算例

为了验证所建模型和程序的正确性, 由于对激光熔凝过程中温度的测量是非常困难的, 在公开发表的文献中还没有发现合适的验证模型, 所以采取文献[8]所提供的试验数据作依据来验证本模型, 文献[8]提供的是电弧焊输入焊接模型, 它与激光输入模型的差别在于输入模型、熔凝速度及相变模型, 除了几个相应子模块外, 其它运算模型是一样的, 试验采用宽 20cm、长 8cm、厚 10cm 的低碳结构钢(含碳量 0.23%), 电弧焊在加工件的宽度中点沿长度方向以 5mm/s 速度移动, 输入模型为<sup>[4]</sup>:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{ab_1c} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b_1^2} e^{-3(z+v(-t))^2/c^2}$$

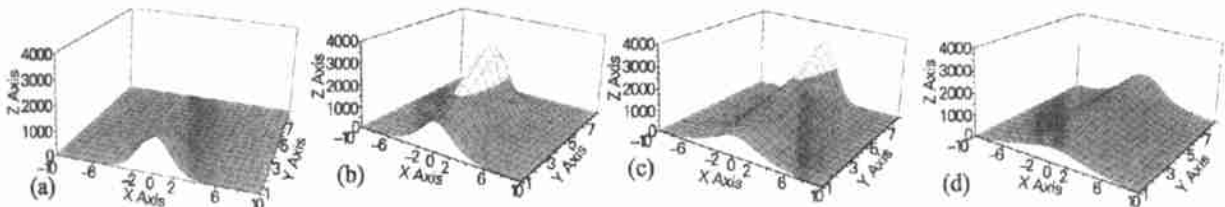


图 2 不同时间 5mm 处界面温度场

Fig. 2 Temperature distribution on 5mm interface at different time

(a) 2s (b) 10s (c) 20s (d) 30s

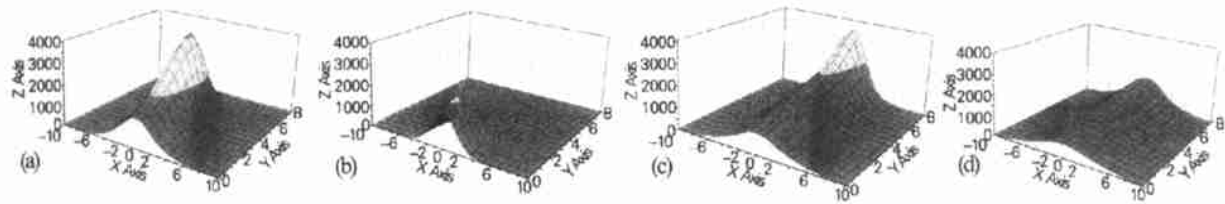


图 3 不同时间表面温度场

Fig. 3 Temperature distribution on surface at different time

(a) 2s (b) 10s (c) 20s (d) 30s

## 3 结果分析及讨论

从图 1 中可以看出本文结果与试验结果是比较接近的, 证明本模型是正确的, 但有一定的误差, 误差的主要来源是

将方程(1)线性化, 并应用改进的 N-R 算法和隐式积分格式, 得到增量形式的迭代公式, 采用 8 结点块体单元进行有限元离散化, 得到增量形式的有限元方程<sup>[6,7]</sup>:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{ab_2c} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b_2^2} e^{-3(z+v(-t))^2/c^2}$$

其中  $q_f(x, y, z, t)$  和  $q_r(x, y, z, t)$  分别为前 1/4 椭圆和后 1/4 椭圆热输入;  $z + v(-t)$  为动坐标与静坐标之间的坐标变换;  $f_f + f_r = 2$ ; 本模型  $f_f = 0.6, f_r = 1.4$ ;  $a = 2.0\text{cm}, b_1 = 1.5\text{cm}, b_2 = 3.0\text{cm}, c = 2.0\text{cm}; Q = 36568.35\text{W}$ ; 将基体块分成 3968 个单元, 应用此模型计算这一过程的瞬时温度, 在电弧焊中心点通过加工件表面与其移动方向垂直的面上 11.5s 后, 所得到的相应结点的温度与文献[8]所提供结果相比较如图 1, 计算结果是在中国科学院网络中心曙光巨型机上得到的。在不同时刻表面及距表面 5mm 处的界面的温度分布如图 2、3。

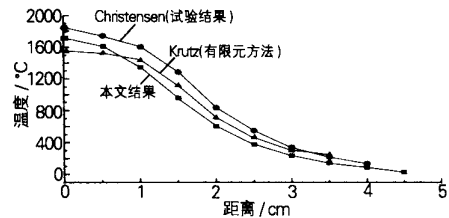


图 1 沿着垂直电子束移动方向的几种表面温度分布结果

Fig. 1 Some temperature distributions along the top of the workpiece perpendicular to the weld

8 结点块体单元本身的误差; 随温度变化的热物性参数选取误差; 模型误差的积累, 主要原因是前两个因素, 高温热物性参数的测量是很困难的, 单元的选取虽有一定自由度, 但

## 热等离子弧对钢表面淬硬深度的影响

赵程,田丰,侯俊英

(青岛化工学院 等离子体表面技术研究所,青岛 266042)

**摘要:**有3种连接方式可以用于等离子弧钢的表面淬火工艺:转移弧、非转移弧和联合弧。本文对比了这3种连接方式的等离子弧对钢表面淬硬深度的影响。试验结果表明,转移弧和联合弧的加热效率比较高,可以获得比非转移弧更深的淬硬深度,但小口径的非转移弧或联合弧的电弧燃烧稳定,比较适合用于等离子弧淬火处理。

**关键词:**等离子弧;淬硬深度

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2002)05-0016-03

## Study on Hardened Layer Depth of Steel Heated by Thermal Plasma Arc

ZHAO Cheng, TIAN Feng, HOU Jun-ying

(Thin Films Laboratory, Qingdao Institute of Chemical Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** There were three connection methods of thermal plasma arc, which were transferred arc, non-transferred arc and combined arc. The effects of different connection methods of thermal plasma arc on hardening depth of steel were studied. The experimental results show that transferred arc and combined arc have higher heating efficiency and larger hardening depth compared with non-transferred arc. But the arc stability of the combined arc and non-transferred arc with smaller orifice diameter is higher than that of transferred arc, and they are more suitable for the hardening treatment by plasma arc.

**Key words:** thermal plasma arc; hardening depth

利用等离子电弧  $10^4$  K 数量级的高温特性对金属材料表面进行改性处理一直是金属材料学的研究重点之一。虽然国内对这项技术的研究起步比较晚,但无论是在基础研究<sup>[1,2]</sup>还是在应用研究<sup>[3,4]</sup>等方面都取得了较大的进展,并且已经在工业生产中获得成功应用<sup>[5,6]</sup>。

等离子弧可以通过直流电源在等离子炬的钨极、喷嘴和被

处理工件之间的不同连接方式,得到转移弧、非转移弧和联合弧3种等离子弧。由于这3种接法的等离子弧有不同的电弧特性,可以根据不同的需要选择一种最佳的连接方式。本文目的是探索这3种连接方法的等离子弧对钢表面淬硬深度的影响,并探讨如何提高等离子弧淬火处理过程中的工艺稳定性。

## 1 试验材料及方法

试验是在自制的等离子体金属表面改性处理设备上进行,试验中用氩气作为等离子弧气体。试验材料选用60钢。淬火处理前,试样经过正火处理。在淬火处理过程中,采用等离子弧加热和喷水冷却同时进行。淬火处理后,从垂直于扫描方向切割试样,试样经研磨后用硝酸酒精溶液腐蚀,然后在

**作者简介:**赵程(1952—),男,青岛人,教授,硕士,主要从事低温等离子体技术金属材料表面改性处理的基础研究与应用研究工作,曾获国家发明三等奖和其他省部级奖励,发表论文40余篇。联系电话:0532-4022664 E-mail:chenzhao@public.qd.sd.cn

收稿日期:2001-09-20

除了8结点块体单元外的其它协调元与非协调元的自由度很高,使计算量成倍增长,考虑到温度可达到2000以上,相对误差在10%以下,这样的误差是可以接受的,以后还要尝试应用其它块体单元和选取合适的热物性参数来提高计算精度。图2、3显示材料不同时刻温度场分布状态,有了这些数据信息为我们继续研究材料的组织转变及残余应力的分布提供了很好条件。

## 4 结论

本模型计算的结果与试验结果比较接近,证明本模型是正确的,利用它可得到材料不同时刻温度场分布状态。

感谢吉林大学地面仿生机械教育部重点实验室的资助和中国科学院网络中心曙光巨型机组的有力支持。

**参考文献:**

[1] Leblond J B, Mottet G, and Devaux J C. Theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations - Derivation of general relations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1986, 34(4): 395-409.

- [2] Denis S, Farias D and Simon A. Mathematical model coupling phase transformations and temperature evolutions in steels[J]. ISIJ International, 1992, 32(3): 316-325.
- [3] Donald Rolph W and Bathe K J. An efficient algorithm for analysis of nonlinear heat transfer with phase changes[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1982, 18: 119-134.
- [4] Prakash K Agarwal and Brimacombe J K. Mathematical model of heat flow and austenite-pearlite transformation in eutectoid carbon steel rods for wire[J]. Metallurgical Transactions B, 1981, 12B: 121-133.
- [5] Bathe K J and Khoshgoftaar M R. Finite element formulation and solution of nonlinear heat transfer[J]. Nuclear Engineering and Design, 1979, 51: 389-401.
- [6] 王勳成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 421-442.
- [7] 马钊英, 王家林. 有限元基础[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 1990: 109-115.
- [8] Goldak J, Chakravarti A and Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metal. Trans., 1984, 15: 299-305.