文章编号: 1000-4750(2005)05-0236-05

热喷涂涂层和基体中残余应力预报与控制研究

李延平¹,赵万华²,卢秉恒²

(1. 集美大学机械工程学院, 厦门 361021; 2. 西安交通大学先进制造技术研究所, 西安 710049)

摘 要:分析研究了热喷涂涂层和基体中残余应力产生的原因并发展建立了相应的理论模型。依据该模型,不但可以计算骤冷过程和冷却过程在涂层/基体结构内引发的残余应力,而且首次分析了沉积过程中,基体/涂层因喷射冲击(即喷涂粒子高速撞击基体及形成的涂层表面)而产生的残余应力,以及因基体/涂层热膨胀系数不匹配产生的残余应力。理论计算结果与实验结果基本吻合。通过理论计算,可以预报涂层/基体中残余应力的大小,并根据需要控制涂层/基体中残余应力的分布。对即将进行的热喷涂工艺具有一定的指导意义。
 关键词:热喷涂;涂层和基体;沉积过程;残余应力;预报与控制

中图分类号: TG45; O34 文献标识码: A

PREDICTION AND CONTROL OF RESIDUAL STRESSES IN THERMAL SPRAYED COATINGS

LI Yan-ping¹, ZHAO Wan-hua², LU Bing-heng²

(1. Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An analytical model is developed to predict and control the residual stress distributions in deposited coatings and substrate by thermal spraying. Not only the residual stresses in coatings and substrate during quenching and cooling processes, but also for the first time the residual stress in coatings and substrate arising from spraying impact (i.e. spraying particles impacting coatings and substrate at high speed,), as well as the residual stress arising from misfit thermal expanding coefficients of substrate and coatings during the whole deposition process are calculated. The calculated results basically agree with the experiment results. With the theoretical prediction of residual stresses in coatings and substrate, the residual stress distributions in coatings and substrate can be controlled. The present work is of some guiding significance for thermal spraying process.

Key words: thermal spraying; coatings and substrate; deposition process; residual stresses; prediction and control

残余应力是指产生应力的各种因素作用不复 存在时,在物体内部依然存在并保持自身平衡的应 力。由于热喷涂材料制备工艺涉及高温、大温变和 高升温率等环节以及涂层/基体材料热物理性能差 异的存在,材料成品中必然存在残余应力。残余应 力对涂层的质量、使用性能以及涂层构件精度、尺 寸稳定性等方面都有很大影响,是导致热喷涂涂层 开裂、剥离、脱落等失效形式的主要原因之一。研 究、预报和控制残余应力对提高热喷涂涂层/基体构 件的质量具有重要意义。

收稿日期: 2004-03-06: 修改日期: 2004-08-02

基金项目:国家 863 项目(2001AA421270)和"十五"国家科技攻关项目(2001BA205B10-01)

作者简介: *李延平(1963), 女,哈尔滨人,副教授,从事快速原型、电弧喷涂模具等研究 (E-mail-ypli@jmu.edu.cn);

赵万华(1965),男,教授,博士,从事快速原型、快速模具研究;

卢秉恒(1945),男,教授、博士研究生导师,从事先进制造技术研究。

近年来,在残余应力的起因以及对涂层材料性 能影响等方面的研究已经取得很多进展^[1~13],但是 到目前为止,各种理论模型的计算结果和各种实验 研究结果之间存在较大差异^[14],已有理论模 型^[1,2,4,8~10]对残余应力产生的起因分析不够,相关研 究工作尚未形成体系^[14],对其开展进一步研究是必 要的。

1 残余应力产生的原因和理论模型

1.1 残余应力产生的原因

现有理论模型大都将涂层内残余应力分为两 种[1,2,4,8~10]: 一是喷涂时融化的喷涂粒子高速撞击基 体表面及已形成的涂层,以10⁵~10⁶ ℃/S 速度迅速 凝固冷却,热量急剧散失引起的残余应力称为骤冷 残余应力^[2];二是喷涂结束冷却到室温过程中因涂 层与基体热膨胀系数不匹配引发的热失配应力称 为冷却残余应力。我们研究发现,热喷涂过程中还 存在其它残余应力,并影响着涂层质量。它们是: 在喷涂过程中,喷涂粒子高速撞击基体表面及已形 成的涂层,使基体/涂层因承受冲击压力而发生变形 产生应力,称为喷射冲击残余应力:还有在涂层沉 积过程中,涂层/基体温度逐渐升高也会因为涂层与 基体热膨胀系数不匹配而产生热失配应力,称为温 升残余应力。虽然影响残余应力的因素较多,但是 其产生的主要原因可以分为上述四种。下面对这四 种应力分别进行分析计算。







1.2 涂层沉积过程中残余应力的理论模型

在涂层沉积过程中,如前所述会产生骤冷残余 应力、喷射冲击残余应力和温升残余应力,虽然它 们产生的原因不同,但都是涂层逐层沉积到已形成 的涂层/基体上而形成的,可将这个涂层连续生长的 过程分成 n 个有限厚度的薄层依次沉积的过程,建 立该过程统一的增层力学模型^[1,15](图 1)。根据复合 梁理论^[16],利用叠加原理,可获得 *n* 个薄层沉积后 在涂层和基体内产生的残余应力^[1]。

$$\sigma_{cj} = \sigma_{c} \Big|_{y=(j-1/2)\omega} = \frac{F_{j}}{b\omega} - E_{c}^{j} (k_{j} - k_{j-1})((j - \frac{1}{2})\omega - \delta_{j}) + \sum_{i=j+1}^{n} (\frac{-E_{c}^{i} F_{i}}{b(HE_{s} + \sum_{m=1}^{i-1} \omega E_{c}^{m})} - (1)$$

$$E_{c}^{i} (k_{i} - k_{i-1})((j - \frac{1}{2})\omega - \delta_{i}))$$

$$\sigma_{s0} = \sigma_{s} \Big|_{y=0} = \sum_{i=1}^{n} (\frac{-E_{s} F_{i}}{b(HE_{s} + \sum_{m=1}^{i-1} \omega E_{c}^{m})} + (2)$$

$$E_{s} (k_{i} - k_{i-1})\delta_{i})$$

$$\sigma_{sH} = \sigma_{s} \Big|_{y=-H} = \sum_{i=1}^{n} (\frac{-E_{s} F_{i}}{b(HE_{s} + \sum_{m=1}^{i-1} \omega E_{c}^{m})} + (3)$$

$$E_{s}(k_{i} - k_{i-1})(H + \delta_{i}))$$

$$\sum_{k=1}^{i} (2m - 1)\omega^{2}E_{c}^{m} - H^{2}E_{s}$$

其中:
$$\delta_i$$

$$2(\sum_{m=1}^{i} \omega E_{c}^{m} + HE_{s})$$

$$\sum_{i} = \sum_{m=1}^{i} (bE_{c}^{m} (\frac{m^{3} - (m-1)^{3}}{3} \omega^{3} - (m^{2} - (m-1)^{2}) \omega^{2} \delta_{i} + \omega \delta_{i}^{2})) + E_{s} bH\left(\frac{H^{2}}{3} + H\delta_{i} + \delta_{i}^{2}\right)$$

$$k_{i} - k_{i-1} = \frac{M_{i}}{\sum_{i}}$$

其中: $F_n 和 M_n$ 为第 n 层沉积到涂层/基体复合梁上时,该沉积梁和整个复合梁中产生的轴向拉力和弯矩;

 $K_n - K_{n-1}$ 为复合梁的曲率变化;

 $\sum_{n} \pi \delta_{n}$ 为复合梁的总刚度和中性轴距界面 距离:

*H、ω*和 *b* 分别为基体厚度和每层沉积的厚度 以及基体/涂层宽度;

E_s为基体的杨氏弹性模量;

E^{*i*}_c为涂层 第*i* 层的杨氏弹性模量。在计算中, 应考虑弹性模量受到孔隙率和温度的影响, 文献[2] 中有详细介绍。

 σ_{cj} 、 σ_{s0} 和 σ_{sH} 分别为第 j 层中心处的残余应力、基体上表面的残余应力和基体下表面的残余应力。

由于沉积过程中,骤冷残余应力、喷射冲击残 余应力和温升残余应力产生的原因不同,计算公式 (1)、(2)、(3)中对应的 *F*_n和 *M*_n也不同,对它们分 别计算如下:

1.2.1 计算骤冷残余应力时

骤冷应力源于涂层液态颗粒与涂层/基体撞击 所形成层片的快速冷却和凝固过程,人们一般利用 模型实验测算涂层内第*i*层的骤冷应力*σⁱ*(可以说,

它是涂层材料的又一个物理量)。由骤冷应力引起的整个复合梁中产生的轴向拉力 *F*_n和弯矩 *M*_n为:

$$F_{n} = \sigma_{q}^{i} b \omega \left(\frac{HE_{s} + \sum_{m=1}^{i-1} \omega E_{c}^{m}}{HE_{s} + \sum_{m=1}^{i} \omega E_{c}^{m}} \right);$$
$$M_{n} = F_{n} ((n-1) - \delta_{n-1}) \quad (n \ge 2)$$
$$(\stackrel{1}{\rightrightarrows} n=1 \ \text{If}, \quad M_{1} = F_{1} (H + \omega)/2)$$

1.2.2 计算温升残余应力时

设在喷涂过程中,喷涂沉积第n 层时,涂层与 基体温度升高 ΔT ,如果涂层和基体的热膨胀系数 (α_c 和 α_s)不同,将会产生热失配应力,此时整个复 合梁中产生的轴向拉力 F_n 和弯矩 M_n 为:

$$F_n = b(\alpha_c - \alpha_s) \Delta T \left(\frac{H \sum_{m=1}^n \omega E_c^m E_s}{H E_s + \sum_{m=1}^n \omega E_c^m} \right)$$
$$M_n = F_n (H + n\omega) / 2$$

1.2.3 计算喷射冲击残余应力时

在喷涂过程中,涂层粒子高速撞击基体表面及 已形成的涂层,当喷涂第 n 层时,将对前 n-1 层涂 层和基体产生冲击残余应力。若单位长度的平均喷 射冲击压力为 q_n,那么整个复合梁在该纵向冲击压 力作用下发生弯曲变形,此时复合梁中轴向拉力 F_n 为零,最大弯矩 M_n为^[16]:

$$M_n = \frac{1}{4}alq_n - \frac{1}{8}a^2q_n$$

上式中 *a* 为喷射冲击压力的作用长度,*l* 为基 体/涂层复合梁的长度。另*q_n*的大小可以通过实验 具体测定。一般来说,普通喷涂平均冲击压力小于 高速喷涂的平均冲击压力,同时喷涂距离越小平均 冲击压力越大。

1.3 冷却过程中的残余应力

如果假设在喷涂结束后冷却到室温的过程中 涂层与基体温度降低 ΔT ,总层厚 $h = n\omega$ 。建立涂 层/基体双层材料力学模型。此时整个复合梁中产生的轴向拉力 F_{CTE} ,系统承受的弯矩 M_{CTE} ,同理利用复合梁理论,第j层中心处残余应力 σ_{cj} 、基体上表面的残余应力 σ_{s0} 和基体下表面的残余应力 σ_{sH} 分别为:

$$\sigma_{cj} = \frac{F_{\text{CTE}}}{bh} + \frac{M_{\text{CTE}}E_c((j-\frac{1}{2})\omega - \delta)}{\sum_z}$$
(4)

$$\sigma_{sH} = \frac{F_{\text{CTE}}}{bH} - \frac{M_{\text{CTE}}E_s(H+\delta)}{\sum_{z}}$$
(5)

$$\sigma_{s0} = \frac{F_{\rm CTE}}{bH} - \frac{M_{\rm CTE} E_s \delta}{\sum_z} \tag{6}$$

其中:

$$\delta = \frac{h^2 E_c - H^2 E_s}{2(hE_c + HE_s)};$$

$$\sum_{Z} = E_c bh \left(\frac{h^2}{3} - h\delta + \delta^2\right) + E_s bH \left(\frac{H^2}{3} + H\delta + \delta^2\right)$$

$$F_{\text{CTE}} = b(\alpha_c - \alpha_s) \Delta T \left(\frac{HhE_c E_s}{HE_s + hE_c}\right)$$

 $M_{\rm CTE} = F_{\rm CTE} \left(H + h \right) / 2$

2 计算结果与讨论

利用上述理论模型可以计算涂层/基体中各种 残余应力的分布,预报和控制涂层/基体中各种残余 应力大小,由此指导热喷涂工艺。

2.1 热喷涂涂层/基体残余应力计算与预报

基体材料为低碳钢, $E_s = 200$ GPa, $\alpha_s = 9 \times 10^{-6}$ °C,涂层材料为羟磷灰石 HA (Hydroxyapatite), $E_c = 4$ GPa, $\alpha_s = 8 \times 10^{-6}$ °C, $\sigma_q = 20$ MPa^[5],基体温度 250°C。按上述理论计算 涂层/基体中残余应力分布,结果如图 2。

该计算结果与实验结果(曲率法)^[5]基本相同, 涂层平均残余应力与涂层沉积厚度成正比。但与实 验结果(X 射线衍射法)^[6]相差很大,实验^[6]测得的 HA 涂层残余应力高达 200MPa,由于 HA 的杨氏弹 性模量较低,强度极限不高(大约 39MPa^[7]),不大 可能产生如此高的残余应力。

2.2 骤冷残余应力与基体材料的关系

实验^[2]发现,当涂层厚度超过 0.01mm 时,涂 层中骤冷残余应力与基体材料基本无关。我们利用 该理论模型计算了 Al 涂层(其它涂层材料结论相 同),杨氏弹性模量 $E_c = E_0 / 3 = 70/3$ GPa,骤冷应力 $\sigma_q = 25$ MPa^[2],当 h/H=0.1、h/H=0.2、h/H=0.5 时, 骤冷残余应力与基体材料的关系如图 3。









图 3 骤冷残余应力与基体材料的关系



modulus of substrate

计算结果与实验结果^[2]相近,计算结果显示: 厚度比 *h/H* 值越小,基体材料对涂层骤冷残余应力 影响越小。

2.3 高速喷涂时喷射冲击残余应力不可忽视

涂层中骤冷残余应力一般为拉应力; 当 $\alpha_c > \alpha_s$ 时,涂层中的冷却残余应力也为拉应力,合成结果 肯定为拉应力。对普通火焰喷涂(平均喷射冲击压力 较小,测得 q_n 值大约为1kN/m),计算结果(图4中 的上方曲线)与实验结果^[17]基本相同;而对超音速 喷涂 HVOF,按以往模型(只考虑骤冷残余应力和冷 却残余应力)计算结果为拉应力(图略),而实验结 果^[17]却为压应力,出现矛盾。



图 4 NiCrBSi 热喷涂涂层残余应力分布

Fig.4. Residual stress distributions of NiCrBSi thermal

spraying coatings

但是,按我们新建立的模型,不但考虑骤冷残 余应力和冷却残余应力,还考虑喷射冲击残余应力 (此时平均喷射冲击压力较大,测得 q_n值大约为 10KN/m)和温升残余应力(如果喷涂过程中基体温 升不大,此应力的影响不大),计算结果(图 4 中的 下方曲线)与实验结果^[17]基本相同。可见,高速喷 涂时喷射冲击残余应力不可忽视。

2.4 热喷涂时最佳基体温度选择和残余应力的控制

(1) 当α_c > α_s时,骤冷残余应力和冷却残余应 力均为拉应力,这两项应力的合成仍为拉应力(图
5),基体温度越高产生的残余拉应力越大,与文献
[2,4]分析结果一致。此时无法利用控制基体温度的 方法降低该拉应力,可以采用高速喷涂,使涂层内 产生较大的冲击压应力,用于抵消一部分拉应力, 当喷涂速度达到一定值时,甚至使涂层的拉应力变 为压应力(如图 4 中的 HVOF);





Fig.5 Variation of residual stresses with substrate temperature

(2) 当α_c > α_s 时,骤冷残余应力为拉应力,冷 却残余应力为压应力,在基体温度不同时,它们合成的结果可能为拉应力也可能为压应力。对普通喷 涂(若不计温升残余应力和喷射冲击残余应力),当 h/H 的值一定时,有一个最佳的基体温度 Ts*使涂层 内的平均残余应力为零(图 6),该计算结果与文献 [2,4]的分析结果一致。由图 6 可见,最优基体温度 Ts*依赖于相对厚度 h/H,随 h/H 的增加而增加。当 涂层/基体材料一定时,可以根据相对厚度 h/H 确定 基体的最佳温度。



Fig.6 Relation between the optimum substrate temperature

Ts* and h/H ($\alpha_c > \alpha_s$)

还可以根据需要,控制基体温度和喷射冲击压力,保证涂层中顶层的残余应力为零(涂层不开裂) 以及涂层底层(涂层不剥落)的残余应力为零等,实现对残余应力的有效控制,进而指导热喷涂工艺。

3 结论

该模型可以计算、预报和控制涂层/基体中各种 残余应力的分布,对即将进行的热喷涂具有指导性 意义。计算结果显示,厚度比 h/H 值越小,基体材 料对涂层骤冷残余应力影响越小;高速喷涂时喷射 冲击残余应力对涂层/基体残余应力影响很大,不可 忽视;当喷涂过程中,基体温度变化不大时,温升 残余应力的影响不大;当 $\alpha_c < \alpha_s$ 时,可以通过选择 最佳基体温度控制涂层中不同位置残余应力的状态; 高速喷涂)控制涂层中不同位置残余应力的状态。

当然理论结果与实验结果仍有偏差。偏差产生 的主要原因是理论计算时未考虑非线性因素、热梯 度效应等影响,同时实验法的测试点位置可能与计 算位置不同,实验法也有其局限性,这些都会导致 计算结果与实验结果的略微差异。可见要精确预报 残余应力的数值仍有许多工作要做。

参考文献:

 Y C Tsui, T W Clyne. An analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings, Part1: Planar geometry [J]. Thin Solid Films, 1997, 306: 23~33.

- [2] S Kurod, T W Cylne. The quenching stress in thermally sprayed coatings [J]. Thin Solid Films, 1991, 200: 49~66.
- [3] J Stokes, L Looney. Residual stress in HVOF thermally sprayed thick deposits [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177/178: 18~23.
- [4] S Takeuchi, M Ito, K Takeda. Modeling of residual stress in plasma-sprayed coatings: effect of substrate temperature [J]. Surface and Coatings Technology, 1990, 43/44: 426~435.
- [5] Y C Tusi, C Doyle, T W Clyne. Plasma sprayed hydroxyapatite coatings on titanium substrates, Part 1: Mechanical properties and residual stress levels [J]. Biomaterials, 1998, 19: 2015~2029.
- [6] Brown SR, Turner IG, Reiter H. Residual stress measurement in thermal sprayed hydroxyapatite coatings [J]. J. Mater Sci Mater Med, 1994, (5): 756~759.
- [7] Chaki TK, Wang PE. Densification and strengthening of silver-reinforced hydroxyapatite coatings [J]. J Mater Sci Mater Med 1994, (5): 533~542.
- [8] L Pawlowski. The science and engineering of thermal spray coatings [M]. John Wiley & Sons Ltd, Englad, 1995.
- Y C Tsui, T W Clyne. An analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings, Part 2: Cylindrical geometry [J]. Thin Solid Films, 1997, 306: 24~51.
- Y C Tsui, T W Clyne. An analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings, Part 1: Further development and applications [J]. Thin Solid Films, 1997, 306: 52~56.
- [11] M Mellali, P Fauchais, A Grimaud. Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/cohesion of alumina coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 81: 275~286.
- [12] J Matejicek, S Sampath, P C Brand and H J Prask. Quenching, thermal and residual stress in plasma sprayed deposits: NiCrAIY and YSZ coatings [J]. Actamater, 1999, 47(2): 607~617.
- [13] C Godoy, E A Souza, M M Lima, J C A Batista. Correlation between residual stresses and adhesion of plasma sprayed coatings: effects of a post-annealing treatment [J]. Thin Solid Films, 2002, 420-421: 438~445.
- [14] 马维, 潘文霞, 张文宏, 吴承康. 热喷涂涂层中残余应 力分析和检测进展[J]. 力学进展, 2002, 32(1): 41~56.
 Ma Wei, Pan Wenxia, Zhang Wenhong, Wu Chengkang. A review of researches on the residual stress in thermal spray coatings [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(1): 41~56. (in Chinese)
- [15] 黄晨光,段祝平,吴承康. 热喷涂构件中残余应力的 理论分析[J]. 工程力学,2002,19(4):135~140.
 Huang Chenguang, Duan Zhuping, Wu Chengkang. A new analytical model for residual stresses due to thermal surface coating [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(4): 135~140. (in Chinese)
- [16] S P Timoshenko and J M Gere. Mechanics of Materials [M]. D, Van Nostrand Company, 1972.
- [17] 王志平,董祖珏, 霍树斌. 超音速火焰喷涂涂层特性研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 96~98.
 Wang Zhiping, Dong Zujue Huo Shubin. A study of coatings properties deposited with HVOF [J].Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 96~98. (in Chinese)