

## 热锻模表面激光熔覆 Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 金属陶瓷的热物性参数研究\*

潘成刚<sup>1,2</sup>, 王华昌<sup>2</sup>, 王洪福<sup>2</sup>, 周家林<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070)

**摘要:** 为了提高热锻模寿命, 采用激光熔覆的方法在热锻模的近表面层 W6Mo5Cr4V2 上激光熔覆 Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 金属陶瓷层。用扫描电镜和 XRD 对熔覆层显微组织结构进行分析; 用维氏硬度计测定覆层的显微硬度; 用激光热常数测试仪测定覆层的比热及热导率; 用动态热机械分析仪测定热膨胀系数; 用高温陶瓷试验系统测定弹性模量。结果表明: 涂层与基体为冶金结合, 熔覆层硬度在 912~1713 HV, Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 覆层的热物性参数总体与基体相比基本相当。

**关键词:** 激光熔覆; 热锻模; 热物性参数; 热应力

中图分类号: TG301

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)04-0035-04

### Thermal Parameters Research of Laser Cladding Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Cermets on Surface of Hot Forging Dies

PAN Cheng-gang<sup>1,2</sup>, WANG Hua-chang<sup>2</sup>, WANG Hong-fu<sup>2</sup>, ZHOU Jia-lin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2. School of Materials Science and Engineering Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

**Abstract:** In order to improve service life of hot forging dies, Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite coatings were prepared on the high speed steel W6Mo5Cr4V2 using laser cladding technology. Microstructure observation and microhardness of laser clad coatings with several ratios of Ni60:Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> were investigated by scanning electron microscopy (SEM), XRD and microhardness tests, respectively; specific heat and thermal conductivity were measured by Laser Thermal Constant Meter; thermal expansion coefficient and elastic modulus were measured by Dynamic Mechanical Thermal Analyzer and High Temperature Ceramic experimental system, respectively. The results show that the coating with metallurgical bonding is obtained between the cladding layer and the substrate. The microhardness of the surface cladding layer can be up to 912~1713 HV, thermal parameters of Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating in general, compared to the substrate, has no major improvement.

**Key words:** laser cladding; hot forging die; thermal parameters; thermal stress

## 0 引言

在锻压生产中, 锻模的寿命直接关系到锻件的产量、质量和成本, 锻模费用一般占锻压件成本的 30%~40%<sup>[1-3]</sup>, 可见提高锻模寿命是降低锻压件成本重要途径。目前, 各国家和企业均相当重视。对提高热锻模的寿命问题一直是工业上的热点、难点问题。

热锻模的正常损坏主要有磨损、机械裂纹、热

疲劳裂纹和塑性变形 4 种形式<sup>[4]</sup>, 热锻模的失效是各种影响因素综合作用的结果。不管是直接影响因素(锻件的质量和锻件等), 还是间接影响因素(模锻设备类型和生产纲领等), 都是通过改变锻模所受的负荷来影响锻模寿命的。作用于热锻模上的负荷仅有机机械负荷和热负荷。通过模具的整体优化<sup>[5-6]</sup>的方法来降低机械负荷, 以此来提高锻模寿命的方法, 效果并不明显。通过有限元分析得出热锻过程中热锻模上的热应力远比机械应力大, 热应力是热锻模失效的主要原因<sup>[7,8]</sup>。所以要提高热锻模的寿命必须降低热锻模表面的热应力。

热锻模深度方向(Z 方向)热应力波分布函数<sup>[9]</sup>:

收稿日期: 2010-03-22; 修回日期: 2010-04-06

基金项目: \*国家自然科学基金(50675165); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2010-II-025)

作者简介: 潘成刚(1976—), 男(汉), 湖北襄樊人, 讲师, 博士生。

$$\sigma_{(z)} = \frac{E\beta\Delta T}{1-\mu} \exp(-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_m}}) * \cos(z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_m}} - \omega t) \quad (1)$$

式中:  $E$ 、 $\mu$ 、 $\beta$  分别为模具材料的弹性模量、泊松比和线性热膨胀系数;  $\Delta T$  为模具危险点处表层与近表层间的温度差;  $\omega$  为热应力函数的谐波频率,  $\alpha$  ( $\alpha = \lambda / \rho c$ ) 为导热系数;  $\lambda$  为导热系数;  $\rho$  为密度;  $c$  为比热容。

从式 (1) 可以看出决定热应力幅值的主要因素是温度波动幅值  $\Delta T$ 、材料的弹性模量  $E$ 、材料的热胀系数  $\beta$ 、材料热传导系数  $\lambda$  和材料热比容  $c$ 。要提高热锻模寿命一方面选用具有高温强硬性材料, 另一方面要降低模具的应力 (主要是热应力)。要缓解热应力就要人为调节这 5 个主要参数 (以下称后 4 个参数为热应力参数)。根据热锻模温度场和应力场的分布来选用具有小的弹性模量  $E$ 、热膨胀系数  $\beta$  以及大的比热容  $c$  和热传导系数  $\lambda$  的材料。根据热锻模温度场和应力场将热锻模分为 3 个区 (如图 1), 分别为: 波动区、平衡区和下降区。波动区表面热应力最大, 平衡区热应力最小, 下降区的热应力居中。均质模具钢无法满足热锻模表面对温度和应力的要求, 要提高热锻模的寿命, 必须根据各区的温度和热应力的特点, 人为确定 3 个区具有好的热应力参数的材料。平衡区和下降区温度

和热应力都不大, 选用常用的热锻模材料, 波动区采用金属陶瓷, 耐热钢作为基体和表面金属陶瓷层的过渡层。在高速钢 W6Mo5Cr4V2 上采用激光熔覆的方法制作具有高温强硬性 Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 金属陶瓷层, 检测金属陶瓷层的热应力参数。

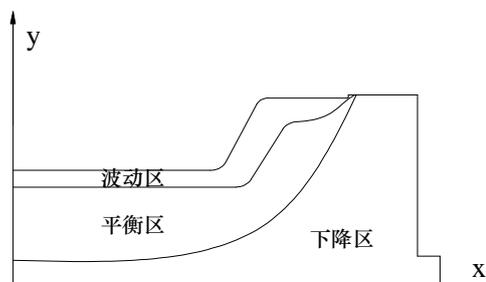


图 1 热锻模 (下模) 分区

Fig.1 Division areas of hot forging die (bottom die)

## 1 试验

试验基材为厂家供货状态下的 W6Mo5Cr4V2 高速钢, 试样尺寸制成为  $\Phi 80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。预置覆层前先将试样表面进行喷砂处理, 再用无水乙醇和丙酮清洗。金属陶瓷粉末材料采用先导 (益阳) 等离子粉末有限公司生产的粒径为  $35 \sim 61 \mu\text{m}$  的 Ni60 粉和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉混合物。表 1 是高速钢基材、Ni60 粉和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉的成分。

表 1 高速钢基材、Ni60 粉和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉的成分 (%)

Table 1 Chemical compositions of Ni60 powder, W6Mo5Cr4V2 and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> powder (%)

材料	C	Cr	Si	B	Ni	Fe	Mo	Mn	W	V	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
Ni60	0.5~1.1	15.0~20.0	3.5~5.5	3.0~4.5	余量	<5.0					
W6Mo5Cr	0.33~0.43	3.80~4.40	<0.40			余量	4.50~5.50	<0	5.50~6.75	1.75~2.20	
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>		5.0			20.0						75.0

采用 HG2000 型 CO<sub>2</sub> 激光器, 进行单道激光熔覆。熔覆过程中的熔池吹入氩气保护, 以防氧化。激光功率 1.4~1.9 kW, 束斑直径 3 mm, 扫描速度为 3~8 mm/s。粉末混合比例分别为 65% : 35% 与 50% : 50% (Ni60: Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>), 以下两种比例的试样分别用 65% : 35% 与 50% : 50% 代替。预置覆层厚度为 0.6 mm, 复合粉末充分研磨混匀后平铺在基体上。

试验完毕制备出 5 mm × 5 mm × 2 mm 金相试样 (腐蚀溶液为 4% 硝酸酒精溶液), 采用 JSM-5610LV 型扫描电镜 (SEM) 观察熔覆层的微观组织; 采用 HX-1000TM LCD 型显微硬度仪测量激光熔覆层剖面的显微硬度, 载荷 0.2 kg, 加载时间 5 s, 测量 3

次后取平均值; 采用 TC-7000H 激光热常数测试仪测定覆层的比热及热导率; 用 PYRISDMA7E 型动态热机械分析仪测定热膨胀系数。制备 3 mm × 4 mm × 35 mm 试样用 MTS-810 型高温陶瓷试验系统测定弹性模量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 覆层的组织分析

图 2 为 65% : 35% 与 50% : 50% 的 Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的覆层在扫描电镜背散射 500 倍的微观组织形貌。其断面组织由熔覆区 (CL)、结合区 (BZ) 和热影响区 (HAZ) 3 部分构成。从图中可以看出, 结合区呈平

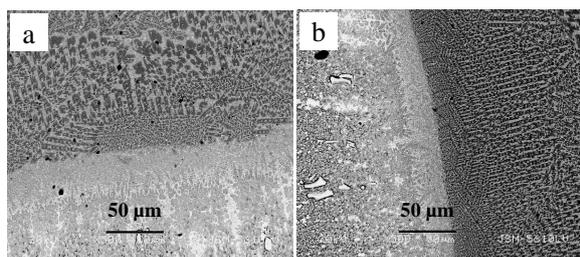


图 2 不同 Ni60 : Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 配比下的显微组织 (a) 65 % : 35 % (b) 50 % : 50 %

Fig.2 Microstructure of several ratios of Ni60:Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (a) 65 % : 35 % (b) 50 % : 50 %

面晶状态, 腐蚀后在扫描电镜的背散射下呈白亮色。由  $\gamma$ -Ni 平面晶构成, 其存在证明熔覆层与基体之间已经形成了良好的冶金结合。从图 2 中可以看出, 50 % : 50 % 的试样明显要比 65 % : 35 % 的试样组织细化。

在激光参数为  $P=1.7$  kW,  $V=5$  mm/s,  $T=0.6$  mm,  $D=3$  mm, 粉末配比为 Ni60:Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 为 50 % : 50 % 的情况下, 可以得到比较好的覆层组织。

图 3 和图 4 为 65 % : 35 % 与 50 % : 50 % 的 Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的覆层 X 射线衍射图。从图中可知, 随着 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉末被加入 Ni 基合金中, 大量的  $\gamma$ -Ni, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>,  $\gamma$ -(Ni, Fe) 和少量的 CrB, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, M<sub>23</sub>(C, B)<sub>6</sub>, (M= Fe, Cr) 被检测到。即在  $\gamma$ -Ni 基体上分布着碳化物和硼化物。其中 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 等硬质相的

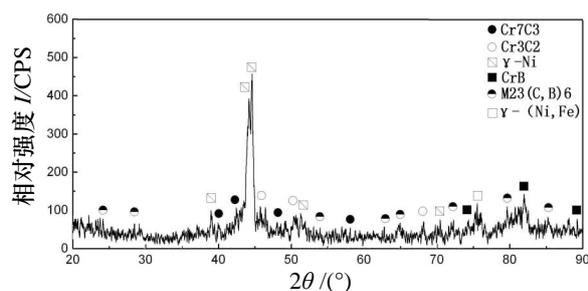


图 3 Ni60+35 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的 XRD 图谱

Fig.3 X-ray diffraction pattern of Ni60+35 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>

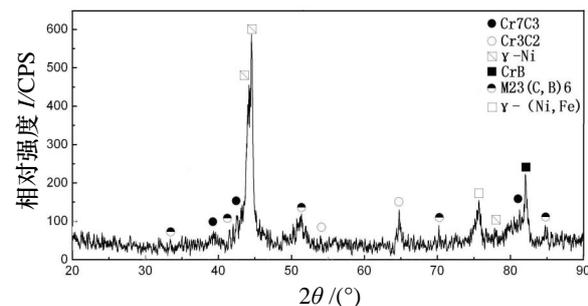


图 4 Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的 XRD 图谱

Fig.4 X-ray diffraction pattern of Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>

存在, 有助于提高覆层的硬度和耐磨性。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 颗粒在激光熔池中的部分溶解, 增加了液体合金中的 C, Cr 含量, 导致了 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 和 M<sub>23</sub>(C, B)<sub>6</sub> 相在快速凝固组织中的形成。

## 2.2 熔覆层的显微硬度分析

图 5 是激光熔覆 Ni60-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 覆层的剖面显微硬度分布。图示曲线呈现较明显的 3 阶梯形式, 分别对应于熔覆区(CL)、热影响区(HAZ)和基体(SUB)。50 % : 50 % 试样的熔覆层硬度为 912~1713 HV, 而 65 % : 35 % 试样覆层硬度则达到 900~1328 HV。50 % : 50 % 试样的熔覆层硬度比 65 % : 35 % 的试样覆层硬度平均增加了 240 HV, 表面硬度得到了明显改善。其原因是 50 % : 50 % 的试样比 35 % : 65 % 的试样增加了覆层中的 Cr 含量, 形成了更多的 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 等硬质相。覆层具有的高硬度与未熔 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 硬质点的存在以及液态合金快速凝固时析出的 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 和 M<sub>23</sub>(C, B)<sub>6</sub> 化合物密切相关。熔覆层的硬度比基体的硬度 600 HV 高很多, 能显著热锻模的寿命。

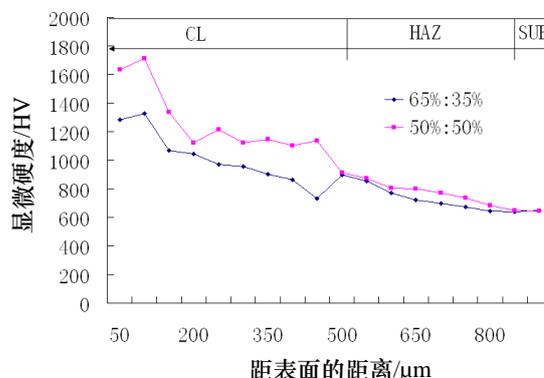


图 5 激光熔覆层的硬度分析

Fig.5 Microhardness analysis of laser cladding coating

## 2.3 热胀系数的测定

图 6 是 Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 试样从室温到 700 °C 的工程热膨胀系数的变化图。从图 6 可以看出, 在温度小于 200 °C 时, 工程热膨胀系数随温度变化的程度比较大, 在 200 °C 以上, 工程热膨胀系数的上升曲线逐渐变缓。这样覆层的好处是, 由于温度升高使得工程热膨胀系数对锻模弹性变形量的影响逐渐变小, 从而热应力的增加也随之变缓。同时, 要使热锻模在工作过程中产生较小的弹性变形, 那么锻模材料的工程热膨胀系数  $\beta$  应该具有较小的数值, 而且  $\beta$  值随温度的变化而变化的幅度应越小越

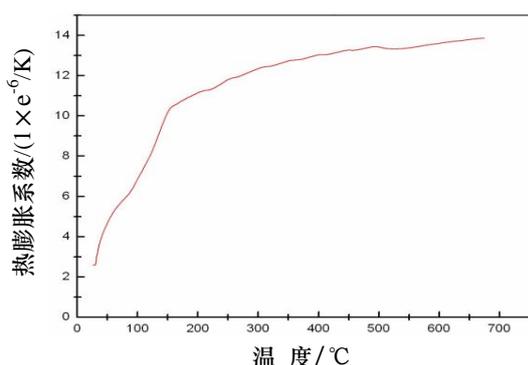
图 6 Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 试样的热膨胀系数

Fig.6 Thermal expansion coefficient of Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> specimen

好。表 2 是几种材料的工程热膨胀系数(650 °C 左右)。50 % : 50 % 覆层工程热膨胀系数是  $13.7 \times 10^{-6}$

表 2 几种材料的工程热膨胀系数

Table 2 Thermal expansion coefficient of several materials

材料	Ni60	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	W6Mo5Cr4V2	H11	Ni60+50 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 复合粉末
热膨胀系数	$18 \times 10^{-6}$	$10.3 \times 10^{-6}$	$11.2 \times 10^{-6}$	$13.3 \times 10^{-6}$	$13.7 \times 10^{-6}$

表 3 几种材料的热导率和比热容

Table 3 Thermal conductivity and specific heat capacity of several materials

材料	Ni60	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Cr	W6Mo5Cr4V2	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (理论值)	Ni60+50 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (实测值)
热导率/(W/m·K)	63	19.1	93.7	27.6	47.3	29
比热容/(J/kg·K)	456	456	450	644	397.4	302

### 2.5 弹性模量的测定

表 4 为 Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 试样在室温下的弹性模量的实测值。覆层的弹性模量为 284GPa (常温), 而 W6Mo5Cr4V2 基体钢的弹性模量是 230~250 GPa, 覆层的弹性模量要比基体钢大。原因有两个, 一是测试是在常温下 (机械应力起主导作用, 模具要求产生较小的弹性变形, 弹性模量应该大), 而弹性模量是随着温度上升而下降的 (高温阶段温度应力起主导作用, 应该使弹性模量小)。二是覆层在做成检测试样的时候, 不能保证覆层的良好, 对测试有影响。

表 4 Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 试样的弹性模量Table 4 Elastic modulus of Ni60+50 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> specimen

试样	宽度/mm	厚度/mm	载荷/N	弹性模量/GPa
平均	5.10	2.86	448.55	284

## 3 结论

(1) 50 % : 50 % 的 Ni60 粉和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉做覆层

(1/K), 而 W6Mo5Cr4V2 的工程热膨胀系数为  $11.2 \times 10^{-6}$ (1/K)。覆层的工程热膨胀系数比基体大。

### 2.4 比热容和热导率的测定

表 3 为几种材料的热导率和比热容。两项结果均比由理论公式算出的小, 原因是主要是由材料中的孔洞等缺陷造成的。材料的导热系数和比热容随着孔隙率的增加呈下降趋势, 而本检测试样受到制备方法限制, 孔隙率比较大。覆层的热导率为 29 W/m·K, 而 W6Mo5Cr4V2 的热导率为 27.6 W/m·K, 在这个参数上, 覆层比 W6Mo5Cr4V2 基体更容易使热量顺利地传递, 减小热应力。而覆层的比热容为 302 J/kg·K, W6Mo5Cr4V2 的比热容为 644 J/kg·K, 覆层的比热容明显比基体小, 这个参数上覆层没有 W6Mo5Cr4V2 基体好。

材料, 采用激光功率 1.7 kW, 扫描速度 5 mm/s, 光斑直径为 3 mm, 预涂厚度为 0.6 mm 的激光熔覆工艺, 可以获得具有良好的冶金结合的激光覆层。熔覆层组织细化, 熔覆层的显微硬度高于基材。

(2) 熔覆层的热传导系数优于基材, 其它热物性参数与基材相比没有什么改善。

### 参考文献:

- [1] 赵一平. 提高热模锻生产中的模具使用寿命 [J]. 锻压技术, 2000, (6): 43-47.
- [2] Summerville E, Venkatesan K, Subramanian C. Wear processes in hot forging press tools [J]. Materials & Design, 1995, 16(5): 289-294.
- [3] Kim D H, Lee H C, Kim B M, et al. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(3): 372-380.
- [4] 张圣深. 提高热锻模寿命途径的探讨与实践 [J]. 煤矿机械, 1996, 5. (下转第 43 页)