

文章编号: 0258-7025(2010)03-0852-06

# 连续/脉冲 CO<sub>2</sub> 激光熔覆高温合金 K403

钟如涛<sup>1</sup> 熊 征<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 武汉钢铁(集团)公司研究院, 湖北 武汉 430080)  
(<sup>2</sup> 海军工程大学理学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 针对飞机叶片激光熔覆的特殊要求,利用横流 CO<sub>2</sub> 激光器及加工系统,系统地研究了连续/脉冲 CO<sub>2</sub> 激光对 K403 材料熔覆质量的影响规律。结果表明,相同线能量下脉冲激光熔覆与连续激光熔覆相比,外表光滑、平整、熔覆层与基体的界面结合完整,稀释率低 20%,熔覆层硬度高 5%,热影响区小 50%。脉冲激光熔覆 K403 材料减少了合金元素的聚集和低熔点共晶组织的形成,缩小了“液态薄膜”的产生范围,同时由于基材变形小,降低了冷却凝固过程中的拉应力,较高的过热度使熔覆层液体与基体液体充分混合,降低了基体的脆性,解决了 K403 材料连续 CO<sub>2</sub> 激光熔覆易产生裂纹的问题。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;连续/脉冲激光;K403 材料

**中图分类号** TN249;TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0852

## Research on Continuous/Pulse Laser Cladding Superalloy K403

Zhong Rutao<sup>1</sup> Xiong Zheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Research and Development Center of Wuhan Iron and Steel (Group) Co., Wuhan, Hubei 430080, China)  
(<sup>2</sup> College of Science, Navy University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

**Abstract** Aiming at the special requirement of laser cladding on aeroengine blade, the influences of continuous/pulse beam on cladding performance for K403 substrate was studied experimentally on a transverse CO<sub>2</sub> laser and its processing system, compared with continuous laser beam, by using pulse laser beam, the hardness of cladding layer increased for about 5%, while the duty rate and area of heat-affected zone decreased for about 20% and about 50%, respectively. Cladding with pulse laser beam could weaken the gathering of alloy elements and the formation of low melting eutectic structure, resulting in the absence of liquid state membrane on grain boundary. In addition, the tension stress in solidification is greatly reduced during pulse laser cladding due to the less deform of substrate, and a higher degree of superheat induced fully mixing of the melting pool and decreased the brittleness of substrate, so, the heat cracking behavior of K403 substrate under continuous laser beam cladding was avoided under pulse laser beam cladding.

**Key words** laser technique; laser cladding; continuous/pulse laser; K403 material

## 1 引 言

镍基高温合金由于其具有良好的高温综合机械性能,广泛应用于航空航天、化工能源等工业领域<sup>[1]</sup>,为了提高其使用性能,需要在其表面熔覆具有特殊性能的合金涂层,有关的研究较多<sup>[2~6]</sup>。K403 合金是我国研制的一种镍基铸造高温合金,采用多种金属元素综合强化,具有较高的中、高温强度,长期使用过程中组织稳定,多用于制造航空喷气发动机的一些零部件,如涡轮叶片等。发动机涡轮叶片是发动机的关键部件,在使用过程中,由于强大的高

速热气流作用,叶冠相互撞击、振动,产生严重的冲击和磨损,为了提高这类零件的耐冲击性能和耐磨损性能,需要在阻尼面上熔覆一层厚度约为 0.3~0.5 mm 的 CoCrW 高温耐磨合金涂层。由于低熔点的晶间 C, B 化物共晶和 ( $\gamma + \gamma'$ ) 共晶的存在, K403 等铸造高温合金的热裂纹敏感性很大。文献 [7~10] 研究了在 K403 等铸造合金基体上熔覆含 B, Si 的 Co 基和 Ni 基合金粉末时,通过调整工艺、调整元素配比、增加预置层、添加稀土元素或含有活性元素的变质剂的方法可以减少或消除裂纹。

收稿日期: 2009-03-16; 收到修改稿日期: 2009-05-31

作者简介: 钟如涛(1967—), 男, 博士, 工程师, 主要从事高功率激光器及其应用方面的研究。E-mail: zrt67@sina.com

与连续激光相比,脉冲激光具有更高的峰值功率、加热速度与冷却速度,在材料表面改性和改形加工方面显示了独特优势<sup>[11]</sup>,因此本文利用横流 CO<sub>2</sub> 激光器及加工系统作为平台,实验研究连续/脉冲 CO<sub>2</sub> 激光对 K403 材料熔覆质量的影响规律,探讨解决 K403 材料表面连续激光熔覆容易产生裂纹的方法。

## 2 实验条件

### 2.1 连续/脉冲横流 CO<sub>2</sub> 激光器

实验采用 5000 W 连续/脉冲横流 CO<sub>2</sub> 激光器,额定输出功率为 5000 W。图 1 为输出光束模式,近似平顶光斑,直径  $\phi 40$  mm。



图 1 光束模式图

Fig. 1 Mode of laser beam

### 2.2 实验方案

手工在基材 K403 表面铺干燥、无粘接剂的 0.8 mm 厚合金粉末,激光经焦距为 250 mm 的 GaAs 透镜聚焦,熔覆光斑直径  $\phi 3$  mm,流量为 2.5 L/min 的 Ar 气保护。通过改变激光能量进行激光熔覆,分析脉冲/连续激光对激光熔覆质量的影响。

使用金相切割机切取试样,采用腐蚀剂(4 g 硫

酸铜+20 mL 盐酸+20 mL 水)腐蚀磨抛好后的试样。使用 Vickers-1000 型数字显微硬度计测量熔覆层的显微硬度,加载力为 2 N,保压时间为 15 s。使用光学显微镜(OM)观察和测量激光熔覆层的质量和几何尺寸,包括熔覆层高度( $H_1$ )、熔化深度( $H_2$ )、熔覆层宽度( $W_1$ )和熔化宽度( $W_2$ ),如图 2 所示,熔覆材料的稀释率=熔化层的面积/(熔化层的面积+熔覆层的面积)。

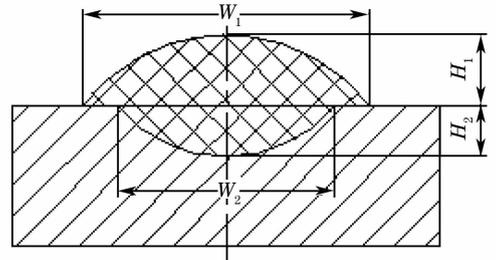


图 2 熔覆层参数示意图

Fig. 2 Parameters of cladding layer dimensions

### 2.3 实验材料

试验基材尺寸为 50 mm×30 mm×3 mm,乙醇清洁后烘干。激光熔覆合金粉末为 Stellite X-40,粉末粒度 150~300 目(106~48  $\mu$ m),化学成分如表 1 所示。这种合金为钴基合金,在高温下具有高强度和极好的抗蚀抗氧化性能,并且塑韧性好,能够满足涡轮工作叶片的要求。表 2 所示为 K403 的化学成分。

表 1 Stellite X-40 合金粉末的主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Stellite X-40 (mass fraction, %)

C	Cr	Si	Mn	W	Ni	Co	Fe
0.85	25.0	0.3	0.3	7.5	10	Bal.	1.0

表 2 K403 的化学成分表(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of K403 (mass fraction, %)

C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Zr	Ce	B	Mn	Ni
0.11~0.18	10.0~12.0	4.5~6.0	4.8~5.5	3.8~4.5	5.3~5.9	2.3~2.9	$\leq 2.0$	0.03~0.08	$< 0.02$	0.012~0.022	$\leq 0.5$	Bal.

## 3 实验结果及分析

### 3.1 熔覆层外观

激光能量是衡量能量是否有效利用的重要参数,选择在激光能量相同的情况下研究脉冲与连续激光对熔覆质量的影响更具有可比性,因此连续激光熔覆时激光功率选择为脉冲激光功率与占空比的乘积。线能量定义为激光熔覆方向单位长度的能量, $W=P/v$ ,式中  $W$  为线能量; $P$  为激光功率; $v$  为速度。

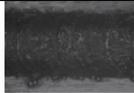
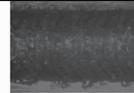
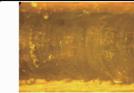
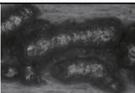
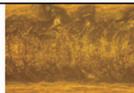
表 3 为连续/脉冲激光在相同线能量时的熔覆形貌,可见脉冲激光熔覆层外表光滑、平整、无缺陷、

熔覆层与基体的界面结合完整;连续激光熔覆层外观成形较粗糙,结瘤较多。这是由于在相同线能量时,脉冲激光峰值功率高,作用时间短,使熔覆区温度梯度大,热影响区小,导致粉末熔化界限分明、光滑。

图 3 所示为连续/脉冲激光下线能量与熔覆尺寸的关系,可见当激光能量相同时,连续/脉冲激光熔覆层高度相同,但脉冲激光下的熔化层深度略大于连续激光,原因是连续/脉冲激光熔覆光斑尺寸相同,照射粉末的面积相同,且合金粉末厚度一样,因此熔覆层高度相同,但由于脉冲激光峰值功率较高,功率密度较大,因此熔化层深度较大。图 3 还表

表 3 连续/脉冲激光熔覆形貌

Table 3 Morphology of cladding layer with continuous/pulse laser

Heat input/(J/mm)	150	225	300	375	450	
<i>P/W</i>	1000	1500	2000	2500	3000	
Pulse laser	<i>v</i> /(mm/s)	2				
	Duty cycle/%	30				
	Morphology (2×)					
Continuous laser	<i>P/W</i>	300	450	600	750	900
	<i>v</i> /(mm/s)	2				
	Morphology (2×)					

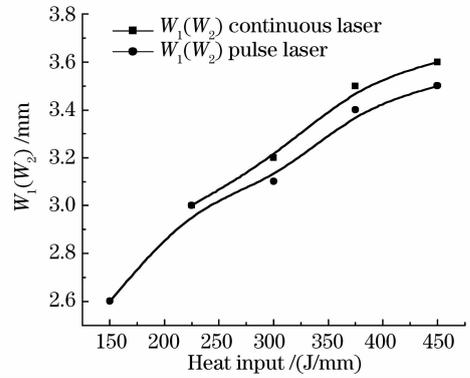
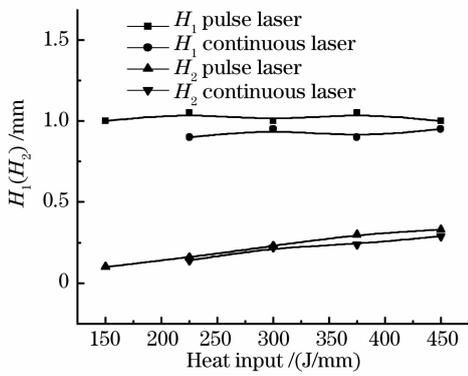


图 3 线能量与熔覆尺寸的关系

Fig. 3 Relationship between heat input and cladding layer dimensions

明连续激光下的熔化层宽度略大于脉冲激光,原因是连续激光作用时间长,热影响区宽,熔化范围较宽。

### 3.2 熔覆层性能

脉冲/连续激光线能量与稀释率的关系如图 4 所示。可见,当脉冲激光线能量为 114~228 J/mm,连续激光线能量为 163~215 J/mm 时,可获得熔合界

面完好、稀释率小于 10% 的熔覆层,可见脉冲激光熔覆工艺范围较宽;图中还可看出在相同线能量时,脉冲激光的熔覆层稀释率比连续激光熔覆层的稀释率低 20%。

脉冲/连续激光线能量与熔覆层硬度的关系如

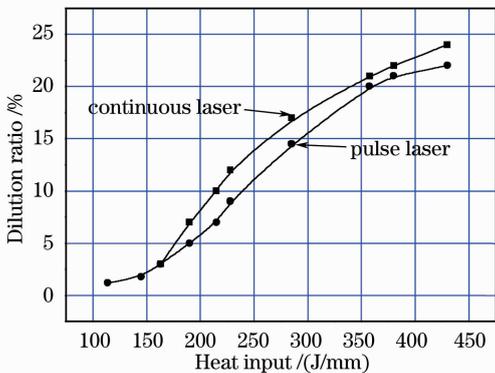


图 4 线能量与稀释率的关系

Fig. 4 Relationship between heat input and dilution ratio

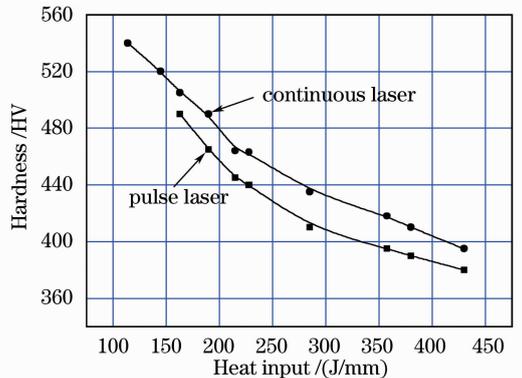


图 5 线能量与熔覆层硬度的关系

Fig. 5 Relationship between heat input and cladding layer hardness

图 5 所示。可见,在相同线能量时,脉冲激光熔覆层硬度比连续激光熔覆层硬度高 5%。

连续/脉冲激光熔覆热影响区对比如图 6 所示,扫描速度为 2 mm/s,激光平均功率为 570 W。测量

结果表明脉冲激光熔覆热影响区与熔合区体积之比为 2.5,连续激光熔覆热影响区与熔合区之比为 3.8,可见脉冲激光熔覆热影响区比连续激光熔覆热影响区小 50%。

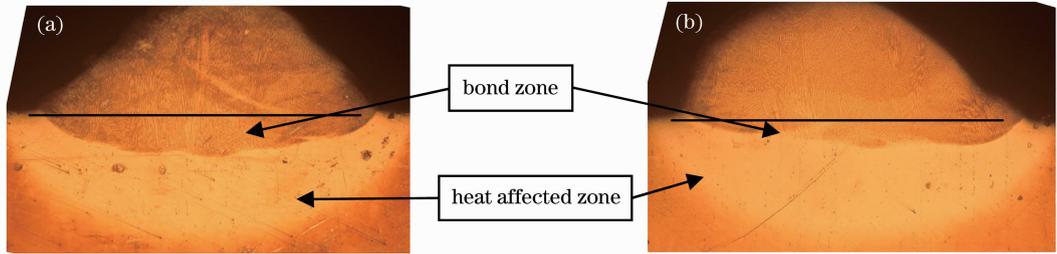


图 6 激光熔覆热影响区对比。(a) 脉冲激光;(b) 连续激光

Fig. 6 Comparison of heat affected zone between pulse (a) and continuous (b) laser cladding

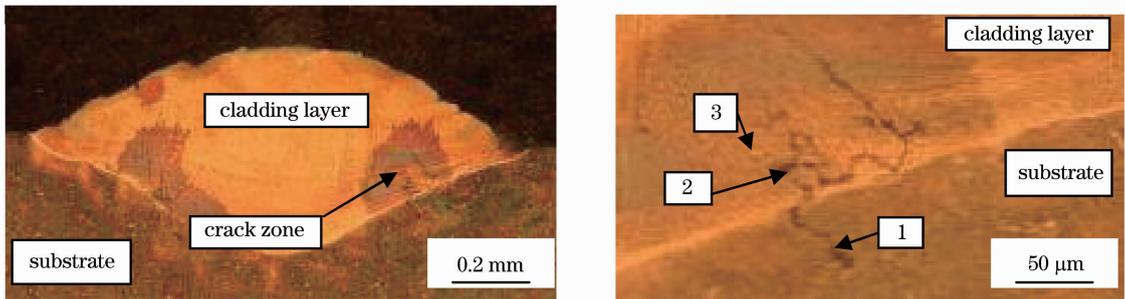


图 7 连续激光熔覆层中的典型裂纹

Fig. 7 Typical crack of continuous-laser cladding layer

这是由于脉冲激光更高的峰值功率、加热速度和冷却速度能够提高熔覆层合金液体的过热度、温度梯度并加快熔覆层的凝固,因此缩小了熔合区和基材的热影响区,提高了熔覆层硬度,并在大的表面张力作用下使熔覆层合金液体和基体合金液体在熔合区能够充分混合,提高了熔合层的性能。

### 3.3 熔覆裂纹

K403 合金材料有很强的热敏感性,容易产生裂纹,激光熔覆性能较差,采用连续 CO<sub>2</sub> 激光熔覆时,极易产生裂纹,其典型裂纹如图 7 所示。熔覆层中的裂纹弯曲而不规则并有分叉,可见裂纹的扩展均为沿晶扩展。研究表明热冲击产生的热应力峰值出现在熔合区-热影响区界面处,以该处热应力为最大,显然裂纹容易在此处产生。

为了分析裂纹产生的原因,首先对热影响区和熔合区交界处附近的裂纹起始段(1 点附近)进行电子探针分析,结果如表 4 所示。可见裂纹附近 Ti, W 和 Mo 元素含量与基材成分相比明显偏高,Cr 元素含量也略微偏高,W,Mo,Cr 在 Ni 中的溶解度很大,元素聚集于晶界形成低熔点共晶组织;Ti, W, Mo 和 Cr 均为强或中强碳化物形成元素,易与 C 形

成 MC, M<sub>6</sub>C, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 等碳化物脆性相,这些脆性相聚集于晶界形成低熔点共晶组织,在熔覆金属凝固过程中,低熔点共晶在晶界形成“液态薄膜”,由于液相的变形抗力小,在冷却过程中极易形成结晶裂纹。如果基材的铸造工艺不恰当,容易导致明显的晶界粗化。这时大量碳化物连线聚集于晶界,如图 8 所示。使裂纹得以沿晶界碳化物脆性相顺利向熔覆层发展。显然,明显的晶界粗化加剧了熔覆层的裂纹倾向。

表 4 热影响区裂纹 1 点主要化学成分(质量分数,%)

Table 4 Chemical composition of the point 1  
(mass fraction, %)

Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni
13	4	6.5	5.4	5.1	3.2	61.5

为了进一步分析裂纹在熔合区和熔覆层区沿怎样的晶界扩展,对图 7 中熔合区裂纹处的 2 点和无裂纹处的 3 点进行电子探针检测,结果分别如表 5, 6 所示,可见除裂纹处的 Ti 和 W 含量相对较多外, X-40 合金本身是没有 Ti 元素的,显然,熔覆层的 Ti 元素是由基材稀释进入的。Ti 和 W 均为强或中强碳化物形成元素,易与 C 形成碳化物脆性相聚集于晶界形成低熔点共晶组织,导致熔覆金属凝固时

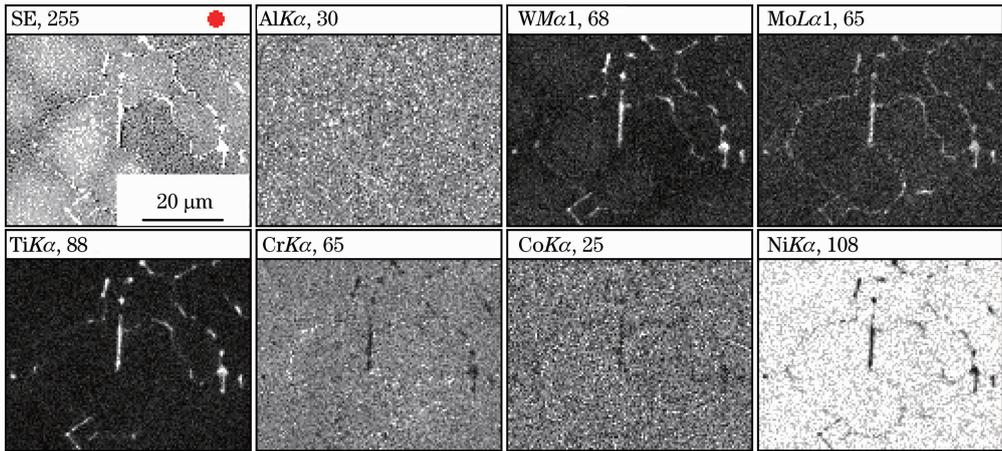


图 8 基体晶界合金元素面分布

Fig. 8 Alloy element map at grain boundary of substrate

表 5 熔合区裂纹 2 点主要化学成分(质量分数,%)

Table 5 Chemical composition of the point 2  
(mass fraction, %)

Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni
17.81	30.68	9.1	2.5	2.3	1.4	35.14

表 6 熔合区无裂纹 3 点主要化学成分(质量分数,%)

Table 6 Chemical composition of the point 3  
(mass fraction, %)

Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni
17.44	30.72	7.3	2.3	1.8	1.1	38.24

裂纹在熔合区和熔覆层区中沿晶界扩展。

采用脉冲激光进行熔覆实验,图 9 所示为几种脉冲激光工艺参数下熔覆层形貌,(a)的激光功率为

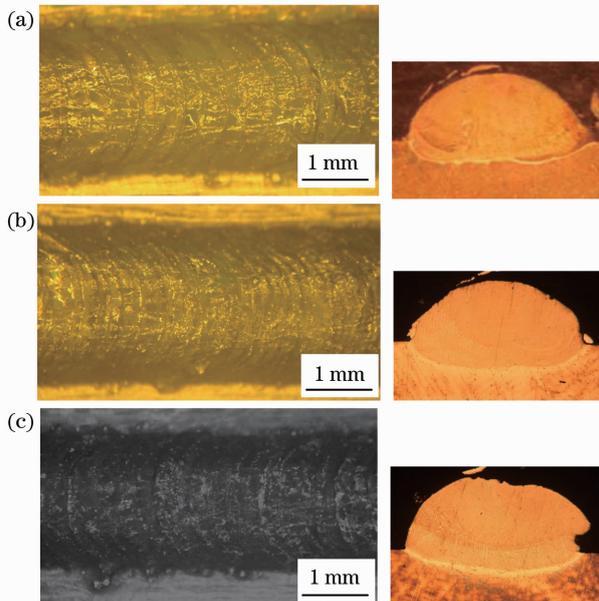


图 9 K403 材料脉冲激光熔覆形貌

Fig. 9 Cladding layer morphology of K403 with pulse laser

2000 W,熔覆速度为2 mm/s,占空比为 25%;(b)的激光功率为2000 W,熔覆速度为2 mm/s,占空比为 30%;(c)的激光功率为 1500 W,熔覆速度为 2 mm/s,占空比为 30%。可见熔覆层与基材熔合界面平整、完好、结合紧密、没有裂纹,取得了满意的效果。原因是脉冲激光熔覆与连续激光相比,较高的加热、冷却速度减少了合金元素的聚集和低熔点共晶组织的形成;较低的热影响区温度和基材热影响区,缩小了“液态薄膜”的产生范围,同时基材变形小,冷却凝固过程中所受拉应力减小,降低了基材产生热裂纹的可能性;较高的过热度,熔覆层合金液体在大的表面张力作用下,与基体合金液体在熔合区能够充分混合,降低基体的脆性,阻止裂纹的产生。

## 4 结 论

利用横流 CO<sub>2</sub> 激光器及加工系统作为平台,实验研究了连续/脉冲横流 CO<sub>2</sub> 激光对 K403 材料熔覆质量的影响规律,结果表明:

1) 脉冲激光熔覆与连续激光熔覆相比,外表光滑、平整,熔覆层与基体的界面结合完整,连续激光熔覆层外观成形较粗糙,结瘤较多;

2) 在相同线能量下,脉冲激光熔覆与连续激光熔覆相比,熔合区稀释率低 20%,熔覆层硬度高 5%,热影响区小 50%,且有更宽的工艺范围。

3) 采用脉冲激光熔覆 K403 材料,减少了合金元素的聚集和低熔点共晶组织的形成;缩小了“液态薄膜”的产生范围,同时基材变形小,降低了冷却凝固过程中所受拉应力;较高的过热度,熔覆层液体与基体液体充分混合,降低基体的脆性;解决了 K403 材料采用连续 CO<sub>2</sub> 激光熔覆易产生裂纹的难题。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Gang, Zhang Binggang, Feng Jicai. Research progress in repair welding technology of Ni-base superalloy bands [J]. *Welding*, 2008, (1):20~23  
王 刚,张秉刚,冯吉才. 镍基高温合金叶片焊接修复技术的研究进展[J]. 焊接, 2008, (1):20~23
- 2 Luo Jiangtao, Guo Hong, Liang Erjun *et al.*. Wide-band laser cladding of Ni-based alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10):957~959  
雒江涛,郭 洪,梁二军等. 镍基合金的宽带激光熔覆[J]. 中国激光, 2001, **A28**(10):957~959
- 3 Yang Yongqiang, Tian Nailiang. Laser cladding of high temperature alloys and their application [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(8):632~637  
杨永强,田乃良. 激光熔覆高温合金及其应用[J]. 中国激光, 1995, **A22**(8):632~637
- 4 Hong Yongchang. Microstructure and performance of laser remelting Ni-based alloy spraed-welding layers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9):1388~1394  
洪永昌. 激光重熔镍基合金火焰喷焊层组织及性能[J]. 中国激光, 2008, **35**(9):1388~1394
- 5 Wang An'an, Yuan Bo. Microstructure and phase constitution in NiCrSiB alloy produced by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(2):169~173  
王安安,袁 波. 激光熔敷 NiCrSiB 合金组织与物相研究[J]. 中国激光, 1997, **A24**(2):169~173
- 6 Shang Lijuan, Zhu Jingpu, Tan Chaoxin. Investigation on laser-deposition and the self-melted Co-base and Ni-base alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 1990, **17**(8):491~496  
尚丽娟,朱荆璞,谭朝鑫. 激光熔覆镍基和钴基自熔合金的研究[J]. 中国激光, 1990, **17**(8):491~496
- 7 Li Xiaoli, Liu Wenjin, Zhong Minlin. Reasearch on laser cladding superalloy K403 [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(3):283~286  
李晓莉,刘文今,钟敏霖. 高温合金 K403 的激光熔覆研究[J]. 应用激光, 2002, **22**(3):283~286
- 8 Hu Qianwu, Liu Shunhong, Li Zhiyuan *et al.*. Study on the hot cracks and preventive measures of Ni-base alloy laser cladding layer [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Parta Physical Testing*, 1999, **35**(5):208~213  
胡乾午,刘顺洪,李志远等. 镍基合金激光熔覆层的热裂纹及预防措施研究[J]. 理化检验物理分册, 1999, **35**(5):208~213
- 9 Hu Qianwu, Liu Shunhong, Li Zhiyuan. Laser hardfacing of turbine engine blade [J]. *Applied Laser*, 1998, **18**(2):75~80  
胡乾午,刘顺洪,李志远等. 涡轮发动机叶片的激光表面强化[J]. 应用激光, 1998, **18**(2):75~80
- 10 Zhou Zhuohua, Zhu Beidi. The study on the laser cladding process and cracking of cast Ni-based superalloy K3 [J]. *Journal of Materials Engineering*, 1996, (1):32~35  
周卓华,朱蓓蒂. 铸造 K3 镍基合金的激光熔覆开裂及工艺研究[J]. 材料工程, 1996, (1):32~35
- 11 J. Mazumder, P. S. Mohanty, A. Kar. Mathematical modelling of laser materials processing [J]. *Int. J. Materials and Product Technology*, 1996, **11**(3/4):193~194