

# 模具钢表面激光原位制备 Ni 基合金复合涂层的 微结构与性能

刘洪喜 唐淑君 蔡川雄 张晓伟 王传琦 蒋业华

(昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要** 通过控制 Ni 基自熔性合金粉末中 Al、Mo 含量, 在 H13 钢表面原位制备了含  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 强化相的激光熔覆涂层。借助光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)分析了不同熔覆层的显微组织及物相结构。结果表明, 4 种成分的熔覆层均呈现出平整致密、无明显缺陷的宏观特征。Ni 基自熔性合金粉末中加入 Al 易于生成  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相, 当 Al 含量达到一定程度后, 涂层中开始出现  $\beta$ -NiAl 相, 同时 Fe 主要以 (Fe, Cr) 固溶体形式存在, (Ni, Cr) 固溶体极少。加入 Mo 后, 涂层中几乎未见  $\beta$ -NiAl 相; Al 含量较少时, Mo 主要与 Fe 结合形成 Mo-Fe 金属间化合物; 当 Al 含量增加至开始出现  $\beta$ -NiAl 相时, Mo 便与 Al 结合形成 AlMo<sub>3</sub>。同时 Mo-Fe 金属间化合物的存在也导致 (Fe, Cr) 固溶体较同等 Al 含量下未加入 Mo 时少, (Ni, Cr) 固溶体含量较未加入 Al 时多。涂层摩擦系数均低于基体, 最高显微硬度为基体的 4.3 倍, 抗磨性提高了 3.8 倍。

**关键词** 材料; 激光熔覆; H13 钢; Ni<sub>3</sub>Al; 金属间化合物; 显微组织

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0603002

## Microstructure and Property of Laser *in situ* Preparation of Ni-Based Alloy Composite Coating on Die Steel Surface

Liu Hongxi Tang Shujun Cai Chuanxiong Zhang Xiaowei Wang Chuanqi Jiang Yehua

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

**Abstract** *In situ* laser cladding coating with  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al strengthening phase is fabricated by controlling the Al and Mo contents in Ni-based self-fluxing alloy powder on H13 die steel surface. The microstructure and phase structure of the four kinds of chemical composition powder are analyzed by means of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractometry (XRD). The results indicate that the macroscopic morphologies of the four kinds of laser cladding coatings are smooth, dense and without obvious macroscopic defects. Ni-based self-fluxing alloy powder with Al added is easier to generate  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al phase. When the Al content reaches a certain degree,  $\beta$ -NiAl phase is found in the coating. Fe mainly exists as (Fe, Cr) solid solution, while the (Ni, Cr) phase is small. The  $\beta$ -NiAl phase is almost not found when Mo is added in the coating. When the Al content is small, Mo and Fe combining to form Mo-Fe are intermetallic compound. But when  $\beta$ -NiAl phase is generated in the coating as the Al content increases, Mo and Al combine to form AlMo<sub>3</sub>. The existence of Mo-Fe intermetallic compound makes (Fe, Cr) solid solution less than that of the same Al content without Mo, but the (Ni, Cr) solid solution is more than without Al. The friction coefficients of all cladding coating samples are lower than the H13 steel substrate. The highest microhardness of the coating increases by 3.3 times and the wear resistance increases by 3.8 times, respectively, in comparison with the substrate.

**Key words** materials; laser cladding; H13 steel; Ni<sub>3</sub>Al; intermetallic compound; microscopic structure

**OCIS codes** 160.3900; 240.6700; 310.1515

收稿日期: 2013-02-01; 收到修改稿日期: 2013-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51165015)和昆明理工大学分析测试基金(2011008)资助课题。

作者简介: 刘洪喜(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事离子束和激光束表面改性等方面的研究。

E-mail: vipluhx@yahoo.com.cn

## 1 引 言

H13 钢(4Cr5MoSiV1)被广泛用作受冲击载荷大的锻模、热挤压模、精锻模、压铸模等的候选材料<sup>[1,2]</sup>。在实际工况中,这些模具由于反复受高低温的交替作用,致使其常因磨损以及冷热疲劳而失效,从而降低了产品的使用寿命。据统计,模具在循环载荷作用下的失效部位主要集中于其表面及表面层<sup>[1,3]</sup>。因此,优化模具结构设计,精选模具制造材料,改善模具表面性能便成为模具工作者普遍重视和亟待解决的关键问题<sup>[4~10]</sup>。

激光熔覆涂层由于具有优异的冶金结合能力、易生成有益相及致密的组织等优点而在近几十年来被大量用在材料的表面改性领域,并取得了许多理想效果<sup>[11~15]</sup>。但从目前已有文献来看,有关 H13 钢表面激光选区熔覆复合涂层,尤其是金属间化合物复合涂层的报道还鲜见涉及。鉴于此,本文通过加入适量 Mo,采用激光选区熔覆技术在 H13 钢表面制备了 Ni-Al 金属间化合物复合涂层,分析了粉末中 Al、Mo 含量对涂层表面熔合质量、涂层与基材

界面的结合特征、涂层显微组织形貌、物相组成以及涂层力学性能的影响,以期为提高 H13 热作模具钢表面综合性能、延长其使用寿命提供理论基础和一条有效的工艺途径。

## 2 实 验

### 2.1 实验材料

实验选用基材为 H13 热作模具钢,其化学成分(质量分数,%)为:Cr 4.75~5.00, Si 0.80~1.20, Mo 1.10~1.72, V 0.80~1.20, C 0.32~0.45, Fe 余量。激光熔覆基材试样尺寸为 100 mm×10 mm×10 mm。熔覆材料为 Ni 基自熔性合金粉末、Al 粉和 Mo 粉,粉末粒度均为 100 μm。实验前先将基材用不同型号的金相砂纸打磨去除氧化皮及油污后,再用无水乙醇和丙酮清洗干净。将 3 种粉末按一定比例(如表 1 所示)混合均匀,用自制有机粘合剂预置在 H13 钢基材表面,预置层厚度约为 1 mm,放在干燥箱中烘干 24 h 备用。

表 1 实验工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding

Sample No.	$P$ /kW	$V_s$ /(mm/min)	Al mass fraction /%	Mo mass fraction /%
S1	3.5	500	7.2	0
S2	3.5	350	7.2	5
S3	3.8	500	9.4	0
S4	4.7	350	9.4	5

### 2.2 实验方法

激光选区熔覆涂层在 GS-TFL-6000 型横流多模 CO<sub>2</sub> 激光器及其配套的五轴联动西门子数控机床上完成。激光功率  $P$  为 3.5~4.7 kW,扫描速度  $V_s$  为 350~500 mm/min,束斑直径为 6 mm,离焦量为 50 mm,高纯 Ar 作保护气体。具体工艺参数及试样编号如表 1 所示。熔覆涂层制备完成后,用线切割沿垂直于激光扫描方向制成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的金相试样,经不同粒度金相砂纸打磨、抛光后,用王水(体积比  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HCl}}=1:3$ )进行深度腐蚀。采用 LEICA DFC280 型光学显微镜观察熔覆层宏观形貌;通过分辨率为 3.5 nm 的 XL30ESEM-TMP 型扫描电镜(SEM)观察熔覆复合涂层显微组织。借助 D/Max2200 型 X 射线衍射仪(XRD)(Cu 靶  $K\alpha$  线波长为 1.54056 nm,管电压为 40 kV,管电流为 30 mA,扫描范围为  $10^\circ\sim90^\circ$ ,扫描速度为  $10^\circ/\text{min}$ )对不同 Al 含量的涂层进行物相分析。运用 HV-5 型小负荷维氏硬度计测量熔覆

涂层沿层深方向的显微硬度分布,载荷为 10 N,加载持续时间为 30 s。通过 MMU-5G 屏显式材料端面高温摩擦磨损试验机测试涂层的磨损性能,磨损速度为 200 r/min,载荷为 100 N,磨损时间为 60 min。

## 3 结果与讨论

### 3.1 涂层表面宏观形貌

图 1 给出了不同 Al、Mo 含量下熔覆涂层的宏观形貌。从图中可明显看出,4 种不同成分配比的熔覆涂层均显示出均匀连续、平整致密的形貌特征,同时均与 H13 钢基材呈现良好的冶金结合,这表明 4 种不同的 Al、Mo 配比均可在激光选区熔覆工艺下制备出较理想的复合涂层。但在 Al 含量增加后,复合涂层中的裂纹和微小气孔逐渐增多,说明 Al 含量的增加会导致熔覆涂层表现出较大脆性,从而使涂层中残余热应力增大。而在加入 Mo 后裂纹有所降低,是因为 Mo 起到了一定的强化作用,增大了固溶强化效果,提高了涂层的整体屈服强度。

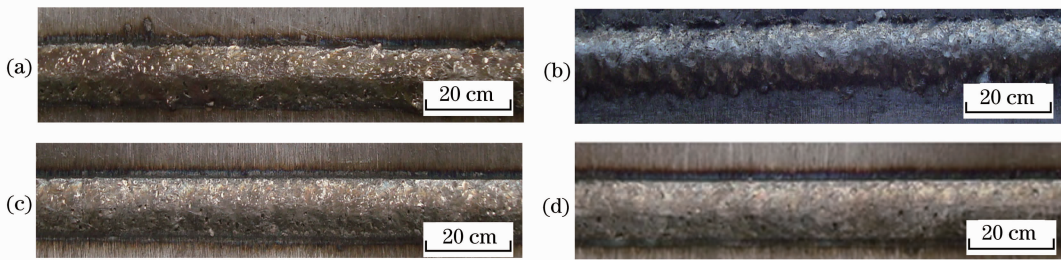


图1 不同 Al、Mo 含量下熔覆层的宏观形貌。(a)试样 S1;(b)试样 S2;(c)试样 S3;(d)试样 S4

Fig.1 Macroscopic morphologies of laser cladding coatings under different Al and Mo content conditions.

(a) Sample S1; (b) sample S2; (c) sample S3; (d) sample S4

### 3.2 涂层结构与物相组成

图2为不同 Al、Mo 含量下熔覆涂层的截面显微形貌。其中,图2(a)~(d)是结合界面处的显微组织,图2(a1)~(d1)是涂层中部较图2(a)~(d)放

大后的显微组织。可以看出,4种熔覆涂层均与基体形成了良好的冶金结合,涂层组织致密。由于激光熔覆快速凝固过程具有较大的过冷度及较高的冷却速度,从而导致凝固组织中出现较多非平衡相并最终导致熔覆涂层从底部到顶部晶粒越来越细小。同时,在远离界面处,由于温度梯度增加,当过冷度超过异质形核所需的程度时,涂层组织开始出现“内生生长”现象。4种不同成分的熔覆涂层基体组织均为较稳定的 $\gamma$ 奥氏体,同时,试样 S1,S2,S4 中,Ni 与 Al 结合形成起沉淀强化作用以阻碍位错运动的 $\gamma'$ 强化相,该相与基体形成( $\gamma+\gamma'$ )共晶(在显微组织中表现为黑色弥散点状)来提高熔覆层强度。而 S3 中,由于 Al 含量的增多导致 Ni 与 Al 反应生成 NiAl 金属间化合物即呈体心立方有序结构的 $\beta$ 相<sup>[16]</sup>。由此可认为,在相同的 Al 含量下,加入 Mo 后形成 NiAl 的倾向降低,其中面心立方有序结构的 $\gamma'$ 相即为高温合金的主要强化相。从显微形貌可直观看出,试样 S3 和试样 S4 熔覆涂层底部的枝晶区域明显比 S1 和 S2 中的枝晶区域宽,且熔池底部枝晶也更为粗大。这主要是因为 Al 含量的增加导致 Ni 与 Al 之间发生自蔓延反应,放出大量热量而使熔覆层底部过冷度降低所致,同时结合 S1 与 S2 中仅 Mo 含量变化却未出现上述类似情况认为,S4 的枝晶区域较 S3 更宽是由于激光功率大幅提升促使过冷度更低的缘故<sup>[17]</sup>。

4种不同 Al、Mo 含量下制备的熔覆涂层 XRD 图谱如图3所示。当 Al 含量(质量分数)为 7.2% 且未加入 Mo 时,熔覆层主要由 $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al、Ni<sub>3</sub>Fe 及少量(Ni,Cr)固溶体组成。由于大量 Ni 与 Al 结合形成 Ni<sub>3</sub>Al,从而导致原本可与 Ni 发生置换的 Fe 和 Cr 相互结合形成 (Fe,Cr)固溶体,同时,含有由 Al,Cr,Fe,C 等元素形成的三元相,如 Al<sub>4</sub>CrNi<sub>15</sub>等。而当 Al 含量不变,加入 5%Mo 时,熔覆层中开始出现 Fe-Mo 金属间化合物,致使物相中几乎没有

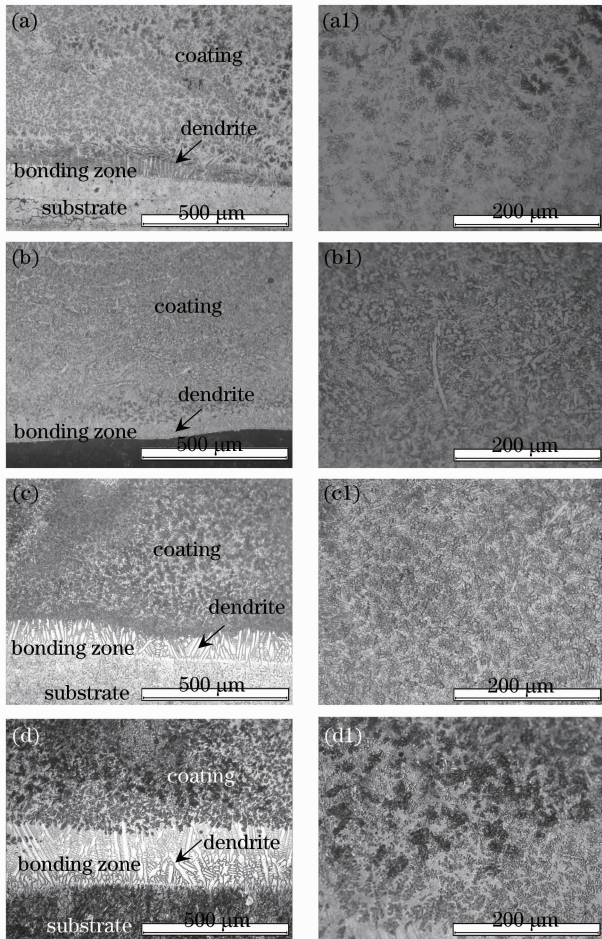


图2 不同 Al、Mo 含量的激光熔覆层截面在不同放大倍数下的显微组织。(a, a1)试样 S1;(b, b1)试样 S2;(c, c1)试样 S3;(d, d1)试样 S4

Fig.2 Cross section microstructures of cladding coatings under different Al and Mo content conditions. (a, a1) Sample S1; (b, b1) sample S2; (c, c1) sample S3; (d, d1) sample S4

$Ni_3Fe$  相,且同时在一定程度上降低了(Fe,Cr)固溶体形成的趋势,并最终导致(Ni,Cr)固溶体形成的趋势增大,而多余的Mo则与Fe、Al、Ni等元素结合形成多元相,如 $Cr_2Fe_{6.7}Mo_{0.1}Ni_{1.3}Si_{0.3}$ 等。当Al含量为9.4%且未加入Mo时,熔覆层中Ni开始与Al结合生成 $\beta-NiAl$ 相<sup>[18]</sup>,使涂层中(Ni,Cr)固溶体较含7.2% Al时低, $Ni_3Al$ 含量进一步增加,且涂层物相中基本不再含 $Ni_3Fe$ 。与此同时,试样S3中的(Fe,Cr)固溶体较S1中呈增多趋势,试样S1中出现的Al-Cr-Ni三元相由于大量Ni已与Al结合形成Ni-Al间金属化合物而基本消失,试样S3中三元相主要为Al-Fe-Si,如 $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$ 等。当9.4% Al中加入5% Mo时,熔覆层物相主要为 $Ni_3Al$ 、 $AlMo_3$ 、(Fe,Cr)固溶体和(Ni,Cr)固溶体,相比试样S3中出现了少量 $\beta-NiAl$ 而言,在S4中则基本没有 $\beta-NiAl$ 相生成。这是因为Mo与多余的Al结合形成 $AlMo_3$ ,该现象说明Mo的加入有助于减少 $\beta-NiAl$ 形成的倾向。在试样S4中,由于大量Ni与Al结合形成 $Ni_3Al$ ,一部分Mo与Al生成 $AlMo_3$ ,使得Mo-Fe金属间化合物也相对于S2要少,从而导致(Fe,Cr)固溶体含量有所增加;(Ni,Cr)固溶体含量虽也较S2中有所减少,但仍较S3中(Ni,Cr)含量多,这是因为在试样S4中又开始出现了Al-Cr-Ni三元相。

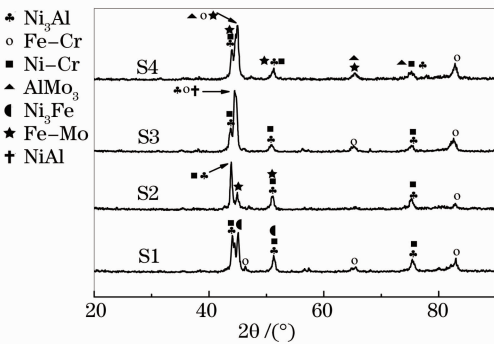


图3 不同Al、Mo含量下复合涂层的XRD图谱  
Fig. 3 XRD patterns of the composite coating under different Al and Mo content conditions

### 3.3 涂层显微硬度

图4为不同Al、Mo含量激光熔覆涂层沿层深方向的显微硬度分布曲线。由图4可以看出,试样S1~S4表面熔覆涂层显微硬度均明显高于H13钢基体(约为270 HV),其中试样S4涂层显微硬度最高,平均值达到1165 HV,约达H13钢基体的4.3倍。S3熔覆涂层显微硬度相对最低,平均值仅为717 HV,但仍比H13钢基体提高了约1.6倍。这

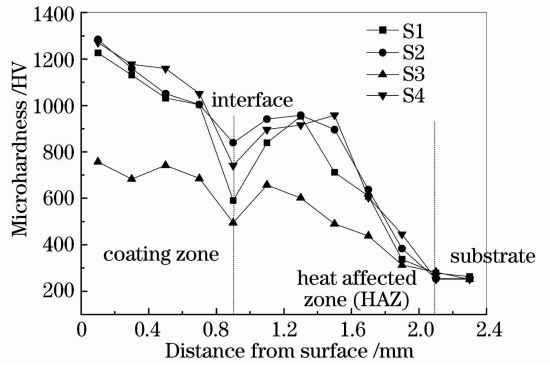


图4 复合涂层横截面的显微硬度分布曲线  
Fig. 4 Cross-section microhardness distribution curves of the laser cladding composite coating

是因为试样S3、S4所含 $\gamma'-Ni_3Al$ 相较S1、S2稍多,但试样S3相对于S4又有会降低涂层力学性能的 $\beta-NiAl$ 相生成<sup>[19]</sup>。同时,试样S1~S4在距离涂层表面0.9 mm(界面)处均有明显回落,但在热影响区(HAZ)处却有回升,之后又开始缓降直至接近基体硬度。结合图2所示熔覆涂层显微组织特征可发现,硬度出现陡降的部位均为枝晶区域,这是因为在Ni与Al发生自蔓延反应放出大量热量以及激光功率密度的增加两者综合作用下,熔池底部稀释作用增加的同时晶粒过快增长,从而导致涂层致密度下降并最终影响显微硬度。但从图4中也可分辨出,试样S2与S4在界面处的硬度虽呈现出陡降现象,但界面处显微硬度仍比S1在同一位置时要高,这说明试样S2与S4这两组成分中,Mo的加入均起到了沉淀强化作用,且效果较明显。

### 3.4 涂层摩擦磨损性能

图5、图6分别为基材及试样S1~S4的摩擦系数随时间的变化曲线和磨损失重图。由图5可以看

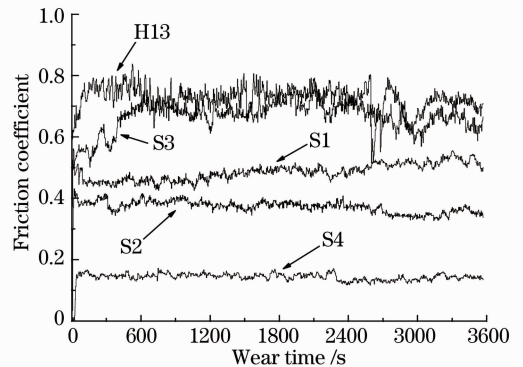


图5 熔覆涂层摩擦系数随时间的变化曲线  
Fig. 5 Curves of laser cladding composite coating friction coefficient versus wear time

出,除试样 S3 外其余 3 种熔覆涂层摩擦系数均比 H13 钢低且波动也较小,其中以试样 S4 摩擦系数最低,平均值仅约为 0.15,试样 S3 摩擦系数平均约 0.68,而基材 H13 钢摩擦系数平均值约为 0.71。另外,从图 6 可以看出,试样 S1~S4 这 4 种熔覆涂层的磨损失重均小于 H13 钢(磨损失重为 17.43 mg)基体,其中,试样 S3 的磨损失重较基体减少了约 1.9 倍,而 S2(磨损失重为 3.65 mg)较基体减少了约 3.8 倍。结合上述显微组织和物相分析,表明具有单一、致密组织的  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相可使熔覆涂层具有更为优异的抗摩擦磨损性能。同时,Mo 的添加加强了试样 S1 与 S3 中仅含一定量 Cr 固溶在 Ni 基中时所起到的固溶强化效果,从而使试样 S2 与 S4 的抗摩擦磨损性能较 S1 与 S3 有明显提升。

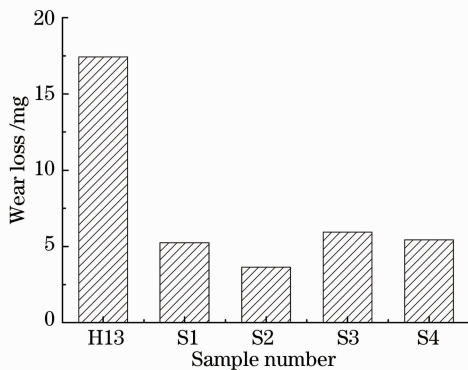


图 6 熔覆复合涂层的磨损失重变化

Fig. 6 Wear loss of the laser cladding composite coatings and H13 steel substrate

## 4 结 论

1) 通过控制 Ni 基自熔性合金粉末中的 Al、Mo 含量,运用激光选区熔覆技术在 H13 热作模具钢表面原位制备了平整、无明显缺陷且与基材呈良好冶金结合的 Ni-Al 间金属化合物复合涂层。涂层主要由  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相形成,同时含有少量(Ni,Cr)及(Fe,Cr)固溶体,且加入 Mo 后,有助于减少  $\beta\text{-NiAl}$  生成的倾向。

2) 在高能激光束作用下,Ni 与加入 Ni 基自熔性合金粉末中的 Al 发生原位自生反应生成  $\text{Ni}_3\text{Al}$ 。当 Al 含量达到 9.4% 时,涂层中开始出现  $\beta\text{-NiAl}$  相,但在加入 5% Mo 后,这种趋势被阻断。同时,激光功率密度和 Al 含量的增加,导致涂层显微形貌在结合界面处呈现出枝晶区域变宽及晶粒粗化现象。

3) 激光熔覆层的显微硬度明显高于 H13 钢,最高约为基体的 4.3 倍。不同 Al 含量的涂层试样

显微硬度均呈现在结合界面处陡降、在热影响区回升的现象。所有涂层试样的摩擦系数均低于 H13 钢基体且波动小,最低磨损失重仅 3.65 mg,耐磨性较基体提高了 3.8 倍。

## 参 考 文 献

- Shaharam Kheirandish, Ahmad Noorian. Effect of niobium on microstructure of cast AISI H13 hot work tool steel[J]. *J. Iron and Steel Research*, 2008, **15**(4): 61~66
- Li Zhigang. Investigation on Surface Modification of Die-Casting Mould Steel H13 [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. 1~15  
李志刚. 热作模具钢 H13 表面改性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008. 1~15
- Wang Meng, Liu Zongde, Bao Zhijian. Study on failure mechanism of H13 steel hot-forging dies for automobile[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2008, **33**(4): 83~86  
王孟, 刘宗德, 宝志坚. H13 钢汽车热锻模具失效机理分析[J]. 锻压技术, 2008, **33**(4): 83~86
- Wang Yanfang, Li Li, Lu Qinglong *et al.*. Laser cladding Fe-based amorphous coating on stainless substrate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603017  
王彦芳, 栗荔, 鲁青龙等. 不锈钢表面激光熔覆铁基非晶涂层研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603017
- Gao Xuesong, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Study on  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  coating prepared by laser cladding and thermal shock resistance[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0203006  
高雪松, 田宗军, 沈理达等. 激光熔覆  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  陶瓷层制备及其抗热震性能[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0203006
- Jiang Hua, Tang Haibo, Fang Yanli *et al.*. Microstructure and mechanical properties of rapid solidified ultra-fine columnar grain Ni-based superalloy DZ408 by laser melting deposition manufacturing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0203004  
姜华, 汤海波, 方艳丽等. 激光熔沉沉积 DZ408 镍基高温合金微细柱晶显微组织及性能[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0203004
- Feng Shurong, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Wear resistance of laser clad hard particles reinforced intermetallic composite coating on TA15 Alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0203002  
冯淑蓉, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0203002
- Liu Hongxi, Zeng Weihua, Zhang Xiaowei *et al.*. Microstructures and properties of multiple-pass laser cladding Ni-based coatings on stainless steel surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1515~1523  
刘洪喜, 曾维华, 张晓伟等. 不锈钢表面多道激光熔覆 Ni 基涂层的组织与性能[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(7): 1515~1523
- Zhang Milan, Xing Shuming, Xin Qiao *et al.*. Abnormal failure analysis of H13 punches in steel squeeze casting process[J]. *J. Iron and Steel Research*, 2008, **15**(3): 47~51
- Xiong Zheng, Chen Guangxia, Zeng Xiaoyan. Effects of process variables on interfacial quality of laser cladding on blade material GH4133[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2009, **209**(2): 930~936
- Wang Chuanqi, Liu Hongxi, Zhou Rong *et al.*. Influence of tempering on microstructure and corrosion resistance of multi-pass Ni-based coatings on 45 steel prepared by laser cladding[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, **32**(7): 145~150  
王传琦, 刘洪喜, 周荣等. 回火处理对多道 Ni 基熔覆涂层组织和耐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, **32**(7): 145~150

- 12 Knut Partes. Analytical model of the catchment efficiency in high speed laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, **204**(3): 366~371
- 13 Gu Shengting, Chai Guozhong, Wu Huaping *et al.*. Characterization of local mechanical properties of laser-cladding H13-TiC composite coatings using nanoindentation[J]. *Materials & Design*, 2012, **39**: 72~80
- 14 Fidel Zapirain, Fidel Zubin, Fermin Garcandia *et al.*. Development of laser welding of Ni based superalloys for aeronautic engine applications (experimental process and obtained properties)[J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**: 105~112
- 15 H. Y. Kim, D. S. Chung, S. H. Hong. Reaction synthesis and microstructures of NiAl/Ni micro-laminated composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, **396**(1-2): 376~384
- 16 C. A. Alexander, J. S. Ogden, S. M. Risser *et al.*. Thermodynamic characterization of NiAl [J]. *J. Chemical Thermodynamics*, 2009, **41**(5): 610~616
- 17 Zhang Xiaowei, Liu Hongxi, Jiang Yehua *et al.*. Laser *in situ* synthesized TiN/Ti<sub>3</sub>Al composite coatings [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, **47**(8): 1086~1093  
张晓伟,刘洪喜,蒋业华等. 激光原位合成 TiN/Ti<sub>3</sub>Al 基复合涂层[J]. *金属学报*, 2011, **47**(8): 1086~1093
- 18 Lu Bizhi, Long Jianzhan. Study on the synthesis mechanism of Ni-Al intermetallic compound [J]. *Cemented Carbide*, 2011, **28**(5): 276~282  
陆必志,龙坚战. Ni-Al 金属间化合物合成机理的研究[J]. *硬质合金*, 2011, **28**(5): 276~282
- 19 Yang Lianbin, Yu Youjun. The properties of NiAl intermetallic compound coating synthesized by laser cladding [J]. *Chinese Surface Engineering*, 2010, **23**(5): 36~40  
杨连斌,俞友军. 激光原位合成 NiAl 金属间化合物覆层的性能[J]. *中国表面工程*, 2010, **23**(5): 36~40

栏目编辑: 宋梅梅