doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2010.02.014

# 快速成形堆积层表面制备耐磨涂层的组织及性能\*

曹 勇<sup>a</sup>,朱 胜<sup>a</sup>,石海滨<sup>b</sup>,孟凡军<sup>a</sup>,王望龙<sup>a</sup>

(装甲兵工程学院 a. 装备再制造技术国防科技重点实验室 b. 训练部,北京 100072)

摘 要:为了提高快速成形零件的服役性能,采用机器人脉冲熔化极气体保护焊工艺在H08Mn2Si 堆积材料表面制备 了耐磨涂层。利用扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)观察分析了基体和涂层的组织形貌,在纳米硬度计上测试了基体--过渡区-涂层的硬度变化,采用 T11 摩擦磨损试验机考察了油润滑条件下基体和涂层的摩擦学性能。试验结果表明, 熔覆涂层与快速成形堆积基体材料呈冶金结合,无孔洞、裂纹出现,沿基体-涂层方向随着距离的增大材料显微硬度呈 增大趋势。熔覆涂层的摩擦因数低于快速成形堆积基体材料,磨损过程也更平稳,相对耐磨性是快速成形堆积基体的 5.91 倍。这主要是由于熔覆涂层基体硬度较高且有 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>等硬质相形成所致。

关键词:快速成形;脉冲熔化极气体保护焊;组织形貌;耐磨性

中图分类号: TG444.73 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2010)02-0069-05

### Microstructure and Performance of Wear-resistant Coating on Deposited Surface by Rapid Forming

CAO Yong<sup>a</sup>, ZHU Sheng<sup>a</sup>, SHI Hai-bin<sup>b</sup>, MENG Fan-jun<sup>a</sup>, WANG Wang-long<sup>a</sup>

(a. National Defense Key Laboratory for Remanufacturing b. Training Department, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

**Abstract:** In order to improve property of parts manufactured by layer deposited processing, wear–resistant coating by robotic gas metal arc welding–pulse processing (GMAW–P) are prepared on test sample accumulated with H08Mn2Si welding wire. The microstructures, hardness, wear–resisting property of cladding layer are analyzed by scanning electron–microscope, nano–hardness tester and T11 high temperature–wear testing machine. The results show that metallurgical bonding between laser–cladding layer and substrate deposited with H08Mn2Si, there are no cracks in the cladding coatings. With the increase of distance, the micro hardness increases along substrate–cladding coating direction. The friction coefficient of coatings is lower and wear process of the coatings is more stable than those of parent material by rapid prototyping under oil lubricating. The reasons of higher matrix hardness of coating and some hard phases among coatings such as  $M_7C_3$  among coatings make the wear resistance of cladding coating is 5.91 times that of the substrate deposited with H08Mn2Si.

Key words: rapid forming; gas metal arc welding-pulse; microstructure; wear-resistance

## 0 引 言

用于模具和零件制造的金属零件快速成形技 术在缩短制造时间、降低制造成本、提高企业市场 应变力和竞争力方面具有特殊优势并已成为国际 研究热点之一<sup>[1-5]</sup>,其中基于三维焊接的金属零件快 速成形技术因具有经济性好、材料利用率高、零件

收稿日期: 2009-12-15; 修回日期: 2010-03-09 基金项目: \*国家自然基金项目(50975286); 国防科技重点实验室 基金(No 9140C8502050806); 国防基金项目(No 9140C8502050806) 作者简介: 曹勇(1974—), 男(汉), 山西新绛人, 讲师,博士生。 致密、可控性好以及可制造异质结构零件等优点而 成为低成本金属零件快速制造的重要研究方向<sup>[6-7]</sup>。 起万华等人基于脉冲微束等离子弧快速成形工艺 对成形参数进行了优化并研究了成形轨迹间的搭 接系数<sup>[8-9]</sup>。张建勋等人采用神经网络对CO<sub>2</sub>气保焊 焊缝形状进行了预测并进行了直接堆焊成形的实 验<sup>[10-11]</sup>。丁冬平等人构建了焊接快速成形系统并对 成形规律进行了研究<sup>[12]</sup>。近年来,为了提高成形零 件的质量和尺寸精度,将焊接堆积与铣削去除相结 合来实现零件快速成形的混合快速制造技术已成 为一个新的研究方向<sup>[13-17]</sup>。Sreenathbabu Akula等人 实现了焊接系统和数控铣削系统的一体化控制。 Song Yong-Ak等人基于三坐标工作台建立了焊接 铣削复合制造系统,并采用该系统制造出了风扇叶 片模具。上述研究主要围绕成形过程中的几何控形 和一体化控制展开。随着表面工程技术、尤其是机 器人焊接工艺和焊接功能材料的发展,将机器人功 能焊接与快速成形堆积相结合,实现新型零件(低 成本、弱性能的结构材料+功能表面)的快速制造, 则有望在缩短制造周期、降低制造成本的同时,大 幅提高零件的服役性能。

1 试 验

### 1.1 试验条件及方法

试验基于机器人GMAW焊/数控铣削快速制造 系统。该系统主要由该系统主要包括机器人激光焊 缝扫描与建模子系统、机器人GMAW堆积近净成形 子系统、数控铣削去除净成形子系统、主控计算机 及相关软件等。试样基体采用H08Mn2Si焊丝堆积, 耐磨涂层采用UTP焊丝,其成分分别见表1和表2。 保护气体为混合气体(氩气80%+二氧化碳20%), 焊接工艺为焊接电流115 A,焊接电压28 V,焊接 速度25 mm/s,气体流量为18 L/min。

表 1 H08Mn2Si 的化学成分(质量分数 %) Table 1 Chemical composition of H08Mn2Si(w/%)

	•		· · · ·			
С	Si	Mn	Cr	S	Р	Fe
≤0.11 0	).65~0.95	1.7~2.1	≤0.20	≤0.035	≤0.035	余量
表 2 UTP A DUR600 焊丝的化学成分(质量分数 %) Table 1 Chemical composition of UTP A DUR600 (w/%)						
С	Si	Mn	Cr	S	Cu	Fe
0.470	31	0.40	915	0.002	0.19	全昰

#### 1.2 组织和性能测试

采用扫描电子显微镜(SEM)及配置的能谱分析 仪(EDS)分析块体材料的微观组织形貌和元素分布, 用纳米硬度计测量涂层与快速成形堆积基体界面处 的硬度变化。摩擦磨损试验在 T11 型高温摩擦磨损 试验机上进行,摩擦对偶球材质为 GCr15,硬度为 65HRC,直径(D)为 6.35 mm,摩擦试验条件为:室 温,30#机油润滑,滑动速度 0.2 m/s,滑动距离 2000 m,采用失重法来评价材料的耐磨性,称量精度为 0.1 mg,摩擦因数根据摩擦力计算得到。试验前后 将试样放入丙酮中并采用超声波清洗 5 min。

## 2 试验结果及讨论

2.1 界面组织

图 1 示出了快速成形堆积材料/涂层的组织形 貌和各元素的面分布图。

快速成形堆积材料组织主要为铁素体和珠光体,涂层主要由奥氏体和二次渗碳体组成<sup>[18]</sup>。涂层和快速成形堆积基体组织致密,无裂纹、气孔和明显夹杂。界面处结合紧密,铬、硅、锰元素沿快速成形堆积基体-涂层方向呈梯度变化,表明由铬、铁、碳元素形成的(Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>硬质相在涂层内均匀分布。



(a) 扫描区域 (b) 锰 (c) 硅 (d) 铬
 图 1 涂层表面元素扫描图谱
 Fig.1 EMPA maps of the layer

# 2.2 界面区域的显微硬度

图2示出了快速成形堆积基体--过渡区-涂层材



图 2 快速成形堆积基体--过渡区--涂层的载荷--深度曲线 Fig.2 Load-depth curve of basal body-translational area-coating

料纳米压痕试验中的载荷--位移深度曲线。可以看 出,相同载荷下,沿基体--涂层方向纳米压痕深度 呈减小趋势,表明沿此方向材料硬度逐渐增加。

图3示出了快速成形堆积材料与涂层过渡区的 硬度变化。可以看出,快速成形堆积材料的硬度为 3.2 GPa,沿快速成形堆积材料-涂层方向随着距离 的增加,材料硬度上升到9.01 GPa并趋于恒定。在 快速成形堆积材料区域,由于材料中的碳、铬、硅 等合金元素含量都较低,材料硬度较低。在涂层区 域,高含量的硅对涂层具有显著的强化效果,同时, 由于(Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>等硬质相的弥散强化<sup>[19-20]</sup>,使得材 料硬度大幅上升。



#### 2.3 基体与涂层的耐磨性

图4示出了快速成形堆积材料和涂层的磨损失 重。可以看出,快速成形堆积基体的磨损失重为 26.7 mg,而涂层的磨损失重仅为4.52 mg,相对耐 磨性提高了4.91倍,这主要是由于在硅元素的固溶 强化以及碳化物颗粒弥散强化作用下,涂层硬度大 幅提高,使磨粒锲入受阻,耐磨性得以增强。这也 表明通过对快速成形堆积材料进行焊接改性,可使 得快速成形堆积材料服役性能大幅提高。

图5示出了快速成形堆积材料基体和涂层的摩 擦因数变化曲线。可以看出,摩擦磨损试验过程中, 快速成形堆积材料的摩擦因数要高于涂层材料,而 且磨损不平稳。快速成形堆积材料涂层摩擦过程平 稳,摩擦因数保持在0.13左右。这是由于快速成形 堆积材料与GCr15相比相对较软,GCr15微凸体更 易于锲入快速成形堆积材料,所受阻力大,因而摩 擦因数要高于涂层材料。快速成形堆积材料磨损过 程中出现的不平稳是由于微凸体每次锲入快速成



图 4 基体和涂层的磨损失重 Fig.4 Weight loss for base body and coating





Fig.5 Friction coefficient for substrate and coating

形堆积组织深度及宽度的不均匀,导致摩擦阻力发 生变化而引起的。

#### 2.4 磨损失效机制

图6示出了快速成形堆积材料和涂层磨损后的 表面形貌。可以看出,快速成形堆积材料的磨损试 样表面有较深的犁沟,这些犁沟平行于滑动方向, 并且其边缘几乎看不到塑形变形的痕迹,表明磨损 失效机制主要是显微切削。这主要是由于快速成形 堆积材料硬度远小于 GCr15, GCr15 微凸体锲入快 速成形堆积材料的深度大,对快速成形堆积材料产 生的犁削作用较为明显,致使沟槽宽且深。

与快速成形堆积材料相比,涂层磨损表面较为 光滑,犁沟条纹较浅,数目也较少,且磨损表面有 少量凹坑。其磨损机制以显微切削为主,同时伴有 接触疲劳磨损。涂层硬度较高,硬质磨粒划过涂层 表面时,锲入深度小,对涂层犁削作用较弱,形成



(a) 快速成形堆积材料



(b) 耐磨涂层 图 6 快速成形堆积材料和涂层磨损形貌

Fig.6 Micrographes of the worn surface (a) surface deposited by rapid forming (b) coating

较浅的沟槽。凹坑是由于硬度较高的磨屑以及脱落的(Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>等硬质颗粒多次对涂层表面进行碾压 致使涂层局部出现接触疲劳失效并脱落而造成的。

3 结 论

基于机器人焊接快速成形系统,采用 H08Mn2Si 焊丝快速成形了快速成形堆积结构材料,以此为基材焊接堆积了耐磨涂层,实现了快速 成形和表面改性的有机统一,大幅提高了快速成形 材料的表面耐磨性能,对先进制造和表面工程的发 展具有积极的推进作用。

(1)快速成形堆积基体与耐磨涂层组织致密, 界面呈冶金结合,无裂纹、气孔等缺陷。 (2)沿快速成形堆积基体-涂层方向,随着距 离的增大材料硬度由 3.2 GPa 增大到 9.01 GPa。这 主要是由于硅元素的固溶强化和碳化物在涂层中 的弥散分布所致。

(3)同快速成形堆积基材相比,涂层具有优异的摩擦学性能,相对耐磨性提高了4.91倍,摩擦因数较低,且磨损过程较为平稳。快速成形堆积材料的磨损机制是显微切削,涂层材料磨损机制以显微切削为主,同时伴有接触疲劳。

## 参考文献:

- Wang H, Jiang W, Ouyang J, et al. Rapid prototyping of 4043 Al–alloy parts by VP–GTAW [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004 (148): 93-102.
- [2] Yin Y, Hu S, Zhang X, et al. Effect of processing parameters on figuration during the GMAW rapid prototyping process [J]. China Welding, 2006 (4): 30-33.
- [3] Male A T, Chen Y W, Pan C, et al. Rapid prototyping of metal components by plasma–jet forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003 (1-3): 340-346.
- [4] Terakubo, Janghwan O H, Kirihars S, et al. Freeform fabrication of titanium metal by 3D micro welding [J]. Materials Science and Engineering A, 2005 (1): 84-91.
- [5] Zhang Y M, Chen Y, Li P, et al. Weld deposition-ased rapid prototyping: a preliminary study [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003 (135): 347-357.
- [6] 向永华,徐滨士,吕耀辉,等.微束等离子粉末熔覆 金属零件直接快速成形研究[J].中国表面工程, 2009,22 (4):44-48.
- [7] 乌日开西.艾依提,赵万华.基于三维堆焊的直接金属快速制造技术 [J]. 机床与液压,2008,36 (8):
  13-16.
- [8] 乌日开西.艾依提,赵万华,卢秉恒.基于微束等离子焊的快速成形中成形参数的优化 [J].西安交通大学学报,2006,40(5):568-572.
- [9] 乌日开西.艾依提,赵万华,卢秉恒等.基于脉冲微 束等离子弧焊的快速成形中的搭接参数 [J]. 机械工 程学报, 2006, 42(5): 192-196.
- [10] 李振岗,朱 形,张建勋. 基于机器人 CO<sub>2</sub> 气体保护 焊的直接堆焊成形研究 [J]. 焊接技术, 2007, 36 (2):

17-20.

- [11] 张建勋, 王 军, 裴 怡, 等. 气保焊焊缝形状的神经 网络预测模型 [J]. 焊接技术, 2002 (3): 11-12.
- [12] 丁冬平. 基于焊接机器人的熔焊成形系统及成形规律的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [13] Ruan Jianzhong, Kunnayut Eiamsa-ard, LIOU F W. Automatic process planning and toolpath generation of a multiaxis hybrid manufacturing system [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2005 (1): 57-68.
- [14] Frank Liou, Kevin Slattery, Mary Kinsella, et al. Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures [J]. Rapid Prototyping Journal, 2007 (4): 236-244.
- [15] Akula Sreenathbabu, Karunakran K P. Hybrid adaptive layer manufacturing: An Intelligent art of direct metal rapid tooling process Robotics and Computer– ntegrated Manufacturing [J]. 2006 (22): 113-123.
- [16] Song Y A, Park S, Choi D, et al. 3D welding and milling: Part I–A direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005 (11): 1057-1062.
- [17] Song Y A, Park S, Chae S W. 3D welding and milling:part II-optimization of the 3D welding process using an experimental design approach [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005(11): 1063-1069.
- [18] 孟凡军,朱 胜,巴德玛. 45CrNiMoVA 钢堆焊修复 层组织及摩擦学性能 [J].机械工程学报,2008,44 (4): 150-153.
- [19] 蒋建敏, 夏立明, 贺定勇, 等.铌含量对 Fe-Cr-C 熔 敷金属组织与性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2006, 16 (4): 40-42.
- [20] 张元彬, 史耀武. Fe-Cr-Ti-Nb-V-C 系堆焊层的组 织及耐磨性研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 16 (4): 40-42.

作者地址:北京市丰台区杜家坎 21 号 100072 装备再制造技术国防科技重点实验室 Tel: 131 6167 8931 E-mail: coyg74@live.cn (上接第 68 页)

在热的作用下组织将会发生变化。在摩擦磨损过程 中,组织的变化将对涂层的摩擦磨损性能产生较大 影响。

(2)激光熔覆 Ni60B 涂层随温度上升,发生 元素扩散,Ni 基合金基体中固溶的 Cr、Fe、C 脱 溶,涂层中碳硼化物形态变化并发生晶型转变,在 900 ℃时才有相析出现象。

(3) WCm 涂层和 WCn 涂层随着温度的升高,W 元素扩散能力增强,原始涂层中 Ni 基固溶体中出现 W 和 Cr、Fe、C 的脱溶,涂层中含 W 碳化物中发生 W 扩散、偏聚乃至脱溶生成 WC, 细长型树枝晶发生枝晶球化,同时主枝干处析出 WC。纳米 WCn 涂层由于过饱和度较微米 WCm 涂层大,因此发生组织变化的驱动力大,出现上 述变化的温度降低。

参考文献:

- [1] 徐采云. 激光熔覆 WC/Ni 基合金复合涂层的组织结构及磨损诱发相变 [D]. 2006, 北京: 中国矿业大学 (北京).
- [2] Chen Huahui, et al, Microstructure and phase transformation of WC/Ni60B laser cladding coatings during dry sliding wear [J]. Wear, 2008, 264(7-8): 487-493.
- [3] Lin Y C, Wang S W. Wear behavior of ceramic powder cladding on an S50C steel surface [J]. Tribology International, 2003, 36: 1-9.
- [4] Lim L C. Annealing of plasma–sprayed WC–Co coating[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 79: 151-161.
- [5] Guilemany J M. Role of heat treatments in the improvement of the sliding wear properties of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 157: 207-213.
- [6] Wu Xiaolei. Rapidly solidified nonequilibrium microstructure and phase transformation of laser–synthesized iron–based alloy coating [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 115: 153-162.

作者地址:北京学院路丁11号 100083 中国矿业大学(北京)机电学院材料系 Tel: (010) 6233 1241 E-mail: camchh@yahoo.com