doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2010.06.008

激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层的组织与性能*

戎 磊^{a,b},黄 坚^{a,b},李铸国^{a,b},李瑞峰^{a,b}

(上海交通大学 a. 上海市激光制造与材料改性重点实验室 b. 材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要:利用 15 kW 横流连续输出 CO₂ 激光器在 CCS-B 钢板上熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层,研究了不同 WC 颗粒含量下熔覆层组织形态和显微硬度的变化规律。结果表明,在激光熔覆 Ni 基合金与 WC 颗粒混合粉末的过程中,WC 颗粒发生溶解并与周围元素相互作用形成低熔点共晶,析出后分别以树枝状、块状与粒状等形态存在;随着 WC 含量增加,熔覆层上部区域 γ-Ni 枝晶先粗化后变细,熔覆层下部区域枝晶组织持续增多且粗化。随 WC 含量增加,熔覆层平均硬度增加,WC 质量分数为0%时,熔覆层平均硬度约为基体的3倍,当 WC 质量分数增加到 30%时,熔覆层平均硬度可达到基体硬度的4倍。

关键词:激光熔覆;Ni基合金;WC颗粒;微观组织;硬度 中图分类号:TG174.44 文献标识码:A 文章编号:1007-9289(2010)06-0040-05

Microstructure and Property of Laser Cladding Ni-based Alloy Coating Reinforced by WC Particles

RONG Lei^{a,b}, HUANG Jian^{a,b}, LI Zhu-guo^{a,b}, LI Rui-feng^{a,b}

(a. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification b. School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The 15kW continuous wave CO₂ laser has been used for cladding WC reinforced Ni–base alloy to steel CCS–B. The effect of WC weight percent on microstructure and microhardness of laser cladding layers was studied. The results show that in the process of laser cladding the mixture of WC particles and Ni–based alloy powder, WC particles dissolve and react with surrounding elements to form low melting point eutectics, which exist in the shape of branch, block and grain. With the increasing of WC content, γ –Ni dendrites in the upper zone of cladding layers first coarsen then refine, which coarsen steadily in the lower zone of cladding layers. At the same time, the average hardness of cladding layers increases, which is about three times that of the matrix when weight percent of WC is 0 %, while it can be four times that of the matrix when weight percent of WC is 30 %.

Key words: laser cladding; Ni-base alloy; WC particle; microstructure; hardness

0 引 言

激光熔覆是通过在基材表面添加熔覆材料,利 用高能密度激光束使之与基材表面薄层一起熔凝, 与基体形成冶金结合熔覆涂层的一种新型表面改 性技术。它可通过在基材表面熔覆适当的材料来提 高工件表面的耐磨、耐蚀、抗氧化等性能^[1]。

金属-陶瓷复合涂层由于成功地将金属的延展 性、高强度和陶瓷相的高熔点、较好的化学稳定性、 高强度等性能结合起来,构成一种新的复合材

收稿日期:2010-06-13;修回日期:2010-09-01 基金项目:*科技部国际科技合作基金项目(2009DFB50350) 作者简介:戎磊(1987---),男(汉),山西省忻州人,硕士生。 料,具有广阔的应用前景^[2]。近些年国内外对这类 涂层研究较多的是在Ni、Co基粉中添加WC、SiC 等陶瓷相的硬质复合涂层^[3-6]。其中,WC是耐磨性 极佳的硬质材料,可借助于起钎料作用的胎体金属 形成硬质合金或相应的耐磨材料及复合涂层^[7]。Ni 基合金对WC有很好的润湿性。因此,激光熔覆WC 颗粒增强Ni基合金涂层以其优良的耐磨性能和适 中的价格在工业界得到了广泛应用^[8]。

有文献曾研究随WC含量的不同,WC颗粒增强 Ni基合金涂层特性的演变规律^[9,10]。不过在不同的 工艺条件和材料成分下,可能会呈现出不同的演变 规律,尤其是目前对高功率条件下激光熔覆WC颗 粒增强Ni基合金涂层研究较少。文中通过在CCS-B 钢板表面用高功率激光熔覆WC颗粒增强Ni基合金 涂层,研究了随WC含量的变化,熔覆层组织形态 和显微硬度的特性及变化规律。

1 试验材料与方法

试验所用基体材料为CCS-B钢板,将其加工成 尺寸为15 mm×10 mm×8 mm的试样块,表面经过 打磨并用丙酮清洗干净。所用熔覆材料为镍基自熔 合金粉末Deloro60与不同含量WC颗粒组成的混合 粉末。Deloro60镍基合金粉末粒度为53~74 μm (-200~+270目),化学成分 (质量分数/%)为:0.65C, 15.00Cr, 4.30Si, 4.00Fe, 0.10Mo, 0.10Mn, 3.10B, Ni余 量。WC颗粒粉末粒度为47~74 μm (-200~+325目)。

将WC分别以质量分数为10%、20%、30%的 比例掺入Deloro60,并用行星式球磨机混合均匀。 另外,以不掺入WC的Deloro60镍基合金粉作为对 照组。试验前将这些粉末置于烘箱中,150℃下烘 烤2h。

用15 kW横流连续输出CO₂ 激光器进行单道激 光熔覆,采用侧向同步送粉方式。熔覆工艺参数为: 激光功率6 kW,扫描速度500 mm/min,送粉速率 6 g/min,光斑直径4 mm。为防止氧化,熔覆时连 续吹氦气进行保护。试验装置示意图如图1所示。

将熔覆试样沿横截面截取一段并镶嵌,磨平、 抛光后用稀王水溶液腐蚀。在金相显微镜下观察金



图 1 激光熔覆试验装置示意图 Fig.1 Schematic of laser cladding setup

相组织,并利用扫描电镜及EDX分析其成分;在显 微硬度仪上测试涂层剖面硬度,载荷4.904 N,加载 时间10 s。

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌与稀释率

图 2 示出了不同WC颗粒含量下熔覆层截面 宏观形貌。为比较稀释率的大小,通过式(1)进 行计算^[11]:

$$\eta = (h/h + H)100 \%$$
 (1)

式中: η 为熔覆层的稀释率,H为熔覆层的高度(mm),h为基体的熔深(mm)。

通过测量*H*与*h*+*H*,计算稀释率的大小结果如 表1所示。





Table 1 The results of dilution				
w(WC) / %	H/mm	h+H/mm	h / mm	η / %
0	1.42	1.63	0.21	12.9
10	1.08	1.42	0.34	23.9
20	0.70	1.32	0.62	47.0
30	0.56	1.28	0.72	56.3

主 1 径级索计管结田

从表1可看出,随着WC含量的增加,熔覆层稀 释率逐渐增大。这是由于随WC含量的增加,熔覆 相同厚度涂层所需最小比能量减小,导致了相同工 艺条件下整个熔覆层温度升高^[9]。

2.2 微观组织特征

图3示出了不同WC颗粒含量下熔覆层的微观 组织。其中,图3(a)、(b)为不加WC的镍基合金熔 覆层上部和下部组织。从图3(a)可以看出,熔覆层 组织主要由γ-Ni树枝晶和枝晶间多元共晶组成,其 间分布着一些Cr、Fe的硼化物、碳化物等硬质相^[12]。 从3(b)可以看出,熔覆层下部与上部相比,形成了 更多有方向性的枝晶组织。对图3(a)中某一白色枝 晶、灰色块体进行EDX分析,结果如图4所示。

经计算得白色枝晶的成分相对含量为(主要成 分的相对质量分数,下同): 65.10Ni, 11.20Cr, 18.61Fe, 4.22Si, 1.28C, 0.60B, 灰色块体的成分相对 含量为: 25.88Ni, 54.74Cr, 13.60Fe, 3.20Si, 1.92C, 0.67B。因此可确定白色枝晶为γ-Ni,而灰色块体 为Cr元素偏聚的组织。在图3(a)中取65 μm×50 μm 区域,测得其平均成分相对含量为(下面测平均成 分时,也取相同大小的区域): 61.20Ni, 17.61Cr, 13.29Fe, 4.47Si, 1.33C, 1.09B。与Ni基合金粉末平均 成分相比,Fe元素含量显著偏高,结合宏观形貌可 知是因为稀释率的存在使得基材中的部分Fe元素 进入熔覆层中。

WC的分解温度为2776±10℃,且对CO₂激光(波 长10.6 µm)的吸收系数较金属粉末高得多。因此加 入WC颗粒后,在高能激光束的作用下一部分WC 颗粒会熔解(烧损),这些熔解的WC与作为基材的 镍基合金熔覆层其它元素相互作用,会形成低熔点 的碳化物共晶组织,它们会由于熔池内高速对流而 以游离态存在于熔池或溶解于镍基合金后重新凝 固结晶析出,进而改变原有的金相组织^[10,13]。

因此当WC质量分数增加到10%时,从图3(c)、

3(d)可看出熔覆层组织与不加WC时存在比较大的 差异,熔覆层中出现了深色的树枝状组织。与不加 WC时相比,熔覆层上部的一些γ-Ni枝晶组织粗化; 熔覆层下部由于稀释率增大,出现了更多的枝晶组 织。图3(c)中深色树枝状物组织的成分相对含量: 43.42Ni, 20.37Cr, 18.88Fe, 10.46W, 2.42Si, 3.20C, 1.24B, γ-Ni枝晶的成分相对含量为: 58.03Ni, 10.04Cr, 20.27Fe, 5.60W, 2.86Si, 2.43C, 0.76B。进一 步测得图3(c)中区域的平均成分相对含量为: 50.22Ni, 17.26Cr, 17.03Fe, 7.93W, 3.36Si, 2.90C, 1.29B。由W元素的分布可得出,WC几乎全部溶解, 一部分与其他元素结合形成碳化物共晶,另一部分 溶入了γ-Ni枝晶中。Fe元素比重的增加也表明熔覆 层稀释率更大。





(c) Deloro60+10 % WC (熔覆层上部) (d) Deloro60+10 % WC (熔覆层下部)



(e) Deloro60+20 % WC (熔覆层上部) (f) Deloro60+20 % WC (熔覆层下部)



(g) Deloro60+30 % WC (熔覆层上部) (h) Deloro60+30 % WC (熔覆层下部)

图 3 不同 WC 颗粒含量下熔覆层的微观组织

Fig.3 The microstructure of laser cladding layers under different WC content



图 4 Deloro60 熔覆层上部组织的 EDX 分析结果 Fig.4 The EDX analysis results of top area of Deloro60 laser cladding layer

随着WC质量分数继续增加到20%时,从图 3(e)、3(f)可看出熔覆层组织与先前又有所差异。先 前熔覆层中树枝状共晶消失,而出现了深色块状组 织。熔覆层上部出现了更多的γ-Ni枝晶组织,枝晶 相对变细;下部的枝晶组织进一步增多并粗化。图 3(e)中深色块状物的成分相对含量:26.13Ni, 18.11Cr,24.10Fe,25.75W,2.03Si,2.55C,1.34B, γ-Ni枝晶的成分相对含量为:45.52Ni,10.94Cr, 29.28Fe,9.47W,2.99Si,2.06C,0.73B。测得3(e)图中 区域的平均成分相对含量为:37.70Ni,14.71Cr, 23.91Fe,16.68W,2.76Si,2.53C,1.71B。由此不仅可 以看出WC与上一组相似的溶解形式,而且可看出 Fe元素的比重进一步增加,已明显高于Cr的比重, 这反映了熔覆层稀释率的进一步增大。

为了比较WC质量分数为20%的熔覆层上部与 下部稀释率的差异,同时测量了熔覆层下部图3(f) 中区域的平均成分相对含量: 32.23Ni, 15.46Cr, 38.49Fe, 9.60W, 2.70Si, 2.34C, 1.17B。由此可见, 熔覆层下部Fe元素含量已相当高,甚至超过Ni,这 证实了熔覆层下部稀释率比上部更大。

当WC质量分数增加到30%时,从图3(g)、3(h) 可看出熔覆层上部与下部的组织形态与先前又有 不同。熔覆层上部γ-Ni进一步变细,变为了比较均 匀的细小等轴晶,晶间分布着深色的碳化物共晶组 织,分布也较为均匀。熔覆层下部的枝晶组织比先 前更加发达,与上部形成了明显的组织差异。测量 了图3(g)中区域的平均成分相对质量分数:24.92Ni, 10.85Cr, 33.05Fe, 24.82W, 2.38Si, 2.58C, 1.41B。可 见,Fe元素的比重已经超过Ni,这反映了熔覆层稀 释率的持续增大。

综上所述,本试验中当WC质量分数从0%增加到30%时,熔覆层组织的变化规律为:熔覆层上部γ-Ni枝晶先粗化后变细,熔覆层下部的枝晶组织则持续增多,熔覆层中WC溶解后与基体元素相互作用而分别形成树枝状、块状、粒状形态的共晶组织。由于稀释率的不断增大,熔覆层中Fe元素相对含量持续增加。

激光熔覆试验中,涂层和基体的温度梯度分布可 用式(2)表示。

$$G = 2\pi K (T - T_0)^2 / \eta P \tag{2}$$

式中: *G* 是 涂 层 和 基 体 之 间 的 温 度 梯 度 (K/mm), *T* 是镍基合金液相线温度(K), *T*₀ 是基体 预热温度(K), η 是激光吸收率, *P* 是激光功率(W), *K* 是材料的热导率(W m⁻¹K⁻¹)。

加入WC颗粒后,一方面,WC颗粒及WC熔化 形成的析出碳化物将阻止粘结金属中γ-Ni枝晶的 长大。另一方面,熔覆相同厚度涂层所需最小比能 量减小,相同工艺条件下导致整个熔覆层温度升 高,即会导致To增大,而相同工艺条件下公式(2) 中右边的其他参数均不变。因此,温度梯度会变小 (不同WC含量下温度梯度减小程度不同),加大了 γ-Ni枝晶的长大趋势^[9]。对于熔覆层上部区域,当 WC含量较低时,上述两个方面中第二个因素占主 导地位,因此熔覆层组织变粗;当WC含量较高时, 第一个方面将起主导作用,导致了熔覆层组织的细 化。而对于熔覆层下部被稀释的区域,由于WC含 量很少,因此上述因素中第二方面一直起主导作 用,导致了熔覆层下部枝晶组织不断增多和粗化。

2.3 显微硬度

图5(a)为不同WC颗粒含量下熔覆层平均显微 硬度曲线。从图5(a)可看出,随着WC含量的增加, 熔覆层平均硬度逐渐增大。这是由于随着WC含量 增加,在熔覆层中形成的各种特殊碳化物会增多, 熔覆层的硬度也相应增加。同时可以看出,随着 WC含量的不断增加,由于稀释率的增加以及熔覆 层缺陷形成的倾向性增加等因素,硬度的增幅会随 之而减弱。

图5(b)为不同WC颗粒含量下熔覆层与基体截 面的显微硬度分布。从图5(b)可看出,当WC质量分 数为0%时,整个熔覆层的硬度变化不大。当WC 质量分数为10%时,熔覆层下部接近热影响区部分 硬度有所下降。当WC质量分数继续增加到20%和 30%时,熔覆层下部硬度的下降程度更大。因此, 随着WC含量的增加,熔覆层下部硬度与上部相比 会发生一定程度的下降,且下降程度会随WC含量 的增加而增大。这也是由于WC含量增加时熔覆层 稀释率增大所导致的结果。结合图5(a)、(b)可看出,



图 5 不同 WC 颗粒含量下熔覆层的显微硬度 Fig.5 Microhardness of laser cladding layers under different WC content

WC 质量分数为0%时,熔覆层平均硬度约为基体的3倍,当WC 质量分数增加到30%时,熔覆层 平均硬度可以达到基体硬度的4倍。

3 结 论

(1) 在激光熔覆WC颗粒增强Ni基合金涂层的 过程中,随着WC含量的增加,熔覆层的稀释率逐 渐增大。同时由于WC的溶解,与周围元素相互作 用形成低熔点共晶,析出后分别以树枝状、块状与 粒状等形态存在。

(2)对于熔覆层上部区域,当WC含量较低时, 合金中γ-Ni枝晶组织发生粗化;随WC含量继续增加,组织又会变细。对于熔覆层下部被稀释区域, 随WC含量的增加,枝晶组织持续增多且粗化。

(3)随WC含量增加,熔覆层平均硬度增加。WC质量分数为0%时,熔覆层平均硬度约为基体的3倍,当WC质量分数增加到30%时,熔覆层平均硬度可达到基体的4倍。

参考文献:

- Chen Z D, Lim L C, Qian M. Laser cladding of WC–Ni composite [J]. Journal of Materials Processing Technology 1996, 62, 321-323.
- [2] 吴新伟,曾晓雁.激光熔覆金属陶瓷技术研究概况[J].金属热处理,1996,4:40-44.
- [3] Levcovici D T, Munteanu V, Levcovici S M, et al. Laser processing of MMC layers on a metal base [J]. Materials and Manufacturing Processes 1999, 14: 475-487.
- [4] Wu P, Zhou C Z, Tang X N. Microstructural characterization and wear behavior of laser cladded nickel-based and tungsten carbide composite coatings [J]. Surface and Coatings Technology 66 (2003) 84-88.
- [5] 方志民, 徐斌, 蒋明安. 激光熔覆 Ni60 和 Ni60/SiC 涂 层磨损性能的研究 [J]. 煤矿机械, 2007, 28 (2): 36-38.
- [6] Lou B Y, Chen Z, Bai W J, et al. Structure and erosion resistance of Ni60A/SiC coatting by laser cladding [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2006, 16: 643-646.
- [7] 陈彦宾, 任振安. 激光熔覆 Cu/WCp 复合涂层 [J].
 焊接学报, 2002, 23(1): 19-22.

(下转第50页)