

不同 Ni 含量铁基激光熔覆层组织和性能的研究

张净宜, 邱长军, 贺沅玮, 齐林森

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: **目的** 研究不同 Ni 含量铁基激光熔覆层的组织和性能。**方法** 采用 CO₂ 激光器制备了不同 Ni 含量的铁基激光熔覆层, 通过奥林巴斯光学显微镜、场发射扫描电镜、X 射线衍射仪及洛氏硬度计等设备, 对激光熔覆层物相、微观组织及力学性能进行表征。**结果** 当 Ni 含量为 10%~11% 时, 熔覆层物相主要由 γ -Fe 相组成, 含有少量 α -Fe 相, 洛氏硬度为 35.1HRC, 熔覆层残余应力宏观上表现为拉应力。当 Ni 含量为 6%~7% 时, 熔覆层物相主要由 α -Fe 相组成, 含有少量 γ -Fe 相, 洛氏硬度为 47.9HRC, 熔覆层残余应力宏观上接近平衡状态。当 Ni 含量为 2%~3% 时, 熔覆层主要由 α -Fe 相组成, 洛氏硬度为 60.3HRC, 熔覆层残余应力宏观上表现为压应力。**结论** 不同 Ni 含量熔覆层的物相主要由 γ -Fe 相和 α -Fe 相组成, 随着 Ni 含量的降低, 熔覆层中 γ -Fe 相对应的衍射峰强度不断减弱, 而 α -Fe 相对应的衍射峰强度逐渐增强, 熔覆层晶粒尺寸减小, 表面洛氏硬度增加, 残余应力逐渐由拉应力转变为压应力, 能够有效抑制裂纹的生成, 从而获得高硬度不开裂熔覆层。

关键词: 铁基合金熔覆层; Ni; 残余应力; 微观组织; 高硬度; 裂纹

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0221-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.035

Microstructure and Properties of Fe-based Laser Cladding with Different Ni Content

ZHANG Jing-yi, QIU Chang-jun, HE Yuan-wei, QI Lin-sen

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

ABSTRACT: The work aims to study microstructure and properties of Fe-based laser cladding with different Ni content. Fe-based laser cladding with different Ni content was prepared with CO₂ laser. Phase, microstructure and mechanical properties of the laser cladding layer were characterized with Olympus optical microscope, field emission scanning electron microscope, X-ray diffractometer and Rockwell apparatus. When the Ni content was 10%~11%, phase of cladding layer was mainly composed of α -Fe phase, and also contained a little γ -Fe phase, Rockwell hardness was 35.1HRC, and residual stress of cladding

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-05-15

Received: 2017-01-05; Revised: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51474130); 湖南省市联合基金重点项目 (13JJ8013); 湖南省高校重点实验室项目 (湘财教指 [2014] 85 号); 湖南省重点学科建设项目 (湘教发 [2011] 76 号); 湖南省-高校科技创新团队支持计划 (湘教通 [2012] 318 号)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51474130); Hunan Provincial Natural Science Fund Committee and Hengyang Municipal People's Government Natural Science Joint Foundation (13JJ8013); Hunan Key Laboratory of Colleges and Universities ([2014] 85); Hunan Key Subject Construction Project ([2011] 76); Hunan Universities Science and Technology Innovation Team Support Plan ([2012] 318)

作者简介: 张净宜 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面改性。

Biography: ZHANG Jing-yi (1991—), Male, Master, Research focus: material surface technology.

通讯作者: 邱长军 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事材料表面改性技术的研究。

Corresponding author: QIU Chang-jun (1965—), Male, Professor, Doctoral tutor, Research focus: material surface technology.

layer was macroscopically presented as tensile stress. When the Ni content was 6%~7%, the cladding layer was mainly composed of α -Fe phase, and also contained a little γ -Fe phase, Rockwell hardness was 47.9HRC, and residual stress of cladding layer was macroscopically close to equilibrium state. When the Ni content was between 2% and 3%, the cladding layer was mainly composed of α -Fe phase, the Rockwell hardness was 60.3HRC, and the residual stress of the cladding layer was macroscopically presented as compressive stress. The cladding layer with different content of Ni is mainly composed of α -Fe phase and γ -Fe phase. With the decrease of Ni content, the diffraction peak intensity corresponding to γ -Fe phase in the cladding layer weakens continuously, the diffraction peak intensity corresponding to α -Fe in the cladding layer increases gradually, grain size decreases, Rockwell hardness increases, residual stress force gradually transforms from tensile stress into compressive stress, effectively inhibiting the generation of cracks, thereby high hardness non-cracking cladding layer can be obtained.

KEY WORDS: Fe-based alloy cladding layer; Ni; residual stress; microstructure; high hardness; crack

激光熔覆铁基合金涂层因与基体钢材成分相近, 界面结合牢固, 并且成本较低, 而受到国内外研究者的广泛重视。但这项技术并未在工业生产中得到广泛的推广和应用, 主要原因在于激光熔覆层容易开裂, 硬度高时尤为明显^[1-7]。

A Plati 等^[8]对激光熔覆层的残余应力及开裂行为进行研究, 结果表明激光熔覆层与基材之间产生很大的温度梯度, 在之后的凝固和冷却过程中, 由于体积膨胀和收缩不一致, 导致熔覆层产生很大的拉应力, 增加了熔覆层的开裂倾向。刘军杰等^[9]研究表明, 在压应力的作用下金属工件不会发生开裂, 当多向应力同时存在时, 若其最大应力为拉应力, 金属工件就会开裂, 并且拉应力越大, 工件就越容易开裂, 导致工件的使用寿命缩短。因此, 高硬度熔覆层不开裂的关键在于避免拉应力的产生。研究表明, 合金元素对不锈钢材料的微观组织以及力学性能有很大的影响, 能够改变不锈钢材料的工艺性能以及使用性能, 试验表明在不锈钢材料中加入适量的合金元素, 能获得更加优异或者特殊的性能^[10-13]。Ni 元素是促进 γ -Fe 形成以及扩大 γ 区的元素, 在铁基合金粉末中加入适量的 Ni 元素, 能降低 M_s 点, 减少 α -Fe 相的转变量, 熔覆层相变导致残余应力状态发生改变^[14-16]。基于以上结论, 本文配制了 3 组不同 Ni 含量的铁基合金粉末, 利用激光熔覆技术制备熔覆层, 并对熔覆层的物相、微观组织、洛氏硬度、截面形貌和残余应力状态进行分析, 阐明 Ni 含量对铁基熔覆层组织和性能的影响。

1 试验原理

当熔覆层发生相变时, 由于不同相的密度和晶格类型不一样, 因而具有不同的比体积, 当 γ -Fe 相转变为 α -Fe 相时, 其比体积将由 0.123~0.125 增加到 0.127~0.131, 体积发生膨胀, 导致熔覆层的残余应力状态发生改变, 宏观上表现为熔覆层翘曲的变化。通过降低铁基合金粉末中 Ni 元素含量, 能够提高 M_s

点, 促进 γ -Fe 相向 α -Fe 相转变, 根据相变体积膨胀效应, 熔覆层获得残余压应力, 能够有效抑制裂纹的生成, 从而获得高硬度不开裂熔覆层。

2 试验方法

采用真空气雾化制粉设备炼制了 3 种 C、Cr、B、Si 元素含量 (文中含量均为质量分数) 基本一致, 而 Ni 含量不同的粉末, Fe 为余量, 设计成分如表 1 所示。采用有机物包覆工艺制备粉末, 具体配制步骤为: 将有机物充分溶解在水中, 按一定比例配制有机物溶液, 加热搅拌均匀后, 再将有机物溶液添加到合金粉末中, 充分混合搅拌后, 放在 65 °C 的干燥箱内干燥 10 h, 使水分彻底蒸发, 再利用振筛机将结块的粉末粉碎, 过 80 目的筛后, 再在保温箱中保温待用。

表 1 不同配比的铁基合金粉末
Tab.1 Fe based alloy powders with different proportions wt%

Samples	C	Cr	Ni	B	Si	Fe
A [#]	0.14~0.15	15~16	2~3	0.6~0.7	0.1~0.2	Bal.
B [#]	0.14~0.15	15~16	6~7	0.6~0.7	0.1~0.2	Bal.
C [#]	0.14~0.15	15~16	10~11	0.6~0.7	0.1~0.2	Bal.

试验基体材料为 Q235 普通碳素结构钢, 尺寸为 120 mm×50 mm×15 mm, 打磨、清洗后, 使用 YS5060A 喷砂机进行喷砂处理。试验选用 5 kW 横流 CO₂ 激光器, 采用侧向送粉, 氩气保护, 激光熔覆工艺参数为: 激光平均功率 2.1~2.5 kW, 椭圆光斑尺寸 3.0 mm×4.0 mm, 扫描速度 6 mm/s, 送粉速度 7.0 g/min, 激光道与道之间的搭接系数 0.5, 扫描层数 5 层。熔覆层最终成形尺寸 90 mm×35 mm×3 mm。使用 TH320 全洛氏硬度计测量熔覆层表面洛氏硬度, 实验在室温下进行, 实验力为 150 kg, 保压时间为 6 s, 每种试样取 10 个点进行测试。利用低速走丝线切割制备残余应力试样 (如图 1 所示), 切割后的熔覆层保留 1 mm

的基材。采用体视显微镜、奥林巴斯光学显微镜、X 射线衍射仪,对熔覆层的形貌和物相进行分析。其中, X 射线衍射仪的靶材为 Cu, 起始角为 10° , 终止角为 110° , 步宽为 0.01° , 波长为 1.54 nm , 电压为 40 kV , 电流为 30 mA 。

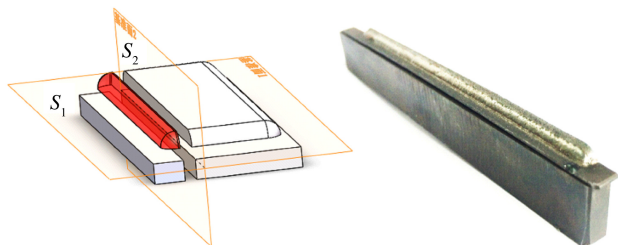


图 1 残余应力试样
Fig.1 Residual stress sample

3 结果分析

3.1 熔覆层物相分析

图 2 为不同 Ni 含量激光熔覆层的 XRD 分析结果,可以看出,不同 Ni 含量熔覆层主要由 $\gamma\text{-Fe}$ 相和 $\alpha\text{-Fe}$ 相组成,各物相对应的衍射峰的位置不变,强度却随 Ni 含量的改变而变化。

当 Ni 含量为 $2\%\sim 3\%$ 时,熔覆层主要由 $\alpha\text{-Fe}$ 相组成,具有很强的衍射峰,三峰位对应的衍射晶面分别为体心立方结构的(110)、(200)和(211),并且没有出现 $\gamma\text{-Fe}$ 相所对应的衍射峰;当 Ni 含量为 $6\%\sim 7\%$ 时, $\alpha\text{-Fe}$ 相所对应的衍射峰位置没有明显变化,但衍射峰强度逐渐减小,熔覆层中出现了 4 个新峰位,即 $\gamma\text{-Fe}$ 相对应的衍射峰,对应的衍射晶面分别为面心立方结构的(111)、(200)、(220)和(311),此时熔覆层物相主要由 $\alpha\text{-Fe}$ 相组成,并含有少量 $\gamma\text{-Fe}$ 相;当 Ni 含量为 $10\%\sim 11\%$ 时, $\alpha\text{-Fe}$ 相和 $\gamma\text{-Fe}$ 相对应的衍射峰位置没有明显变化,衍射峰强度发生改变, $\gamma\text{-Fe}$ 相对应的衍射峰强度逐渐增大, $\alpha\text{-Fe}$ 相对应的衍射峰强度不断减小,熔覆层主要由 $\gamma\text{-Fe}$ 相组成,并含有少量的 $\alpha\text{-Fe}$ 相。

结果表明:熔覆层主要由 $\alpha\text{-Fe}$ 相和 $\gamma\text{-Fe}$ 相组成,随着 Ni 含量的增加, $\alpha\text{-Fe}$ 相对应的衍射峰强度逐

渐减弱,而 $\gamma\text{-Fe}$ 相对应的衍射峰强度不断增强。衍射峰强度的强弱变化表明,熔覆层中的 $\alpha\text{-Fe}$ 相含量减少, $\gamma\text{-Fe}$ 相含量增加。

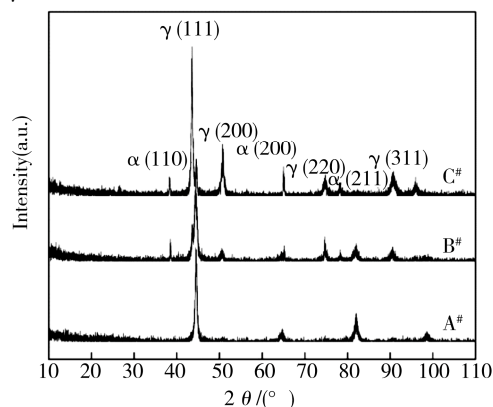


图 2 不同 Ni 含量熔覆层的 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of the coatings with different Ni content

3.2 熔覆层显微组织分析

图 3 和图 4 为不同 Ni 含量的熔覆层截面中间部分的显微组织,可以看出,不同 Ni 含量的熔覆层均为树枝晶组织,由枝晶及枝晶间构成。当 Ni 含量较低时,熔覆层组织细小致密,枝晶相互交错,起到分割和细化晶粒的作用,并且枝晶间的组织较多。随着 Ni 含量的增加,晶粒尺寸增大,晶粒数量减少,粗大的树枝晶增加,枝晶间组织减少。结合 XRD 分析结果可知,随着 Ni 含量的增加,熔覆层中的 $\alpha\text{-Fe}$ 相含量减少, $\gamma\text{-Fe}$ 相含量增加,可以推断出,枝晶对应的是 $\gamma\text{-Fe}$ 相,而枝晶间对应的是 $\alpha\text{-Fe}$ 相。

3.3 残余应力状态分析

激光熔覆试样的残余应力状态为拉应力,为了表征激光熔覆层的残余应力状态,需将基体材料切除一部分,使熔覆层的残余应力得以释放。3 种不同 Ni 含量的熔覆层均保留 1 mm 的基材,相对于原基材 12 mm 的厚度,不会对熔覆层的残余应力状态产生太大影响,作为定性分析可以忽略其影响。

图 5 分别表示 Ni 含量为 $2\%\sim 3\%$ 、 $6\%\sim 7\%$ 、 $10\%\sim 11\%$ 的熔覆层残余应力状态。从图 5 可以看出,

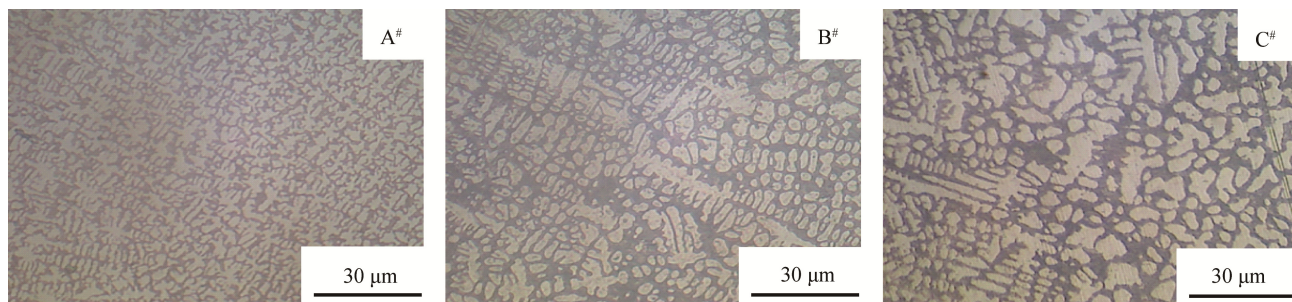


图 3 不同 Ni 含量熔覆层的 OM 组织形态
Fig.3 Optical metallograph microstructure of the cladding layer with different Ni content

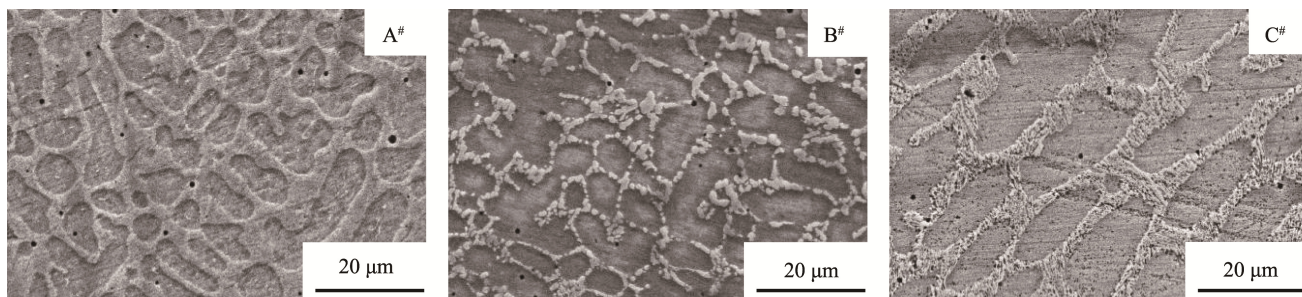


图4 不同Ni含量熔覆层的SEM组织形态

Fig.4 Scanning electron microstructure of the cladding layer with different Ni content

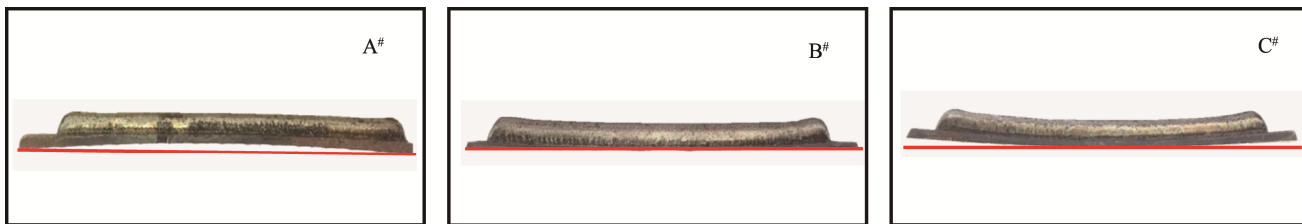


图5 不同Ni含量熔覆层的残余应力状态

Fig.5 The residual stress state of the cladding layer with different Ni content

当Ni含量为2%~3%时,熔覆层中间向外凸起,两端向内收缩,残余应力为压应力;当Ni含量为6%~7%时,熔覆层较平整,内应力接近平衡状态;当Ni含量为10%~11%时,熔覆层中间向内收缩,两端向外翘起,残余应力为拉应力。3种不同Ni含量熔覆层残余应力状态明显不同,根据XRD和金相分析结果可知,Ni元素的加入促进 γ -Fe的形成,使 γ -Fe向 α -Fe转变量减少, α -Fe相变体积膨胀效应减弱,而熔覆层的体积变化导致残余应力状态发生改变,宏观表现为翘曲度的变化。

结果表明,随着Ni含量的增加,熔覆层形貌由两端向内收缩状态转变为拉伸状态,残余应力逐渐由压应力转变为拉应力。

3.4 硬度分析

在每个成形试件表面各取10个点,利用洛氏硬度计进行测量,各组硬度测量值如图6所示。从图6可以看出,熔覆层Ni含量为2%~3%、6%~7%、10%~11%时,平均洛氏硬度分别为60.3HRC、47.9HRC、35.1HRC。

试验结果表明,不同Ni含量的熔覆层硬度分布均匀,没有大的起伏波动,说明激光熔覆过程稳定,得到的熔覆层致密均匀。随着Ni含量的增加,熔覆层洛氏硬度值呈下降趋势。一方面,根据金相观察结果可知,随着Ni含量的增加,熔覆层晶粒尺寸不断增大,在受到外力产生塑性变形时,分散到其他晶粒中的力减少,单个晶粒承受的力增大,塑性变形不均匀,应力集中大,熔覆层硬度降低;另一方面,随着Ni含量的增加,熔覆层中 α -Fe相的含量逐渐减少,而 α -Fe相为硬质相,其含量减少导致熔覆层硬度降低。

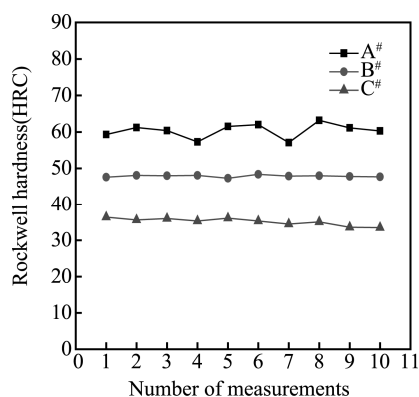


图6 不同Ni含量熔覆层的洛氏硬度变化

Fig.6 The Rockwell hardness of cladding layer with different Ni content

3.5 截面形貌分析

在激光熔覆过程中产生裂纹的原因主要有两个:其一,熔覆层的氧化夹渣导致开裂;其二,熔覆层中过大的拉应力导致开裂。图7分别表示Ni含量为2%~3%、6%~7%、10%~11%的熔覆层截面形貌,从图7可以看出,不同Ni含量的熔覆层截面形貌致密均匀,没有明显的裂纹出现。一方面,实验采用了有机物包覆工艺配制合金粉末,在激光熔覆过程中,有机物高温分解消耗熔覆层中的氧,熔覆层表面致密,没有氧化夹渣等缺陷形成;另一方面,通过调整Ni含量来控制熔覆层的相变,从而达到抑制开裂的目的。结合XRD图谱和熔覆层宏观残余应力状态可知,当熔覆层Ni含量较高时,熔覆层中的相主要为 γ -Fe,熔覆层的残余应力为拉应力,虽然拉应力是导致开裂的原因,但较多的 γ -Fe相增加了熔覆层的塑性,从而削弱拉应力对熔覆层开裂的影响,减少裂纹的产

生。而当熔覆层Ni含量降低时, γ -Fe向 α -Fe转变量增加, 相变体积膨胀效应使残余应力状态发生改变, 熔覆层残余应力为压应力, 能够有效抑制熔覆层开

裂。故当Ni含量为2%~3%时, 熔覆层的洛氏硬度高达60.3HRC, 未出现明显裂纹, 满足高硬度不开裂的要求。

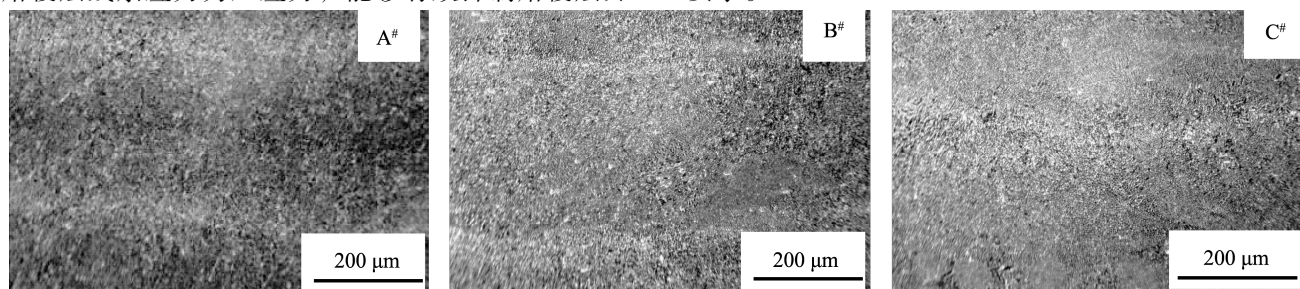


图7 不同Ni含量熔覆层的截面形貌

Fig.7 The section morphology of cladding layer with different Ni content

4 结论

1) 随着Ni含量的降低, 熔覆层晶粒尺寸减小, 枝晶组织逐渐减少, 熔覆层中 γ -Fe含量减少, 而 α -Fe含量增加, 熔覆层的硬度呈增大趋势, 残余应力由拉应力转变为压应力。

2) 当Ni含量为2%~3%时, 熔覆层的平均洛氏硬度高达60.3HRC, 残余应力为压应力, 熔覆层表面没有明显的气孔和裂纹等缺陷, 满足高硬度不开裂熔覆层的工业生产要求。

参考文献:

- [1] 刘武. 不同添加物对激光成型不锈钢试件组织与性能的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2014.
LIU Wu. Effects of Different Additives on the Laser Forming of Stainless Steel Specimen Microstructure and Properties[D]. Hengyang: University of South China, 2014.
- [2] 樊湘芳, 邱长军. 高频微锻造对激光熔覆层开裂行为与表面组织的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 101—104.
FAN Xiang-fang, QIU Chang-jun. Effect of High Frequency and Slight Forging on the Cracking Behavior and Surface Microstructure of Laser Cladding Layer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 101—104.
- [3] MESA D H, TORO A, SINALORA A, et al. The Effect of Leasing Temperature on Corrosion-Erosion Resistance of Marlenstie Stainless Steels[J]. Wear, 2003, 255: 139—145.
- [4] JOHN D V, ALFRED H P, HOWARD F C. Wear Tests of Steel Knife Blades[J]. Wear, 2008, 265(7/8): 1093—1099.
- [5] 王斌, 栗卓新, 李国栋. 超级 α -Fe 不锈钢焊接的研究进展[J]. 新技术新工艺, 2008(5): 57—61.
WANG Bin, LI Zhuo-xin, LI Guo-dong. Research Progress in Welding of Super α -Fe Stainless Steel[J]. New Technology & New Process, 2008(5): 57—61.
- [6] PIETA G, LEITE R, KWIETNIEWSKI C, et al. Evaluation of the Fracture Toughness of a SMSS Subjected to Common Heat Treatment Cycles in an Aggressive Environment[J]. JMEPEG, 2010, 19: 1318—1324.
- [7] 张志强, 程宗辉, 曹强, 等. 30CrMnSiNi2A 超强钢激光熔覆修复试验研究[J]. 装备环境工程, 2016(1): 62—67.
ZHANG Zhi-qiang, CHENG Zong-hui, CAO Qiang, et al. Repairing of 30CrMnSiNi2A High Strength Steel by Laser Cladding[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016(1): 62—67.
- [8] PLATI A, TAN J, GOLOSNOY I, et al. Residual Stress Generation during Laser Cladding of Steel with a Particulate Metal Matrix Composite[J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(7): 619—624.
- [9] 张其枢, 堵耀庭. 不锈钢焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
ZHANG Qi-shu, DU Yao-ting. Stainless Steel Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [10] KIM J H, YANG H S, BAIK K H, et al. Development and Properties of Nanostructured Thermal Spray Coatings[J]. Current Applied Physics, 2006, 6(6): 1002—1006.
- [11] LBRAHIM A, LIMA R S, BERNDT C C, et al. Fatigue and Mechanical Properties of Nanostructured and Conventional Titania(TiO_2) Thermal Spray Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(16/17): 7589—7596.
- [12] GAO Ya-li, WANG Cun-shan, LIN Qi, et al. Broad Beam Laser Cladding of Al-Si Alloy Coating on AZ91HP Magnesium Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2701—2706.
- [13] ZHANG P P, WANG X B, GUO L J, et al. Characterization of In-situ Synthesized TiB_2 Reinforcements in Iron-based Composite Coating[J]. Applied Surface Science, 2011, 258: 1592—1598.
- [14] 张拯, 林万明, 钱玉水. 马氏体不锈钢腐蚀性能的研究[J]. 铸造设备与工艺, 2012(6): 11—13.
ZHANG Zheng, LIN Wan-ming, QIAN Yu-shui. Research on Corrosion Behavior of Martensitic Stainless Steel[J]. Foundry Equipment and Technology, 2012(6): 11—13.
- [15] ZHOU Sheng-feng, DAI Xiao-qin. Microstructure Evolution of Fe-based WC Composite Coating Prepared by Laser Induction Hybrid Rapid Cladding[J]. Appl Surf Sci, 2010, 256(24): 7395—7399.
- [16] 刘军杰. 金属热处理残余应力与开裂失效关系的探讨[J]. 企业技术与开发, 2013, 32(19): 65—66.
LIU Jun-jie. Research on the Relationship between Residual Stress and Cracking Failure of Metal Heat Treatment[J]. Technology Development, 2013, 32(19): 65—66.