

激光表面熔覆层凝固组织特征形成过程

王忠柯 郑启光 王涛 辜建辉 陶星之

(华中理工大学激光技术国家重点实验室,武汉,430074)

潘清跃^a 石世宏^b

(^a西北工业大学,西安,710072) (^b中南工学院,衡阳,421001)

摘要: 试验研究了激光熔覆层的凝固特征和组织形成规律。结果表明:熔覆层不同位置的凝固特征参数不同。熔覆层底部属于典型的平面外延生长组织,且枝晶粗大;而顶部是较规则的树枝状共晶组织;中部为细小的胞晶和柱状晶;且晶体生长受结晶学各向异性影响。熔覆层组织晶粒形核的非均匀形核特征显著。熔覆层微区成分存在着不均匀性,不同元素沿晶间偏析(富集),是组织不均匀的重要原因。

关键词: 激光熔覆 凝固特征 凝固组织

Study on the formation features of solidification microstructure for laser cladding layer

Wang Zhongke, Zheng Qiguang, Wang Tao, Gu Jianhui, Tao Xingzhi

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Pan Qingyue^a, Shi Shihong^b

(^a Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

(^b Central South Institute of Technology, Hengyang, 421001)

Abstract: The investigation on the solidification features and formation law of microstructure for laser cladding layer has been carried out. It is shown that there are different solidification parameters for different position in cladding layer. The microstructure at the cladding layer bottom was the typical extension growth on plane basis, the dendrite crystal is coarser. The microstructure at the top and middle was the regular pine-tree eutectic crystal and small cell and column crystal, respectively. The crystalline anisotropy was a main factor to influence the crystal growth form. The grain nucleation has obvious feature of heterogeneous nucleation in microstructure cladding. The results also show that the components in microzone of the cladding layer are not uniform. The different elements segregate along crystalline axis or interdendritic result in the non-uniform microstructure.

Key words: laser cladding solidification feature solidification microstructure

引 言

激光熔覆可获得优质的表面耐磨、耐蚀、耐高温氧化以及电的良好导体等新材料,近年来,在国内外得到了迅速发展^[1,2]。激光熔覆,就其过程属于材料的快速熔化和快速凝固,因此,研究熔覆层的凝固特征、组织形成规律,将直接揭示熔覆层的性能形成机制。我们以1Cr18Ni9Ti为基材的激光熔覆为例作些探讨。

1 试验条件

激光熔覆基材为厂家生产的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢阀门商品,熔覆层为 Co 基合金粉末,成分为 Cr:24%~26%,W:6%~8%,Fe:3%~5%,Mo:1.5%~2.5%,B:2%~3%,其余为 Co。预先采用粘结剂将粉末涂敷在阀门圆周上,试验中预置粉厚度为 2.0mm~2.5mm。采用华中理工大学制造的 HGL-895 型 5kW 横流 CO₂ 激光器,模式为多模。N₂ 保护激光扫描区。工艺参数:激光功率 2.5~3.2kW,光斑大小 4~5mm×6mm,激光扫描速度 3.5~6mm/s。在阀门本体上取样进行金相观察,试样经王水深腐蚀后,用 JSM-35C 型扫描电镜观察分析熔池内组织形成及枝晶生长特性,用 JXA-8800R 型电子探针测试分析熔覆层成分及分布特征。

2 试验结果及分析

2.1 激光熔覆层组织形成特征

温度梯度/凝固速度 (G/v) 是凝固组织生长形态选择的控制参数(形状控制因子)^[3,4]。熔池/基材界面处 $v=0$ 而 G 最大, G/v 值很大,凝固组织以低速平面生长,随 v 的增大和 G/v 逐渐减小,形成胞/枝转变区以及枝晶形态的领先相与枝晶间共晶的生长形态,见图 1。依据凝固理论,晶体生长不稳定

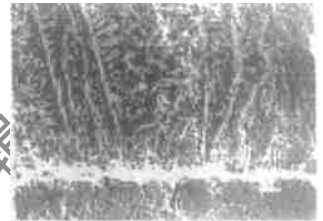


Fig. 1 Transition-region microstructure

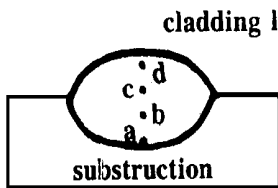


Fig. 2 Measuring locations for laser cladding

性受形状因子 G/v 控制,熔覆层熔池不同位置凝固条件不同,最终所形成的组织结构不同。图 3a, b, c, d 首尾相连为一熔覆层的整个断面(纵截面)组织特征,测试部位如图 2。可明显看出:熔覆层顶部是较有规则的树枝状共晶组织,如图 3a,且枝晶发达而细小。熔覆层底部枝晶组织较为粗大,如图 3c,图 3d。依图中白线标尺 100 μ m 计算,熔覆层底部如图 1 和图 3d 中枝晶二次间距为 5 μ m~8 μ m;熔覆层顶



Fig. 3 Microstructure of cross section of laser cladding layer

a—top of laser cladding layer b—middle region of laser cladding layer c—middle region of laser cladding d—bottom of laser cladding layer

部如图 3a 中枝晶二次间距为 1.5 μ m~3 μ m。纵观整个熔覆层组织,从枝晶组织发展形式看,具有外延生长特性;从晶粒形核生长形式看,非均匀形核(异质形核)特征显著。

进一步分析,熔覆层中枝晶生长受热流方向的控制,但枝晶生长不是由热流唯一决定的,同时还受结晶各向异性的影响。因此,熔覆层底部枝晶组织在未熔合金边缘形核后外延生长,生长方向与固液界面法向呈一定角度,如图 2 和图 3d。而熔覆层中部晶粒以异质形核为主,晶体生长受结晶学各向异性影响较大,如图 3b 和图 3c。熔覆层顶部,熔池冷却速率 R 较高,过冷度较大,导致枝晶尺寸较小。熔覆层组织基本上是平面晶(过渡区)、胞状/枝状混合晶(熔覆层中部)、细小枝晶(熔覆层顶部)的结构。

2.2 熔覆层的成分分布及其对组织形成的影响

组织形态是成分、凝固速度 v 和凝固前沿温度梯度 G 三者综合作用的结果,组织形成除与 G/v 有关外,还与成分有关^[5]。首先,由于熔覆过程中熔覆层和基材成分的浓度差,原子的扩散要使成分趋于均匀,激光熔覆是一快速熔凝过程,而不同原子扩散速率各异,因而熔覆层、结合层中各成分含量不均,扫描电镜测试的主要成分的浓度(wt%)结果如表1(三次测量的平均值)。可以看出,由于结合层靠近基体,Fe, Ni, Ti 主要金属类原子从基材表面熔化层向熔覆层扩散,熔覆层中的Co只有少量扩

Table 1 Main components of laser cladding layer measured by electron microprobe

	Si	Cr	Fe	Co	W	Mo	Ni	Ti
surface layer of cladding		25.4	7.3	61.0	6.11	2.1		
transition region	0.25	18.7	70.5	0.69			8.74	0.69
substrate	0.37	18.7	70.6				8.74	0.70

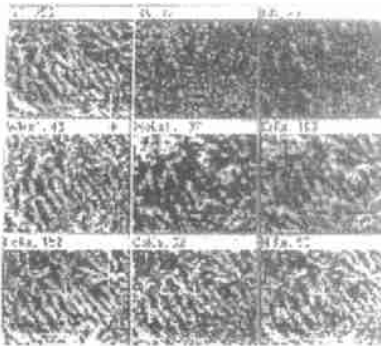


Fig. 4 Electron microprobe X-ray mapping

散到结合层,而基体中的Si, Ti等又较熔覆层中的Co, W等更容易进入结合层,这一结果也正说明了熔覆层与基体的冶金结合。其次,熔覆层元素特征X射线面扫描结果,如图4。可以看出,作为粘结相的低熔点合金元素Fe, Co, Ni以及高熔点W,形成了固溶体,对应着生长的枝晶,此也即Co, W不易扩散进入结合层的原因。而Mo和Cr等合金元素沿枝晶间偏析,可能形成C或B的化合物,对应着枝晶生长的间隙。熔覆层凝固过程中,枝晶上及枝晶间元素的聚集、形核、长大过程不同,这也正说明激光熔覆过程中,在对流传质和扩散的作用下,合金元素之间存在着交互作用,并且贯穿着凝固的全过程,熔覆层微区成分的不均匀,造成了熔池中晶体生长的多样性,是组织不均匀的重要原因之一。

3 结 论

- (1) 激光熔覆层底部属于典型的平面外延生长组织,且枝晶组织粗大;过渡到熔覆层顶部是较规则的树枝状共晶组织,且枝晶细小。熔覆层组织中晶体生长受结晶学各向异性影响。
- (2) 熔覆层组织晶粒形核生长非均匀形核特征显著,枝晶组织发展形式具外延生长特性。
- (3) 熔覆层微区成分存在着不均匀性。Fe, Co, Ni, W 4元素形成了固溶体, Mo, Cr, C等元素存在对应关系并沿晶间偏析。熔覆层微区成分的不均匀也是凝固组织多样的重要原因。

参 考 文 献

- 1 Ariely S, Bamberger M, Hogel H *et al.* J Mater Science, 1995; 30: 1849
- 2 Hu C, Barnard L, Mridha S *et al.* J Mater Processing Tech, 1996; 58: 87
- 3 武晓雷, 陈光南. 金属学报, 1998; (10): 1033 ~ 1038
- 4 Kurz W, Fisher J. Fundamentals of Solidification. Aedermannsdors, Switzerland: Transations Technical Publications, 1989: 67
- 5 李 强, 雷廷权, 王富耻 *et al.* 中国激光, 1999; 26(1): 80 ~ 84

作者简介: 王忠柯, 男, 1968年出生。博士, 讲师。现从事激光先进制造技术及材料相互作用理论的研究工作。