

## 高能束熔覆技术的研究现状及发展趋势<sup>\*</sup>

张 迪 单际国 任家烈

(清华大学机械工程系,北京,100084)

**摘要:** 综述了高能束熔覆技术的研究现状,提出了高能束熔覆技术领域存在的主要问题及解决途径,并指出高能束熔覆技术的发展趋势。

**关键词:** 激光束熔覆 聚焦光束熔覆 熔覆层质量控制

### Status and development of cladding with high power density beam

Zhang Di, Shan Jiguo, Ren Jialie

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** This paper describes the status of cladding with high power density beam. The main problems and the solutions of them in this field are presented. The development tendency of cladding with high power density beam is pointed out.

**Key words:** laser cladding light beam cladding quality control of cladding layer

### 引 言

高能束熔覆技术是采用高能束为热源在金属表面获得优异的耐磨、耐蚀、耐热等性能的表面改性技术,它具有广阔的工业应用前景。新型熔覆材料的开发、熔覆材料引入方式的改进、熔覆层组织性能研究及质量控制一向是国内外同行的研究热点。近年来,高能束熔覆技术的推广应用以及新型高能束熔覆技术的开发已受到普遍关注。

### 1 熔覆材料及其引入方式的研究

高能束熔覆大多采用热喷涂用 Ni 基,Co 基,Fe 基自熔合金粉末。向自熔合金中添加 WC, TiC, SiC, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN 等陶瓷相及陶瓷相形成元素,可得到陶瓷复合涂层及梯度涂层。如在 5CrMnMo 钢上激光熔覆 Ni60, Ti 粉及石墨,制备 TiC<sub>p</sub> 增强的金属基陶瓷复合涂层<sup>[1]</sup>;在 Q235 钢上激光熔覆 Cu-5%Al 合金粉末,得到 Fe<sub>p</sub>/Cu 的复合涂层<sup>[2]</sup>;在 Ti 基体上激

\* 国家机械行业 95 攻关项目。

2 Casperson L W, Tovar A A. J O S A. 1998;A15(4):954

3 Tovar A A, Casperson L W. J O S A. 1998;A15(9):2425

4 Erdelyi A, Magnus W, Oberhettinger F *et al.* Tables of Integral Transforms. New York:McGraw-Hill Book Company, 1954

5 吕百达. 激光技术,1992;16(5):278

作者简介:王喜庆,男,1959 年出生。副教授,在读博士。从事光束传输与变换等研究。

光熔覆 Ti-Al-TiB<sub>2</sub> 合金粉末,得到了 Al-Ti 功能梯度涂层<sup>[3]</sup>。除自熔合金粉末外,还可将钢带和焊条作为熔覆材料。如在 40# 钢上电子束熔覆 AISI316 钢带<sup>[4]</sup>,在钢基体上激光熔覆镍基焊条<sup>[5]</sup>等。热喷涂粉末结晶温度区间大,应用于高能束熔覆时,涂层气孔和裂纹倾向较大。因而,开发高能束熔覆专用材料将是高能束熔覆研究的重要方向之一。

熔覆材料的引入方式将直接影响熔覆层的质量和服役性能。长期以来,预引入法被广泛应用,该方法尤其易于涂覆混合成分的粉末,但难以使预置层厚度均匀,基材的熔深和稀释率不易控制,多道搭接时易翘曲。因此,近年来同步传输技术逐步受到重视。由于合金粉末对高能束的吸收率远大于线材和板材,且后者成本较高,因而,同步送粉熔覆技术是国内外研究的重点<sup>[6]</sup>。采用同轴喷嘴,可以实现连续全方位的熔覆形成三维零件,即 LDC<sup>[7]</sup>。同轴送粉熔覆不受熔覆形状的限制,粉末利用率高,故将是今后研究发展的重点。与预引入法相比,同步送粉法要求混合粉末中各成分比重基本一致,固态流动性好。这就带来了送粉技术中的问题:微粒速度不匹配、粉末流速不稳定、保护气体导致粉末流变性等对熔覆层成型和质量有显著影响<sup>[8]</sup>。这都限制了同步送粉法优势的充分发挥。如何对其改进,将是一个亟待解决的问题。

## 2 熔覆层微观组织及性能的研究

高能束熔覆是一种快速凝固过程,组织转变往往偏离平衡相图,其一般特征为:组织细小、固溶度大、晶格畸变、形成亚稳相。因此,定性分析熔覆层组织及物相时,往往采用 X-ray 衍射,SEM,TEM 并结合相图进行综合分析。

熔覆层的组织特点不仅受熔覆材料的影响,而且与熔覆工艺参数有关。Ni 基合金的激光熔覆研究表明,熔覆区的组织主要为  $\gamma$ -Ni 枝晶及  $\gamma$ -Ni、镍铬、镍硅组成的共晶体,其上弥散分布着碳化物、硼化物相<sup>[9,10]</sup>。向自熔合金中添加陶瓷相后,陶瓷相起非均匀形核核心的作用,并阻碍枝晶长大,改变枝晶生长方向,因此,陶瓷相不仅细化枝晶,也使枝晶形状变得更复杂<sup>[11]</sup>。在 45# 钢基体上熔覆 30% TiC + 70% Ni-Cr-B-Si 合金时, TiC 颗粒在宏观上均匀分布,改变工艺参数,则可依靠 TiC<sub>p</sub> 在熔池中的不断长大和有规律运动,自动实现复合涂层的连续梯度结构<sup>[12]</sup>。

基材经高能束熔覆处理后,表面硬度明显提高,为熔覆层获得优良的耐磨性提供了保证。除了熔覆材料本身硬度较高外,高能束熔覆所具有过饱和固溶强化、组织细化、弥散强化、沉淀强化也起着不可忽视的作用。在 321 奥氏体不锈钢上激光熔覆 Ni-Cr-Si-B 合金粉末可明显改善基体的抗粘着磨损和抗点蚀性能<sup>[10]</sup>。在这些自熔合金粉末中加入各种陶瓷相,可进一步提高熔覆层的耐磨性。熔覆层耐磨性都受外加硬质相的种类、含量、粒度、分布状态及硬质相的溶解程度的影响。在碳钢 SS400 上激光熔覆 30% TiC + Ni-Cr 时,涂层的耐磨性与基体相比提高了 10 倍,且熔覆层的耐磨性随 TiC 含量的增加而增加<sup>[13]</sup>。研究低碳钢 AISI1020 表面 Al-1236 合金粉末(含 WC 的镍基合金系)和 Colomonoy88 合金激光熔覆层的硬度和耐磨性发现,熔覆层的硬度和耐磨性无直接关系<sup>[9]</sup>。

比较激光熔覆、喷涂和堆焊三种工艺获得的 Co 基合金涂层在强酸、强碱介质中的腐蚀率,以激光熔覆层的腐蚀率为最低<sup>[14]</sup>。研究 Ni60 + WC 激光熔覆层的腐蚀磨损性能发现,磨损对腐蚀有明显激化作用,硬质相的加入对熔覆层的抗腐蚀磨损性能有双重影响,加入量存在一最佳值<sup>[15]</sup>。耐高温涂层大多由绝热的陶瓷涂层和抗氧化金属粘结界层构成。ZrO<sub>2</sub> 涂层在高温下易与基体保持热应力匹配,并具有良好的隔热效果,因而被广泛应用。

总之,采用高能束熔覆技术,控制熔覆层的成分和选择合理的熔覆工艺,可以使基体获得其它表面改性技术难以得到的性能,充分发挥了原材料的潜力。

### 3 高能束熔覆层质量控制的研究

高能束熔覆过程中最主要的问题是熔覆层的裂纹问题。围绕如何降低熔覆层的开裂敏感性,开展了许多研究。增加含 Ni 量,能有效降低 Fe-Cr-Ni-B-Si 熔覆层的开裂敏感性。熔覆金属陶瓷时,随陶瓷相含量的增加,存在一个裂纹率的峰值,这可从基体与陶瓷相的相互作用方面加以解释<sup>[16]</sup>。适当提高能量密度可显著降低开裂倾向<sup>[17]</sup>。在熔池中施加电磁搅动也可使裂纹减少<sup>[18]</sup>。基体的预热对降低裂纹倾向是有效的<sup>[19,21]</sup>,但这一措施减弱了高能束熔覆技术的优势。采用双层预涂覆<sup>[20]</sup>或引入过渡层<sup>[21]</sup>,可避免裂纹和空洞的产生。功能梯度涂层(FGM)的开发为解决裂纹问题提供了新思路。在 FGM 涂层中,涂层组成与性能沿厚度方向连续梯度变化,金属基体与陶瓷相涂层间无明显界面,以克服两者性能不匹配的问题,最大限度地削弱涂层中的应力,提高涂层与基体的结合强度<sup>[12]</sup>。但 FGM 涂层制备中还存在一些问题,如难以精确控制涂层成分按理论设计变化,难以应用于大尺寸零件等。因而,加强对涂层形成机理的研究,开发大尺寸 FGM 涂层,都可能为解决裂纹问题提供新途径。

除裂纹问题外,降低稀释率也是高能束熔覆技术的重要研究方向。高能束熔覆过程中,热源的能量经熔覆层间接传入基材,可减小基材的熔化量,获得较小的稀释率<sup>[22]</sup>。文献[23]分析了采用送粉系统时,激光熔覆层的稀释机理,认为激光辅助部位与熔池边缘之间的表面张力梯度是熔覆层稀释的原因。采用同步送粉法时,粉末流量是决定稀释率的最主要因素。当送粉速度较小时,随扫描速度的增加,稀释率减小;当送粉速度较大时,随扫描速度的增加,稀释率反而增加,这可通过粉末流产生的热屏蔽效应加以解释<sup>[24]</sup>。采用矩形光束可以降低熔覆层的稀释率<sup>[17]</sup>。若稀释率过小,基材熔化不足,与熔覆层间的结合力下降,易使涂层剥落。熔覆工艺中必须注意稀释率的控制,众多研究表明,激光熔覆时希望稀释率在 5% 以内。

### 4 新型高能束熔覆技术的开发研究

高能束熔覆技术中激光熔覆技术的研究十分活跃,近年来取得了大量有理论价值的研究成果。在研究激光表面熔覆技术的同时,国内外对新型表面熔覆技术的开发也十分重视,如聚焦光束熔覆技术、电子束熔覆技术等。

在 40<sup>#</sup> 钢表面电子束熔覆 AISI316 钢带,熔覆层组织均匀且无明显缺陷,具有良好的耐电化学腐蚀的性能<sup>[4]</sup>。乌兹别克斯坦科学院以两个 5kW 的氙灯辐射光束为热源在 F-1120 钢和 Y8 钢基体上熔覆不锈钢粉末 SS316,熔覆层的成分及在酸性介质中耐蚀性均接近于 316 不锈钢的水平<sup>[25]</sup>。我国关于聚焦光束熔覆技术的研究是在清华大学于 1997 年自行开发了聚焦光束加热设备后开始的,并对其实验结果进行了连续报道。采用动态 Ar 气氛保护,在 45<sup>#</sup> 钢基体上熔覆 GH1-6-2 镍基钎料与 F5010 镍包 WC 复合粉末是完全可行的。聚焦光束熔覆金属陶瓷复合涂层时,WC 陶瓷相的种类对熔覆层质量有显著影响。采用镍包 WC 可改善熔覆层质量。提高聚焦光束的能量密度,直接向熔池中吹送 Ar 气就可实现 Ni60 + 镍包 WC 耐磨合金的表面熔覆,熔覆层的平均硬度比基体提高了两倍以上<sup>[26,27]</sup>。聚焦光束熔覆技术的研究尚处于起步阶段。光束熔覆机理、熔覆层质量控制等有待于进一步深入研究。

## 5 结束语

高能束熔覆技术在表面改性及制造技术领域已显示了质量和效率上的优势,是国内外研究和开发的重要方向之一。激光熔覆时,基体热畸变小,成分和稀释率可控性好,可获得性能优异的熔覆层,近十几年来得到了迅速发展,但目前的研究成果处于实验室阶段,与生产应用的要求差距较大,因此,激光熔覆技术在生产中的推广应用是今后的重要攻关方向,如开发商品化的专用熔覆材料、研制合乎工业生产条件的同轴送粉激光熔覆设备,以及熔覆层质量的在线控制等。电子束熔覆技术必须在真空中进行,成本高,但可保证获得高质量的熔覆层,所以,将电子束应用于活性金属的表面熔覆及精密零件的近净型制造等将充分发挥其质量优势。另外,开发优质、高效、低成本的表面熔覆技术(如光束熔覆技术)作为激光熔覆技术的补充手段,也是高能束熔覆技术领域的重要攻关方向。

## 参 考 文 献

- 1 武晓雷,陈光南. 金属学报,1998;34(12):1284~1288
- 2 王毛球,曾大文,宋武林 *et al.* 激光技术,1999;23(3):149~153
- 3 Abbovd J, West D, Rawlings R. J Mater Sci, 1994;29(13):3393~3398
- 4 Barbera A, Mignone A, Tosto S *et al.* Surface & Coatings Technol, 1991;46(3):317~329
- 5 栾景飞,郭作兴,胡建东 *et al.* 应用激光,1999;19(1):29~31
- 6 Weerasinghe V M, Steen W M. Lasers in Materials Processing. London: American Society for Metals, 1983:166~173
- 7 Mclean M A, Shannon G J, Steen W M. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials proceeding of the 1997 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1997;21:3~6
- 8 Cadenas M, Cuetos J M, Fernandez-Rico E *et al.* Revista de Metalurgia, 1998;34(2):120
- 9 Qian M, Lim L C, Chen Z D. Surface & Coatings Technol, 1998;106:174~182
- 10 Pan Q Y, Huang W D, Li Y M *et al.* Acta Metallurgica Sinica, 1997;10(5):445~452
- 11 周二华,曾晓雁,吴新伟 *et al.* 激光技术,1997;21(1):34~37
- 12 裴宇韬,孟庆昌,欧阳家虎 *et al.* 中国激光,1995;A22(12):935~938
- 13 Nagakura H, Nakata K, Honda Y *et al.* Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1998;64(5):763~767
- 14 黄国栋,张悦仁. 中国机械工程,1993;10(2):22~25
- 15 王顺兴,张一民,郑世安. 金属热处理,1995;(10):10~13
- 16 吴新伟,曾晓雁,朱蓓蒂 *et al.* 中国激光,1997;A24(6):570~576
- 17 Brandt M, Emms S B, Scoot D A *et al.* Proceedings of the 1997 Laser Materials Processing Conference, 1997;83(2):11~20
- 18 Kovalenko V S, Lutay A M, Anyakin M S *et al.* Proceedings of the 1997 Laser Materials Processing Conference, 1997;83(2):21~26
- 19 Choi J, Mazumder J. J Mater Sci, 1994;29(17):4460~4476
- 20 许伯藩,史华忠,张细菊. 中国激光,1998;A25(8):763~767
- 21 Liu Y, Koch J, Mazumder J *et al.* Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 1994;25(3):425~434
- 22 Hirose A, Kobayashi K F. Iron & Steel Inst of Japan, 1995;35(6):757~763
- 23 Miyamoto I, Fujimori S, Itakura K *et al.* Proceedings of the 1997 Laser Materials Processing Conference, 1997;83(2):1~10
- 24 朱蓓蒂,曾晓雁. 材料研究学报,1994;8(4):315~317
- 25 Suleimanov S Kh, Baizakov B B, Bugakov A G *et al.* J Physique IV, 1999;9(3):447~452
- 26 单际国,任家烈. 中国表面工程,1999;12(1):22~24
- 27 Shan J G, Ren J L. Avtoma Svarka, 1999;(4):56~58

作者简介:张迪,1977年10月出生。在读硕士。从事高能束表面改性技术研究。