

文章编号: 0258-7025(2001)11-1049-05

镍基合金光束粉末堆焊质量的研究*

张 迪 单际国 任家烈

(清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要 研究了堆焊工艺和材料对镍基合金光束粉末堆焊质量的影响规律。为获得优质堆焊层,预涂层的宽度必须小于光斑直径,较大的预涂厚度会导致堆焊层与基材结合不良,厚度较小时,因过高的稀释率使堆焊层宏观硬度显著下降。采用多层焊和多道搭接工艺可获得大厚度、大面积堆焊层。堆焊层横向裂纹、焊道边缘气孔及层间未熔合是多层堆焊时易产生的缺陷。大面积堆焊时,焊趾位置会因选择性润湿而出现未搭接。合理控制堆焊线能量、对前道焊缝的清理以及堆焊过程中加强对熔池的保护,是获得大厚度、大面积堆焊层的关键。在镍基合金中加入与其相互润湿的金属陶瓷相(镍包 WC),并控制其加入量可获得无缺陷的、更高硬度的复合堆焊层。

关键词 光束粉末堆焊,堆焊层质量,镍基合金

中图分类号 TN 249;TG 456.7 **文献标识码** A

Study on the Quality of Ni-based Alloy Light Beam Powder Surfacing

ZHANG Di SHAN Ji-guo REN Jia-lie

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

Abstract In this paper, the influence of surfacing technology and material on the quality of light beam Ni-based alloy powder surfacing layer was investigated. In order to acquire surfacing layer of quality, the width of pre-coating must be smaller than that of light spot. Too big thickness of pre-coating can result in the poor bond between surfacing layer and base metal. While the pre-coating is too thin, the macrohardness of surfacing layer decreases obviously owing to high dilution of base metal. By means of multi-layer and multi-pass lap surfacing, the surfacing layer with big thickness and area can be acquired. The transverse crack in surfacing layer, porosity in bead edge and non-fusion between layers are the defects that are liable to produce when multi-layer surfacing is used. When multi-pass lap surfacing is used, non-lap in the toe of weld can arise because of selected moisture. The reasonable control of heat input, cleaning of former weld and good protection of molten pool are the crucial factors of acquiring surfacing layer with big thickness and area. When adding wettable ceramics (WC with Ni coating) with Ni-based alloy and controlling the content of WC with Ni coating, the high quality of surfacing layer with higher hardness can be acquired.

Key words light beam powder surfacing, quality of surfacing layer, Ni-based alloy

1 引言

堆焊作为表面改性技术领域一种重要的工艺方法,在现代材料加工和制造业中得到了极为广泛的应用。优质、高效、低稀释率一直是国内外堆焊技术发展的重要攻关方向。传统的电弧、等离子弧堆焊由于电弧、等离子弧吹力较大和功率密度有限难以同时达到优质、高效、低稀释率的目标。因此,近年来以激光堆焊为代表的高能束堆焊方法的研究开发

引起了国内外同行的普遍关注。激光堆焊具有基体热变形小,堆焊层成形优良的优点,在精密堆焊、特殊材料堆焊等方面更显示了该技术的优势^[1]。氙灯辐射光束波长与 YAG 激光极为接近,金属材料对其吸收率高,而其能量转换效率远高于激光,设备成本仅为同功率激光设备的三分之一。合理的光学聚焦系统可获得能量密度达 10^4 W/cm^2 以上,焦点尺寸 3~20 mm 的高质量聚焦光斑^[2]。因此,将聚焦光束应用于粉末堆焊技术是完全可能的。光束粉末堆焊技术在国内外尚处于起步阶段,堆焊层质量的研究是开发应用光束粉末堆焊技术的基础。

本文采用了自行研制开发的 SR-II 型聚焦光束

* 国家自然科学基金(N59905017)资助项目。

收稿日期:2000-07-24;收到修改稿日期:2001-02-26

加热设备,在45#钢基体上获得了镍基合金光束粉末堆焊层,并研究了堆焊工艺和材料对堆焊层质量的影响规律。

2 试验材料、设备及方法

2.1 试验材料

堆焊材料选用商品化的喷涂用镍基自熔合金粉末 Ni60, Ni35 及镍基钎料 BNi2, GHL-6-2, 粒度为

-140~+320目。金属陶瓷相选用 F5010 镍包 WC 及普通 WC, 粒度均为 -140~+320目。基材为 45# 钢, 单道堆焊时试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm, 多层及多道焊时试样尺寸为 18 mm×36 mm×100 mm。

2.2 试验设备

试验中采用 SR-II 型聚焦光束加热设备, 其主要技术参数见表 1, 聚焦系统见图 1。

表 1 光束加热设备技术参数

Table 1 Properties of light beam heating equipment

Power /kW	Scanning velocity /mm·s ⁻¹	Beam diameter with single focusing /mm	Beam diameter with combined focusing /mm
0.6~5	0.5~20	15	5

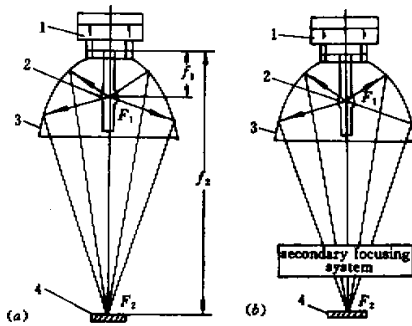


图 1 堆焊设备的光学聚焦系统示意图

1: 风冷系统; 2: 氙灯光源; 3: 反光镜; 4: 工件

(a) 单聚焦系统; (b) 合并聚焦系统

Fig. 1 Sketch of optical focusing system of surfacing equipment

1: wind cooling system; 2: xenon arc lamp;

3: reflector; 4: base metal

(a) single focusing system; (b) combined focusing system

2.3 试验方法

堆焊中所用功率 5 kW, 扫描速度 1 mm/s, 采用有机粘结剂将合金粉末预涂在基体表面。预涂层厚度为 0.5~3 mm。金相试样用双氧水盐酸水溶液腐蚀后在 Neophot 32 光学显微镜及 CSM950 扫描电镜下分析组织并照相。用 IIMT-3 型显微硬度计和 AR-10 型洛氏硬度计分别测量显微硬度和表面硬度, 载荷分别为 200 g 和 150 kg。

以堆焊层成形、表面硬度及界面结合作为堆焊

层质量的评定标准。堆焊层成形质量包括堆焊层连续性、表面粗糙度、润湿角等。在堆焊层成形良好的前提下, 评定堆焊层的表面硬度。

3 试验结果、分析与讨论

3.1 单道单层堆焊

3.1.1 堆焊工艺对堆焊层质量的影响

研究表明, 光束的能量密度、熔池的保护方式、预涂层中粘结剂的加入量以及预涂层厚度 H 和宽度 W 是影响光束粉末堆焊层质量的重要工艺因素。

光束加热的能量密度与堆焊过程中对熔池的保护方式是决定堆焊过程成败的关键工艺因素。本试验中采用两种光束聚焦模式, 即单一模式的反光镜聚焦和透镜配合反光镜复式聚焦, 分别对应较小和较大能量密度。熔池的保护方式有两种, 即在半封闭的石英玻璃罩内创造动态 Ar 气保护^[3]、向熔池直接吹送 Ar 气。试验中发现, 采用单一模式的反光镜聚焦时, 直接向熔池吹送 Ar 气不能保证良好的保护效果, 堆焊金属在基体表面不能很好铺展且氧化严重, 导致堆焊层质量恶化。这显然与经反光镜聚焦的光束能量密度低、熔池存在时间长有关; 采用动态 Ar 气保护可明显改善堆焊层的表面成形, 但整个堆焊过程必须在石英玻璃罩内进行, 对基体的尺寸有一定限制。而光束经透镜配合反光镜复式聚焦后, 光斑直径明显减小, 能量密度大幅度提高, 采用直接向熔池吹送 Ar 气就可保证堆焊层良好的成形质量; 即使在不加 Ar 气保护的条件下, 镍基自熔合金粉末 (Ni60, Ni35) 光束堆焊层仍可获得较好成

形,堆焊层表面光滑,横断面呈规则圆弧状,但 Ni35 圆弧半径比 Ni60 大,这与 Ni35 合金粉末熔点低,易于在基体表面润湿铺展有关,即其光束粉末堆焊的工艺性能更好。而镍基钎料 BNi2, GHL-6-2 堆焊层成形较差。这是由于 BNi2, GHL-6-2 是真空钎料,只有在真空条件下,才能充分发挥其熔点低、对基体润湿性好的优点,而喷涂用自熔合金粉末本身具有自造渣能力。因此,对于大气中的光束堆焊过程,有发展前景的不是对工艺要求苛刻的真空钎料,而是热喷涂用的自熔性合金粉末。

光束粉末堆焊前预涂层中粘结剂的加入量是控制堆焊层成形的重要工艺因素之一。当加入过量粘结剂时,堆焊过程中熔池发粘,流动性差,堆焊层表面粗糙度增大,易产生气孔;而粘结剂加入量过少时,堆焊金属对基体的润湿性下降,堆焊层呈泪滴状,不能形成连续的焊道。所以在光束粉末堆焊过程中,为获得成形良好的堆焊层,必须合理控制粘结剂的加入量。

预涂层的形状系数 (H/W) 是影响堆焊层质量的另一重要复合参数。预涂层的宽度 W 影响堆焊层与基体结合。当单道预涂层宽度大于光斑直径时,焊道边缘由于光束能量密度较低,堆焊合金粉末熔化不充分,不能在基体表面良好润湿,堆焊层易出现边缘翘曲或未结合(图 2)。因此单道预涂层的宽度应小于光斑直径。

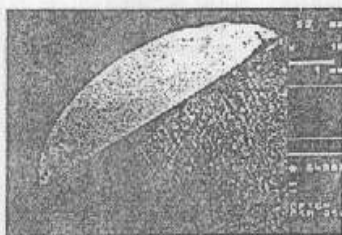


图 2 预涂宽度过大时堆焊层横断面(16×)
Fig. 2 Transverse section of too wide surfacing layer(16×)

在热输入一定的条件下,预涂层厚度 H 在很大程度上决定了堆焊层的稀释率,进而影响堆焊层的宏观硬度及其与基体的结合质量。光束能量由堆焊金属和基体两部分吸收,而基体的受热是通过堆焊层的热传导完成的。较薄的预涂层吸收的热量少,对光束能量的屏蔽作用小,基体吸热量相对较大,使基体表面熔化后形成浅熔池,堆焊层的稀释率相对较大;而当预涂层较厚时,基体吸收的光束能量减

少,其熔化量也相应减小,稀释率降低。但预涂层厚度过大会因基材熔化不足导致堆焊层与基体结合不良或未结合。预涂 3 mm 的 Ni60 粉末,堆焊层已不能与基体结合,而 Ni35 与基体可产生弱结合,说明不同堆焊合金粉末对应着不同的预涂层极限厚度。在热输入一定时,极限厚度与合金粉末的熔点有关。与常规堆焊方法相比,光束粉末堆焊即使在堆焊层很薄的情况下,仍可保证较小的稀释率。当预涂层厚度为 0.5 mm 时, Ni35, Ni60 合金粉末光束堆焊层的稀释率分别为 4% 和 2.5%,最大限度地保证了堆焊层的设计成分和性能。

光束粉末堆焊层的硬度与预涂层厚度有着密切的联系(图 3)。当预涂层厚度较小时(0.5 mm), Ni60, Ni35 堆焊层的宏观硬度均低于同种材料的热喷涂层(分别为 HRC60, HRC35);随着预涂厚度的增加,堆焊层的宏观硬度逐渐达到并超过同种材料的热喷涂层;当厚度超过某一定值时(1mm),堆焊层的宏观硬度将趋于稳定。当预涂层厚度较小时,堆焊层更多反映的是基体的硬度,随预涂层厚度的增加,大部分光束能量用于熔化堆焊金属,基体熔化量相应减少,堆焊层稀释率降低,堆焊材料的硬度成为决定堆焊层硬度的主要因素。因此,要保证堆焊层较高硬度,且与基体结合良好,存在着最佳预涂层厚度范围。

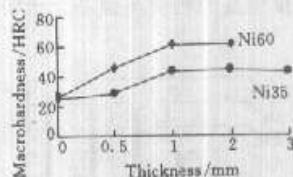


图 3 堆焊层宏观硬度与预涂层厚度关系曲线
Fig. 3 Relationship between hardness and thickness of surfacing layer

3.1.2 堆焊材料对堆焊层质量的影响

根据工艺试验的研究结果,选用光束粉末堆焊的工艺参数为:光斑直径 5 mm,预涂层宽度 4 mm,厚度 2 mm,直接向熔池吹送 Ar 气保护熔池,以 Ni35, Ni60 为基础合金粉末,进一步研究基础粉末材料的种类、金属陶瓷相的种类和含量等材料因素对堆焊层质量的影响。

研究表明,不同金属陶瓷相及其加入量会对堆焊层的成形及宏观硬度产生很大影响。以普通 WC 作为镍基合金粉末中的金属陶瓷相,堆焊层表面、内

部尤其是界面处产生大量气孔、夹杂等冶金缺陷而恶化堆焊层质量,这是由于镍基合金对普通 WC 润湿性差导致的^[3]。可见,加入与镍基合金润湿性好的金属陶瓷相有利于获得质量优良的堆焊层。

以镍包 WC 作为镍基合金粉末中的金属陶瓷相,堆焊层成形较加入普通 WC 时有明显改善。镍包 WC 的含量不超过 60wt.-%,堆焊层可保持较好的成形且无裂纹产生。随镍包 WC 含量的增加,堆焊层横断面由圆弧截面过渡为矩形截面,堆焊金属对基体的润湿性逐渐下降。过多地加入镍包 WC 会导致堆焊层表面粗糙,内部孔隙率增加。因此,在保证堆焊层良好成形的前提下,其加入量存在一最大值。另外,大量的实验研究表明,当在 Ni60 合金粉末中加入 40wt.-% 镍包 WC 时,堆焊层内部气孔敏感性最大。堆焊层中的气孔主要是由碳的氧化烧损造成的 CO 或 CO₂ 气孔,从碳的来源看,镍包 WC 含量越高,气孔产生的几率越大,但当镍包 WC 含量进一步提高时,镍基合金的量相对减少,熔池底部镍包 WC 团占熔池的比例大,相当于气孔的逸出路径减小,使堆焊层中气孔减少。

纯镍基合金粉末光束堆焊层的宏观硬度均高于采用同种材料而获得的热喷涂层的宏观硬度,这与热喷涂层致密度低有关。添加镍包 WC 后所获得的复合堆焊层的硬度高于相应纯镍基合金粉末堆焊层的硬度,硬度提高的幅度与镍基合金粉末的种类

及镍包 WC 的加入量有关。加入 50% 以下的镍包 WC, Ni35 堆焊层的硬度有较大幅度的提高(25%),而 Ni60 堆焊层的硬度仅提高 4%~5%,但当镍包 WC 的含量增至 60% 时,其堆焊层硬度有明显增加(图 4)。可见,金属陶瓷相与镍基合金相互润湿及其加入量是获得优质复合堆焊层的关键因素。

3.2 多层堆焊

单道单层堆焊工艺试验表明,每种堆焊合金粉末对应一不产生堆焊缺陷的最大预涂层厚度。为获得大厚度的光束粉末堆焊层,采用大厚度单层堆焊是不可行的,只能采用小厚度多层堆焊的方法。

试验结果表明,由于光束粉末堆焊可保证涂层较薄时获得较小的稀释率,因此多层焊表层与底层的稀释率相差不大,其表层的硬度与较大厚度单层焊时宏观硬度值接近(表 2),这也可从多层焊横断面厚度方向的显微硬度分布曲线波动较小反映出来(图 5)。采用多层焊工艺可使堆焊层硬度分布趋于稳定,避免因基材的稀释而导致的表面硬度下降。

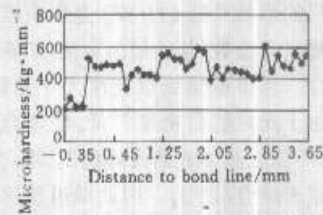


图 5 Ni35 多层焊显微硬度分布特征

Fig. 5 Distribution of microhardness in Ni35 multi-layer surfacing layer

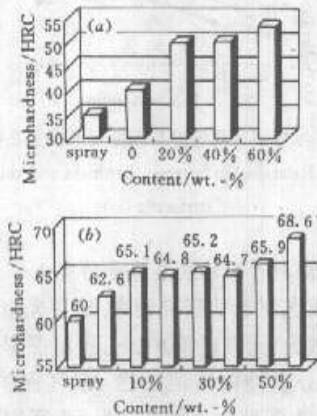


图 4 镍包 WC 含量对复合堆焊层宏观硬度的影响
(a) Ni35; (b) Ni60

Fig. 4 Macrohardness of composite surfacing layer of Ni-based alloy + WC with Ni coating
(a) Ni35 composite surfacing layer;
(b) Ni60 composite surfacing layer

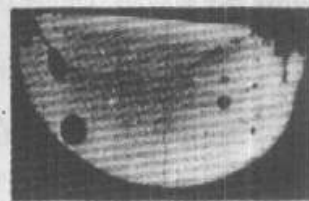


图 6 Ni35 多层焊道中的典型缺陷(10×)

Fig. 6 Typical defects in the layers of Ni35 multi-layer surfacing (10×)

多层堆焊存在的主要问题有三个,即堆焊层横向裂纹、焊道边缘气孔及层间未熔合(图 6)。多层堆焊时产生的裂纹与光束扫描方向垂直,具有冷裂纹的特征。不同的堆焊材料的开裂倾向对堆焊厚度的敏感性不同,每一种材料均对应着不产生裂纹的最大堆焊层厚度值。Ni60 在堆焊层厚度达 2.1 mm

(第三层)时出现裂纹,而Ni35在厚度达2.9 mm(第四层)时出现裂纹(表2)。Ni60合金粉末的含碳量高,开裂敏感性大,对应堆焊层极限厚度较小。提高线能量或预热基体可避免横向裂纹的产生,从而增加合金粉末所对应的极限厚度。焊道边缘气孔产生的主要原因是惰性气体对该区域的保护不充分,加

强惰气保护可避免气孔的产生。而层间未熔合是由于对前道堆焊金属表面的氧化物残渣清理不彻底而导致的,当然,后一道的熔透程度也是不可忽视的,降低预涂层厚度显然有利于避免层间未熔合。因此,适当控制热输入,加强对熔池的保护并彻底清理层间氧化皮和渣壳是获得优质大厚度堆焊层的重要保证。

表2 多层堆焊实验结果

Table 2 Results of multi-layer surfacing

Surfacing material	Number of surfacing layers	Thickness of surfacing layer/mm	Total thickness of multi-layers/mm	Maximum thickness of surfacing layers without cracks/mm	Hardness (HRC)
Ni60	4	0.70	3.0	2.1	60
Ni35	5	0.70	3.7	2.9	42

3.3 大面积堆焊

获得大面积堆焊层的关键是多道搭接技术。从搭接试样的低倍形貌(图7)看出,左右两焊道与中间焊道进行搭接的先后顺序不同,导致与中部焊道表面的润湿性不同,右焊道先施焊,基体为冷态,而左焊道后施焊,基体为热态,左焊道与中间焊道的搭接质量明显提高。在高倍下观察发现(图8),焊道中出现沿共晶开裂的纵向裂纹,裂纹在枝晶处止裂,该裂纹具有热裂纹特征,光束加热条件下热裂纹的形成机理及防止措施有待于进一步研究。



图7 Ni35多道搭接堆焊层横截面形貌(12.5×)
Fig.7 Morphology of transverse section of Ni35 multi-pass lap surfacing layer (12.5×)

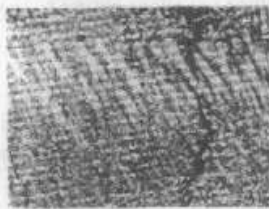


图8 Ni35多道搭接堆焊层中的热裂纹形貌(100×)
Fig.8 Heat crack in Ni35 multi-pass lap surfacing layer (100×)

反复试验研究表明,前焊道边缘与基材的结合部(焊趾位置)的渣壳和氧化皮必须清理彻底,否则

焊趾位置会因后续焊道对前焊道的选择性润湿而出现未搭接。堆焊过程中加强对堆焊金属的保护会明显改善前一堆焊道的表面质量,使搭接质量提高。

4 结论

1) 为获得质量优良的光束粉末堆焊层,预涂层的宽度必须小于光斑直径,较大的预涂厚度会导致堆焊层与基材结合不良,厚度较小时,因过高的稀释率堆焊层宏观硬度则显著下降。

2) 在光束粉末堆焊条件下,镍包WC比普通WC更适于做镍基合金的陶瓷强化相,加入过量的陶瓷相会导致堆焊层成形恶化。

3) 镍基合金粉末中加入镍包WC金属陶瓷相使堆焊层的宏观硬度提高。在保证堆焊层成形良好的前提下,对硬度较高的Ni60而言,加入镍包WC后复合粉末堆焊层的硬度提高幅度较小(4%~5%),而Ni35堆焊层硬度可提高25%。

4) 合理控制堆焊线能量、对前道焊缝的清理,以及堆焊过程中加强对熔池的保护,是获得优质大面积大厚度堆焊层的关键。

参考文献

- 1 Dong Zujue, Huang Qingyun, Gao Feng *et al.*. Status and development of surfacing in the world. China Welding Society, Proceedings of the 8th National Welding Conference in China, Beijing: Mechanical Industry Press, 1997, (1):157~164 (in Chinese)
- 2 Shan Jiguo, Ren Jialie, Xu Binshi. Surface hardening with light beam. *China Surface Engineering* (中国表面工程), 1998, 11(1):16 (in Chinese)
- 3 Shan Jiguo, Ren Jialie. Light beam surfacing of powder mixture of self-fluxing nickel alloy and tungsten carbide. *Avomo. Svarka*, 1999, (4):56~58 (in Russian)