

高能密度聚焦光束粉末堆焊质量的研究*

单际国 张迪 任家烈

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘要:研究了堆焊材料组成和堆焊工艺参数对光束粉末堆焊质量的影响规律。单道单层堆焊时,预涂粉末厚度过大将导致堆焊层与母材结合不良,反之,因过高的稀释率堆焊层宏观硬度则显著下降。多层堆焊时,易产生堆焊层横向裂纹、焊道边缘气孔及层间结合不良等堆焊缺陷。多道搭接堆焊时,易产生相邻焊道搭接部位的未熔合。在镍基合金中加入与其相互润湿的金属陶瓷相(镍包WC),并控制其加入量是获得优质复合堆焊层的关键。合理控制堆焊热输入、对焊道焊趾部位的清理,以及堆焊过程中对熔池采取合理的保护,可获得无缺陷的大厚度、大面积堆焊层。

关键词: 光束粉末堆焊 质量控制 镍基合金

中图分类号: TG455

0 前言

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、等离子弧吹力较大或功率密度有限难以同时达到优质、高效、低稀释率的目标。激光堆焊具有母材热变形小,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]。氩灯辐射光束的波长与YAG激光极为接近,能量转换效率不低于40%,金属材料对其吸收率高,而设备成本仅为同功率激光设备的三分之一,采用合理的光学聚焦系统可获得能量密度达10 kW/cm²以上、焦点尺寸3~20 mm的高质量聚焦光斑^[2]。光束粉末堆焊技术在国内外尚处于起步阶段,开展光束粉末堆焊层质量控制的研究是推广应用该技术的基础。

本文采用了自行研制的聚焦光束加热设备,在45钢母材上获得了镍基合金光束粉末堆焊层,揭示了堆焊材料组成和堆焊工艺对堆焊层质量的影响规律。

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验材料

试验用堆焊材料为镍基自熔合金粉末Ni60和Ni35,其名义硬度分别为60 HRC和35 HRC。金属陶瓷增强相为F5010镍包WC及普通WC,粒度均

为-140~+320目。母材为退火态45钢,单道堆焊时试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm,多层及多道堆焊时试样尺寸为18 mm×36 mm×100 mm。

1.2 试验设备

堆焊试验采用SR-II型聚焦光束加热设备,其光源最大电功率为5 kW,经反光镜聚焦后的最小光斑直径为15 mm,经透镜二次聚焦后光斑直径减小至5 mm。借助工作台光束相对工件的扫描速度可在0.2~11.0 mm/s范围内连续调节。

1.3 试验方法

堆焊试验所用光源电功率为5 kW,扫描速度为1 mm/s,采用有机粘剂将合金粉末预涂在母材表面。预涂层厚度为0.5~3.0 mm。金相试样在Neophot 32光学显微镜及CSM950扫描电镜下分析组织并照相。用AR-10型洛氏硬度计测量表面硬度,载荷为1.5 kN。以堆焊层外观成形、内部冶金质量、表面硬度及界面结合质量作为堆焊层质量的评定标准。在堆焊层成形良好的前提下,评定堆焊层的表面硬度。

2 试验结果、分析与讨论

2.1 影响单道单层堆焊质量的主要因素

2.1.1 堆焊工艺参数

研究表明,光束能量密度及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(1 kW/cm²)和较大(10 kW/cm²)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

* 国家自然科学基金(59905017)、清华大学985基金及实验室开放基金资助项目。20001205收到初稿,20010428收到修改稿

创造动态 Ar 气保护^[3]、向熔池直接吹送 Ar 气。试验中发现,采用较低的能量密度(1 kW/cm²)堆焊时,若直接向熔池吹送 Ar 气,堆焊金属在母材表面不能很好铺展且氧化严重。这可能是由于光束能量密度低,熔池存在时间长,导致了堆焊材料合金元素的过度烧损,不仅改变了堆焊材料的熔点,而且可能使熔化后的堆焊金属对母材的润湿性变差;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,对工件的尺寸有一定限制。而光束经透镜配合反光镜复式聚焦后,光斑直径明显减小(5 mm),能量密度大幅度提高(10 kW/cm²),不采用 Ar 气保护或直接向熔池吹送 Ar 气均能保证堆焊层良好的成形质量,堆焊层表面光滑,横断面呈圆弧状,但 Ni35 堆焊层圆弧半径比 Ni60 大,这与 Ni35 合金粉末固-液相线温度区间窄,易于在母材表面润湿铺展有关。

将堆焊粉末材料预涂在母材表面所采用的有机粘剂剂的加入量对堆焊层成形有着重要影响。当过量加入粘剂剂时,堆焊过程中熔池发粘,流动性变差,堆焊层表面粗糙度增大,另外,由于有机粘剂剂烧损会使气孔产生几率增加;而粘剂剂过少时,堆焊金属对母材的润湿性下降,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必须合理控制粘剂剂的加入量。

预涂层的宽度 b 和厚度 δ 是影响堆焊层质量的重要工艺参数,它们不仅可能影响堆焊层与母材的结合,而且还可能决定堆焊层的宏观硬度。当预涂层宽度 b 大于光斑直径时,焊道边缘由于能量密度较低,堆焊合金粉末熔化不充分,不能在母材表面良好润湿,堆焊层易出现边缘翘曲或未结合(图1)。因此单道预涂层的宽度应不大于光斑直径。

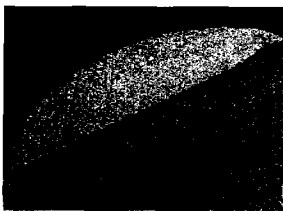


图1 预涂宽度过大时堆焊层横截面形貌 $\times 16$

在热输入一定的条件下,预涂层厚度 δ 在很大程度上决定了堆焊层的稀释率 η ,进而影响堆焊层的宏观硬度及其与母材的结合质量(表1)。光束能量由堆焊金属和母材两部分吸收,而母材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,母材吸热量相对

较大,使母材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,母材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母材熔化不足导致堆焊层与母材结合不良或未结合,当然预涂层厚度对堆焊层质量的影响还与堆焊材料密切相关。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,仍能保证较小的稀释率,可最大限度地保证堆焊层的设计成分和性能。

堆焊层的硬度与预涂层厚度密切相关(表1)。当预涂层厚度较小时(0.5 mm),堆焊层的宏观硬度均低于堆焊材料的名义硬度;随着预涂层厚度的增加,堆焊层的宏观硬度逐渐达到并超过堆焊材料的名义硬度;当厚度超过某一值时(1 mm),堆焊层的宏观硬度将趋于稳定。因为,当预涂层厚度较小时,堆焊层更多反映的是母材的硬度,随预涂层厚度的增加,大部分光束能量用于熔化堆焊金属,母材熔化量相应减少,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,且与母材结合良好,存在着最佳预涂层厚度范围。

表1 预涂层厚度对堆焊层质量的影响

堆焊材料	Ni35				Ni60			
	0.5	1.0	2.0	3.0	0.5	1.0	2.0	3.0
预涂层厚度 δ /mm								
稀释率 η /%	4.0	<3.0	<3.0	未测	2.5	<2.0	<2.0	未测
界面结合状况	良好	良好	良好	弱结合	良好	良好	良好	未结合
宏观硬度 HRC	28.3	42.9	43.5	42.2	45.5	61.1	60.6	未测

2.1.2 堆焊材料的组成

探索性试验研究表明,光束堆焊金属陶瓷相增强的复合粉末材料时,堆焊材料的组成对堆焊层质量有显著影响^[3]。因此,本文还以 Ni35、Ni60 为基础合金粉末,系统研究了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复合堆焊层质量的影响规律。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 5 mm、厚度 2 mm,直接向熔池吹送 Ar 气保护熔池。

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增强相,堆焊层表面、内部、尤其是界面处产生大量气孔、夹渣等冶金缺陷而恶

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]。以镍包 WC 作为镍基合金粉末中的增强相,堆焊层成形较加入普通 WC 时有明显改善。

镍包 WC 的质量分数不超过 60% 时,堆焊层可保持较好的成形且无裂纹产生。随镍包 WC 质量分数的增加,堆焊金属对母材的润湿性逐渐下降。过多地加入镍包 WC 会导致堆焊层表面粗糙不致密,内部孔隙率增加。因此,在保证堆焊层良好形成的前提下,其加入量存在一最大值。另外,大量的试验研究表明,当在 Ni60 合金粉末中加入 40% 镍包 WC 时,堆焊层的气孔敏感性最大。堆焊层中形成气孔应满足两个条件,一是有气体来源,二是气体不能及时逸出。堆焊层中的气孔主要由碳的氧化烧损造成的 CO 或 CO₂ 气孔,从碳的来源看,镍包 WC 质量分数越高,气体的生成量越多,但若由于 WC 的烧损而产生的气体量足够多时也会有利于气体的逸出。

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 40% 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约 5%,但当镍包 WC 的质量分数增至 60% 时,其堆焊层硬度有较大增加(图 2)。

可见,金属陶瓷相与镍基合金相互润湿及其合适的加入量是获得优质复合堆焊层的关键。

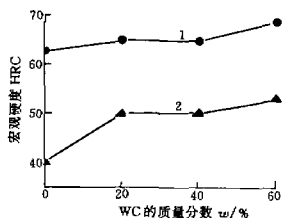


图 2 复合堆焊层宏观硬度与镍包 WC 质量分数关系图

1. Ni60 堆焊层 2. Ni35 堆焊层

2.2 多层堆焊时的主要质量问题

单道单层堆焊试验表明,每种堆焊合金粉末对应一不产生堆焊缺陷(界面结合不良)的最大预涂层极限厚度。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,多层堆焊时易产生堆焊层横向裂纹、焊道边缘气孔及层间结合不良等缺陷(图 3a)。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。不同堆焊材料的开裂倾向对堆焊层厚度的敏感性不同,每一种材料均对应着不产生裂纹的最大堆焊层极限厚度值。Ni60 在堆焊层厚度达 2.1 mm 时出现裂纹,而 Ni35 在厚度达 2.9 mm 时方产生裂纹(表 2)。Ni60 合金粉末的碳质量分数,开裂敏感性大,对应堆焊层极限厚度较小。预热母材可避免横向裂纹的产生。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。层间结合不良是由于对前道堆焊金属表面的氧化物残渣清理不彻底以及后续焊道未充分熔透导致的,降低预涂层厚度显然有利于避免层间结合不良的产生。因此,采取必要的预热、控制预涂层的厚度、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(图 3b)。由于光束粉末堆焊可保证涂层较薄时获得较小的稀释率,因此多层焊时,其表层的硬度(表 2)与较大厚度单层焊时宏观硬度值接近(表 1)。

表 2 多层堆焊工艺试验结果

材料	层数	单层厚度 δ_1 /mm	总厚度 δ_t /mm	极限厚度 δ_c /mm	宏观硬度 HRC
Ni60	4	0.70	3.0	2.1	60
Ni35	5	0.70	3.7	2.9	42

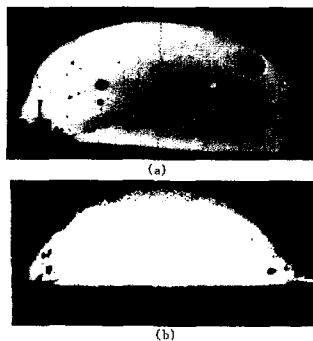


图 3 Ni35 多层堆焊焊道横截面形貌 $\times 10$

2.3 大面积堆焊时的主要质量问题

为了获得大面积堆焊层,必需采用多道搭接技术。研究表明,多道搭接堆焊时,若前焊道边缘与母材的结合部(焊趾位置)的渣壳和氧化皮清理不彻底,在焊趾位置会因后续焊道的选择性润湿而出现搭接部位未熔合。堆焊过程中加强对堆焊金属的保护会明显改善前一焊道的表面质量,使搭接质量

得以提高。

另外,多道搭接过程中,热量在母材中的累积将使母材的温度逐渐提高,若在搭接过程中采用相同的热输入条件,将导致后搭接的焊道堆宽增加,而堆高减小。图4所示的左右两焊道与中间焊道进行搭接的先后顺序不同,导致与中部焊道及母材表面的润湿性不同,焊道2先施焊,母材为冷态,而焊道3后施焊,母材为热态,与焊道2相比,焊道3的堆高减小堆宽增加。



图4 Ni35S 多道搭接堆焊层横截面形貌 $\times 12.5$

3 结论

(1) 聚焦光束的能量密度及预涂层的厚度是影响光束粉末堆焊层质量的重要工艺因素。预涂层厚度过大导致堆焊层与母材结合不良,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) 在镍基合金粉末中添加金属陶瓷相可获得比纯镍基合金更高硬度的复合堆焊层。金属陶瓷相与镍基合金的相互润湿及其加入量是获得优质复合堆焊层的关键。在光束粉末堆焊条件下,加入过量的陶瓷相会导致堆焊层成形及内部冶金质量下降。

(3) 为获得大厚度光束堆焊层必须采用多层焊工艺。采取必要的预热措施、合理控制预涂层的厚度是获得优质大厚度堆焊层的重要保证。

(4) 采用多道搭接技术可获得大面积堆焊层。相邻两焊道未熔合以及后续焊道由于母材中的热累积而产生的堆宽增加和堆高减小是大面积堆焊时存在的主要质量问题。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,是获得优质大面积堆焊层的关键。

参 考 文 献

- 董祖珏,黄庆云,高峰,等. 国内外堆焊技术发展现状. 见:第八届全国焊接会议论文集,北京:机械工业出版社,1997,(1):165~169
- 单际国,任家烈,徐滨士. 聚焦光束表面改性技术. 中国表面工程,1998,11(1):16~18
- Shan Jiguo, Ren Jialie. Light beam surfacing of powder mixture of self-fluxing nickel alloy and tungsten carbide. Avtoma. Svarka, 1999, (4): 56~58 (in Russian)

STUDY ON THE QUALITY OF HIGH-POWER DENSITY LIGHT BEAM POWDER SURFACING LAYER

Shan Jiguo Zhang Di Ren Jialie
(Qinghua University)

Abstract: The influence of surfacing material and processing parameters on the quality of light beam powder surfacing layer is investigated. When single-pass and single-layer surfacing is used, too big thickness of pre-coating can result in a poor bond between surfacing layer and base metal. On the contrary, the macrohardness of surfacing layer decreases obviously owing to high dilution when the pre-coating is too thin. 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-fusion can easily arise between neighboring beads. Adding wettable metal ceramics (WC with Ni coating) to Ni-based alloy and controlling the content of ceramics are the key factors to acquire the high quality composite surfacing layer. When heat input is controlled reasonably, toe of weld is cleaned thoroughly and molten pool is protected rationally, the non-defect surfacing layer with big thickness and area can be acquired.

Key words: Light beam powder surfacing Quality control Ni-based alloy

作者简介: 单际国,男,1965年出生,副教授。1996年获乌克兰科学院巴顿电焊研究所(PWI)工学博士学位(Ph.D.)。主要从事新材料连接、高能束表面改性的教学与科研工作,发表论文30余篇,申报国家发明专利1项。