

辊压机辊面堆焊区域的力学性能研究

胡励农

华润水泥(昌江)有限公司 海南昌江 572700

摘要: 受到辊面堆焊金属和基体材料性能之间差异的影响,会导致辊面堆焊金属耐磨层脱落,不能满足辊压机在苛刻的高应力条件下工作环境。为此,选择4种不同的焊条成分作为焊丝的药芯,对焊条与辊压机辊面进行堆焊后区域的力学性能展开研究。选定与辊面材质最接近的Q355钢板作为基体材料,选定高铬高锰、碳化钛、高铬铸铁、含铌4种焊丝对基体材料进行堆焊,从堆焊区域结合强度、微观形貌、剪切强度、抗拉强度和磨损质量几方面,分析堆焊区域的力学性能。通过试验结果可知,利用高铬高锰焊丝堆焊基体材料后,堆焊区域与基体材料结合强度最高,且在微观形态显示,使用高铬高锰焊丝后结合位置韧性较高,更容易在堆焊过程中形成硬质相,剪切强度可达到最高15MPa,抗拉强度可达到436.2MPa,伸长率为29.3%,区域磨损质量损失不超过15g,具有较高的硬度和耐磨性,能够抵抗辊压机辊面在工作中高强度的磨损,有利于确保辊面的长期稳定运行。

关键词: 辊压机;堆焊区域;力学性能;结合强度;抗拉强度;剪切强度

Research on the mechanical properties of the welding area on the roller surface of the roller press

HU Linong

China Resources Cement (Changjiang) Co., Ltd., Changjiang 572700, Hainan, China

Abstract: Due to the difference in properties between the metal deposited on the roller surface and the substrate material, the wear-resistant layer of the metal deposited on the roller surface may peel off, which cannot meet the working environment of the roller press under harsh high stress conditions. Therefore, four different types of welding rods were selected to prepare flux cored welding wires, and the mechanical properties of the area after the welding rod and the roller press roller surface were studied. Select Q355 steel plate, which is closest to the roller surface material, as the substrate material. Four types of welding rods, including high chromium and high manganese, titanium carbide, high chromium cast iron, and niobium containing, are selected for overlay welding of the substrate material. Analyze the mechanical properties of the overlay welding area from the aspects of bonding strength, microstructure, shear strength, tensile strength, and wear quality. According to the experimental results, it can be seen that after using high chromium and high manganese welding rods to weld the substrate material, the bonding strength between the overlay area and the substrate material is the highest. In terms of microstructure, the toughness

基金项目: 海南省重点研发项目(ZAYS2023SAFD135)。

第一作者: 胡励农, 本科, 中级工程师, 主要从事取料机、辊压机、球磨机、立磨及回转窑蓖冷机与液压系统研究,

E-mail: pr567661@126.com。

of the bonding position is higher after using high chromium and high manganese welding rods, making it easier to form hard phases during the welding process. The shear strength can reach up to 15MPa, the tensile strength can reach 436.2MPa, the elongation rate is 29.3%, and the loss of area wear quality does not exceed 15g. It has high hardness and wear resistance, and can resist high-strength wear borne by the roller surface of the roller press during work, which is conducive to ensuring the long-term stable operation of the roller surface.

Keywords: roller press; welding area; mechanical properties; bond strength; tensile strength; shear strength

1 序言

辊压机辊面磨损机理是一个涉及物理、化学和材料科学等多个领域的复杂问题^[1]。辊压机工作是典型的高应力磨料磨损过程,循环载荷的反复作用超过辊子材料的疲劳强度时,就会使辊子表面出现细微裂纹^[2]。随着循环载荷的反复作用,亚表层的塑性变形继续发展^[3]。

堆焊是一种采用弧焊方式,在零件表面熔覆一种性能独特的材料,以提高零件耐磨、耐热及耐蚀等性能。在辊压机中,为了提高辊面的耐磨性,常在辊压机表面堆焊数层耐磨金属。耐磨堆焊材料通常利用高硬度、高熔点、高耐磨性的耐磨材料,使得耐磨钢板具有出色的耐磨性能,从而有效提高设备的使用寿命^[4, 5]。然而,由于堆焊金属和基体材料性能的差异,以及辊压机在苛刻的高应力条件下工作,所以耐磨层容易脱落,导致辊压机失效^[6]。因此,研究焊丝与辊压机辊面进行堆焊后区域的力学性能,对于提高辊压机的使用寿命和效率具有重要意义。

众多学者对机械设备的磨损进行研究,分析堆焊效果,如RATUR^[7]集中研究铝合金材料的磨损机理以及堆焊后的效果,该研究测试堆焊后的力学性能,通过材料软化提升抗磨损性能,但是该研究只关注材料磨损的某一方面,如磨损量、磨损形态等,缺乏一个综合评价体系来全面评估材料的磨损情况,这样的综合评价体系应该包括多个指标,如磨损速度、磨损均匀性、材料寿命等。艾孝文等^[8]研究了堆焊合金的组织性能与耐磨性能,该研究确定C含量是影响最终组织性能的因素,堆焊合金韧性受到合金含量的影响,但是对Cr₈Nb₃CSiMnTi系堆焊合金的组织演化机制,尤其是在不同堆焊条件和工艺参数下的组织变化,理解还不够深入,合金的组织结构对其性能具有重要影响,而组织演化机

制的缺失可能导致对合金性能预测的不准确。孙洪斌等^[9]研究的合金由Fe-Cr-B-C等元素组成,调整Cr和C含量体现焊缝组织性能,同时提升复合材料的耐磨性,但是对于Fe-Cr-B-C系耐磨堆焊合金的组织演化机制,目前的理解尚不深入,尽管已有研究探讨了不同元素对合金组织的影响,但关于合金中各元素如何相互作用以形成特定组织结构的机制仍不够清晰。这限制了对合金性能优化和改进的能力。黄海堂等^[10]研究了铁基堆焊材料,并且分析该材料的耐磨性能,提出化合物掺杂是提高铁基堆焊合金耐磨性的有效手段之一,但现有的掺杂技术仍存在一定的不足,例如掺杂化合物的种类、比例和分布对涂层性能的影响机制尚不明确,导致在实际应用中难以准确控制掺杂效果。此外,掺杂过程中可能出现的杂质和缺陷也可能对涂层性能产生负面影响。

为此,本文选择4种不同的焊条成分作为焊丝的药芯,从堆焊区域结合强度、微观形貌、剪切强度、抗拉强度和磨损质量几方面,对辊压机辊面堆焊区域的力学性能展开研究。

2 材料

2.1 基体材料选择

由于辊压机辊面体积较大,不能直接将堆焊后的区域拆卸下来作为研究对象,因此需要选取与辊面材料较为接近的原料作为试验对象。目前市面常见的辊压机辊面一般采用焊接性能好、强度高的低碳合金钢整体锻造而成,考虑这一材料特点,选择与辊面材料较为接近热轧(正火)200mm×150mm×16mm尺寸的Q355钢板作为基体材料。Q355钢板化学成分与力学性能见表1、表2。

2.2 焊丝药芯成分的选取

(1) 焊条化学成分 堆焊区域需要具有较强合金添加效果,因此要选择较为合适的焊条成分作为

表1 Q355钢板化学成分（质量分数）(%)

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Al	Ti
≤0.20	≤0.55	1.00~1.60	≤0.04	≤0.04	0.02~0.15	0.015~0.06	0.02	0.20

表2 Q355钢板力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	冲击吸收能量/J	伸长率 (%)
≥345	460~660	≥34	≥17

药芯，本文选取4种常见焊条，通过试验分析不同成分药芯焊丝对于辊压机辊面耐磨堆焊材料结合性能的影响，4种焊丝药芯成分分别为：高铬高锰焊条（焊丝1）、碳化钛焊条（焊丝2）、高铬铸铁焊条（焊丝3）、含铌焊条（焊丝4）。4种焊丝药芯中焊条的化学成分见表3。

（2）作为药芯的焊条选择因素 在选择用于辊压机辊面耐磨堆焊的焊丝时，需要考虑作为药芯的焊条的耐磨性、硬度、抗冲击能力、焊接性及结合性能等因素。以上述考虑条件为基础，对选择4种焊条的原因进行分析。

1）高铬高锰焊条（焊丝1）。耐磨性和硬度：高铬高锰焊条通常具有高硬度和高耐磨性，适用于承受高磨损和冲击的工作环境。高铬焊条含有铸铁组织加Cr、Mn的碳化物，特别适合用于抵抗泥沙及矿山磨损和轻微冲击的零部件。

抗冲击能力：高锰钢焊条在严重冲击载荷和金属间磨损工作中表现出色，经过加工硬化后硬度显著提高。

2）碳化钛焊条（焊丝2）。高硬度和耐磨性：碳化钛（TiC）硬度高，且弥散分布，可极大地提高堆焊层的硬度及耐磨性。钛铁的加入量增多，堆焊层中的TiC数量越多，堆焊层的硬度就越高，耐磨性也随之提高。

抗裂性：碳化钛焊条在保持高硬度的同时，还具有良好的抗裂性。

3）高铬铸铁焊条（焊丝3）。高硬度和耐磨性：高铬铸铁堆焊耐磨焊条具有较高的硬度，能够在高温和高压环境下保持稳定的性能，适用于需要

高耐磨性和高硬度的场合。

良好的焊接性能：高铬铸铁焊条能够实现高质量的焊接，焊缝质量高，抗拉强度高。

耐热性：部分型号的高铬铸铁焊条能够在高温下保持硬度，如D667型号在500℃以下具有良好的耐磨性、耐蚀性。

4）含Nb焊条（焊丝4）。提高硬度和耐磨性能：Nb是一种重要的元素，能够提高钢铁材料的强度。在耐磨中焊材中加入Nb元素，能够提高堆焊材料的硬度和耐磨性能。

提高韧性和耐蚀性：铌还可以提高堆焊材料的韧性和耐蚀性，从而提高材料的整体耐用性和使用寿命。

综上所述，4种焊条在耐磨性、硬度、抗冲击能力、焊接性能及结合性能等方面均具有不同的优势，因此选择这些焊条作为药芯成分的焊丝进行试验能够满足辊压机辊面耐磨堆焊材料的基本需求。

2.3 堆焊区域预处理

由于基体材料表面可能存在的油污、铁锈及氧化皮等杂质会严重影响焊丝与基体材料之间的结合强度，因此需要通过打磨预处理来彻底清除这些杂质^[11]。确保堆焊区域与基体材料之间能够发生牢固的冶金结合，提高堆焊区域的性能和质量。具体步骤如下。

1）清理基体材料表面：使用清洗剂、脱脂剂等对基体材料表面进行初步清洗，去除表面的油污和油脂。

2）打磨处理：使用砂轮、砂纸、布轮等打磨工具对辊面进行打磨，去除表面的铁锈、氧化皮和顽

表3 焊丝药芯中焊条的化学成分（质量分数）(%)

元素	C	Cr	Mn	Si	S	P	Fe	Ni	Mo	Ti	V	Nb
焊丝1	0.43	13.18	11.18	0.59	0.007	0.025	余量	—	—	—	—	—
焊丝2	1.82	5.15	1.32	0.93	0.008	0.029	余量	—	1.43	4.18	1.43	—
焊丝3	4.81	32.19	0.98	0.55	0.098	—	余量	0.29	—	0.027	—	—
焊丝4	5.83	20.98	1.99	1.24	0.016	0.028	余量	—	0.33	—	—	7.89

固杂质。

3) 毛刺处理: 使用细砂纸或布轮对辊面进行去毛刺处理, 去除因打磨产生的毛刺和凸起。

4) 清洗处理: 再次对辊面进行清洗, 确保表面无残留杂质, 并使用干净的布或纸巾将辊面擦干, 避免因水分残留而影响后续堆焊。

2.4 堆焊操作

使用手工钨极氩弧焊方式, 利用逆变式焊机、循环冷水机等设备, 分别选取不同药芯焊丝进行堆焊操作。堆焊参数见表4。

表4 堆焊参数

电弧电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 / (mm/s)	层间温度 /℃	坡口角度组合 / (°)
26~27	250~300	2	<200	15+45

堆焊后使焊接材料保持空冷状态。未堆焊时, 先组装基体材料与内塞材料, 组装后固定在转台的卡盘上, 使用变频调速器调整转盘速度, 保证收弧和引弧位置具有良好填充度, 在堆焊区域形成圆环形状的堆焊区域。不同焊丝堆焊效果如图1所示。

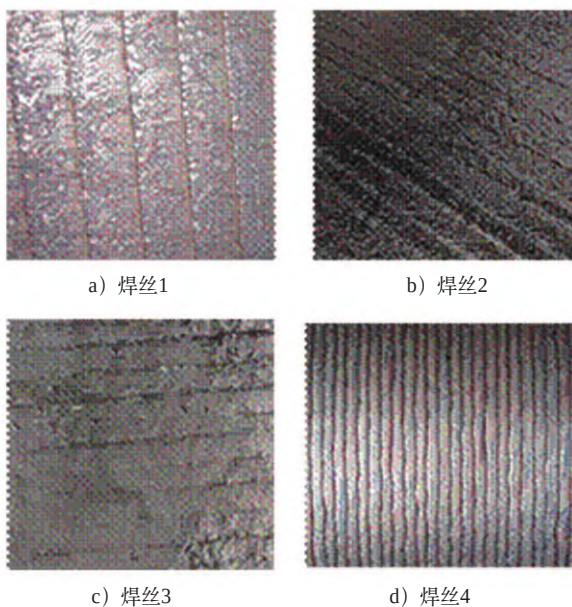


图1 不同焊丝堆焊效果

2.5 试样制备

对不同焊丝完成堆焊后的堆焊区域表面进行打磨平整, 线切割出尺寸为20mm×20mm×15mm的试样若干, 作为后续多个试验试样。

3 试验方法

3.1 堆焊区域结合强度

将试验样品堆焊区域一面放置在试验用支撑座

的通孔内, 保证基体材料不会接触支撑座表面, 再将推离头从基体材料盲孔之中穿过, 向推离头底座一侧施加推力, 堆焊区域接受该推力, 基体材料和堆焊区域结合面在该推力下承受拉应力, 一旦结合强度低于该拉应力, 会导致堆焊区域与基体材料之间丧失结合能力, 出现堆焊接头断裂现象^[12]。将发生断裂时的极限推力, 通过式(1)计算分析获得耐磨堆焊区域的结合强度, 即

$$\phi = F/S \quad (1)$$

式中 ϕ ——结合强度 (MPa)

S ——断裂区域面积 (mm²)

F ——极限推离力 (N)。

3.2 堆焊区域微观形貌

在不同药芯焊丝堆焊后, 使用扫描电子显微镜观察在极限推力产生时, 耐磨堆焊材料结合失效断裂位置的微观形貌, 由此总结出各个试验样品受到极限推力影响后, 断口的微观形貌以及结合强度变化规律^[13]。

3.3 堆焊区域剪切强度

对堆焊区域与基体材料的结合位置进行剪切试验, 通过计算的剪切强度, 比较堆焊区域与基体材料的剪切强度, 并绘制不同焊丝堆焊条件下的剪切试验载荷-位移曲线。将准备好的试样固定在剪切试验机的夹具上, 确保试样被牢固夹持, 且受力方向正确^[14]。起动剪切试验机, 以0.1~0.8mm/s的速度逐渐施加剪切力于试样上, 记录剪切力变化的全过程, 使用式(2)计算单剪切试验剪切强度, 即

$$\tau = P/S_0 \quad (2)$$

式中 τ ——剪切强度 (MPa);

P ——试样被剪切的最大载荷 (N);

S_0 ——试样原始横截面积 (mm²)。

3.4 堆焊区域抗拉强度

使用万能试验机测试各个试验样品经过堆焊后, 堆焊区域与基体材料之间的结合强度。通过抗拉强度试验分析, 测试发生拉伸断裂时堆焊区域与基体材料之间结合位置的极限拉伸力, 获得抗拉强度和伸长率。

3.5 堆焊区域磨损质量

三体磨料磨损堆焊试样的磨损性能评估在室温、常压条件下进行, 使用MMH-5型环块三体磨损试验机来执行具体的试验过程。在试验开始前,

每个磨损试样首先进行30min的预磨处理,以稳定其表面状态。预磨完成后,试样被取出,经过清洗和吹干处理,随后使用精度为0.01mg的XY-1265FA型电子天平进行称量,此时的质量记作试样的初始质量 m_0 。正式的三体磨料磨损试验周期为10h,期间每隔2h进行一次操作循环:卸载试样、进行超声波清洗以去除磨料残留、吹干后重新称量试样的质量,并更换一次已磨损的磨料。5次称量的质量分别记录为 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 。为了确保质量称量结果的准确性,每次更换磨料后,试样在磨损机上的位置保持不变,以减小称量时的误差。

4 试验结果分析

4.1 堆焊区域结合强度分析

测量并且计算使用不同焊丝堆焊,计算焊缝与基体材料的结合强度,试验结果见表5。

从表5可看出,使用不同焊丝,堆焊后形成的堆焊区域结合强度存在很大差异,其中焊丝1结合强度最高,为188.36MPa,但是结合面积却不是最大,仅有152.15mm²,说明结合面积并不是影响耐磨堆焊区域结合强度最为关键的因素,影响堆焊区域结合强度最为关键的因素还是堆焊时所使用的原料^[15]。同时也可以说明使用焊丝1进行堆焊,可以在结合面积较小的情况下形成较大的结合强度,说明这种焊丝能够形成足够强度的焊缝,从而确保堆焊区域的稳定性,应用效果较好。

表5 结合强度分析

焊丝编号	结合面积/mm ²	结合强度/MPa
1	152.15	188.36
2	208.83	183.42
3	162.41	169.74
4	183.61	138.65

4.2 堆焊区域微观形貌分析

采用4种焊丝堆焊后的试验样品微观形貌试验结果如图2所示。

在各试验结果图像中,上部均为堆焊区域,下部均为基体材料。

由图2a可知,使用含有大量Cr、Mn元素的焊丝堆焊形成堆焊区域,这两种元素在室温环境下为奥氏体,完成堆焊后熔池的温度下降,液相焊缝组织结晶转化成单相奥氏体,大量Mn元素扩大了 γ 相区的范围,Cr元素增加了奥氏体向珠光体转变的时

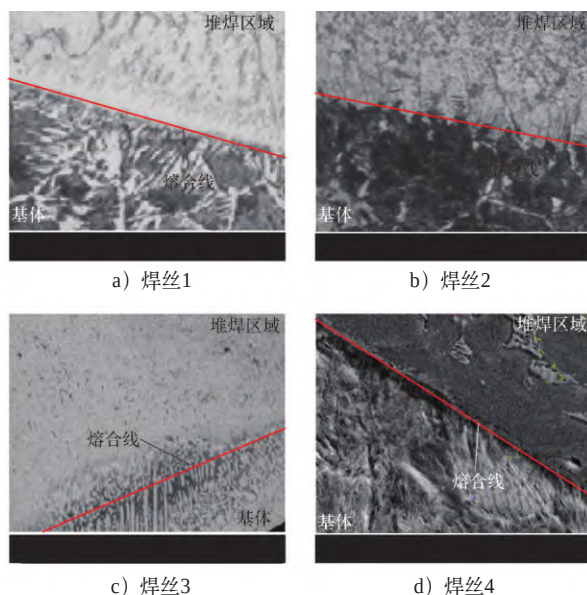


图2 微观组织分析

间,两种元素的参与会提升奥氏体的稳定性,堆焊区域中,奥氏体含量增加会进一步提升堆焊区域的韧性,增加堆焊区域和基体材料之间的结合强度。

由图2b可知,使用碳化钛材料焊丝,析出的碳集中在碳化颗粒物之中,堆焊后熔合区域出现大量细小针状固相,判断这些固相为马氏体,马氏体的脆性较大,极限推力之下,堆焊区域和基体材料之间产生脆性断裂,结合强度较小。

由图2c可知,选择高铬材料作为焊丝,堆焊后微观形貌中,基体材料内的Cr含量最少,晶间组织中Cr含量最高,但是Fe元素的含量保持减少。这种情况是由于堆焊后堆焊区域中的组织主要为奥氏体, γ -铁相之中固溶一部分Cr元素,因此晶间层之中Cr含量会增加。尽管奥氏体具有较高韧性,但是晶间层之中含有大量Cr元素,导致堆焊区域与基体材料之间的结合强度降低。

由图2d可知,晶间层之中Fe含量较少Cr含量较高,颗粒析出物区域含有大量Nb元素,基体材料中的C含量超过金属含量,堆焊时熔池中Nb元素与碳结合产生碳化物结晶,冷却降温时,液相中的Nb元素逐渐降低,熔合区中同时含有奥氏体组织与晶间共晶组织,奥氏体和一部分Cr元素共熔,在基体材料的稀释作用下与Cr元素结合C含量减少,因此整体来看,极限推力下堆焊区域出现脆性断裂,与基体材料的结合强度也发生降低。

由此可以说明,焊丝1中Cr、Mn元素的作用共

同导致了堆焊层中奥氏体含量增加，不仅增强了堆焊层自身的韧性，还增加了堆焊区域和基体材料之间的结合强度。

4.3 堆焊区域剪切强度分析

剪切强度测试结果如图3所示。

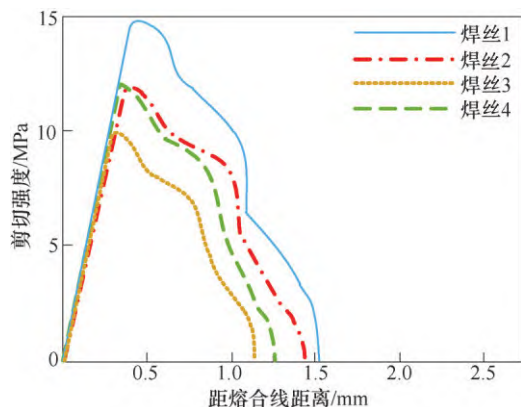


图3 剪切强度测试结果

在靠近熔合线的区域，由于堆焊过程中的热影响，基体材料的微观结构和化学成分可能会发生变化。堆焊热源的作用会导致近熔合线区域的温度迅速升高，随后又迅速冷却。这种热循环可能导致材料的微观结构发生变化，例如晶粒长大或相变，从而可能降低材料的硬度，出现软化现象。随着距熔合线距离的增加，堆焊热循环的影响逐渐减弱，材料的微观结构和性能逐渐恢复到原始状态。但是通过图3可看出，利用焊丝1进行堆焊后，剪切强度可达到最高15MPa，远高于另外3种焊丝。这是由于高铬高锰焊丝中包含的合金元素含量较高，在堆焊过程中冷却速度较快，会导致近熔合线区域形成硬质相或细晶组织，从而使材料硬度增加，更容易在堆焊过程中形成硬质相，进而提高了堆焊区域与基体材料的剪切强度。

4.4 堆焊区域抗拉强度分析

利用不同焊丝进行堆焊后，堆焊区域和基体材料结合区域的抗拉强度与伸长率变化情况见表6。

表6 抗拉强度和伸长率测试结果

焊丝编号	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)
1	436.2	29.3
2	414.6	27.1
3	402.2	18.4
4	396.1	16.5

从表6可看出，使用高铬高锰焊丝堆焊后，

堆焊区域与基体材料结合区域的抗拉强度可达到436.2MPa，伸长率为29.3%，抗拉强度和伸长率高于对比的另3种焊丝，这一高强度特性表明，在承受拉伸载荷时，该堆焊区域不易发生断裂或失效，并在受力过程中具有较好的延展性和塑性变形能力，使堆焊结构在受到外力作用时，通过材料的塑性变形来吸收和分散应力，从而降低堆焊区域因应力集中而发生破坏的风险。

4.5 堆焊区域磨损质量分析

堆焊区域磨损质量测试结果如图4所示。

从图4可看出，利用焊丝1进行堆焊的试样，其堆焊区域5个测点的磨损质量损失在13.1~14.2g之间；利用焊丝2进行堆焊的试样，其堆焊区域5个测点的磨损质量损失在15.4~16.8g之间；利用焊丝3进行堆焊的试样，其堆焊区域5个测点的磨损质量损失在15.1~16.3g之间；利用焊丝4进行堆焊的试样，其堆焊区域5个测点的磨损质量损失在15.1~17.4g之间。焊丝1堆焊后的区域磨损质量损失最少，不超过15g，意味着堆焊材料具有较高的硬度和耐磨性。这是因为焊丝1中的Cr、Mn都是提高硬度和耐磨性的常见合金元素，这样的硬度能够抵抗辊压机辊面在工作中所承受的高冲击和高强度的磨损，高铬高锰焊丝的高硬度特性使其能够适应这种高磨损环境，从而确保辊面的长期稳定运行。

5 结束语

为了提高辊压机辊面的耐磨性，常在辊面堆焊数层耐磨金属。然而，堆焊金属与基体材料之间存在性能差异，对堆焊区域的应用性能带来较大影响。本文对辊压机辊面堆焊区域的力学性能展开研究，并使用高铬高锰、碳化钛、高铬铸铁、含Nb的4种焊丝对基体材料磨损区域进行堆焊。

1) 使用高铬高锰作为原料的焊丝1，在结合面积仅为152.15mm²的情况下，形成高达188.36MPa的结合强度，说明这种焊丝能够形成足够强度的焊缝，从而确保堆焊区域的稳定性。

2) 在堆焊过程中，焊丝1中的Cr、Mn元素会使液相焊缝组织结晶转化成单相奥氏体，提升奥氏体的稳定性和堆焊区域的韧性，增加堆焊区域与基体材料之间的结合强度。

3) 焊丝1中的合金元素，会在堆焊过程中导致

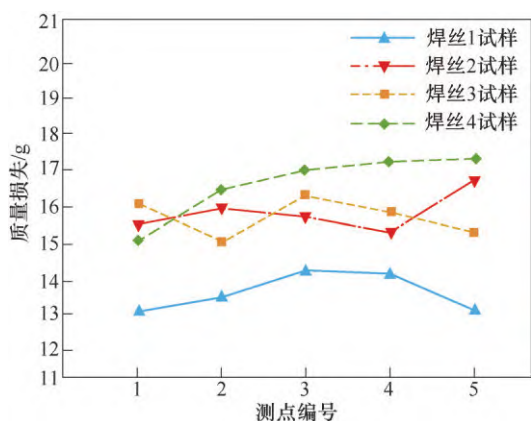


图4 堆焊区域磨损质量测试结果

近熔合线区域形成硬质相或细晶组织，从而使材料硬度增加，更容易在堆焊过程中形成硬质相，剪切强度可达到最高15MPa，进而提高了堆焊区域与基体材料的剪切强度。

4) 利用焊丝1进行堆焊的区域，抗拉强度可达到436.2MPa，伸长率为29.3%，堆焊区域不易发生断裂或失效，并通过材料的塑性变形来吸收和分散应力，从而降低堆焊区域因应力集中而发生破坏的风险。

5) 焊丝1堆焊后的区域磨损质量损失≤15g，具有较高的硬度和耐磨性，说明此焊丝硬度能够抵抗辊压机辊面在工作中所承受的高冲击和高强度的磨损，有利于确保辊面的长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 顾金土, 鲍福军, 胡沿东, 等. 大型钢渣辊压机联合粉磨装备及工艺开发研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (10) : 73-77.
- [2] KANNAN A R, SHANMUGAM N S, PALGUNA Y, et al. Effect of double-side welding on the microstructural characteristics and mechanical performance of dissimilar AA6061-AA5052 aluminium alloys[J]. Materials Letters, 2023, 331 (15) : 1-4.
- [3] FU W, LI C, JI F, et al. Precipitation mechanism of nanoscale Cu-rich particles in restrained welding conditions and its effect on the mechanical properties of HAZs[J]. Materials Letters, 2023, 335 (15) : 133753.1-133753.4.
- [4] 朱泽松. 辊压机在线堆焊修复技术[J]. 金属加工 (热加工), 2013 (20) : 32-33.

- [5] YAN D, SHAN Z, ZANG Y, et al. Study on interlayer bonding properties of multi-material composite cast mold[J]. Materials Letters, 2023 (15) : 133750.1-133750.4.
- [6] PENG Z, ZHANG J, ZHANG M. Laser in-situ preparation and mechanical properties of VC reinforced Fe-based wear-resistant composite cladding[J]. Ceramics International, 2022, 48 (19) : 28240-28249.
- [7] RATURI M, BHATTACHARYA A. Appraising tool wear during secondary heating assisted dissimilar friction stir welding between 6061 and 7075 aluminum alloys[J]. Materials Transactions, 2023, 64 (2) : 485-491.
- [8] 艾孝文, 龚建勋, 刘书同, 等. Cr8Nb3CSiMnTi系堆焊合金的组织及耐磨性研究[J]. 材料保护, 2023, 56 (3) : 6-12, 48.
- [9] 孙洪斌, 王龙权, 马振, 等. Fe-Cr-B-C系耐磨堆焊合金组织与性能[J]. 焊接, 2023 (1) : 43-49.
- [10] 黄海堂, 陈登华, 何曲波, 等. 铁基堆焊合金表面涂层耐磨性的研究进展[J]. 功能材料, 2023, 54 (11) : 11106-11117.
- [11] MOU Y, LIAN Z, LI W, et al. The effect of friction welding on the mechanical properties and corrosion fatigue resistance of titanium alloy drill pipe[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2022, 45 (2) : 466-481.
- [12] 贾华, 高明, 刘政军. Ti和Nb对铁基堆焊合金组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44 (3) : 87-91, 133-134.
- [13] 魏来, 李丹, 董振. 原位自生 (Ti, V) C堆焊区域的耐磨性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45 (1) : 43-47.
- [14] 贺巍亮, 霍曼. 随焊激冷控制铝锂合金焊接接头残余应力规律研究[J]. 金属功能材料, 2023, 30 (2) : 54-60.
- [15] 杨忠华, 付泽宇, 付海霞. 窄间隙埋弧焊对锅炉低合金调质钢过渡焊接接头缺陷的影响[J]. 金属功能材料, 2022, 29 (2) : 71-76.

(收稿日期: 20241223)