

激光熔覆过程声发射检测

刘哲军^[1] 葛丽^[1] 原津平^[2]

^[1]航天材料及工艺研究所 ^[2]装甲兵工程学院

摘要: 激光熔覆是当前材料表面改性工艺研究的热点。熔覆层开裂是目前试验研究遇到的最大困难之一。本文首次借助声发射检测技术在激光熔覆实时过程中进行监测,摸索出了两种材料熔覆层形成过程的声发射特性。

关键词: 声发射 激光熔覆 裂纹

1. 引言

激光熔覆是改善材料表面性能的一种新工艺、新方法,其过程是利用高能激光束将合金金属粉末与基体材料进行快速熔化并快速冷却。因为这一过程时间很短,远离平衡态,过热度 and 过冷度远大于常规热处理,可以使材料在激光辐照区中形成晶粒高度细化的组织结构和较小的变形。由于熔覆成形的金属制件可得到用常规加工方法很难获得的极高的表面硬度和耐磨性,因此在工业上有广泛的应用前景。然而,由于材料的熔化、凝固和冷却都是在极快的条件下进行的,因熔覆材料与基体材料的热物性差异以及成形工艺等因素的影响,容易在成形件中形成裂纹、气孔、夹杂、层间结合不良等缺陷,目前熔覆层的裂纹和气孔问题仍然是激光熔覆技术工业化应用的一大障碍。

对于激光熔覆过程中裂纹产生原因的研究是该技术研究的一个热点和难点。资料调研显示:熔覆层裂纹是激光和材料相互作用过程中产生的热应力和组合应力共同作用的结果^[2]。本文利用声发射动态无损检测技术,在激光熔覆全过程中对熔覆焊道进行实时监测,通过分析声发射定位与熔覆过程的声发射特性来确定声发射起始点,进而推断裂纹的起始时刻与应力,为探索熔覆工艺并改进熔覆质量提供有效的监测手段。

由于熔覆后的熔覆层在外观、形状上与焊缝很相似,因而从形象、简便角度我们在下文中将熔覆层称为“焊道”。

2. 声发射检测原理

材料或结构件在应力作用下释放出弹性应力波的现象称为声发射。利用声发射传感器接受材料或结构件释放出的弹性应力波,通过信号转换、采集与数据分析来反推声发射源的类型、位置、性质和严重性的技术称为声发射检测技术^[1]。其原理见图1。

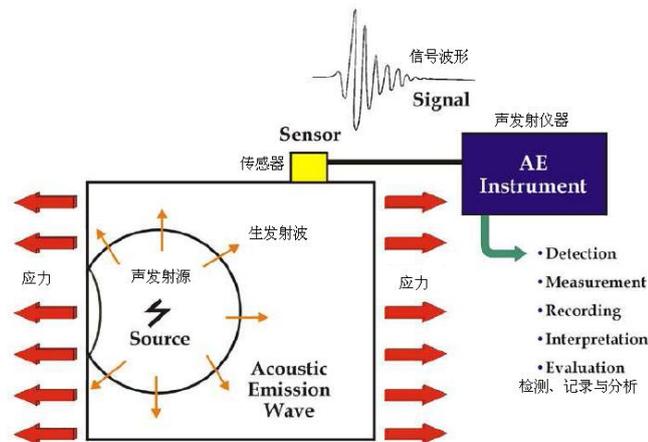


图1 声发射检测原理示意图

声发射检测技术可以发现材料或结构件中活动的缺陷，并可以对被检件进行整体连续监测，利用声发射波到达声发射传感器阵列中不同传感器的时间差还可以实现声发射源的时差定位。目前该技术广泛应用于民用各行业的压力容器、压力管道及包括像桥梁、起重机之类的大型结构的整体监测中。在军工行业中广泛应用与金属构件和复合材料构件的质量验收检测中。

激光熔覆过程声发射检测采用激光为激励源，利用焊道温度变化而在微观上产生应力的变化，当焊道局部应力大到足够程度时，就会促使焊道中的活动声发射源（裂纹）发生扩展并释放应力，在应力释放的过程中，一部分能量转化为声发射机械振动并以声发射源为原点向四面八方传播。因此在熔覆和冷却过程中利用声发射检测系统接收并存储分析这些声发射信号，有可能实现声发射源的定位、裂纹扩展起始时刻和应力的确定等信息。这些信息将极大有助于熔覆裂纹发生和防止的研究工作。

3. 试验系统与设置

熔覆是在一块 600×500×10mm 的 45# 钢基板上进行。试验用激光设备的最大功率为 6000W，熔覆速度为 0.2m/min，焊道长度约 200mm。

声发射检测系统采用美国 PAC 公司便携式 DiSP 型 8 通道声发射检测系统（见图 2），传感器选择 R15 型，在钢板上布置一个四通道矩形平面定位阵列（见图 3）。传感器间距：1~2 为 260mm，2-3 为 330mm，初设声速 3000m/s。

在激光熔覆过程中进行声发射检测首先需要克服的是压缩空气送粉装置产生的连续背景噪声，试验观察发现在熔覆实时过程中，仪器平均信号电平值高达 50~65dB，为了进行正常采集，试验采用浮动门槛和 35dB 固定门槛相结合。在熔覆实时过程中设置为浮动门槛，因而在熔覆实时过程中采集的声发射信号一般不小 60dB。熔覆一结束，在不中断试验的前提下立刻将门槛降低到 35dB，为了不影响定位效果，同时将门槛类型改为固定。

激光熔覆试验种类和数量见表 1。在激光熔覆过程中为了减少相邻焊道区域的影响，采用焊道序号单双对称分布的方式进行熔覆（见图 4），焊道间距约 15mm。图 5 为激光熔覆过程中，图 6 为熔覆后的焊道形貌。

表 1 激光熔覆试验种类及焊道数量

序号	材料	熔覆方向	数量	备注
1	无粉	单向	1	第一块试板
2	Ni 基 3: 1 粉	单向	4	
		双向搭接	2	
3	M2 粉	单向	5	第二块试板上有 3 道
		双向搭接	2	第二块试板

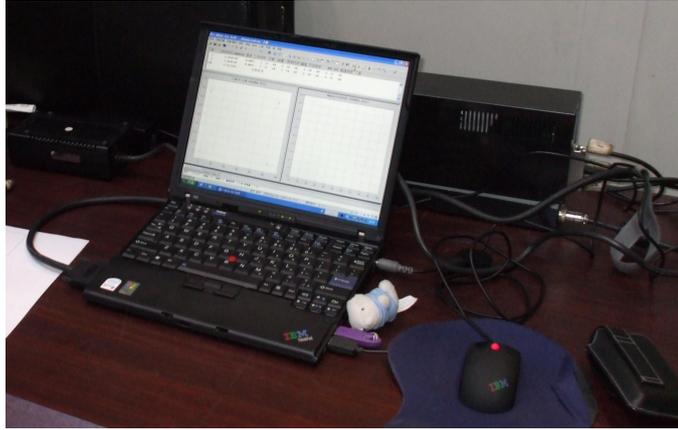


图2 声发射检测系统

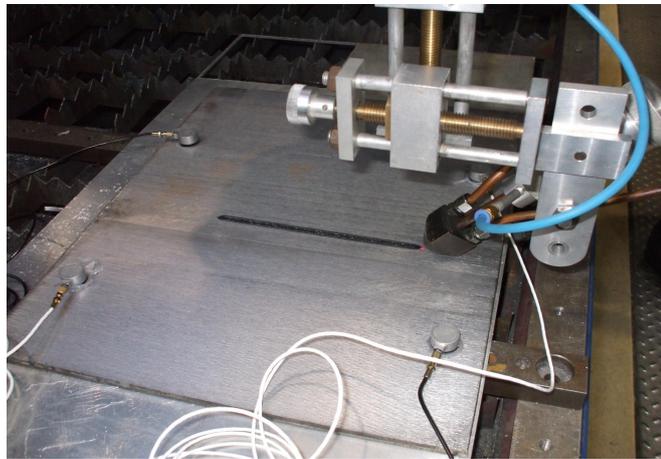


图3 传感器阵列

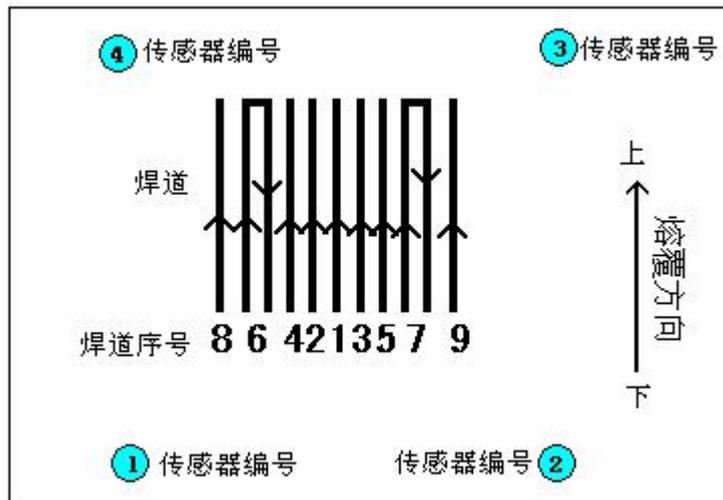


图4 焊道序号及排列

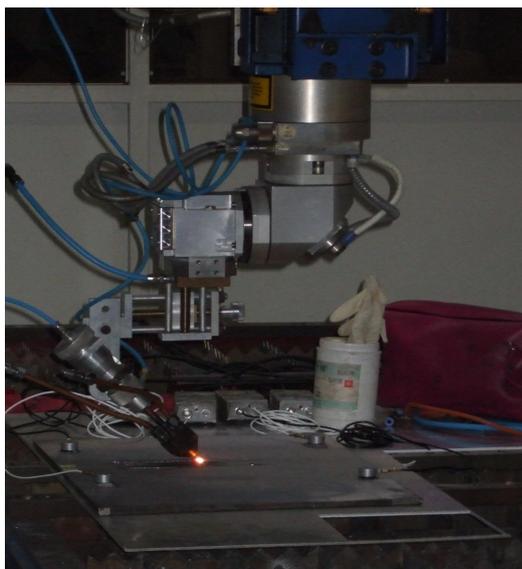


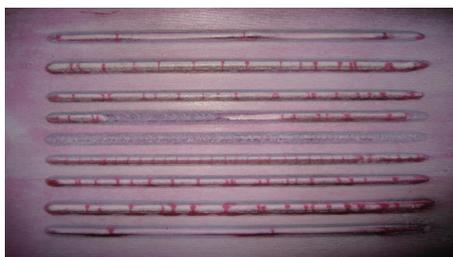
图5 熔覆过程中



图6 熔覆后焊道形貌

4. 结果与讨论

图7为熔覆焊道经过渗透探伤后的照片。从照片中可以明显看出除无粉焊道（图7a的中间焊道）外，其余焊道均分布有数量不等的宏观裂纹和微观裂纹。由于试验过程中送粉装置偶尔出现送粉断续故障，造成焊道中熔覆层厚度大小不一，甚至有的地方几乎没有熔覆堆积层，而有的地方堆积又过厚。观察图7可以发现裂纹全部集中在有熔覆堆积层的区域，而没有熔覆层的区域几乎没有裂纹。



a 第一个试板



b 第二个试板

图7 熔覆焊道图片

图 8 为激光熔覆过程声发射定位三例，从图中可见，声发射定位结果呈现一维线状，声发射定位信号成纵向条状分布，这与焊道走向、形状一致。图 8a 为无粉焊道，从图中可见几乎没有声发射定位。图 8b 为均匀送粉状态，从图中可见声发射定位在整个焊道上分布较为平均。图 8c 为不均匀送粉状态，在焊道两端送粉集中，而中间部位很少。从图中可见，声发射定位也集中在焊道两端，中间很少。这些定位特点与实际焊道裂纹数量分布及熔覆堆积层厚度分布情况完全吻合，说明激光熔覆过程的声发射主要来自熔覆层的裂纹活动，声发射定位集中区域与熔覆层上裂纹的密集区相对应。另外由于影响声发射定位精度的因素很多，一些定位在焊道外侧的信号与噪声并没有必然联系。

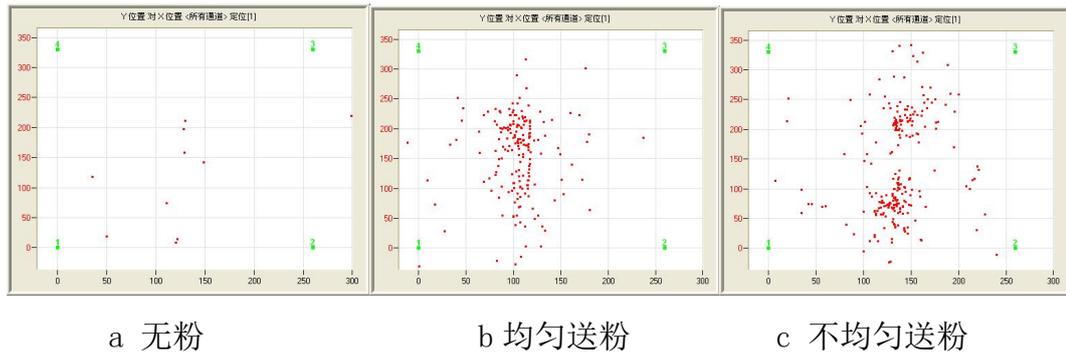


图 8 激光熔覆声发射定位

试验中除无粉熔覆外每种情况都进行了不少于两次试验，相互比较发现：在有粉熔覆实时过程中，连续出现 99dB 左右的信号，而无粉熔覆过程没有。这类信号的典型数据列表见表 2。从声发射参数几乎完全一致这个特点上分析认为：这些信号的产生机制相同。结合其定位顺序和特点进行分析可以发现：这些信号的位置与熔融区动态位置相关。信号从定位阵列下端（Y 轴方向）向上依次出现，并且随着激光熔覆实时过程结束而消失。分析认为：这类信号可能与有粉熔覆实时过程的熔池特点有关。

表 2 典型数据列表

数据序号	到达时间	通道	上升时间	计数	能量	持续时间	幅值	平均频率
1	11. 8720227	2	113	8134	65535	71435	98	114
2	11. 8720275	1	23	8792	65535	79306	98	111
3	11. 8720520	3	93	8813	65535	74844	99	118

4.1 无粉熔覆

图 9 为无粉熔覆的声发射定位和幅度历程图。从图中可以看出无粉熔覆实时过程中信号较多，在冷却过程中信号很少，声发射呈现快速收敛趋势。观察熔覆实时过程中声发射信号出现的时间和位置，可以发现声发射信号出现的顺序基本沿着焊道成型的方向依次出现，信号在整个焊道上分布较为均匀。观察焊道表面和渗透探伤结果，没有发现宏观裂纹，估计无粉熔覆声发射与基体金属在融化和冷却过程中的正常应力释放有关。

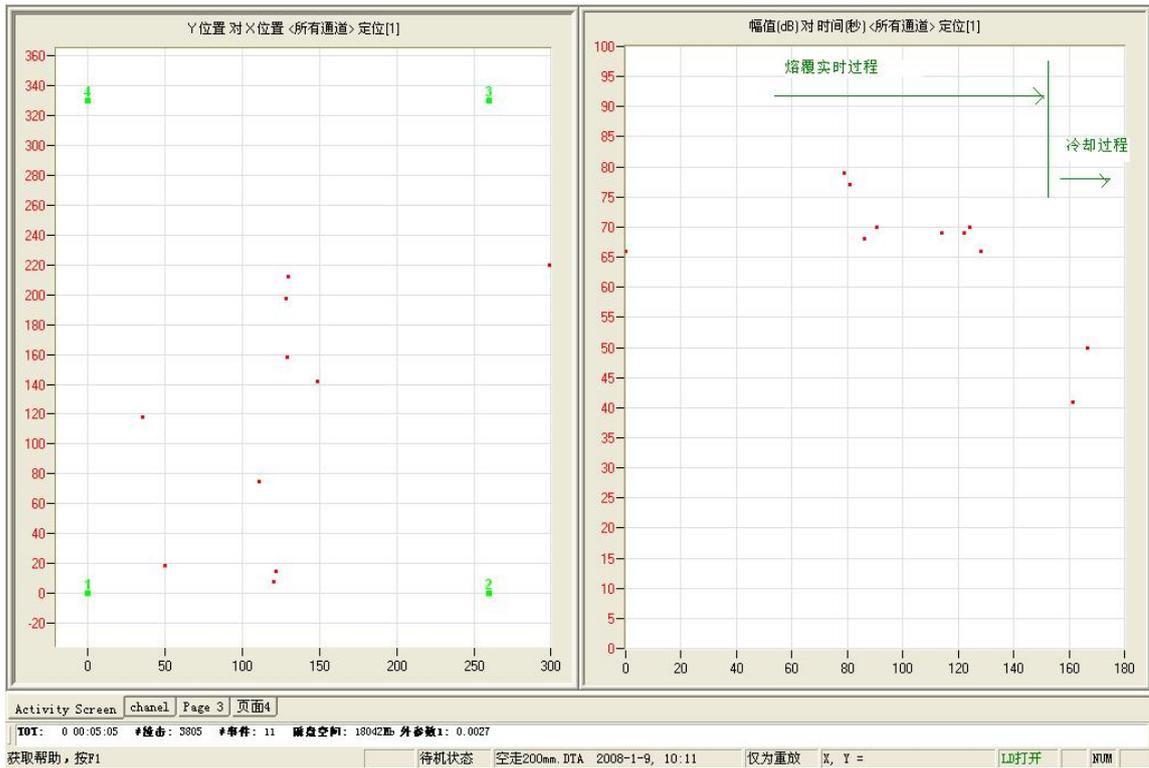


图9 无粉熔覆声发射定位和幅度历程图

4.2 Ni 基粉 3: 1 单向

图 10 和图 11 分别为 Ni 基粉 3: 1 单向熔覆的典型声发射定位、幅度历程、持续时间历程、平均信号电平历程结果。从定位结果可以看出信号较为均匀的分布在焊道区域，成条状分布。从平均信号电平历程结果可以看出，在实时熔覆过程中信号平均电平值基本维持在 55dB 以上，最高达到 65dB 左右。从大约 72" 开始，平均信号电平值开始下降，标志着熔覆实时过程完全结束，开始进入熔覆后的冷却过程。对比声发射幅度和持续时间历程结果，可以看出在 72" 以前，声发射信号较少，幅度主要分布在 66-100dB 之间，在冷却过程中，声发射信号数量大大上升，信号幅度多数在 35-50dB 之间，少量在 50-90dB 之间，且随时间信号逐渐变少，幅度也越来越小。在总采集时间 550s 快结束时仍然有信号断续出现。观察信号持续时间参数可以看出：信号持续时间多数在 10000 μ s 以下，在冷却过程中有少量持续时间大于 10000 μ s，最大 130000 μ s 的信号出现。分析这些高幅度和高持续时间信号，可以基本确定其基本来自于裂纹集中区。例如：持续时间为 44344 μ s，幅度为 86dB 的信号的定位位置为 (172, 195.8)，估计与纵坐标为 147 的裂纹信号相关。

进一步数据分析发现，信号是随着熔覆方向依次出现的。由于熔覆过程中噪声很高，采集门槛也很高，因而焊道下段（Y 轴方向）在熔覆后的冷却中产生的大量低幅度声发射信号由于很高的检测门槛而不能被采集。在熔覆完全结束后的冷却前期出现的低幅度声发射信号主要来自焊道的上半段（Y 轴方向）。通过分析熔覆结束时刻以后的信号，结合定位位置可以推断出：声发射信号起始时间大约在熔覆后 10~20s 之间。

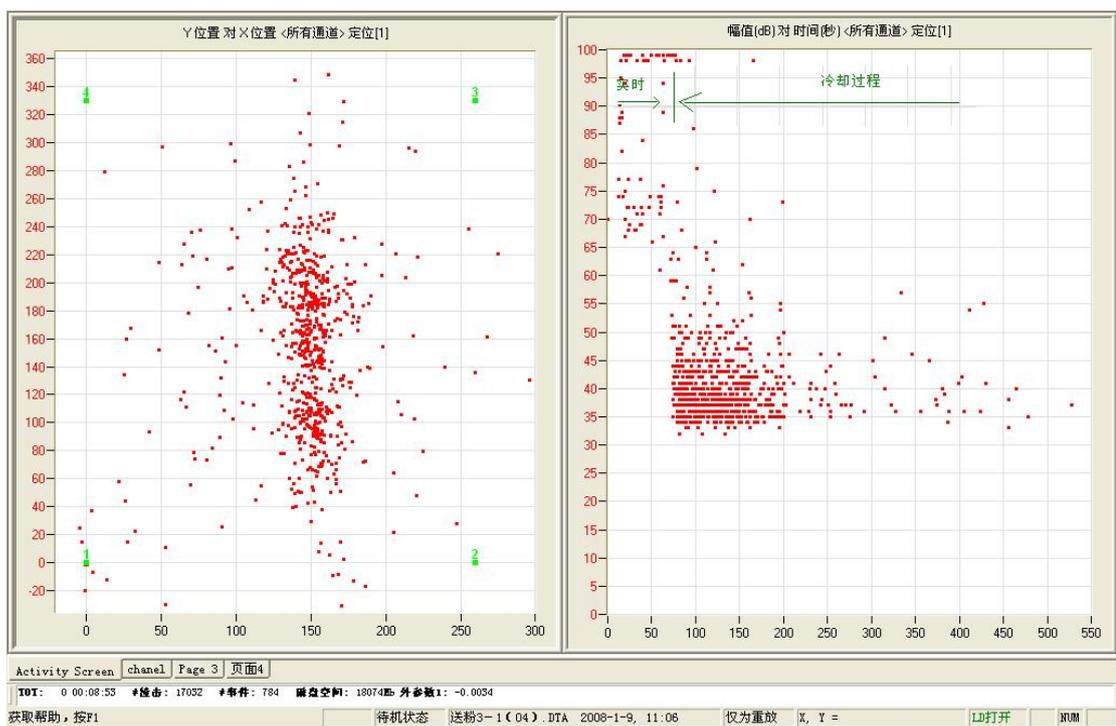


图 10 Ni 基粉 3: 1 声发射定位和幅度历程结果

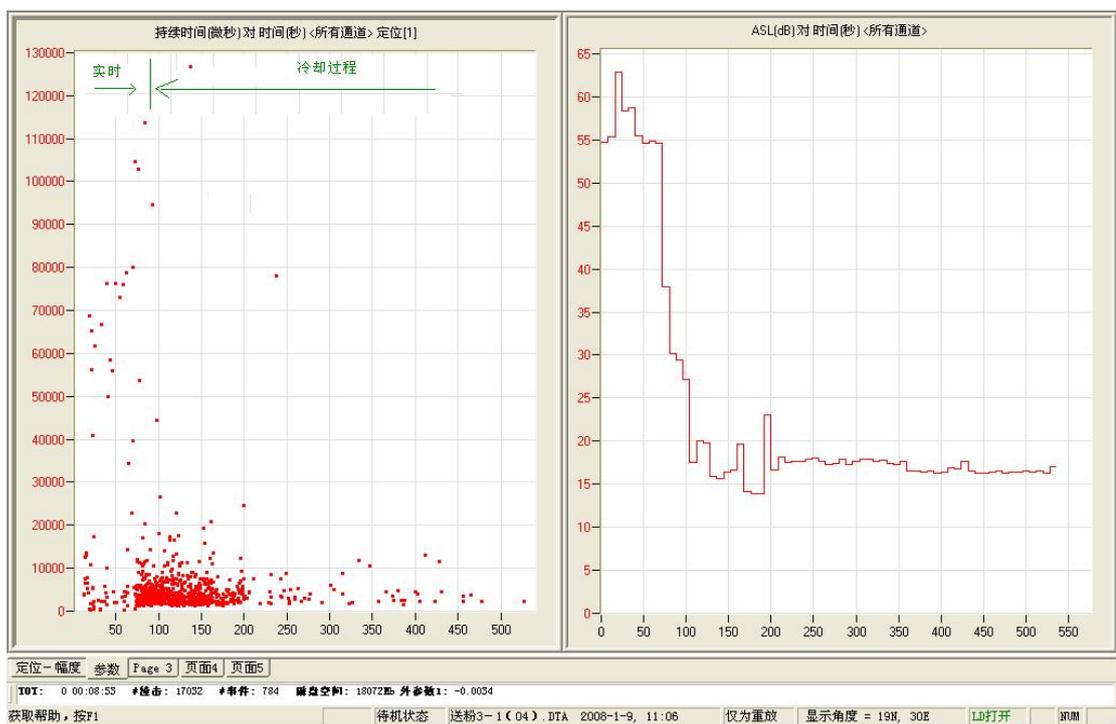


图 11 Ni 基粉 3: 1 声发射持续时间、平均信号电平历程结果

4.3 M2 粉单向

图 12 和 13 分别为 M2 粉单向的典型声发射定位和幅度历程、持续时间历程、平均信号电平历程结果。

从定位结果可以看出信号较为集中在焊道的上部区域，这与实际送粉情况和裂纹

情况相符。从平均信号电平历程结果可以看出，在实时熔覆过程中信号平均电平值基本维持在 55dB 左右。从大约 72" 开始，平均信号电平值迅速下降，标志着熔覆实时过程完全结束，开始进入冷却过程中。从声发射幅度历程结果可以看出，在 72" 以前，声发射信号很少，幅度不小于 65dB。在 72" 后的冷却过程中，声发射信号数量大大上升，信号幅度分布在 35-65dB 之间，且随试验时间的延长信号数量逐渐变少，幅度呈下降的趋势。在总采集时间 700s 快结束时仍然有信号连续出现。观察信号持续时间参数可以看出：信号持续时间多数在 15000 μ s 以下，在冷却过程中有少量持续时间大于 15000 μ s 的信号出现。分析发现这些长持续时间的信号基本来自于裂纹集中区，可能与宏观裂纹的扩展相关。例如持续时间为 21236 μ s，幅度为 58dB 的信号定位位置为 (118, 186.4)，估计是纵坐标为 140.5 的裂纹信号。通过对熔覆完全结束后的信号分析可以推断出：在熔覆后约 16s，裂纹开始开裂。

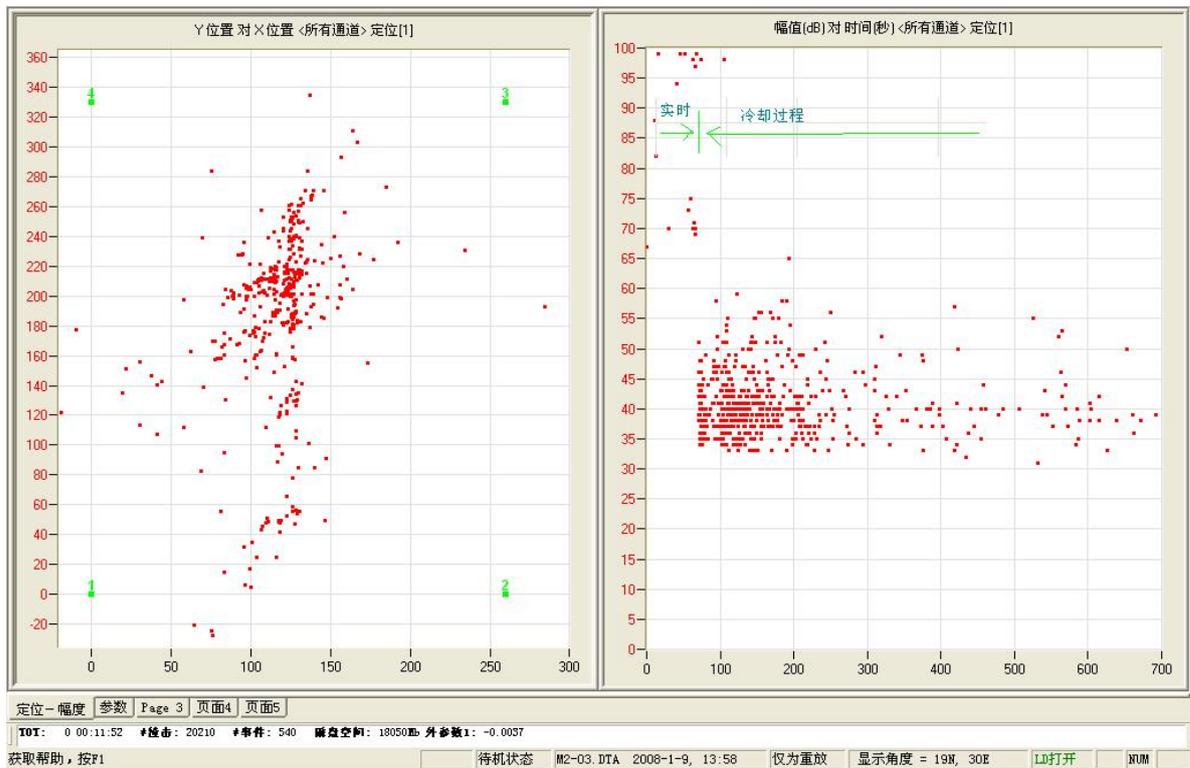


图 12 M2 粉声发射定位和幅度历程图

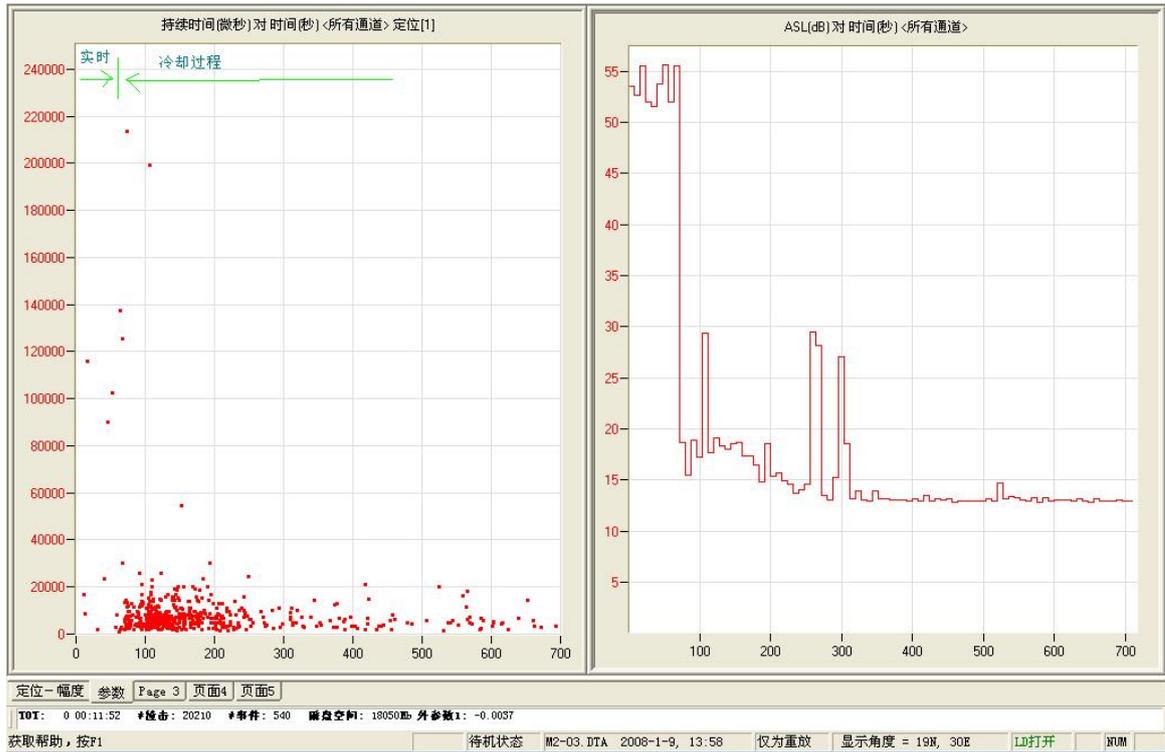


图 13 M2 粉声发射持续时间历程图

4.4 Ni 基粉 3: 1 搭接

图 14 和 15 为 Ni 基粉 3: 1 搭接的典型声发射定位和幅度历程、持续时间历程、平均信号电平历程结果。

由定位图我们可以看出声发射信号均匀分布在整个监视区域的焊道上，与单向熔覆定位情况进行比较可以发现搭接熔覆的定位较单向熔覆分散。分析认为定位分散的原因可能与搭接后焊道宽度增加和已凝固焊道重新融化再次凝固后声发射机制及声发射信号特点有关。从幅度历程图来看，在总采集时间 800s 内信号连续不断。通过分析平均信号电平历程结果曲线发现总的熔覆时间约 138"，138" 以后为冷却过程（图中黑竖线右侧）。搭接焊道的形成分为两步，第一步从定位阵列的 1、2 通道一端开始向另一端沿直线进行熔覆，行程到 200mm 后向右 5mm 左右再向下进行熔覆到达起点的右侧 5mm 处，这样两条焊道就搭接在一起了。在熔覆时间上两条焊道的形成时间基本相等，即第一条焊道在 0" ~69" 左右完成，第二条焊道在 69" ~138" 内完成。

观察熔覆实时过程的声发射信号幅度历程结果可以发现，0" ~69" 的信号数量远小于 69" ~138"。在反向熔覆时，信号增多的原因可能与第一条焊道已经凝固被再次融化后重新凝固过程中的某些机制有关，比如正向熔覆凝固后表面有很多氧化物和熔渣等，再次熔覆形成焊道时，焊道中存在夹杂和第二相的可能性大大增加，这样焊道中增大了裂纹萌生和扩展的可能性。在熔覆全部结束后的冷却过程中信号数量及幅度的变化趋势与单向熔覆类似，呈收敛趋势。信号幅度在熔覆实时过程中分布在 60~100dB 之间，冷却过程中信号幅度主要分布在 35~65dB 之间。

在实时熔覆过程中，正向熔覆过程产生的信号在定位图中主要分布在焊道区域的下半段（Y 轴方向），而反向熔覆过程产生的信号主要定位在焊道的上半段（Y 轴方向），这说明较高幅度的声发射信号是在熔覆结束后冷却一定时间后才产生的。

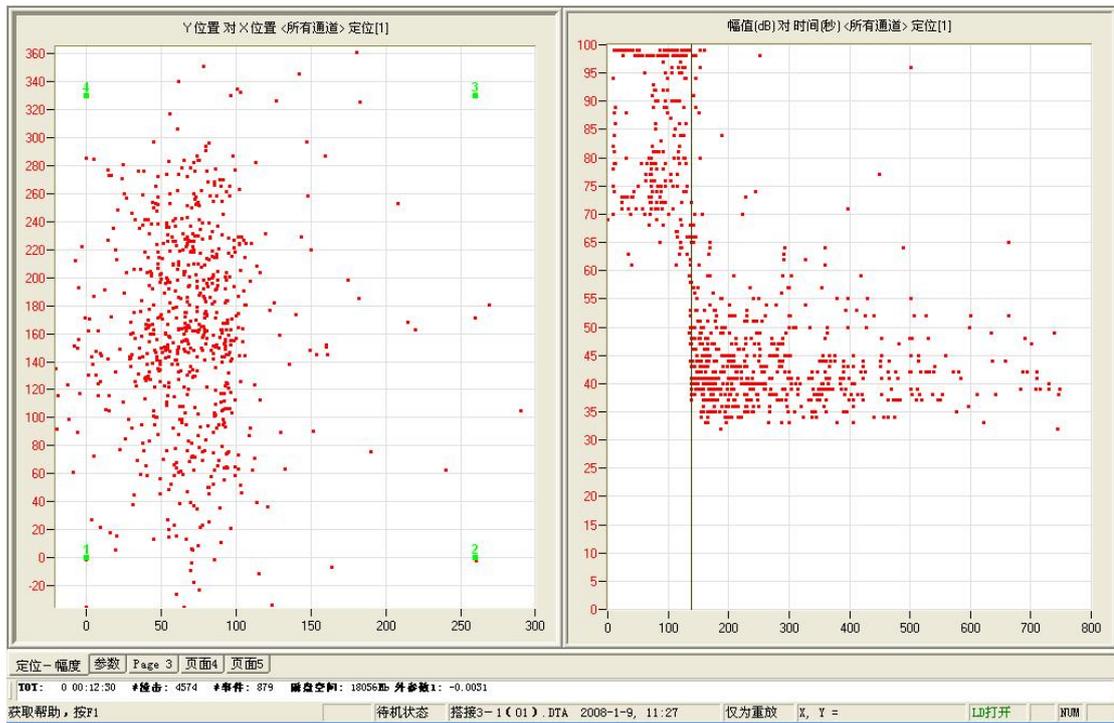


图 14 Ni 基粉 3：1 搭接声发射定位和幅度历程图

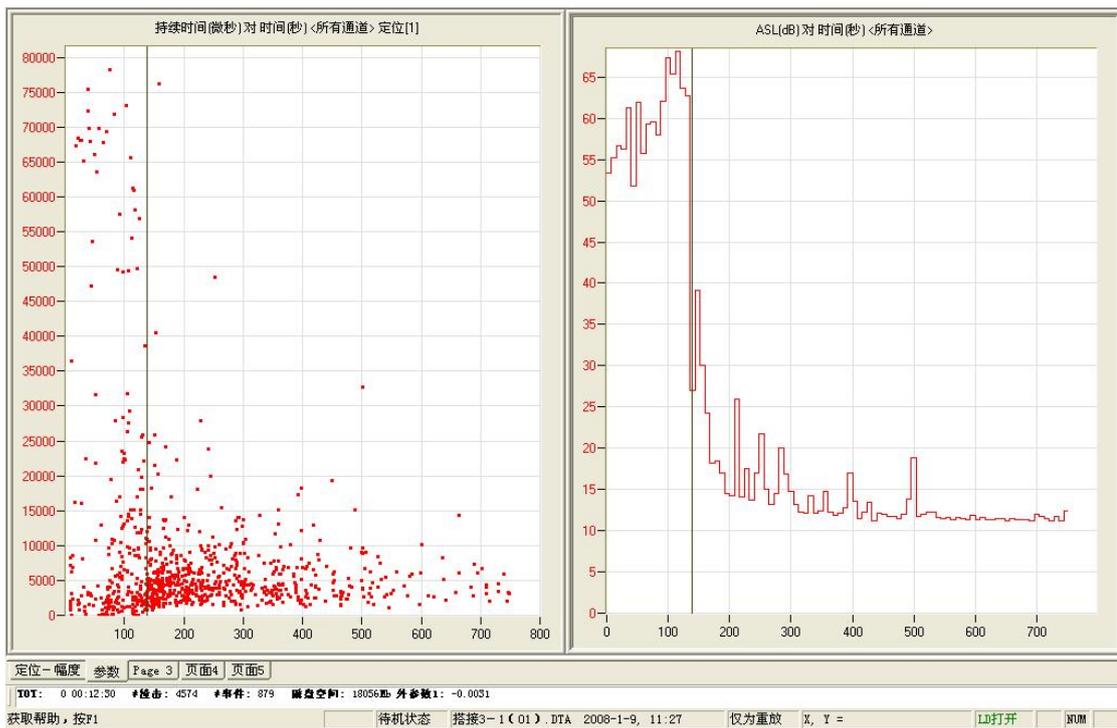


图 15 Ni 基粉 3：1 搭接声发射持续时间、平均信号历程图

4.5 M2 粉搭接

图 16 和 17 为 M2 粉搭接的典型声发射定位和幅度历程、持续时间历程、平均信号电平历程结果。

由定位图可以看出声发射信号均匀分布在整个焊道上，这与焊道形貌和宏观裂纹

情况相符。从声发射平均信号电平曲线看出，熔覆实时过程的时间段为0"~138"左右。第一条焊道和第二条焊道的形成时间相等，分别在0"~69"和69"~138"内完成。熔覆实时过程的信号数量和幅度与Ni基3:1粉搭接熔覆的情况类似，在69"~138"的反向焊道形成过程中的信号数量远大于0"~69"的正向焊道形成过程。分析其原因也与Ni基3:1粉相同。

熔覆过程中信号幅度分布在60~100dB,在冷却过程中信号幅度主要分布35~65dB之间。在冷却过程中信号幅度和数量随时间的推移呈现收敛趋势。

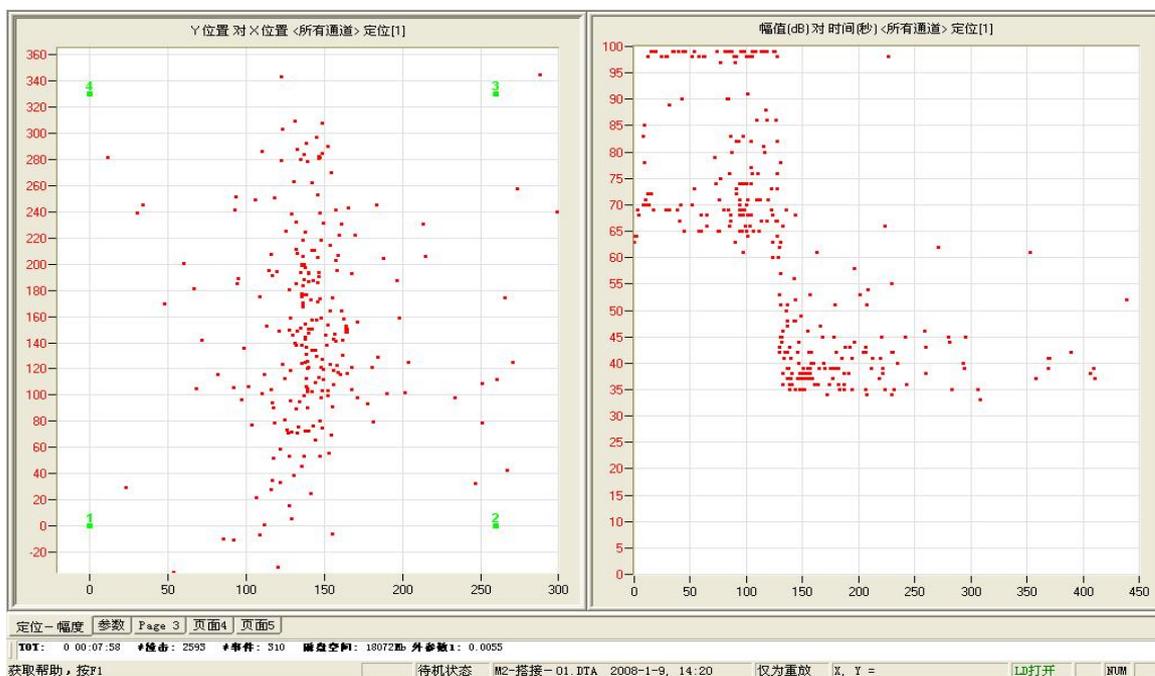


图 16 M2 粉搭接声发射定位和幅度历程图

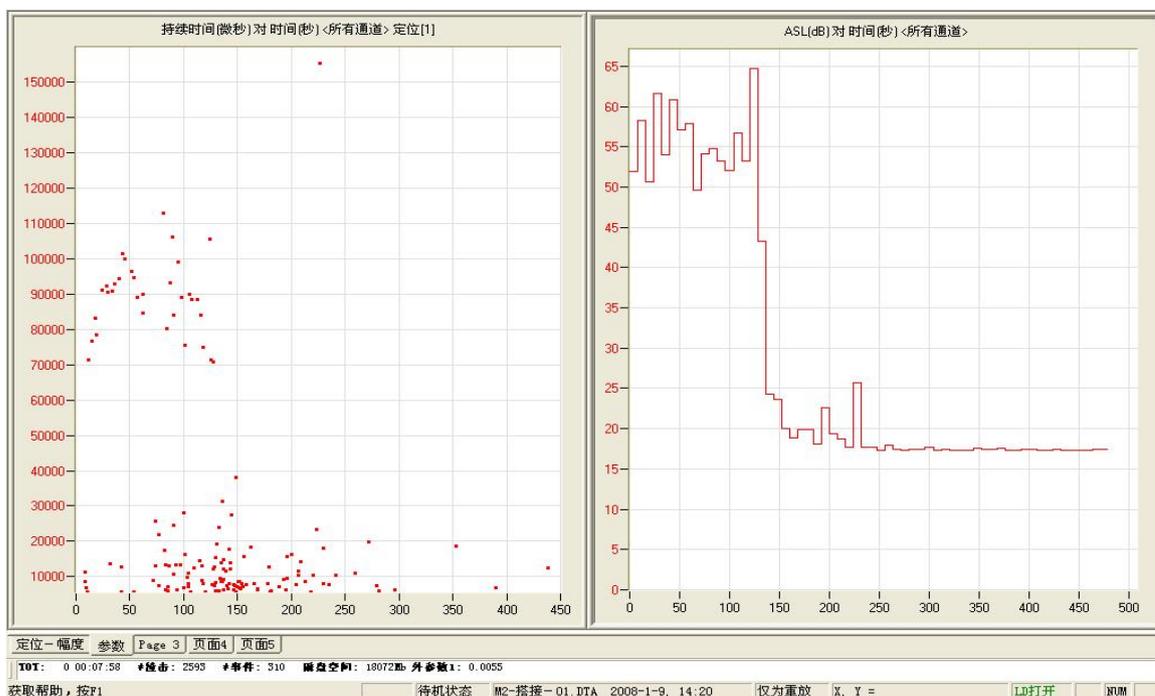


图 17 M2 粉搭接声发射持续时间、平均信号历程图

5 小结

本文通过对两种材料的激光熔覆过程进行声发射监测，粗略得到了两种材料激光熔覆过程的声发射特性，当然文中得到的有关结论还需要进一步试验的验证，但试验结果明确表明：声发射检测技术用于激光熔覆过程的实时监测是可行的，若结合焊道形成过程中的温度变化进行声发射数据的分析可能会得到更多有用的信息。

6 参考资料

1. 杨明伟 刘哲军 马云中 《声发射检测》机械工业出版社，2005. 1。
2. 徐大鹏 周建忠等《激光熔覆裂纹产生机理及控制方法分析》工具技术2007 年第41 卷 №4。