

铝合金 MIG 电弧增材制造热平衡及工艺稳定性分析

包蓄磊¹, 韩永全¹, 韩福彪², 杜茂华¹

(1.内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;
2.中国水利水电科学研究院 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要 用 MIG 电弧增材制造技术成形 Al-Mg 合金, 同时拍摄高速摄像、采集电流电压信号, 对比不同电流条件下熔滴过渡行为的演变规律, 并阐释其对熔覆成形过程的影响机制。获取了多层熔覆在不同电流参数下的热循环数据, 基于等效散热功率构建传热模型, 计算得出相应的等效散热功率, 进而揭示熔池失稳的关键影响因素。结果表明: 当成形电流大于 140 A 时, 熔滴过渡频率加快、电弧加热区域扩大, 不利于获得成形系数较小的熔覆层, 且熔池所受侧向作用力显著增强。通过等效散热功率的计算与实测分析发现, 在熔覆初始阶段, 由于散热条件良好, 各层等效散热功率变化平缓; 随着熔覆层数增加, 等效散热功率降幅加剧, 热量积累显著, 导致液态熔池极易失稳。在 140 A 较低电流下, 保持等效散热功率恒定, 可获得最优的成形质量。

关键词 MIG 电弧增材制造; 熔滴过渡特性; 等效散热功率; 熔池热力稳定性; 成型工艺

中图分类号 TG455

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2026)02-0048-07

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20260121.001

Thermal balance and process stability analysis of aluminum alloy MIG arc additive manufacturing

BAO Xulei¹, HAN Yongquan¹, HAN Fubiao², DU Maohua¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2.Institute of Water Conservancy in Pastoral Area, China Research Institute of Water Resources and Hydropower, Hohhot 010020, China)

Abstract Al-Mg alloy was formed using MIG arc additive manufacturing. High-speed imaging was simultaneously captured, and current/voltage signals were collected to compare the evolution of droplet transfer behavior under different current conditions and to explain its influence mechanism on the cladding formation process. Thermal cycle data from multi-layer cladding under various current parameters were obtained. Based on the equivalent heat dissipation power, a heat transfer model was constructed to calculate the corresponding equivalent heat dissipation power, thereby revealing the key influencing factors of molten pool instability. The results indicate that when the forming current exceeds 140 A, the droplet transfer frequency increases, and the arc heating area expands, which is unfavorable for achieving a cladding layer with a smaller forming coefficient. Additionally, the lateral force on the molten pool significantly increases. Through the calculation and experimental analysis of the equivalent heat dissipation power, it was found that in the initial stages of cladding, due to favorable heat dissipation conditions, the equivalent heat dissipation power for each layer changes gradually. As the number of cladding layers increases, the decrease in equivalent heat dissipation power becomes more pronounced, leading to significant heat accumulation and making the liquid molten pool highly prone to instability. At a lower current of 140 A, maintaining a constant equivalent heat dissipation power results in optimal forming quality.

Keywords MIG arc additive manufacturing; transitional characteristics of droplet; equivalent heat dissipation power; thermal stability of molten pool; forming technique

近些年来随着社会的发展, 传统的减材制造已不能满足制造业的需求, 而增材制造 (additive manufacturing) 的发展正在崛起, 被学者认为是一种很有前途的制造技术^[1-3]。与传统的减材制造相比, 增材制造可

以极大地降低制造成本, 因此逐渐成为制造复杂零部件的主导技术。增材制造工艺广泛应用于各种工业生产, 主要包括粉末激光增材 (SLS、SLM)、电子束增材 (EBAM) 和电弧增材 (WAAM) 等^[4]。在这一领域, 电弧

收稿日期: 2025-06-17; 修回日期: 2026-01-31

基金项目: 国家自然科学基金 (52265054); 内蒙古自治区自然科学基金 (2022ZD03); 新型有色金属材料开发与加工成形关键技术集成攻关大平台建设项目 (RZ2300001971); 自治区直属高校基本科研业务费项目 (JY20220199); 自治区直属高校基本科研业务费项目 (JY20220028); 内蒙古自治区军民融合重点科研项目 (JM202302); 一流学科科研专项项目 (YLXKZX-NGD-033)

第一作者: 包蓄磊, 男, 博士研究生。E-mail: nmgydxbxl@163.com。

通信作者: 韩永全, 男, 博士, 教授。E-mail: hanyongquan-imut@outlook.com。

增材制造(WAAM)相比电子束增材和激光选区熔化增材具备一些优点^[5],如在沉积方向上使用具有极大灵活性的自动化系统,沉积速率提高了100~1 000倍,且可以结合CNC或机器人位移系统来进行熔覆叠加,扩展了可能的应用范围^[6-8]。

WAAM还可用于沉积一系列可焊接的材料,例如钢,铝合金,钛合金和镍合金^[9-15]。熔化极气体保护焊(GMAW)作为WAAM中常见的热源,具有生产效率高、成本低和适用范围广等特点,但该技术是在高温液态金属过渡成形中进行的,存在热输入大,电弧与熔滴、熔池之间复杂的多重耦合,熔池形状和边界控制困难等问题,导致熔池容易失稳流淌^[10],难以获得优质的焊缝,限制了其在工程中的应用。高炼玲等^[16]研究了不同热输入对5356铝合金WAAM组织与性能的影响,结果表明,WAAM过程中的热输入从113.4 J/mm增至356.4 J/mm时,5356铝合金中 α -Al相晶界处的粗大 β -Al₈Mg₅相增多,使试件抗拉强度和伸长率显著降低。ZHANG等^[17]研究了GMAW增材制造技术,提出了GMAW成型起、收弧端及熔滴过渡方式控制熔覆热平衡过程,以期得到优良的成型效果。熊俊^[18]基于直壁墙体的GMAW成型建立了堆积层宽高视觉传感自适应闭环控制系统,研究了层间温度、送丝速度等熔覆参数对成型质量的影响;表明热平衡过程对多层熔覆成型质量控制有重要意义。DA等^[19]开发了一种浸没主动冷却(near-immersion active cooling, NIAC)技术,该方法在水箱内进行增材制造,其中水位随着预成形件升高而增加,可以有效地降低铝的WAAM过程中的热积累。

本文作者通过MIG电弧增材制造工艺,系统探究了电流对成型质量的影响机理,并通过建模与实验相结合的方式验证。主要分为4个步骤:通过MIG电弧增材制造工艺,获取不同电流下的熔滴过渡方式,并在此基础上建立传热模型,以揭示工艺参数对成型质量的影响规律;引入等效散热功率建立传热模型,在相同等待时间下,计算不同电流对应的多层等效散热功率。建立熔池传热模型,进一步分析熔池失稳原因;通过测量试样侧壁粗糙度,对上述理论进行实验验证与数据分析;研究成果为多层熔覆成型质量的控制提供了理论基础与实验依据。

1 实验与检测方法

1.1 增材系统搭建及实验方法

实验系统搭建如图1所示。用直径为1.2 mm的ER5356的铝合金焊丝为增材材料,其成分如表1所

示。保护气体为氩气,基板选用250 mm×100 mm×8 mm的6061铝合金,成分如表2所示。实验过程采用熔化极氩气保护焊(MIG)增材工艺,由于熔覆电流、熔覆速度、层间等待时间等工艺参数均可能影响成型过程。因此,增材过程中各电流均设置为一元化与电压匹配,熔覆速度设置为11.5 mm/s,层间等待时间设置为150 s。熔覆过程中控制喷嘴到熔覆层的距离为10 mm。

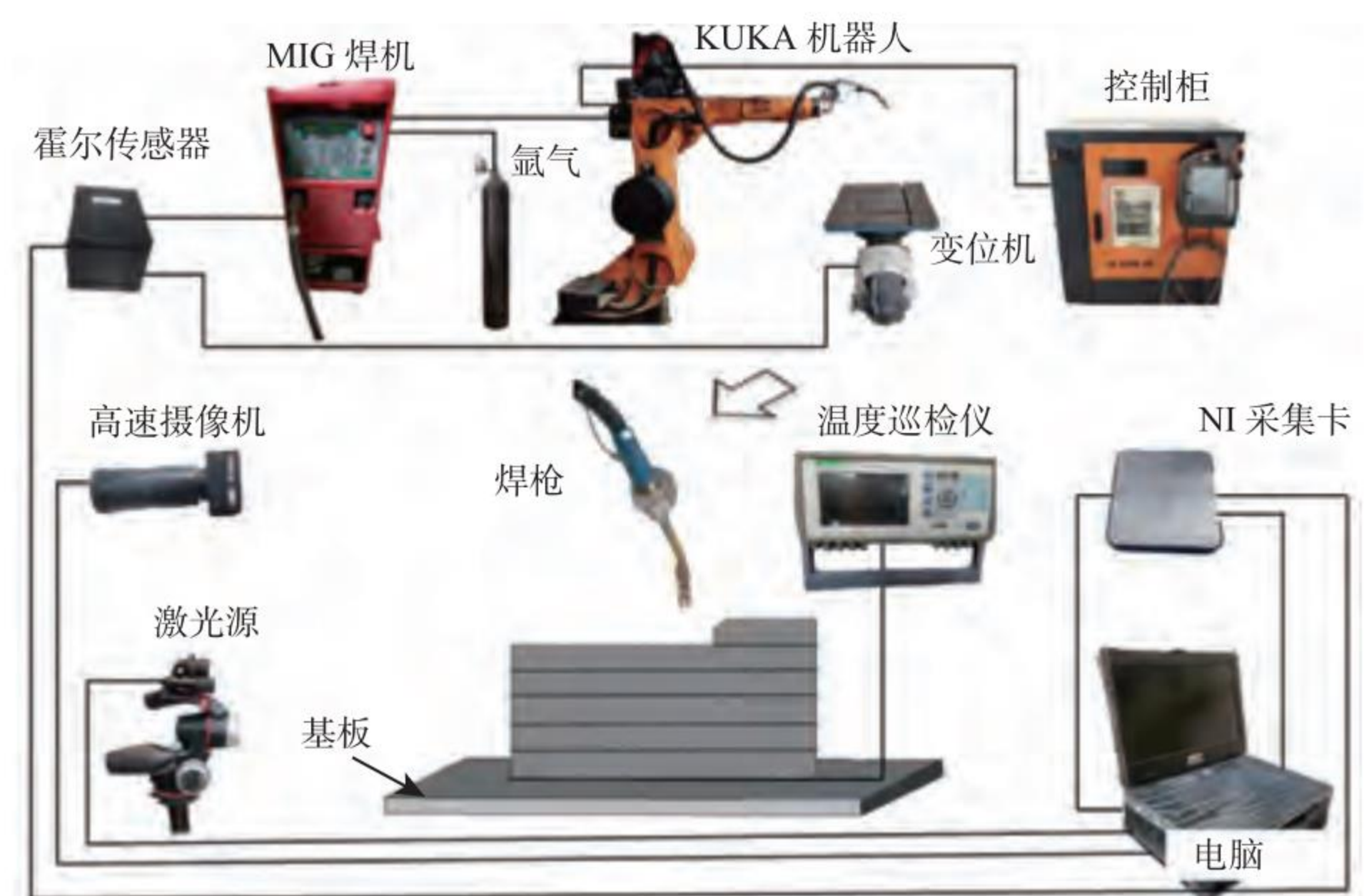


图1 实验系统搭建

Fig.1 Experimental system construction

表1 ER5356铝合金成分(质量分数/%)

Table 1 Composition of ER5356 aluminum alloy (mass fraction/%)

牌号	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ti	Al
ER5356	5.10	0.04	0.09	0.15	0.01	0.01	0.07	0.08	余量

表2 6061铝合金成分(质量分数/%)

Table 2 Composition of 6061 aluminum alloy (mass fraction/%)

牌号	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ti	Al
6061	1.0	0.6	0.5	0.11	0.24	0.1	0.1	0.035	余量

1.2 检测分析方法

在实验中用高速摄影系统、NI AD数据采集系统采集增材熔覆过程中熔滴过渡行为及电流电压波形。选用INSTRUMENTS热循环分析仪和K型热电偶来获取增材过程的热循环温度数据。通过分析各个电流下增材过程和冷却过程中的热循环数据来分析MIG电弧增材制造中的热过程。

为了准确分析增材制造中沉积层的表面质量,以便调控成型精度,引入侧壁粗糙度的计算方法,将计算得出的结果作为参考,分析工艺参数对零部件表面质量的影响。

依据最小二乘法,用一条直线将提取的像素点拟合,结果如图2所示。方程:

$$Ax + By + C = 0 \quad (1)$$

轮廓上所有点到直线的距离之和:

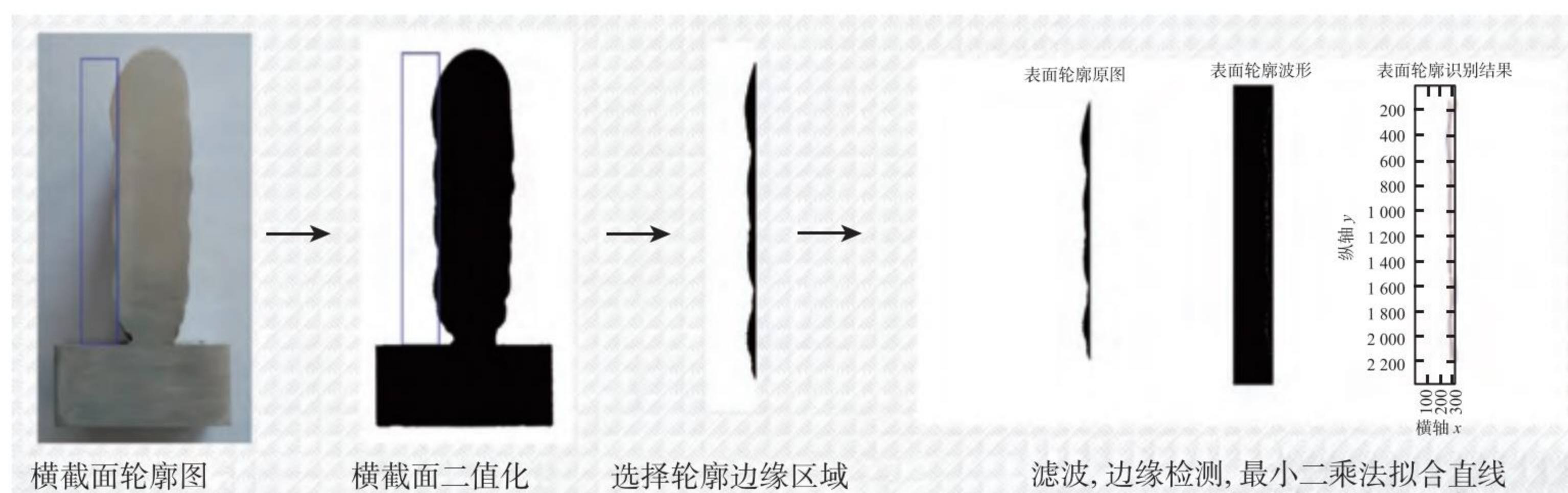


图2 最小二乘法原理提取轮廓结果示意图

Fig.2 Schematic diagram of contour extraction results based on least square method

$$d = \sum_{i=1}^n \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2)$$

侧壁粗糙度:

$$R = d/n \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 熔覆电流对熔覆成型影响规律及熔滴过渡特性

在 MIG 增材制造中,熔覆电流的大小直接影响增材热输入。为探究熔覆电流对增材过程的影响,在基板上进行单层单道实验,以 40 cm/min 的熔覆速度为基准,研究了 110~180 A 范围内(以 10 A 为间隔)熔覆电流对成型的影响规律。熔覆层宏观形貌如图 3 所示。



图3 各个电流下单层单道熔覆层的宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of single-layer single-track cladding layers under various currents

在增材过程中,电流的大小对熔覆层的成型和质量影响较为显著。当电流较低(小于 130 A)时,熔覆层熔池铺展不开,容易出现明显的咬边缺陷,这表明电流不足会导致熔覆效果不佳。而当电流增加到 130 A 以上时,熔覆层的成型效果明显改善,随着电流的进一步提高,熔覆层宽度也逐渐增加。

在上述基础上为探究熔覆电流与熔滴过渡之间的关系,保持丝端行进速度为 70 cm/min,设置熔覆电流 130 A 至 180 A(以 10 A 为间隔),通过 NI AD 数据采集系统和高速摄影设备,对熔覆过程中的电流电压信号及熔滴过渡进行了数据采集。对于每组电流参数,选取熔覆层中点区域 300 ms 的信号进行统计分析,结果如图 4 所示。电流小于 140 A 时,熔滴过渡方式为短路过渡,未出现滴状过渡。电流达到 150 A 时开始出现滴状过渡,占比约为熔滴过渡次数的 0.25。进一步提高电流,滴状过渡的比例持续上升,180 A 时达到 69.34%。同时,熔滴过渡频率也呈现递增趋势。这是因于电流增大导致电弧输出热量增加,送丝速度加快,从而使得单位时间内熔化的金属量增多,熔滴大小变化不大,从而熔滴过渡频率相应提高。

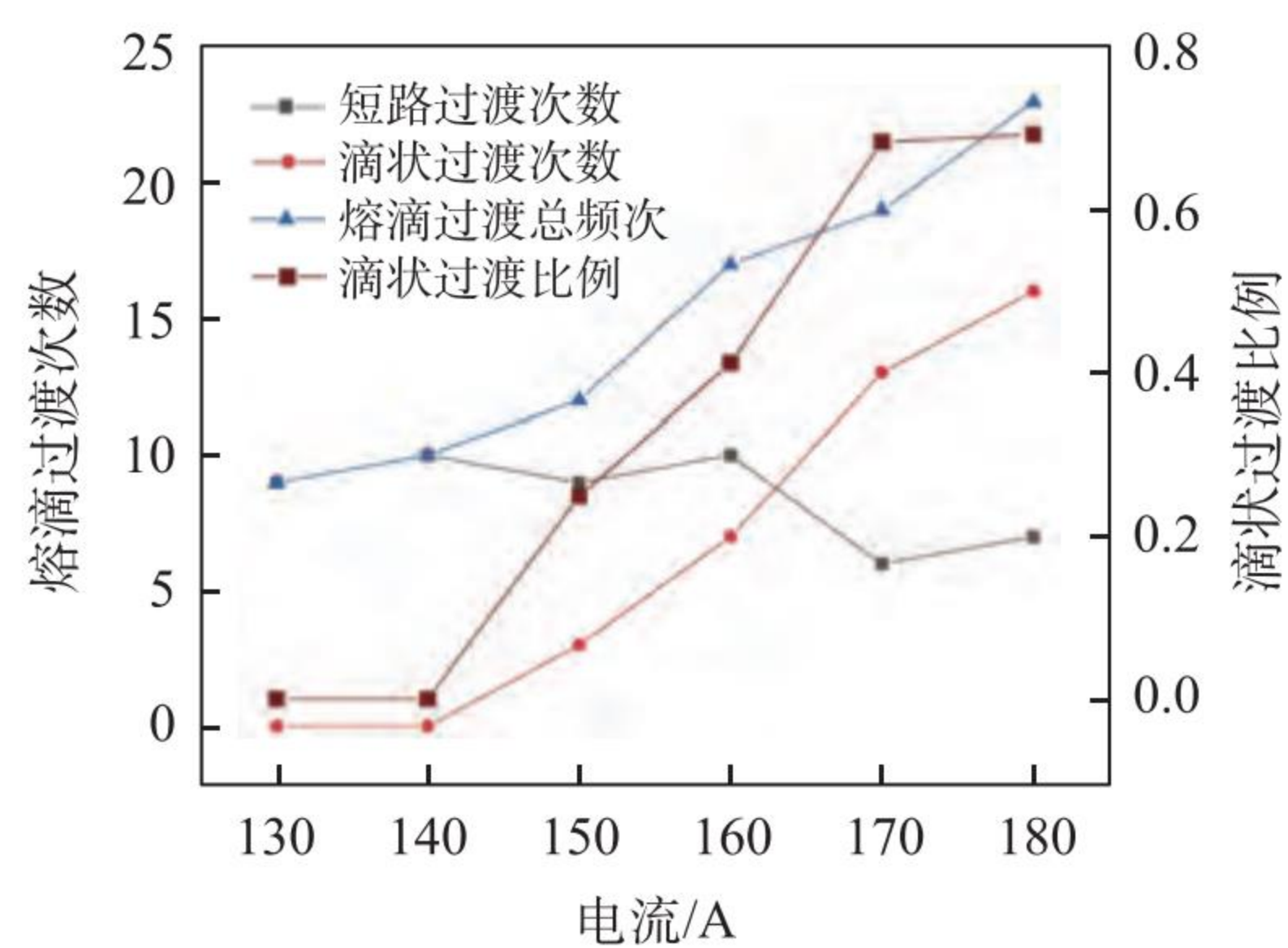


图4 不同电流下熔滴过渡次数与熔滴过渡比例

Fig.4 Droplet transition times and droplet transition ratio under different current

选取 140, 160, 180 A 3 组参数,采集的电流电压波形如图 5 所示。3 组电流参数下熔滴过渡图像如图 6 所示。观察电流电压波形与熔滴过渡图像,可以看出,140 A 时在图 5a 电压波形图中存在较为明显的阶梯状,有一定次数的电压为 0 V 的阶段,这个阶梯状波形是典型的短路过渡波形,160 A 时在图 5b 电压波形图中看出,这种阶梯状时间变短,说明短路过渡过程加快,由图 6b 可以看出,存在较为明显的滴状过渡,滴状

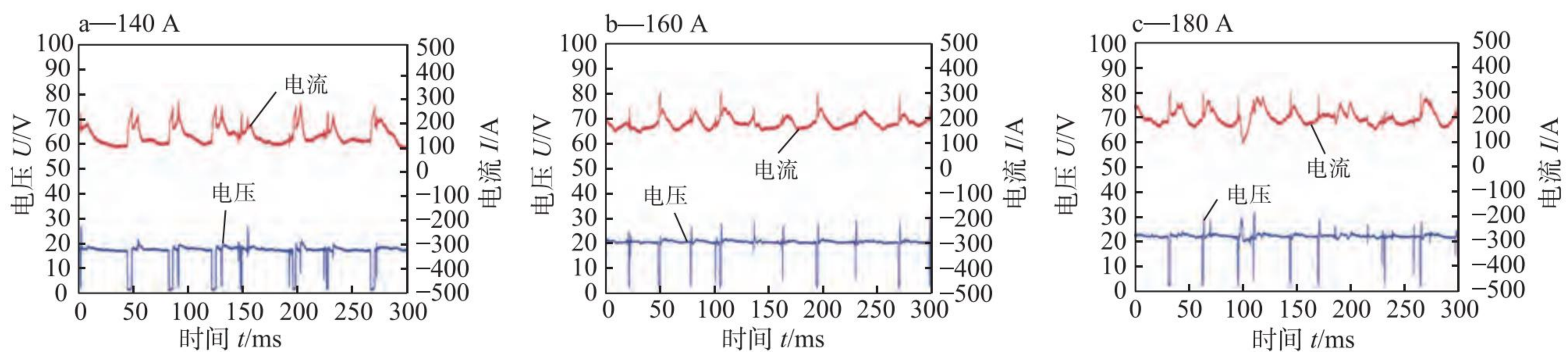


图5 不同电流下的电流电压波形

Fig.5 Current and voltage waveforms under different currents

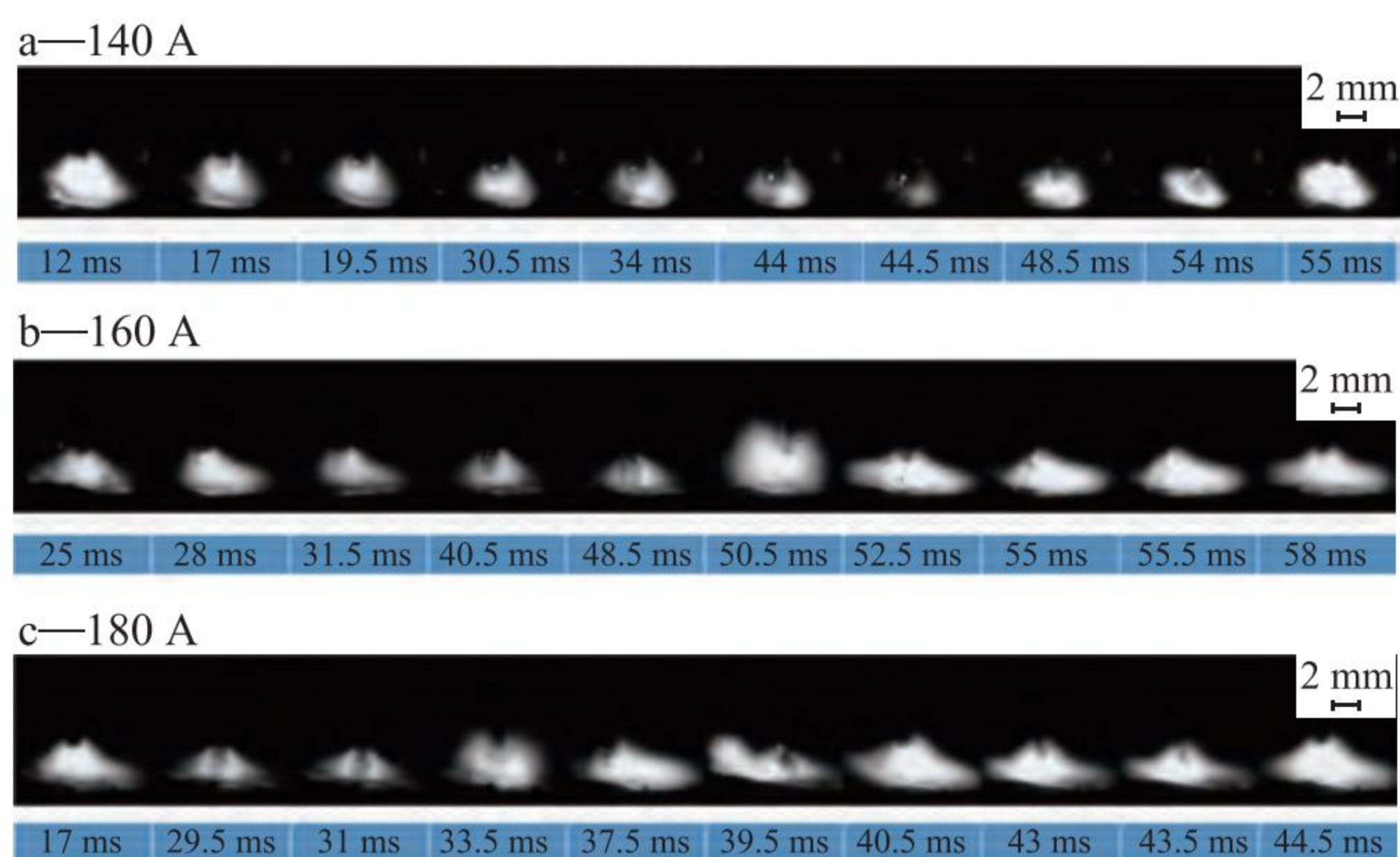


图6 3种电流下熔滴过渡高速摄影图

Fig.6 High-speed photographic image of droplet transition under three current currents

过渡比例约占整个熔滴过渡次数的41%。随着电流增大滴状过渡比例逐渐上升,180 A时滴状过渡比例接近70%,熔滴过渡频率(熔滴过渡次数/300 ms)由33 Hz增至76 Hz,单位时间内熔覆量增多。

2.2 单道多层熔覆传热过程分析

图7为基板处3个热电偶测温点示意图。以140 A参数举例,熔覆速度为11.5 mm/s,层间等待时间为150 s。针对不同测量位置(A,B,C),记录了从焊枪起弧至收弧全过程的温度变化,如图8所示。可以看出,起弧位置处的初始温度最低,在约20 s时温度迅速上升,随后逐渐下降。为更明确分析各位置温度变化的

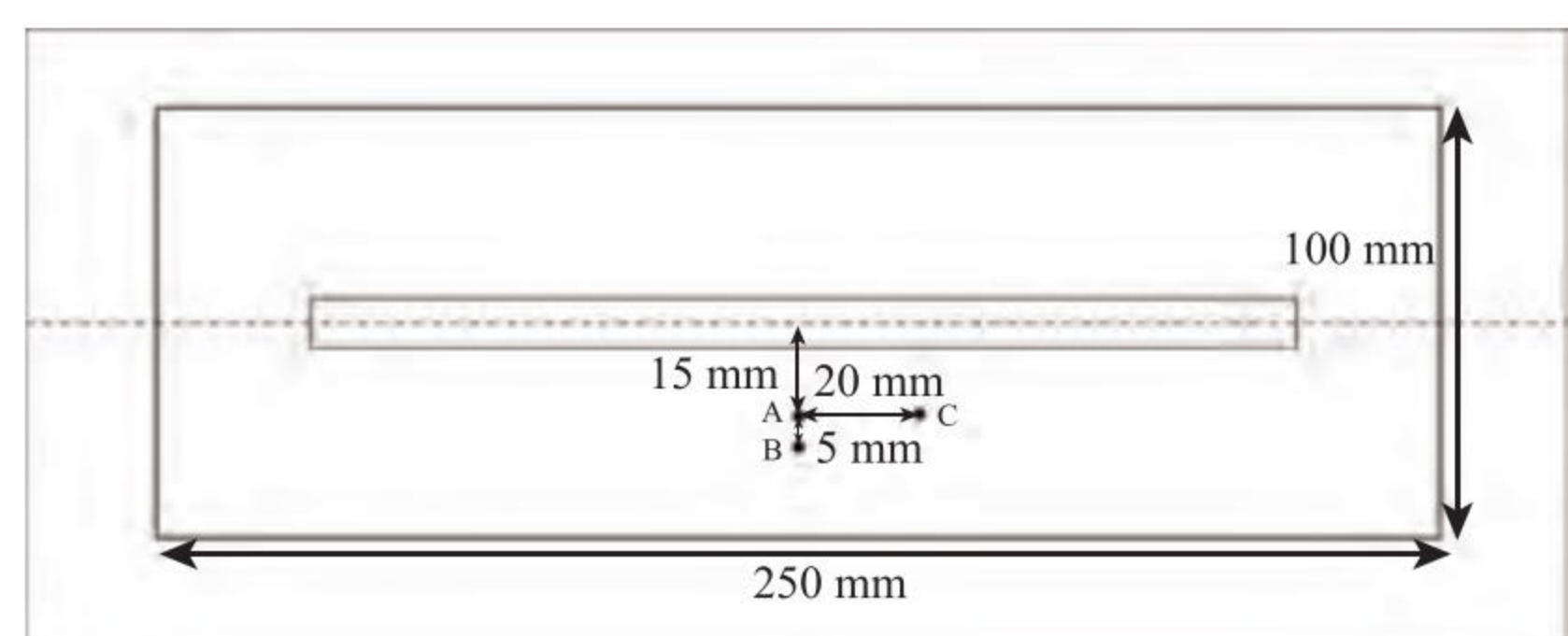


图7 基板处3个热电偶测温点位置

Fig.7 Location of three thermocouple temperature measurement points at substrate

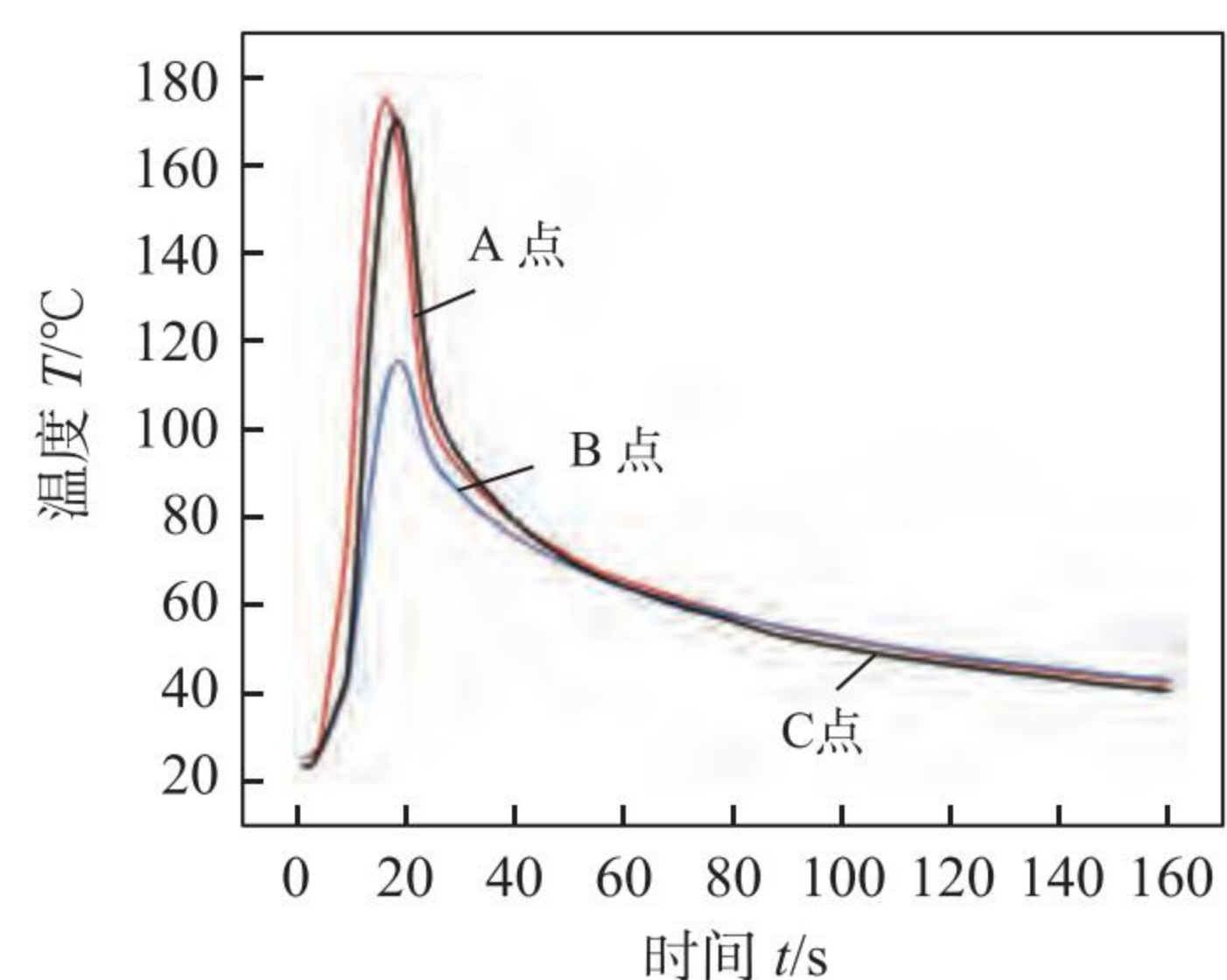


图8 3点第一层从起弧至收弧的温度变化

Fig.8 Temperature variation at three points during the first layer from arc ignition to extinction

具体特征,对测得的热循环曲线进行一阶差分处理,结果如图9所示。分析表明,在第一层增材结束后至第二层开始前,系统存在一个平衡温度 T_m 。在此期间,

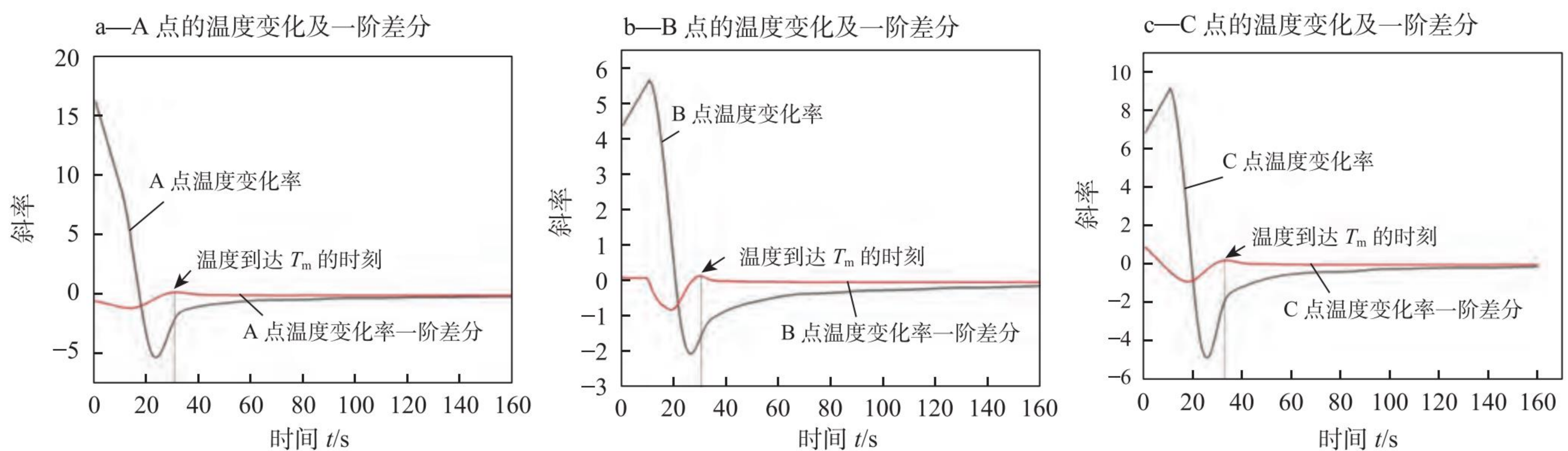


图9 温度变化率及其一阶差分

Fig.9 Temperature change rate and its first-order difference

基板与熔覆区内部热量逐步均匀化,整体温度趋于 T_m ,再经过时间 t_E 冷却至下一层熔覆开始时的初始温度 T_0 。 T_m 的数值可通过对温度-时间曲线进行二次差分(即对温度变化率曲线再次作一阶差分)确定。

由图9可以看出,A,B 2点温度变化率一阶差分曲线都在30 s左右发生转折,由于C点与起弧位置之间距离最远,故该点热量接收与A,B点相比较迟,平衡转折时间也较迟,约为33 s。A,B,C 3点在第一层熔覆后达到的平衡温度分别为90.5,85.5,87 °C,3点平衡温度差值较小。故可选取其中一点作为整个工件的平衡温度。以A点为例,进一步分析:

将基板和熔覆层看作一个整体,在熔覆过程中有^[20-21]:

$$cm\Delta T = Q_H - Q_E \quad (4)$$

式中: Q_H 为电弧传到整个工件的热量; Q_E 为工件与周围环境交换的热量。

$$c \times (m_j + m_l) \times (T_m - T_0) = UI\eta \times t_H = Q_H \quad (5)$$

在冷却过程中有:

$$c \times (m_j + m_l) \times (T_m - T_0) = P_E \times t_E = Q_E \quad (6)$$

式中: c 为比热容; m_j 为基板的质量; m_l 为熔覆层的质量; T_m 为工件内部平衡时的最高温度; t_E 为等待时间; T_0 为每一层冷却 t_E 时间后到下一次起弧时刻的温度; P_E 为等效散热功率。

对每一层的温度曲线求其温度变化率及差分,得出每一层的平衡温度 T_m 及初始温度 T_0 。

由式(6)得到式(7):

$$P_E = \frac{c \times (m_j + m_l) \times (T_m - T_0)}{t_E} \quad (7)$$

根据求得的平衡温度 T_m 、初始温度 T_0 等参数,可计算不同电流下各层的等效散热功率 P_E ,如图10所示。3种电流下 P_E 都先增高后降低,可以看到,在前6层 P_E 逐渐升高,电流为140 A时增长趋势不明显,160,180 A

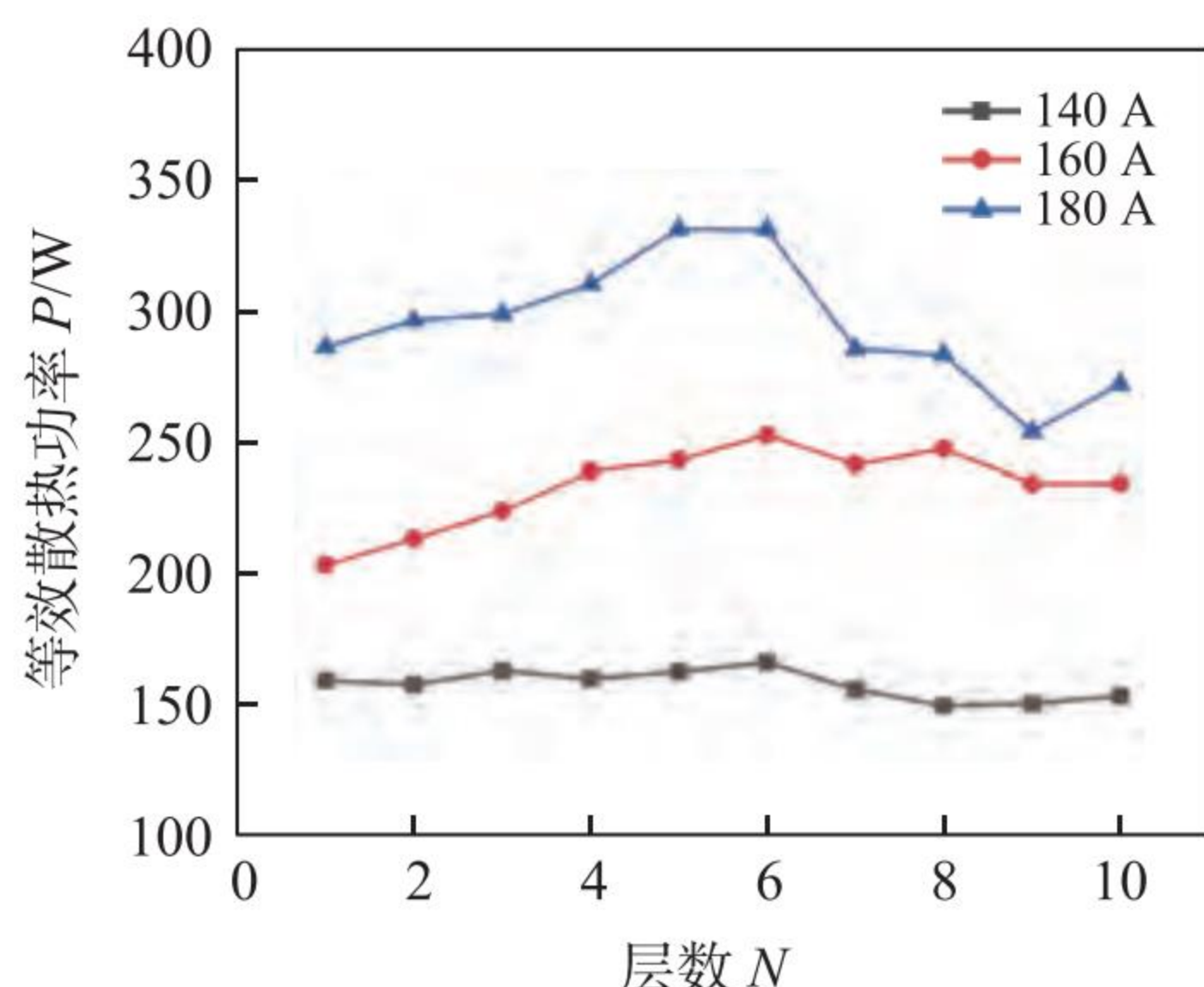


图10 3种电流下熔覆层等效散热功率分布

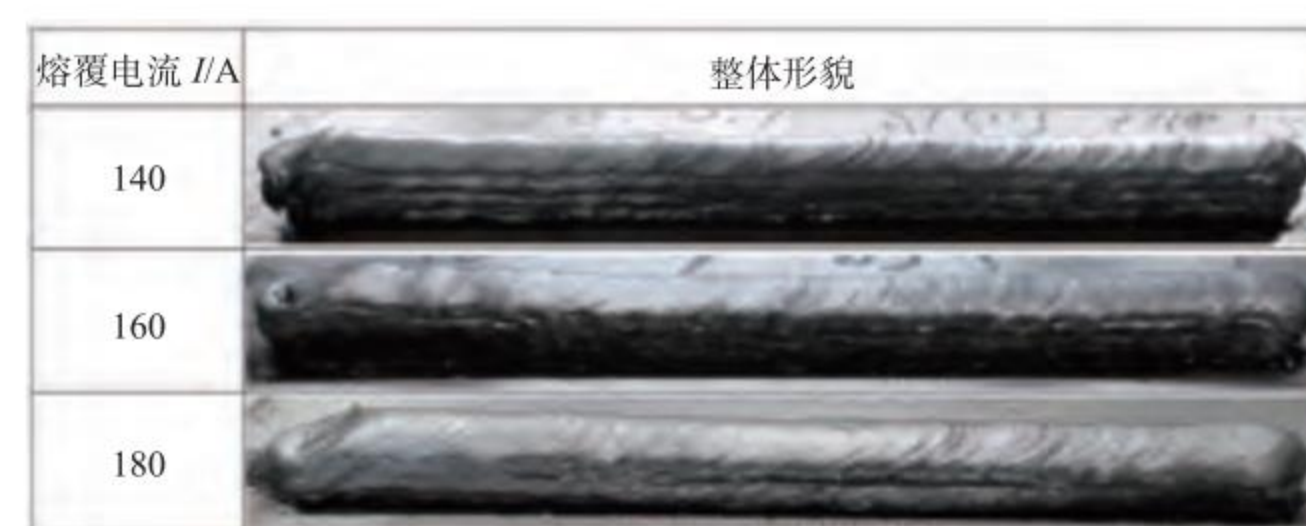
Fig.10 Equivalent heat dissipation power distribution of cladding layer under three different currents

时每增一层 P_E 都有所上升。这是因为前几层熔覆时温度较高,与基板工作台之间温差较大,温度梯度较大,散热较好,使前几层的 P_E 升高且逐渐趋于峰值。当在第6层及以上熔覆时,前几层熔覆的热量在工件及熔覆层中积累,当前熔覆层与下方熔覆层基板之间的温差较小,温度梯度相比前几层减小,散热变差, P_E 降低。当熔覆电流为180 A进行至第7层时,其对应的 P_E 开始显著下降,降幅达20.1%,较上层明显降低。

2.3 多层熔覆成型质量控制

基于对单层单道熔覆成型及熔滴过渡特性随电流变化的分析,确定了熔覆电流区间为140~180 A,并在此范围内进一步研究电流对成型形貌的影响。图11为试样截面形貌图及熔覆电流对熔覆稳定区宽度和高度的影响。由图可知,当电流从140 A升至160 A时,稳定区宽度由8.16 mm增至11.5 mm,增幅达41.83%;熔覆稳定区高度由1.52 mm降至1.24 mm。当电流进一步升至180 A时,稳定区高度又小幅回升至1.3 mm,相较于160 A时增长了4%。这是由于电流增加,送丝速度会根据电流一元化匹配,送丝速度也会相应增加,即相同时间内熔覆量变大,熔池易向两侧流淌,这促使稳定区宽度持续增大。另一方面,电流上升也带来了电弧压力的提升,更大的电弧压力施加于液态金属表面,进一步推动了宽度的增大。此外,电流上升使得熔池温度升高,熔池向两侧摊开,从而使得稳定区高度有所降低。但当电流继续增至180 A时,尽管宽度的增大趋势有所放缓,但熔覆金属量的增加仍导致熔覆稳定区高度出现了轻微的回升。

a—试样形貌



b—熔覆电流对熔覆稳定区宽度和高度的影响

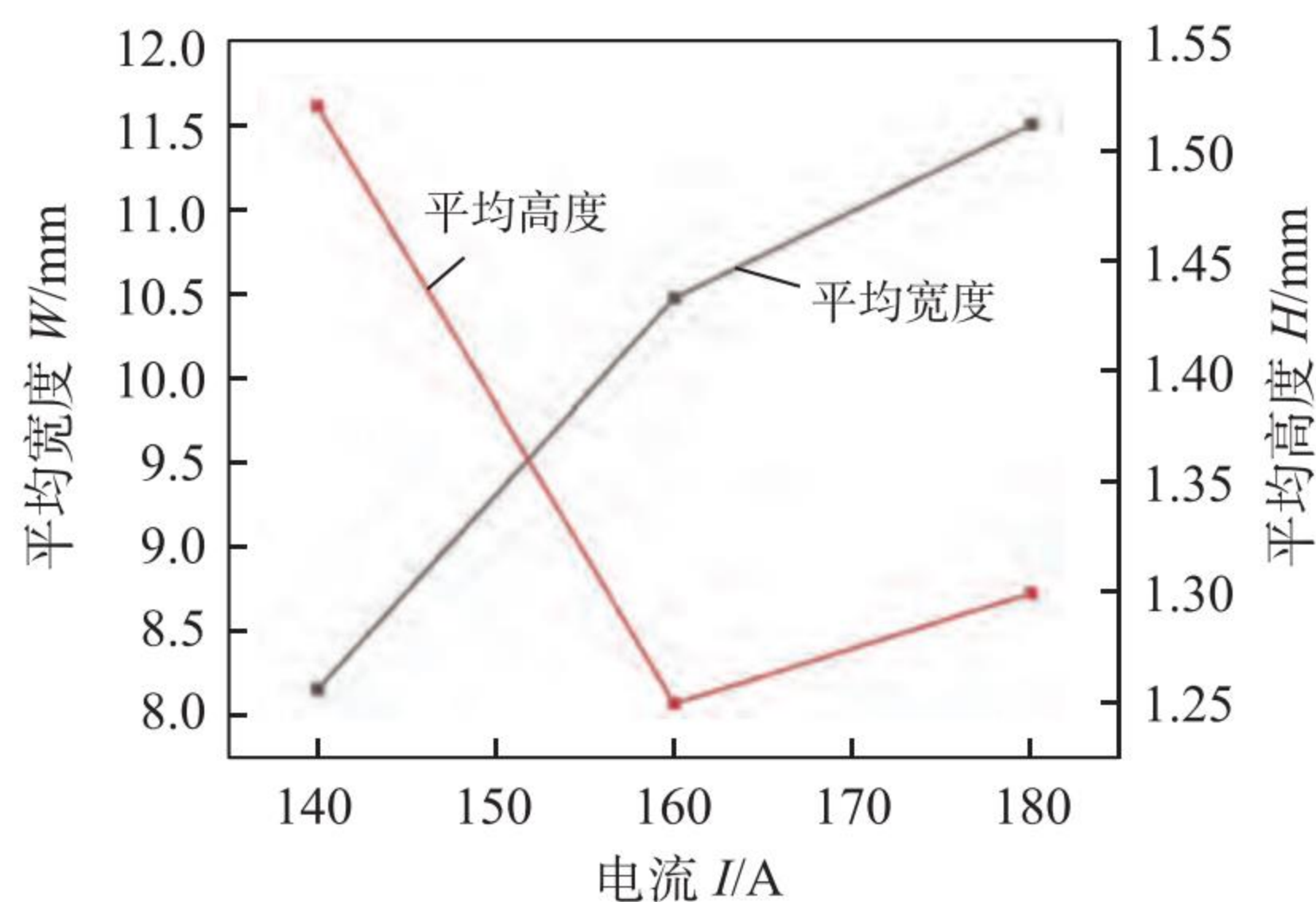


图11 试样形貌图及熔覆电流对熔覆稳定区宽度和高度的影响

Fig.11 Sample morphology and influence of cladding current on width and height of cladding stable zone

图12为侧壁形貌及熔覆电流对侧壁粗糙度的影响。在熔覆电流为140 A时侧壁粗糙度为0.366 mm,由于热输入相对较小,每一层金属都呈现均匀分布的排列效果,墙体侧壁存在明显的分层界限,没有表现出流淌或其他明显的缺陷。电流为160 A时,侧壁粗糙度为0.438 mm,相比于140 A时增加21%,层间开始出现流淌的趋势。电流增至180 A时侧壁粗糙度为0.449 mm,相比与140 A时电流增加22.9%,180 A时相应的热输入较高,熔池在高温状态的停留时间较长,导致层间的界限模糊,尤其在后面几层甚至出现流淌现象。由上节分析等效散热功率可知,这种现象是由于在较高电流下等效散热功率 P_E 下降严重,熔覆层内产生严重的热积累,熔覆过程中熔池的热量无法向熔覆层及基板尽快散出,从而熔融金属难以及时凝固,造成熔池稳定性降低,导致成型不均匀。

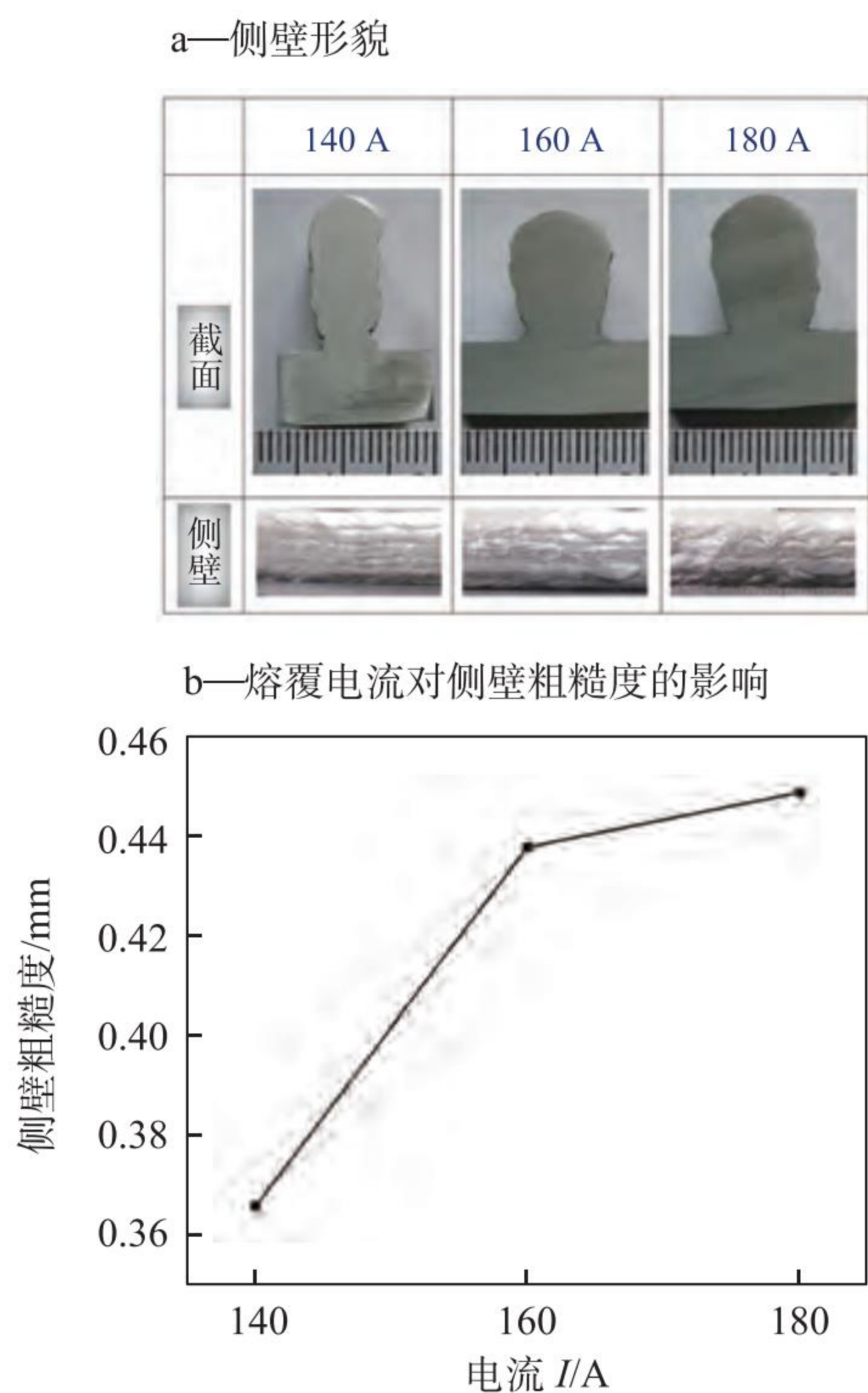


图12 侧壁形貌及熔覆电流对侧壁粗糙度的影响

Fig.12 Side wall morphology and influence of cladding current on sidewall roughness

3 结 论

1) 在单层单道增材实验中,熔覆电流小于130 A时,出现咬边等缺陷,当熔覆电流为140~180 A时成型良好。随着熔覆电流增大,熔滴过渡形式由短路过渡转变为“短路+滴状”混合过渡,且滴状过渡的比例也在增大,熔滴过渡频率也由140 A时的33 Hz升到180 A时的76 Hz,熔滴过渡频率增加,对熔池的冲击力增大,保持工艺稳定性难度增大。

2) 在较小电流下,保持等效散热功率恒定是获得良好成型的关键。在多道单层增材实验中,电流为140 A时整个熔覆期间内等效散热功率 P_E 基本保持恒定,当电流为180 A时,熔覆初期等效散热功率 P_E 随着层数增高而升高,但达到一定层数后,随着层数增加反而大幅降低(降幅为20.1%)。

3) 熔覆电流在140 A至180 A之间时,单道10层熔覆稳定区高度从1.52 mm降至1.24 mm,稳定区宽度由8.16 mm增至11.5 mm。侧壁粗糙度由0.366 mm增至0.449 mm,增加了22.95%,在工艺区间内应保持合适的等效散热功率,保持熔化与凝固的平衡,避免后面的熔覆层产生混层甚至流淌现象。

4 参考文献

- [1] CHEEPU M, KANTUMUCHU V C. Numerical simulations of the effect of heat input on microstructural growth for MIG-based wire arc additive manufacturing of inconel 718 [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2023, 76(2): 473-481.
- [2] TAKEZAWA A, KOBASHI M, KOIZUMI Y, et al. Porous metal produced by selective laser melting with effective isotropic thermal conductivity close to the Hashin-Shtrikman bound [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 564-572.
- [3] KHAUDAIR H J, UGLA A A, ALMUSAWI A R J. Design, integrating and controlling of mig-based shaped metal deposition system with externally cold wire feed in additive layered manufacturing technology [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(3): 2677-2690.
- [4] 樊恩想, 刘小欣, 廖文俊, 等. 金属增材制造的现状与发展 [J]. 机械制造, 2019(4): 1-6.
FAN Enxiang, LIU Xiaoxin, LIAO Wenjun, et al. The current situation and development of metal additive manufacturing [J]. Mechanical Manufacturing, 2019(4): 1-6. (in Chinese)
- [5] LAMBIASE F, SCIPIONI S I, PAOLETTI A. Accurate prediction of the bead geometry in wire arc additive manufacturing process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11): 7629-7639.
- [6] LOPES J G, MACHADO C M, DUARTE V R, et al. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 739-749.
- [7] ZENG Z, CONG B Q, OLIVEIRA J P, et al. Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: Microstructure and mechanical properties [J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101051.
- [8] RODRIGUES T A, DUARTE V R, TOMÁS D, et al. In-situ

- strengthening of a high strength low alloy steel during wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101200.
- [9] MA Y, CUIURI D, HOYE N, et al. The effect of location on the microstructure and mechanical properties of titanium aluminides produced by additive layer manufacturing using in-situ alloying and gas tungsten arc welding [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 631: 230–240.
- [10] XIONG Jun, LEI Yangyang, CHEN Hui, et al. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 397–403.
- [11] XIONG Jun, ZHANG Guangjun, ZHANG Weihua. Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80: 1767–1776.
- [12] DING Donghong, PAN Zengxi, CUIURI D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, 31: 101–110.
- [13] SKIBA T, BAUFELD B, VAN D B O. Shaped metal deposition of 300M steel [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, 225(6): 831–839.
- [14] FANG Xuwei, ZHANG Lijuan, CHEN Guopeng, et al. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 800: 140168.
- [15] KLEIN T, ARNOLDT A, LAHNSTEINER R, et al. Microstructure and mechanical properties of a structurally refined Al-Mg-Si alloy for wire-arc additive manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 830: 14231.
- [16] 高炼玲, 余圣甫, 禹润缜, 等. 5356铝合金过渡端框电弧增材制造及组织与性能 [J]. *机械工程学报*: 2020, 56(8): 28–36. GAO Lianling, YU Shengfu, YU Runzhen, et al. 5356 aluminum alloy transition end frame arc additive manufacturing and microstructure and properties [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(8): 28–36. (in Chinese)
- [17] ZHANG Yuming, CHEN Yiwei, LI Pengjiu, et al. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 135: 347–357.
- [18] 熊俊. 多层单道GMA增材制造成形特性及熔敷尺寸控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. XIONG Jun. Forming characteristics and deposition size control of multi-layer single-channel GMA additive manufacturing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [19] DA S L J, SOUZA D M, DE A D B, et al. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107: 2513–2523.
- [20] 韩福彪. 铝合金MIG增材制造成形工艺及机理研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021. HAN Fubiao. Study on the forming process and mechanism of MIG additive manufacturing of aluminum alloy [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [21] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1–10. YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer (fourth edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1–10. (in Chinese)