

添加相对自蔓延成型铝合金筒内壁涂层温度的影响

管西巧¹, 杨延峰¹, 王亮¹, 黄智², 于云龙³, 周凯旋^{4*}, 王浩⁴, 金国⁴

1. 烟台职业学院智能制造系, 烟台 264670
2. 中山职业技术学院机电工程学院, 中山 528400
3. 上汽通用东岳动力总成有限公司采购部, 烟台 264006
4. 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001

摘要 自蔓延高温通常约为 1000℃, 超过铝合金筒的可承受温度 502~638℃, 对铝合金基体造成热损伤, 而 Si、Ti 与 Mo 作为添加相, 可通过活化晶格和润湿界面来降低自蔓延铝热反应温度。采用低温自蔓延技术制备小内径的铝合金筒内壁耐磨涂层, 探讨了添加相 (Si、Ti 与 Mo) 对降低自蔓延铝热反应体系温度的影响。利用正交试验确定了铝热剂、添加相最佳配比与冷却压力等工艺参数, 研究了添加相的降温机理。结果表明: 传统铝热反应过程释放热量较大, 加入 Si、Ti 添加相可以降低反应温度, 会减缓反应剧烈程度, 甚至抑制反应的进行, 加入适量 Mo 时会使铝热反应重新发生。加入全部添加相的自蔓延反应体系的放热反应温度较铝热反应温度降低了 100℃ 左右且高温失重最少, 为 1.33%。最优配比为: 冷却气体压力为 0.2 MPa, 添加相质量分数为 6%, 铝热剂质量分数为 94%。

关键词 铝热反应; 涂层; 自蔓延反应; 温度; 添加相

铝合金作动筒是飞机装备液压系统的主要执行附件之一, 对飞机舱门或减速板收放等性能有着显著的影响^[1]。目前作动筒内壁常采用阳极氧化耐磨涂层技术防护, 但阳极化涂层厚度较薄, 在重载、

高频的苛刻工况下服役, 常导致作动筒内壁涂层划伤而尺寸失配^[2]。阳极化涂层属于铝合金基体自生长的氧化铝涂层, 一旦磨损或划伤, 再修复去除涂层后铝合金筒的内径尺寸变大而无法再制造利用^[3-5]。

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2024-02-05

基金项目: 烟台职业学院校本科研项目 (2022XBYB009); 烟台职业学院横向课题项目 (HX202311); 广东省教育厅高职院校产教融合创新平台项目 (2023CJPT018); 广东省继续教育质量提升工程建设类项目 (JXJYGC2022GX419)

作者简介: 管西巧, 讲师, 研究方向为机械制造, 电子信箱: qiao19880828@163.com; 周凯旋 (通信作者), 硕士研究生, 研究方向为材料表面处理及防护, 电子信箱: 15370509015@163.com

引用格式: 管西巧, 杨延峰, 王亮, 等. 添加相对自蔓延成型铝合金筒内壁涂层温度的影响[J]. 科技导报, 2024, 42(19): 105-112;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.08.01219

自蔓延高温合成技术 (self-propagating high temperature synthesis, SHS)^[6] 是通过外部热源引发强放热反应体系发生一定范围内的化学反应, 产生可以传递至整个反应体系的燃烧波, 燃烧波通过蔓延反应生成所需材料^[7-8]。自蔓延高温合成技术具有所需能量少、效率高、反应快、制备产物纯度高、材料来源广及环保节能等优点^[9-12]。

目前, 许多研究人员利用自蔓延技术合成制备了防护涂层。李会谦等^[13]利用自蔓延离心法制备了具有 W_2C 相的 Fe_3Al 涂层并与 Fe_3Al 涂层进行对比。结果表明: 具有 W_2C 相的 Fe_3Al 涂层硬质相分布均匀, 耐磨性更优。张啸宇等^[14]在 7A52 铝合金表面上采用自蔓延燃烧合成技术制备了 $TiC-Ni(Cr)$ 金属陶瓷复合涂层。结果表明: 复合涂层的硬度优于基体且涂层与基体之间结合强度高, 为冶金结合。王欣等^[15]以铝粉和氧化铁为原料, SiO_2 为添加剂, 在钢管内壁利用自蔓延高温合成技术制备 Al_2O_3 陶瓷涂层。结果表明: 涂层与基体结合强度高且耐冲蚀性较为优良。Imak Anil 等^[16]利用感应加热自蔓延技术在 $Ti6Al4V$ 合金表面制备 $NiTi-SiC$ 复合涂层并研究 SiC 的含量对涂层硬度的影响。结果表明: 复合涂层的显微硬度随 SiC 添加量的增加而增加, 最高硬度值为 1416 Hv。

自蔓延高温合成技术制备铁基金属陶瓷层具有较好的韧性、硬度、耐磨性、耐腐蚀性及热稳定性^[17]。考虑成本问题, 原料来源广泛的 Fe/Al_2O_3 是比较合适的选择。然而, 铝热反应的反应程度特别剧烈, 放热量大, 而铝合金的熔点较低, 单纯的铝热反应自蔓延合成体系的放热量会烧蚀铝合金作动筒, 使得涂层达不到使用要求。所以, 还需要在 Fe/Al_2O_3 加入一定量合金粉末以降低铝热反应的温度^[18-19]。

通过离心 SHS 技术在铝合金筒内壁制备自蔓延防护涂层 (Al 与 Fe_2O_3 物质的量比为 3 : 1) 并研究了添加相 (Si 、 Ti 、 Mo) 对降低铝热反应温度的作用。通过热分析仪绘制出高温差示扫描量热 (differential scanning calorimetry, DSC) 与热重分析 (thermogravimetry analysis) 曲线, 分析了 Si 、 Ti 与 Mo 对涂层的影响机理并利用正交试验法来确定铝热剂、添加相与冷却压力的最佳配比, 最终实现降

低铝热反应温度的目的。

1 实验内容

1.1 实验原料

本实验选用 $\varnothing 35\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的 LY12CZ(2A12) 铝合金管为基体, 主要化学成分如表 1 所示。

表 1 2A12 铝合金化学成分

元素	质量分数/%
Si	0.5
Fe	0.5
Cu	3.8~4.9
Mn	0.3~0.9
Mg	1.2~1.8
Ni	0.1
Zn	0.1
Fe+Ni	0.5
Ti	0.15
Al	余量

为降低铝热反应温度与剧烈程度, 提高制备得到涂层的致密度, 设计的自蔓延燃烧粉末体系为铝热剂 Al 、 Fe_2O_3 , 作为降温剂、助熔剂与黏结剂的添加相 Si 、 Ti 与 Mo , 试验原料具体见表 2。

表 2 试验原料

试验原料	粒度	纯度	厂家
Al 粉	—	工业	上海关金分体材料有限公司
Fe_2O_3 粉	—	工业	北京圣博泰光学科技有限公司
Si 粉	200 目	99%	北京圣博泰光学科技有限公司
Ti 粉	200 目	99%	天津市科密欧化学试剂厂
Mo 粉	200 目	99%	天津新通精细化工有限公司

利用哈尔滨工程大学自研的离心法自蔓延工艺设备 (图 1) 制备内壁防护涂层, 其基础反应为铝热反应 ($2Al+Fe_2O_3 \rightarrow 2Fe+Al_2O_3+3265\text{ kJ}$), 试验工艺参数见表 3。

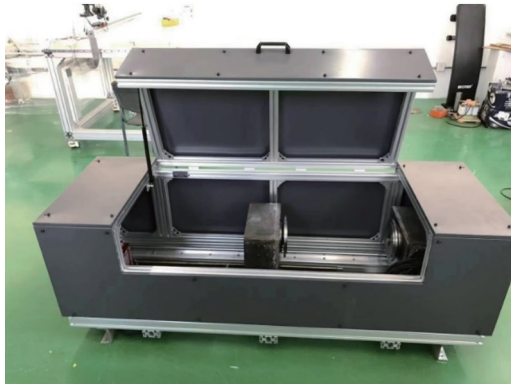


图1 自蔓延设备外观

表3 离心自蔓延法工艺参数

工艺参数	数值
离心转速/(r/min)	2000
粉末填充量/(g/cm ³)	0.9
旋转反应时间/s	16
冷却压力/MPa	0.2

1.2 实验方法

1) 将自蔓延体系粉料按照设计比例混合,之后对粉料进行研磨,研磨时间为2 h,将4种配比的自蔓延粉末装在坩埚中放入1000℃的高温炉保温15 min,引燃SHS反应后观察宏观产物。管筒件自蔓延高温合成成型涂层技术流程如图2所示。

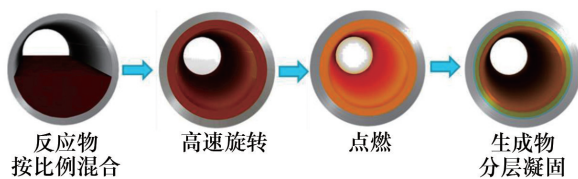


图2 管筒件自蔓延高温合成成型涂层技术流程

2) 利用热分析仪绘制出高温DSC与TG曲线,温度参数设置25~1000℃,温度上升速率10℃/min,通过对曲线的分析来研究不同比例的自蔓延粉末体系的热效应与反应过程中的相态变化,以探究其高温燃烧性能。4种自蔓延粉体材料如表4所示。

3) 选择铝热剂(Al-Fe₂O₃)与添加剂(Si、Ti、Mo)的分配比以及冷却气体压力3个因素来优化正交试验,每个因素分别选取3个水平。根据L9(33)正交表,采用3因素3水平的极差法正交优化

表4 4种自蔓延体系的粉体配比
(质量分数为X%)

编号	Al	Fe ₂ O ₃	Si	Ti	Mo
1	3	1	0	0	0
2	3	1	0.5	0	0
3	3	1	0.5	0.5	0
4	3	1	0.5	0.5	0.5

设计,研究3个影响因素在反应过程中对基体温度的影响为最小时的最优匹配。正交试验因素与水平表如表5所示。

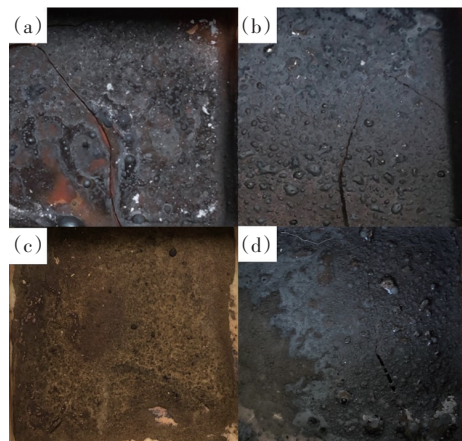
表5 试验因素与水平表

水平	铝热剂 (A)/%	填充剂 (B)/%	冷却压力 (C)/MPa
L1	86	14	0.1
L2	90	10	0.2
L3	94	6	0.3

2 结果与分析

2.1 低温自蔓延燃烧宏观形貌

图3为不同添加相制备的低温自蔓延粉末燃烧的宏观形貌。将铝热剂在坩埚中混合均匀后,形成了如图3(a)所示的涂层。由图中可以看出,坩埚中产物炸裂、断开,这可能是因为1000℃下铝热剂反应非常剧烈所致。图3(a)中反应后的涂层有一部分比较均匀,有一部分含有球状的或者其他不规则形状的突起,涂层表面比较粗糙^[20]。



(a) Al+Fe₂O₃; (b) Al+Fe₂O₃+Si; (c) Al+Fe₂O₃+Si+Ti; (d) Al+Fe₂O₃+Si+Ti+Mo

图3 低温自蔓延粉末燃烧宏观形貌

Al+Fe₂O₃+Si混合均匀后的粉体,形成了如图3(b)所示的涂层。图中可以看出,坩埚中产物只是形成裂纹,没有完全断开,说明1000℃下,加入Si的粉体,反应剧烈程度有所下降。这可能是由于加入Si后,由于Si良好的润湿性,使粉体混合更均匀,降低了粉体反应的熔点,因此降低了其反应的剧烈程度。同时,涂层上分布有球状的或者其他不规则的突起,且分布不均匀,这导致涂层表面比较粗糙。这些突起可能是由反应后的产物及其氧化物(Fe₂O₃、Fe₃O₄等)或者混合不均匀的一些SiO₂附着在涂层表面形成的。

在第2种配比的条件下继续加入降温剂Ti,结果如图3(c)所示,只在表层发生烧结反应,没有发生铝热反应。说明同时加入的Si与Ti粉提高了铝热反应的发生难度,抑制了反应的发生。

Al+Fe₂O₃+Si+Ti+Mo混合均匀后的粉体,铝热反应重新发生,形成了如图3(d)所示的涂层。图中可以看出,坩埚中产物也只是形成裂纹,没有完全断开,且相较于图3(b)中的裂纹有所缩短,说明此粉体在1000℃下,较只加入Si的粉体,反应剧烈

程度又有所下降。

2.2 低温自蔓延DSC分析

图4为4种配比自蔓延粉末DSC曲线。图4(a)为Al+Fe₂O₃粉末的热分析曲线,600~700℃内,DSC曲线上出现一个明显的吸热峰,分析是由于铝热剂熔化吸热造成的。在1000℃左右出现一个明显的放热峰,分析是由于熔化后的铝热剂反应,生成单质Fe和Al₂O₃时造成的。DSC曲线在800~1000℃下降很迅速,说明铝热剂在此温度下反应相当剧烈。粉体在1000℃才发生反应,说明此粉体反应所需要的能量较多。

图4(b)为Al+Fe₂O₃+Si粉末热分析曲线,通过曲线能够看出,在600~700℃内,DSC曲线上出现一个吸热峰,分析可知这是由于铝热剂熔化吸热造成的,且此吸热峰较不含添加相的铝热剂反应的吸热峰明显下降,这可能是加入的Si良好的润湿作用,提高铝合金基体界面流动性及铺展润湿性,降低了粉体熔化所需要的能量,也降低了熔化时的剧烈程度。

图4(c)为Al+Fe₂O₃+Si+Ti粉末热分析曲线,在600~700℃内,DSC曲线上出现一个比较明显的吸

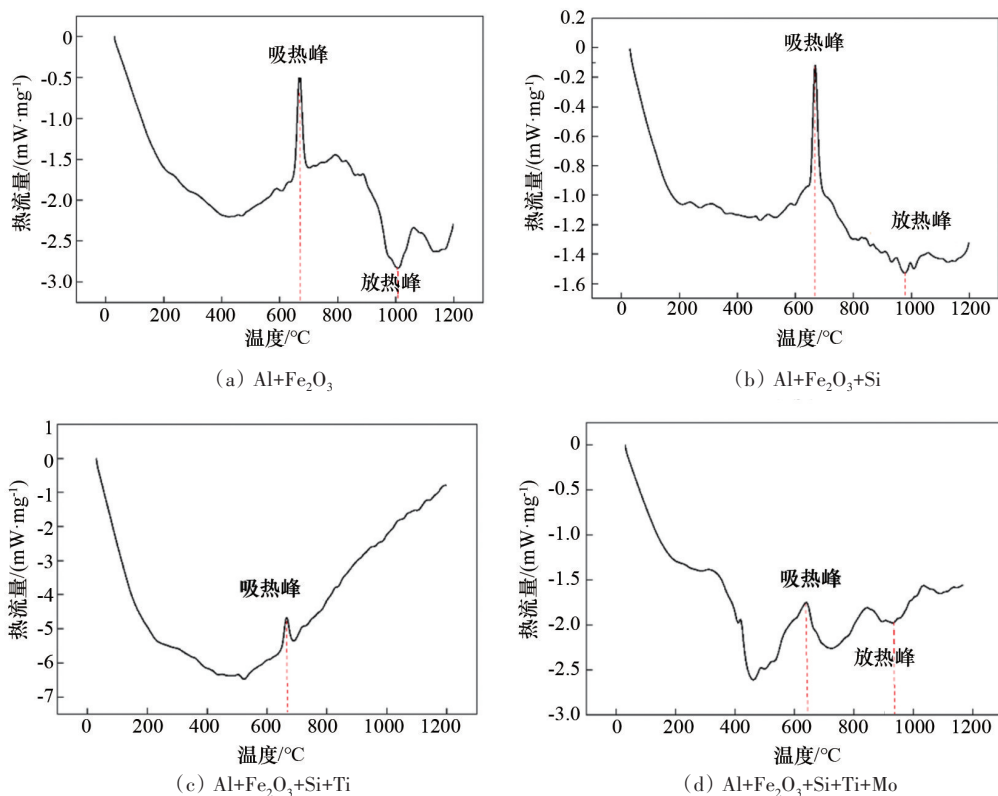


图4 4种配比自蔓延粉末DSC曲线

热峰,分析可知这是由于铝热剂熔化吸热造成的,且此吸热峰较不含添加相的铝热剂反应的吸热峰有所下降,这可能是加入的Si、Ti发挥了作用,Ti在自蔓延反应过程中,可以活化 Al_2O_3 的晶格结构^[21],促进反应烧结,降低了粉体熔化所需要的能量,但是在DSC曲线上没有出现明显的放热峰。说明铝热剂在熔化后没有反应。

图4(d)为 $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Si}+\text{Ti}+\text{Mo}$ 粉末热分析曲线,可以看出,DSC曲线在 $600\sim 700^\circ\text{C}$ 内,有一个非常明显的吸热峰,分析可知这是由于铝热剂熔化吸热造成的。在 900°C 左右DSC曲线上出现一个峰强较低的放热峰,放热表现不明显,说明铝热剂在熔化后发生了反应,但是反应程度不剧烈,对比其他粉末体系的热分析曲线,加入Si、Ti、Mo的自蔓延体系,反应所需的能量下降,其铝热反应发生起始温度约为 900°C ,比铝热剂 $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的起始温度降低了 100°C 左右,且反应剧烈程度下降,说明该粉体设计可以降低自蔓延铝热反应温度。这是因为Mo是一种常见的助熔剂,可以降低 Al_2O_3 的熔点,延长自蔓延燃烧后的液相存续时间^[22]。

2.3 低温自蔓延粉末热重分析

涂层在高温下的稳定性,对涂层的性能有很大的影响。通过分析不同粉体的TG曲线,来分析涂层的热稳定性,比较不同添加相对涂层性能的影响。4种配比自蔓延粉末热重曲线如图5所示。

图5(a)为 $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粉体TG曲线,可以看出,此粉体共减重 12.35% ,粉体反应生成涂层后的减重较多,说明其热稳定性较差。

图5(b)为 $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Si}$ 粉体TG曲线,可以看出,此粉体共减重 2.17% ,相较于铝热剂反应后生成的涂层减重较少,故认为此涂层热稳定性有所改善,而且其热稳定性较好,说明加入的Si对铝热剂粉末热稳定性有改善作用。

图5(c)为 $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Si}+\text{Ti}$ 粉体的TG曲线,可以看出,此粉体共减重 17.48% ,是4种粉体中减重最多的。这可能是粉体没有反应生成涂层,只是粉体在高温下熔化减重,并且同时加入的Si与Ti都对降低Al的熔点有促进作用,因此减重最多。

图5(d)为 $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Si}+\text{Ti}+\text{Mo}$ 粉体TG曲线,可以看出,此粉体共减重 1.33% ,相较于只加入 SiO_2

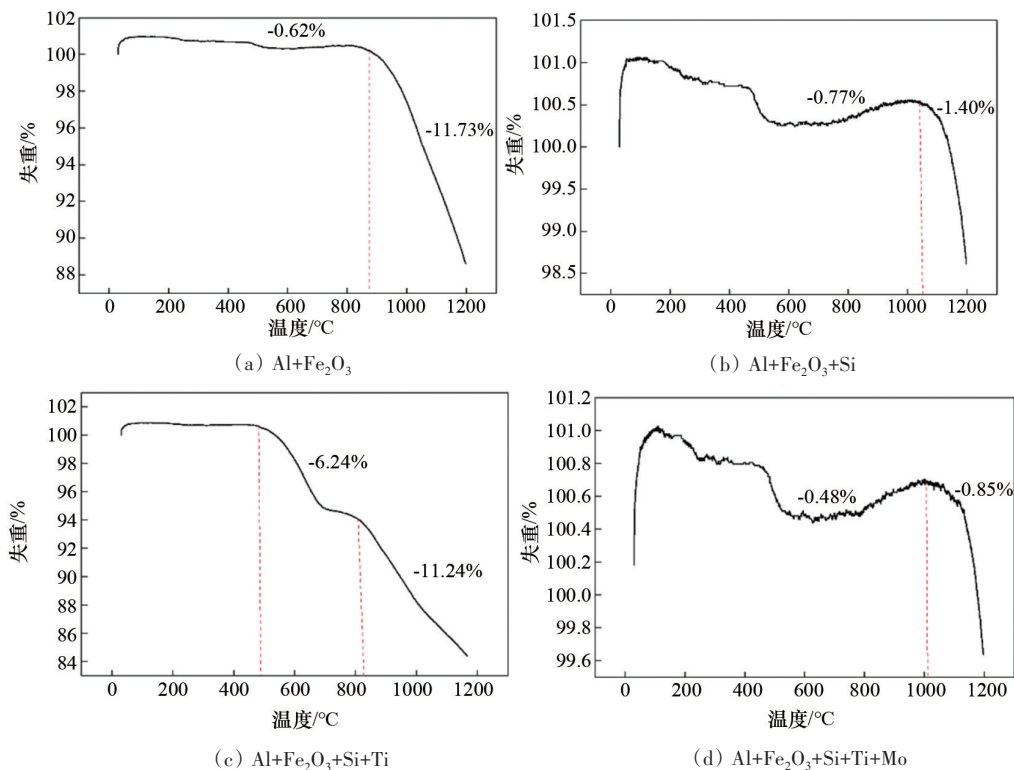


图5 4种配比自蔓延粉末热重曲线

粉末体系的减重更少,热稳定性有更多的改善。

粉末在高温加热时产生的质量减少主要是由于高温下的 Fe_2O_3 被还原生成 Fe , 因此质量变少。再加入 Mo 元素后, 铝热反应更为充分, Fe_2O_3 还原的氧元素大部分又与 Al 结合生成 Al_2O_3 , 因此重量变化最小, 减重最少。这可能是因为加入 Mo 后, Mo 在热反应过程中与 O_2 生成 MoO_3 , 同时反应放出大量的热。 MoO_3 在 793°C 发生液化, 在 1150°C 温度下, 液相 MoO_3 沸腾蒸发, 在冷凝过程中释放出大量热量^[23], 放出的热量重新促进了铝热反应的进行。

2.4 正交实验分析

表6为正交试验结果表, 其中第5列为涂层反应后基体温度。表中各因素的 K_{1j} 值为这个因素的最低参数所对应的各个参数温度的加和; K_{2j} 值为这个因素的中间参数所对应的各个参数温度的加和, K_{3j} 值为这个因素的最高参数所对应的各个参数温度的加和; 而 \bar{k}_{1j} 、 \bar{k}_{2j} 、 \bar{k}_{3j} 分别为相应的各组温度的平均值, 因素的 k_j 值反映了相应水平对结果的影响。各因素的 R_j 值为此因素最大 \bar{k}_j 和最小 \bar{k}_j 值的差, 称为级差因子, 级差因子越大的因素, 对结果的影响越重要。

表6正交试验结果表明影响涂层制备过程中基体温度的主次顺序依次为: 冷却气体压力、铝热

表6 正交实验结果

实验号	A	B	C	温度/ $^\circ\text{C}$
1	86	14	0.1	193
2	90	10	0.2	216
3	94	6	0.3	217
4	94	6	0.1	244
5	90	10	0.1	218
6	86	14	0.2	244
7	90	10	0.3	197
8	94	6	0.2	188
9	86	14	0.3	207
K_{1j}	638	649	612	
K_{2j}	621	631	657	
K_{3j}	649	638	649	
\bar{k}_{1j}	212	216	204	
\bar{k}_{2j}	207	210	219	
\bar{k}_{3j}	216	212	216	
极差 R_j	9	6	15	

剂 ($\text{Al}-\text{Fe}_2\text{O}_3$) 添加重量比、填充剂 (Si 、 Ti 、 Mo) 添加重量比。各参数对基体温度的影响规律如图6所示, 最优的参数组合为 A3B1C2, 即冷却气体压力为 0.2 MPa , 填充剂添加质量分数为 6% , 铝热剂添加质量分数为 94% 。

按正交试验制备的试验件端口形貌如图7所示, 其中最优的工艺组合参数第8组制备的涂层铝合金管的外壁形貌状况最为优异, 说明温度对铝合金管的影响较小。结果表明, 通过合理地调整反应物配比, 可以使涂层的致密度得到极大改善, 可以看出内壁涂层的厚度均匀性、界面结合状态都比较优异, 可以明显看到内衬 Fe 层与外层 Al_2O_3 陶瓷层的双层复合结构。

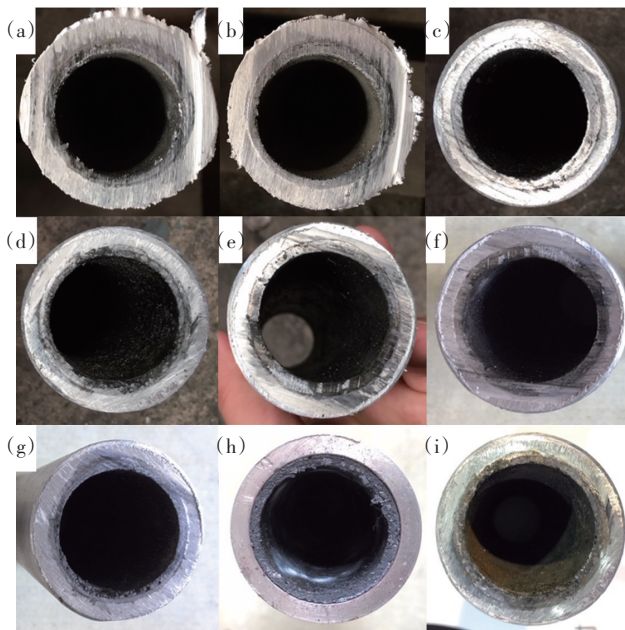


图7 正交试验9组工艺制备内壁涂层端面形貌

图8为正交试验9组工艺制备内壁涂层截面形貌, 由图8可以看出反应时间较长造成端面 Fe 内衬涂层较薄, 甚至局部没有涂层, 这是由于铝热反应后瞬间形成的 Fe 和 Al_2O_3 混合熔体, Al_2O_3 的密度大于 Fe , 离心时间延长 Al_2O_3 会部分浸入内衬 Fe 层中, 造成 Fe 内衬层不连续 (i)。调节转速主要是为了能更好的形成底层 Fe 内衬和 Al_2O_3 陶瓷面层的复合结构, 同时要实现 Fe 与 Al 基体的扩散结合, Fe 内衬层与 Al_2O_3 界面及内部有互溶的状态, 但 Fe 内衬层与 Al_2O_3 的热膨胀系数差异较大, 密度差异也

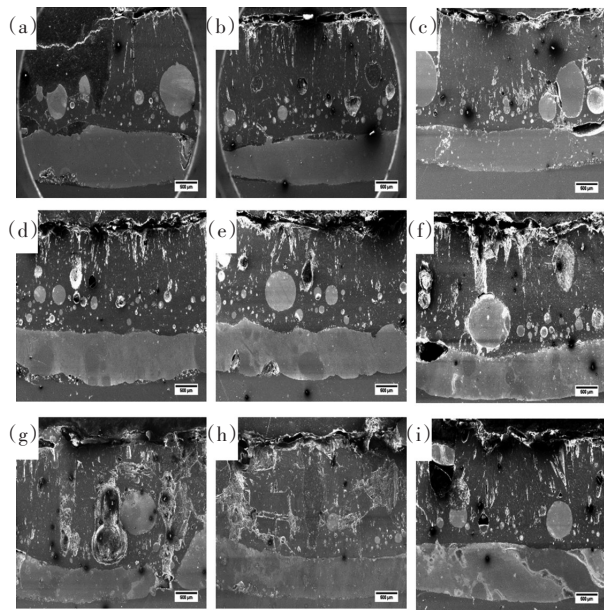


图8 正交试验9组工艺制备内壁涂层截面形貌

大,快速旋转易造成熔体内的 Al_2O_3 相比较多的浸入Fe内层,Fe挤出在表层,无法实现与Al基体的扩散结合,也造成复合涂层内部Fe层夹生陶瓷相的现象,甚至有局部分层的现象(c),综上分析,结合正交试验影响因子的排序,应选择适中的转速、旋转时间,同时选择较小的填充量,可以提高涂层的致密度和与基体界面的结合性能。

3 结论

通过高温燃烧实验、高温DSC实验、热重实验对自蔓延粉体的高温性能进行了初步探索,并利用正交实验法优化铝热剂($\text{Al-Fe}_2\text{O}_3$)与添加相(Si、Ti、Mo)的成分配比以降低铝热反应的温度,主要结论如下。

1) 铝热反应的过程十分激烈,释放大量的热,加入Si、Ti添加相时会降低反应温度,减缓反应剧烈程度,甚至抑制反应的进行,再加入适量的Mo时会使铝热反应重新发生。

2) 添加相的加入可以降低反应温度,降低反应的剧烈程度,加入Si、Ti、Mo添加相的自蔓延反应体系的放热反应温度较铝热反应温度降低了 100°C 左右。且高温失重最少,为1.33%,体系最为稳定。

3) 调配铝热剂与添加相的配比可以使自蔓延反应降低反应温度,反应过程平稳进行。通过设计正交实验确定铝热剂、添加相与冷却压力的最优配比,根据实验结果得出最优配比为:冷却气体压力为0.2 MPa,添加相质量分数为6%,铝热剂质量分数为94%。

参考文献(References)

- [1] 于鹏, 张德东, 过凯, 等. 国外大型军用运输机电子对抗系统装备现状及发展趋势[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(4): 1-6.
- [2] 邓丽虹. 铝合金在低硫酸浓度电解液中硬质阳极氧化膜的制备研究[D]. 成都: 西华大学, 2011.
- [3] 李玲, 李洪伟, 李旭东. 某型飞机作动筒常见故障分析及维护[J]. 新技术新工艺, 2014(5): 122-124.
- [4] Jin Z, Yu Z Z, Yang L S. Prediction of nonlinear contact force of piston skirt and cylinder liner under the function of clap force[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226/227/228: 831-834.
- [5] Yokota M, Koyama T, Kawakami T. Digital holographic inspection for the inner surface of a straight pipe using current-induced multiwavelength from two laser diodes[J]. Optical Engineering, 2014, 53(10): 511-521.
- [6] Shi H L, Zhang M L, Zhou L, et al. Improved oxidation protective ability of SHS powder-synthesized $\text{ZrB}_2\text{-MoSi}_2\text{-SiC-Si}$ coating on carbon/carbon composites[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 447: 128838.
- [7] He S, Fan X A, Chang Q M, et al. TiC-Fe-based composite coating prepared by self-propagating high-temperature synthesis[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(3): 1748-1753.
- [8] Popov R Y, Bohdan E O, Dyatlova E M, et al. The application of self-propagating high-temperature synthesis to obtain a protective-strengthening alumina-silica coatings[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series, 1999, 72(12): 2197-2201.
- [9] Ye K X, Li F, Zhang J, et al. Effect of SiO_2 on microstructure and mechanical properties of composite ceramic coatings prepared by centrifugal-SHS process[J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12833-12842.
- [10] 李宁, 韩凤兰, 丁坤飞, 等. 自蔓延高温合成法制备陶瓷涂层的研究进展[J]. 热加工工艺, 2023, 52(2): 1-4.
- [11] 左蓓璘, 刘佩进, 张维海, 等. 高温自蔓延反应合成功能材料的研究进展[J]. 含能材料, 2018, 26(6): 537-544.
- [12] Fan X Z, Huang W Z, Zhou X, et al. Preparation and

- characterization of NiAl-TiC-TiB₂ intermetallic matrix composite coatings by atmospheric plasma spraying of SHS powders[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(8): 10512-10520.
- [13] 李会谦, 高峰, 郭志猛. 自蔓延离心法制备 Fe₃Al/W₂C 复合涂层[J]. *热喷涂技术*, 2012, 4(2): 25-29.
- [14] 张啸宇, 谭俊, 任伟, 等. SHS法制备 TiC-Ni(Cr)金属陶瓷复合材料组织与性能[J]. *功能材料*, 2015, 46(21): 21045-21049.
- [15] 王欣, 刘鹏, 孙广合. 自蔓延高温合成内衬陶瓷复合涂层的制备及研究[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(2): 146-148.
- [16] Imak A. NiTi-SiC composite coating on Ti6Al4V alloy produced by SHS using induction heating[J]. *Materials Testing*, 2022, 64(12): 1851-1859.
- [17] 王志, 刘健飞, 丁寅森, 等. Fe/Al₂O₃复合材料的制备和性能[J]. *材料研究学报*, 2012, 26(2): 206-210.
- [18] 房昺, 陈皓辉, 王守泽, 等. 合金元素对SHS伴生金属涂层基本性能的影响[J]. *科技导报*, 2022, 40(5): 52-62.
- [19] 胡亚群, 周泽华, 王泽华, 等. 自蔓延高温合成涂层技术的研究现状[J]. *粉末冶金工业*, 2015, 25(4): 68-73.
- [20] Kashir A, O'Donnell T. A brachioradialis splitting approach sparing the pronator Quadratus for volar plating of the distal radius[J]. *Techniques in Hand & Upper Extremity Surgery*, 2015, 19(4): 176-181.
- [21] Bengisu M, Brow R K, Wittenauer A. Glasses and glass-ceramics in the SrO-TiO₂-Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃ system and the effect of P₂O₅ additions[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(10): 3531-3538.
- [22] Pathak L C, Bandyopadhyay D, Srikanth S, et al. Effect of heating rates on the synthesis of Al₂O₃-SiC composites by the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) technique[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, 84(5): 915-920.
- [23] Bucy R P, Panoskaltis-Mortari A, Huang G Q, et al. Heterogeneity of single cell cytokine gene expression in clonal T cell populations[J]. *The Journal of Experimental Medicine*, 1994, 180(4): 1251-1262.

Temperature effect analysis of additives in self-propagating forming aluminum alloy cylinder inner wall coating

GUAN Xiqiao¹, YANG Yanfeng¹, WANG Liang¹, HUANG Zhi², YU Yunlong³, ZHOU Kaixuan^{4*}, WANG Hao⁴, JIN Guo⁴

1. Department of Intelligent Manufacturing, Yantai Vocational College, Yantai 264670, China
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528400, China
3. SAIC GM Dong Yue Powertrain Company Limited, Yantai 264006, China
4. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract The high temperature of self-propagation is about 1000°C, which exceeds the tolerable temperature of 502~638°C of the bearing temperature of aluminum alloy tube and causes thermal damage to the aluminum alloy substrate, while Si, Ti and Mo, as the additive phases, can reduce the temperature of self-propagation aluminum thermal reaction by activating the crystal lattice and wetting the interface. In this paper, low-temperature self-propagation technology is used to prepare wear-resistant coatings on the inner wall of aluminum alloy tubes with small inner diameters, and investigated the effect of added phases (Si, Ti, and Mo) on reducing the temperature of the self-propagating aluminothermic reaction system. Orthogonal experiments were used to determine process parameters such as the optimal ratio of aluminothermic agents, additive phases, and cooling pressure, and the cooling mechanism of additive phases was studied. The results show that the traditional aluminothermic reaction process releases a large amount of heat. Adding Si and Ti phases can lower the reaction temperature, slow down the severity of the reaction, and even inhibit the progress of the reaction. Adding an appropriate amount of Mo will cause the aluminothermic reaction to occur again. The Exothermic reaction temperature of the self-propagating reaction system with all added phases is about 100°C lower than that of the aluminothermic reaction, and the weight loss at high temperature is at least 1.33%. The optimal ratio is: the cooling gas pressure is 0.2 MPa, the mass fraction of the added phase is 6%, and the mass fraction of thermite is 94%.

Keywords aluminum thermal reaction; coating; self propagating reaction; temperature; additives ●



(责任编辑 王丽娜)