

浇注温度对 304 不锈钢/纯铝复合材料界面组织及性能的影响

马 科¹ 李元东^{1,2} 邱 谨¹ 周宏伟¹ 曹 驰^{1,3}
(1.兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室;
2.兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室; 3.兰州理工大学温州泵阀工程研究院)

摘 要 采用热浸镀铝工艺对不锈钢管表面进行镀铝处理,再用固-液复合铸造法制备 304 不锈钢/纯铝管状复合材料,用 SEM 观察复合界面的微观形貌,结合 EDS 与 XRD 物相检测对复合材料结合界面的物相成分与分布进行分析,并测试其显微硬度、抗拉强度和剪切强度。结果发现,随着浇注温度提高,界面处裂纹消失,结合层厚度逐渐增加。界面处形成金属间化合物,主要以 FeAl₃ 和 Fe₂Al₅ 相为主,Fe 和 Al 的含量在界面附近呈现相反的阶梯梯度分布,且存在一个稳定的台阶。随浇注温度升高,纯铝基体的硬度基本保持稳定,304 不锈钢基体的硬度有所降低。抗拉强度和剪切强度都呈现出先上升后下降的趋势,当浇注温度为 740 ℃时抗拉强度和剪切强度均达到最大,分别为 512.3 MPa 和 41.6 MPa。

关键词 复合铸造;浇注温度;界面组织;力学性能

中图分类号 TG339;TG146.21;TG142 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Pouring Temperature on Interfacial Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel/Pure Aluminum Composites

Ma Ke¹, Li Yuandong^{1,2}, Qiu Jin¹, Zhou Hongwei¹, Cao Chi^{1,3}
(1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology; 2.Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology; 3.Wenzhou Pump and Valve Engineering Research Institute of Lanzhou University of Technology)

Abstract: The surface of stainless steel tube was aluminized by hot dip aluminizing process, and the 304 stainless steel/pure aluminum tubular composite was prepared by solid-liquid compound casting method. The microstructure of compound interface was observed by SEM, and the composition and distribution mode of bonding interface were analyzed by EDS and XRD physical phase detection, and the microhardness, tensile strength and shear strength of the composites prepared were tested. The results indicate that the cracks at the interface disappear and the thickness of the bonding layer is gradually increased with the increase of pouring temperature. Intermetallic compounds are formed at the interface, which is dominated by FeAl₃ and Fe₂Al₅ phases, and Fe and Al content present an opposite gradient distribution near the interface with a stable step. The hardness of pure aluminum matrix remains basically stable, while that of 304 stainless steel matrix is decreased with the increase in casting temperature. Both of tensile strength and shear strength show a trend of increasing and then decreasing, which reach the maximum of 512.3 MPa and 41.6 MPa, respectively, when the pouring temperature is 740 ℃.

Key Words: Compound Casting, Pouring Temperature, Interface Microstructure, Mechanical Properties

科技的飞速发展对材料性能的要求越来越高,传统的单一材料经常出现性能无法满足要求的问题^[1-3]。双金属复合材料可将多种不同金属的优良性能综合并发挥各自的优势^[4],近年来受到了研究者的广泛关注,并

收稿日期:2022-10-07;修改稿收到日期:2022-11-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52261010)
第一作者简介:马科,男,1996 年出生,硕士研究生,兰州(730050),E-mail:846171376@qq.com
通信作者:李元东,男,1971 年出生,教授,兰州(730050),E-mail:liy_d_lut@163.com
引用格式:马科,李元东,邱谨,等. 浇注温度对 304 不锈钢/纯铝复合材料界面组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(3): 325-330.
MA K, LI Y D, QIU J, et al. Effects of pouring temperature on interfacial microstructure and properties of 304 stainless steel/pure aluminum composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3): 325-330.

已被应用于航空航天、汽车、化工等领域^[5-7]。

双金属复合材料的制备方法包括轧制^[8-9]、铸轧^[10-11]、爆炸焊^[12]、搅拌摩擦焊^[13]、粉末冶金^[14]、铸造复合^[15]等。固-液复合铸造的原理是将一种液态金属直接浇到另一种固态金属表面,使固-液界面金属原子相互扩散形成冶金结合,从而提升结合强度,满足使用要求。固-液复合铸造相比于其他复合材料制备方法,具有加工工艺简单、对异种金属材料特性要求宽泛、生产成本低、界面结合强度高等特点,可以生产出形状复杂的铸件,并可通过调整工艺参数对界面反应产物进行调控,以实现复合铸件的有效连接。陈天赐等^[16]研究表明,随着浇注温度升高,界面处的缺陷会逐渐消失,溶质扩散更加充分并出现过渡区。张跃^[17]采用型内感应加热工艺制备铝/钢双金属复合材料,对其进行检测分析,发现所得到的双金属复合铸件形成了完全的冶金结合。复合层生成连续的金属间化合物,其成分为 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 ,界面结合强度为 76.4 MPa。BAO Z 等^[18]采用复合铸造法制备铝/镀镍钢双金属,中间层靠近钢侧为 Fe_2Al_5 ,靠近铝侧为 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 。在 760 ℃保温 15 min 时中间层出现最高的剪切强度,为 13.4 MPa。

不锈钢有高强度和良好的可加工性,铝具有优良的导热性、导电性、塑性以及质量轻等特点,其双金属材料已应用于电解、造船、轻工、冶金、原子能等工业工程领域,同时当前能源的紧缺使各类机械部件的轻量化越来越受到关注^[19],而铝/不锈钢双金属复合材料制备汽车发动机缸体等零件可以减轻其质量,同时保证其他性能,具有广阔的使用价值。目前,大多研究是采用固液铸轧方式制备铝/钢复合板,而对于能够制备其他形状的复合铸造工艺研究关注较少,其中关于铝液浇注温度对复合铸造双金属界面性能影响的报道更少。因此,本研究选用不同温度的纯铝熔液作为浇注材料,用 304 不锈钢作为基体材料,通过复合铸造的方式制备铝/钢复合管材,进而探索界面微观组织与其力学性能之间的联系,为铝/钢复合材料的研究提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为纯铝(质量分数>99.99%)和 3 mm 厚的方形 304 不锈钢管。钢管(外壁)尺寸为 50 mm×50 mm×60 mm,预先在钢管表面热浸镀一层纯铝,热浸镀工艺流程为打磨-除油-碱洗-酸洗-助镀(NH_4Cl)-烘干-热浸镀-空冷。纯铝与 304 不锈钢的化学成分见表 1。

首先将适量的纯铝锭放置于 SG2-7.5-10 井式电阻炉中熔化。当温度达到 740 ℃时用质量分数为 1%的 C_2Cl_6 进行精炼、除杂,静置后,调整温度至 700、740 或

表 1 304 不锈钢与纯铝的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 304 stainless steel and

pure aluminum											%
材料	w_B										
	Al	Cu	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe	
304	—	—	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00~20.00	8.00~11.00	余量	
Al	99.99	0.005	—	—	—	—	0.003	—	—	0.002	

780 ℃。将热浸镀铝处理过的钢管放在温度为 300 ℃的电炉中预热 20 min,再将其放入砂型中,把铝液浇入,待凝固后将双金属取出。制备的铝/钢双金属复合材料液固体积比为 6.9 : 1。

从复合管材上分别选取金相试样、拉伸试样和剪切试样,用 240~2000 目砂纸打磨,并用金刚石抛光剂抛光,用 FEG-450 场发射扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对试样结合界面微观组织和元素分布进行观察和分析。使用 D/max-2400 型 X 射线衍射仪(XRD)检测复合界面的金属间化合物种类。使用 HV-100 型显微硬度计测量试样的显微硬度。使用 WDW-100D 型万能电子材料试验机进行拉伸和剪切试验,拉伸速率为 0.5 mm/min。拉伸试样与剪切试样尺寸见图 1。

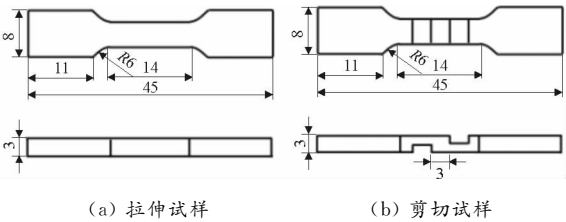


图 1 拉伸试样和剪切试样

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen and shear specimen

2 试验结果与分析

2.1 304 不锈钢/纯铝复合材料界面的微观形貌

图 2 为不同浇注温度下 304 不锈钢/纯铝复合管结合界面的 SEM 形貌。可以看出,在不同温度下,不锈钢与纯铝都实现了冶金结合,但复合界面处的扩散情况有所不同。其扩散主要可以分为两个部分,一部分是钢基体与纯铝之间产生的结合层,结合层在靠近铝侧与铝相连接的界面处为不规则形状,主要呈絮状,还有部分区域出现不同程度起伏的锯齿状,而结合层靠近钢侧的界面比较平整;另一部分是铝基体靠近结合层的一侧,出现析出相,这些析出相是由 Fe 原子扩散到 Al 液中而形成的。

3 种浇注温度下,都发生了扩散反应并生成了结合层。在 700 ℃时,在结合层金属间化合物内部出现了较宽且连续的缝隙,在铝基体内也出现了较长的裂纹,结合层中无法观察到不同相区之间的分界线,Fe 原子扩

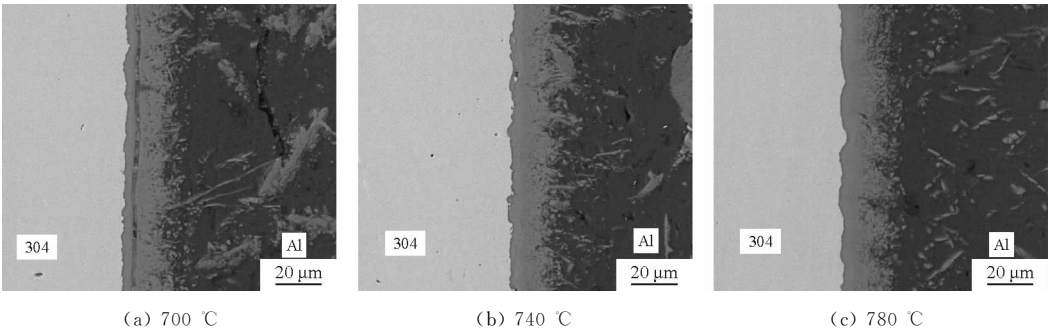


图 2 不同浇注温度下不锈钢/纯铝复合界面的微观组织

Fig.2 Microstructure of stainless steel/pure aluminum compound interface at different pouring temperatures

散在铝基体中形成了细长的析出相。当浇注温度升高至 740 °C 时,结合层金属化合物中没有出现大范围裂纹,可以观察到不同相区之间的分界线,铝基体中有部分小的裂纹和缩孔,依然有细长的析出相形成。浇注温度为 780 °C 时,结合层靠近铝侧呈现弥散分布的团絮状,铝基体中存在少数缩孔,析出相变多且分布更加均匀。随着浇注温度升高,界面层厚度没有表现出明显的增长趋势,不同浇注温度下界面处结合层的厚度为 15~30 μm。

在 700 °C 浇注时,复合界面结合层中出现裂纹,这些裂纹主要是由于浇注温度较低所造成的。纯铝熔液与不锈钢基体表面的镀铝层接触时,不锈钢表面的镀铝层会熔化一定的厚度,从而实现两种金属的冶金结合。当浇注温度较低时,不锈钢表面只能熔化很薄的一层并与铝液结合在一起,其结合力较小,而在随后铝液凝固收缩过程中,靠近钢基体一侧的 FeAl₃ 相温度低,其收缩量大,靠近铝熔体一侧的温度高,收缩量小,因此会在

FeAl₃ 相内部形成热应力,此时结合力小于热应力,而 FeAl₃ 相具有硬度高、塑性低的特点,因此这一部分应力只能以裂纹的形式来消耗。产生裂纹的另一个原因是复合材料中两种金属的线膨胀系数差别比较大,所以在凝固过程中收缩量不同,因而会产生很大的应力,造成复合材料中出现裂纹。随着浇注温度升高,冶金结合层的厚度也增加,界面之间结合力增大,因此界面的裂纹逐渐减少并消失。同时当浇注温度较低时,原子所能获得的能量较少,因此只有一部分原子可以发生扩散,当浇注温度升高时,更多的原子获得足够的能量以发生扩散,生成更宽的结合层。

2.2 304 不锈钢/纯铝复合材料界面的元素分布

图 3 为 304 不锈钢/纯铝复合管界面处的 BSED 图像与 EDS 线扫描结果。可以看出,不同温度下铝/钢复合界面区的 Al、Fe 两种元素分布情况大致相同,均在过渡区呈现台阶状,在靠近钢的一侧 Fe 含量高,而在靠近纯铝熔体一侧 Al 含量高。在结合界面附近,Fe 和

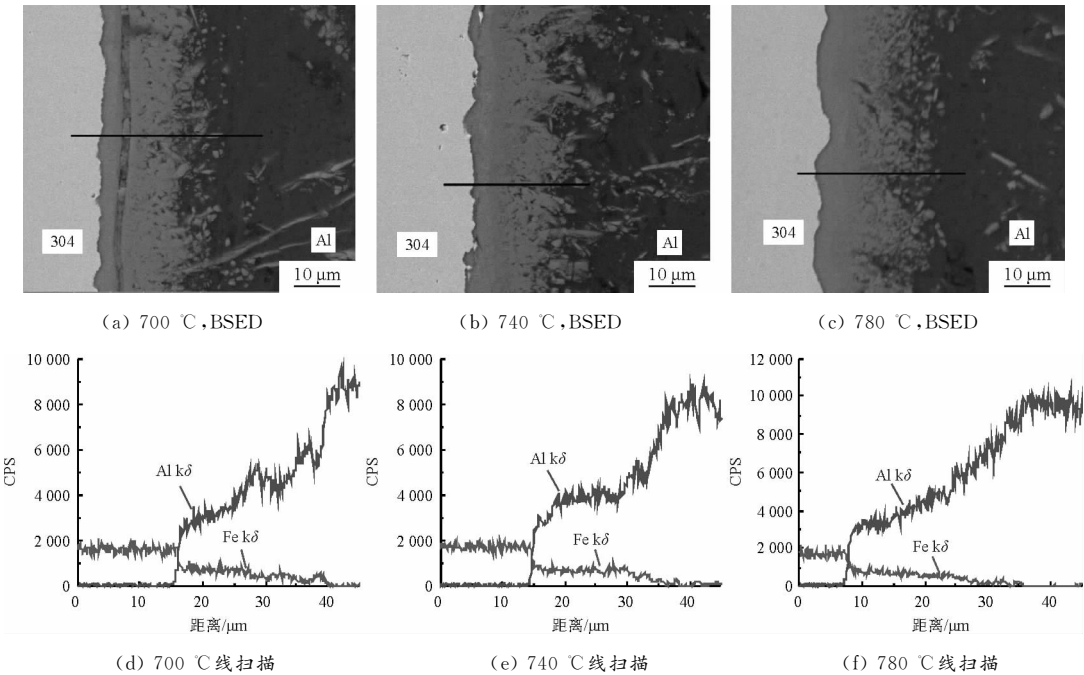


图 3 不同浇注温度下铝/钢复合界面 BSED 图和线扫描

Fig.3 BSED images and linear scanning results of aluminum/steel compound interface at different pouring temperatures

Al 的含量分布情况相反,并在远离 Al 一侧的区域形成了过渡。说明二者在结合界面处发生了相互扩散,形成了冶金结合,但由于 Fe、Al 的互溶度很低,所以 Al 从 Fe 基体到扩散层时的过渡迅速,其含量产生一个突变。经过突变以后其分布曲线出现一个平缓的平台,说明在该区域形成了稳定的金属间化合物。当浇注温度为 700 ℃ 时,复合界面的结合品质较差,在界面处存在裂纹,其形成稳定金属间化合物的区域最小,在稳定的平台区域结束后,产生一个凸起的阶段,说明在靠近结合层附近的铝基体中有析出相产生,导致该处成分的突变,之后在靠近铝基体一侧,Al 发生突变,其斜率最大,说明其变化速率很大。浇注温度升高至 740 ℃ 时,其曲线与 700 ℃ 时大致相同,但稳定的平台区域变宽,在经历平台区后依然有成分的突变,但是 Al 含量向铝基体变化时的曲线斜率变小,速率减缓。当浇注温度升高至 780 ℃ 时,Al 含量的变化过程更加平缓,稳定平台区的宽度进一步变宽,其界面结合层相较之前更加致密,在平台区过后没有低温时的成分突增突减的现象,从稳定的金属间化合物区域向铝基体过渡时,Al 含量的变化曲线的斜率最小,说明其变化最平缓。

图 4 是浇注温度分别为 700、740 和 780 ℃ 时铝/钢复合界面的 XRD 图谱。扫描范围为 20°~100°,扫描速率为 10°/min。根据 KOBAYASHI S 等^[20]的研究,铝/钢复合材料在界面处发生冶金结合时形成 Fe_xAl_y 型金属间化合物,这些化合物一般为 Fe_3Al 、 $FeAl$ 、 $FeAl_2$ 、 $FeAl_3$ 和 Fe_2Al_5 相。结合苗鹏等^[21]的研究,发现浇注温度为 700 ℃ 时,在界面处形成的金属间化合物主要有 $FeAl_3$ 、 Fe_2Al_5 、 $FeAl$ 、 $FeAl_2$ 和 Fe_3Al 等,在该温度时, $FeAl_3$ 含量最高,这是由于 $FeAl_3$ 的生成焓最低。因此,当 Al 液与 Fe 基体接触时 $FeAl_3$ 便优先形核从铝液中析出,并逐渐变厚,而 Fe_2Al_5 含量则相对较低,当浇注温度升高至 740 ℃ 时,能检测到的金属间化合物种类没有发生变化,但其含量出现了改变,其中

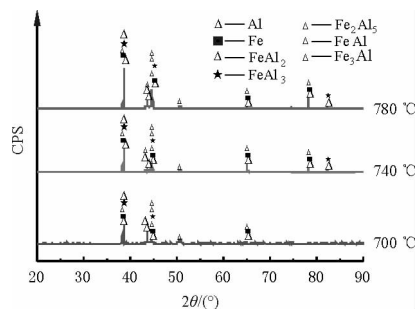


图 4 不同浇注温度铝/钢复合材料界面 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of Al/steel compound interface at different pouring temperatures

$FeAl_3$ 和 Fe_2Al_5 的含量均有所提高,同时 $FeAl_2$ 的含量也有一定程度的增加。当浇注温度为 780 ℃ 时,金属间化合物的种类没有发生变化,但是 Fe_2Al_5 和 $FeAl_2$ 相的含量显著增加,这主要是由于温度升高时钢基体表面附近 Fe 原子的活性增加,扩散到更远的距离,形成更厚的 $FeAl_3$ 相扩散层,同时在靠近钢基体一侧的 $FeAl_3$ 相表面出现 Fe_2Al_5 相区,在随后的反应中还可以进一步生成 Fe_2Al_5 相和 $FeAl_2$ 相。

2.3 304 不锈钢/纯铝复合材料界面的显微硬度

图 5 为 304 不锈钢/纯铝复合管界面处沿垂直界面方向上的显微硬度。从不锈钢一侧依次向纯铝一侧加载,载荷为 10 N,加载 15 s。结果发现,在不同浇注温度下,其显微硬度变化趋势一致,在不锈钢一侧和纯铝一侧的显微硬度基本保持稳定。不锈钢基体的平均显微硬度(HV)为 276.7,纯铝的平均显微硬度(HV)为 38.1,而在界面处,显微硬度发生突变。随着浇注温度的升高,结合界面的显微硬度(HV)由 700 ℃ 时的 535.1 增高至 780 ℃ 时的 643.2。结合界面的硬度变化主要是由于温度升高之后结合层的厚度增加, $FeAl_3$ 和 Fe_2Al_5 等硬脆相增多,且其与基体的结合更加致密,弥散区域减小,因此硬度更高,而在不锈钢基体一侧,随着浇注温度升高,其硬度有小幅下降,浇注温度为 700 ℃ 时,钢侧平均显微硬度(HV)为 283.4,浇注温度为 780 ℃ 时,显微硬度(HV)降至 267.8。其原因是由于铝液的浇注温度升高使不锈钢软化,进而使得材料硬度降低。

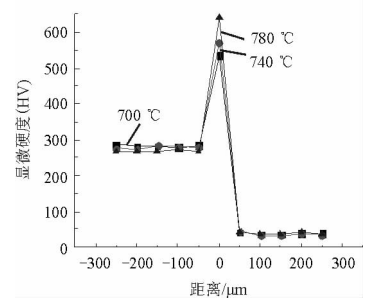


图 5 不同浇注温度下铝/钢复合材料界面处硬度
Fig.5 Hardness of aluminum/steel composites at the interface under different pouring temperatures

2.4 浇注温度对复合材料抗拉强度与剪切强度的影响

图 6 为不同浇注温度下制备的 304 不锈钢/纯铝复合材料在室温下的抗拉强度和剪切强度。可以看出,当浇注温度从 700 ℃ 升高至 780 ℃ 时,复合材料的抗拉强度和剪切强度都是先升高再降低,在 700 ℃ 时,复合材料的抗拉强度和剪切强度均为最低,分别为 451.5 MPa 和 27.9 MPa。当浇注温度升高至 740 ℃ 时,抗拉强度和剪切强度都达到最大值,分别为 512.3 MPa 和 41.6 MPa,对比浇注温度为 700 ℃ 时的性能分别提升了

13.5%和49.1%。当浇注温度为780℃时,抗拉强度和剪切强度分别为420.3 MPa和31.5 MPa,相较最高抗拉强度和剪切强度,分别下降了17.9%和24.2%。

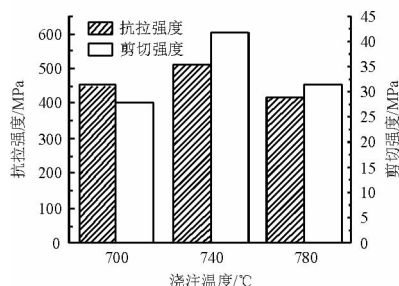


图6 不同浇注温度下铝/钢复合材料的抗拉强度与剪切强度

Fig.6 Tensile strength and shearing strength of aluminum/steel composites at different pouring temperatures

当浇注温度为700℃时,纯Al液中含的热量较少,在与Fe基体接触后,只能将Fe基体表面很薄的一层熔化,导致发生扩散的原子较少,其冶金结合能力不强。当浇注温度升高时,Al液中含有更多的热量,有更多的原子可以吸收能量发生扩散,从而在界面处Al和钢可以形成良好的冶金结合。且由于此时的温度并没有产生过厚的结合层,其反应界面处硬脆的金属间化合物含量较低,故在该温度下,硬脆的金属间化合物对复合材料产生的负面影响远小于铝/钢复合界面发生冶金结合所带来的强度提升作用,因此此时复合材料的性能达到最佳。当浇注温度提升到780℃时,Al液可以提供充足的能量使更多Fe原子进行扩散,在界面处发生充分的冶金反应,生成大量连续致密的金属间化合物,而这些金属间化合物多以 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 等硬脆相存在,这些硬脆相很容易在界面处产生裂纹,从而发生断裂,使复合材料的强度下降。

界面在复合材料中起着重要的协调变形作用^[21],使得复合材料不会轻易开裂。当浇注温度较低时,界面处发生很少的扩散,在受力时由于Al、钢的性能存在较大差异,很容易在界面处开裂,而浇注温度过高时,扩散充分,产生较厚的扩散层,并生成大量的硬脆相,使复合材料的协调变形作用下降。因此在制备复合材料时需要避免在界面产生大量连续的有害金属间化合物。

3 结 论

(1)纯铝浇注温度为700℃时,Al/钢复合材料结合较差,在复合界面处出现裂纹。随着浇注温度升高,复合材料的结合质量显著提高,其结合层厚度随着浇注温度的升高无明显增加趋势,不同浇注温度下界面处结合层的厚度为15~30 μm。

(2)复合材料中Fe和Al的含量在界面附近的分

布呈现相反的阶梯梯度,在结合层中存在一个稳定的台阶,随着浇注温度升高,Al的变化趋势逐渐平缓,在结合层中形成的金属间化合物主要有 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 。

(3)复合材料的显微硬度(HV)在不锈钢基体和Al基体中都趋于稳定,结合层中硬度大于两侧基体的硬度。随着浇注温度升高,结合层的硬度也呈现升高的趋势,而不锈钢基体的硬度则随着浇注温度升高而降低,纯Al基体的硬度(HV)随浇注温度的变化基本保持不变,平均为38.1,浇注温度为780℃时,结合层中的硬度(HV)最高,为643.2。

(4)随浇注温度提高,复合材料的抗拉强度和剪切强度先上升后下降,740℃时性能最佳,抗拉强度与剪切强度分别为512.3 MPa和41.6 MPa。

参 考 文 献

- [1] 杨金鹏,吴孟武,陆文兴,等.复合铸造工艺及机理研究进展[J].特种铸造及有色合金,2020,40(9):964-970.
- [2] 裴蒙蒙,齐会萍,秦芳诚,等.双金属复合环形构件制造技术研究进展[J].铸造技术,2021,42(1):53-60.
- [3] 郑巧玲,李烨飞,王国亮,等. TiB_2 陶瓷/Cr15基复合材料界面结合研究[J].铸造技术,2021,42(6):486-489.
- [4] 辜诚,程进,闻福林,等.固-液复合铸造制备双金属复合材料的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2022,42(6):681-687.
- [5] 闫可安,许天早,韩礼红,等.双金属复合管的研究现状与发展趋势[J].化工技术与开发,2020,49(10):45-50.
- [6] WANG Z J, ZHAI L, MA M, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of Al/Al laminated composites fabricated by hot rolling[J]. Materials Science & Engineering, 2015, A644: 194-203.
- [7] LIU B X, HUANG L J, GENG L, et al. Effects of reinforcement volume fraction on tensile behaviors of laminated Ti-TiB_w/Ti composites[J]. Materials Science & Engineering, 2014, A610(29): 344-349.
- [8] LI X B, ZU G Y, WANG P. Microstructural development and its effects on mechanical properties of Al/Cu laminated composite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(1): 36-45.
- [9] 祁梓豪,余超,肖宏,等.异温轧制制备钛/铝复合板的变形协调性与复合性能[J].中国有色金属学报,2018,28(6):1120-1127.
- [10] GRYDIN O, GERSTEIN G, NÜRNBERGER F, et al. Twin-roll casting of aluminum-steel clad strips[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(4): 501-507.
- [11] HAGA T, SUZUKI S. A twin-roll caster to cast clad strip[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2003, 138(1): 366-371.
- [12] XIE M X, ZHANG L J, ZHANG G F, et al. Microstructure and mechanical properties of CP-Ti/X65 bimetallic sheets fabricated by explosive welding and hot rolling[J]. Materials & Design, 2015, 87: 181-197.
- [13] LI B, SHEN Y F, LUO L, et al. Effects of processing variables and heat treatments on Al/Ti-6Al-4V interface microstructure of bi-metal clad-plate fabricated via a novel route employing friction stir lap welding[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 658: 904-913.

多粒径颗粒对石墨烯/铝基复合材料组织及性能的影响

解 双^{1,2} 张宇博^{1,2,3} 刘嘉鸣^{1,2} 李廷举^{1,2,3}

(1.大连理工大学材料科学与工程学院;2.辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室;3. 大连理工大学宁波研究院)

摘 要 采用球磨和真空热压烧结结合的工艺制备石墨烯增强铝基(Gr/Al)复合材料,研究不同粒径铝粉混合对复合材料微观组织和力学性能的影响。结果表明,利用球体最密堆积原理设计的多粒径铝粉混合, M_1 ($1\text{ }\mu\text{m}$: $10\text{ }\mu\text{m}$ 按 $1:1.5$ 混合)和 M_2 ($10\text{ }\mu\text{m}$ 与 $100\text{ }\mu\text{m}$ 按 $1:1.5$ 混合)的致密度均高于单一粒径的试样(S), M_2 致密度达到96.2%。 M_1 试样抗拉强度和伸长率相较于S试样有所降低, M_2 试样抗拉强度和伸长率均提高,其中伸长率提升31.8%。多粒径混合可促进分散小粒径铝粉和石墨烯,有效降低孔隙率,在减少原始颗粒界面的同时增加裂纹扩展路径,大尺寸粒径颗粒的加入使得复合材料的塑性大幅提升。

关键词 混合粒径;Gr/Al复合材料;微观组织;力学性能

中图分类号 TB331;TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Multi-size Particle on the Microstructure and Properties of Graphene Reinforced Al-matrix Composites

Xie Shuang^{1,2},Zhang Yubo^{1,2,3},Liu Jiaming^{1,2},Li Tingju^{1,2,3}

[1. School of Materials Science and Engineering,Dalian University of Technology;
2.Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology(Liaoning Province);
3.Ningbo Institute of Dalian University of Technology]

Abstract:Effects of Al powders with different particle sizes on the microstructure and mechanical properties of graphene reinforced aluminum matrix(Gr/Al) composites fabricated by ball milling and vacuum hot-pressing sintering were investigated. The results indicate that the relative density of M_1 ($1\text{ }\mu\text{m}$: $10\text{ }\mu\text{m}$ = $1:1.5$ mixture) and M_2 ($10\text{ }\mu\text{m}$: $100\text{ }\mu\text{m}$ = $1:1.5$ mixture) of multi-size aluminum powder mixture designed by sphere densest packing principle is higher than that of S specimen ($10\text{ }\mu\text{m}$) with single size, where the density of M_2 reaches 96.2%. The tensile strength and elongation of M_1 are lower than that of S specimen, while those of M_2 are increased, where the elongation is enhanced by 31.8%. The multi-size mixture can effectively disperse small aluminum powders and graphene,reduce the porosity, and add the crack propagation path with the reduction of the original particle interface, consequently resulting in the enhanced plasticity.

Key Words: Multi-size,Gr/Al Composites,Microstructure,Mechanical Properties

收稿日期:2022-04-25;修改稿收到日期:2022-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51971048);大连理工大学重点实验室科研专题资助项目(DUT20LAB141)

第一作者简介:解双,女,1997年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail:xieshuang0429@163.com

通信作者:张宇博,男,1985年出生,副教授,辽宁大连(116024),E-mail:ybzhang@dlut.edu.cn

引用格式:解双,张宇博,刘嘉鸣,等.多粒径颗粒对石墨烯/铝基复合材料组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(3):330-335.
XIE S,ZHANG Y B,LIU J M, et al. Effects of multi-size particle on the microstructure and properties of graphene reinforced Al-matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):330-335.

[14] 温亚辉,李长亮,张清,等.粉末粒度对钨钼双金属性能影响[J].稀有金属,2016,40(11):1188-1192.

[15] LIU Y,BIAN X F,ZHANG K,et al.Interfacial microstructures and properties of aluminum alloys/galvanized low-carbon steel under high-pressure torsion[J].Materials & Design, 2014, 64(9): 287-293.

[16] 陈天赐,李元东,李明,等.对固-液轧制 A356/2024 板材复合界面的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(3):295-299.

[17] 张跃.型内感应加热钢/铝双金属复合成型工艺[D].郑州:郑州大学,2007.

[18] BAO Z,WANG S, HAN R H, et al. Structure and mechanical properties of aluminum/ steel bimetal using compound casting with electroless nickel plating[J].Materials Research Express, 2021, 8 (1): 016 517.

[19] 闫可安,许天早,韩礼红,等.双金属复合管的研究现状与发展趋势[J].化工技术与开发,2020,49(10):45-50.

[20] KOBAYASHI S,YAKOU T.Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment[J].Materials Science& Engineering, 2002, A338(1-2): 44-53.

[21] 苗鹏,李元东,王慧,等.A356 浇覆温度对铝/钢复合板界面组织及力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2020,30(4):728-738.

(编辑:刘卫)