

# 蜂窝壁厚对 ZTA<sub>p</sub>/高锰钢构型复合材料强度的影响

周谟金, 王楠, 隋育栋, 蒋业华

(昆明理工大学机电工程学院 先进凝固成形及装备技术国家地方联合工程实验室, 云南昆明 650500)

**摘要:** ZTA陶瓷颗粒在粘结剂作用下形成具有蜂窝柱和蜂窝壁结构陶瓷预制体, 与熔融的高锰钢金属液复合后获得ZTA<sub>p</sub>/高锰钢构型复合材料。研究控制蜂窝结构中蜂窝柱参数不变, 调节蜂窝壁尺寸大小, 获得蜂窝柱/蜂窝壁不同比值的复合材料。通过测定复合材料抗压强度及屈服强度指标, 得到复合材料蜂窝柱与蜂窝壁的最佳比值, 为复合材料结构设计提供参考。

**关键词:** 复合材料; 抗压强度; ZTA颗粒; 蜂窝结构

陶瓷颗粒增强金属基复合材料是指在金属基体中加入增强相陶瓷颗粒以提高材料的硬度、弹性模量及耐磨性, 获得具有高模量和高熔点的复合材料, 其在研究和工业应用中日益受到重视<sup>[1]</sup>。对于矿山、水泥、电力等行业, 传统的耐磨铸件难以满足现代生产需要, 具有更高耐磨性的陶瓷颗粒增强金属基复合材料越来越受到青睐。K Kambakas利用双重金属复合铸造的方法获得WC颗粒增强高铬铸铁层状复合材料, 其耐磨性较高铬铸铁提高了10倍左右<sup>[2]</sup>。ZHOU Rong利用真空负压技术获得不同体积分数WC陶瓷颗粒增强铁基层状复合材料, 认为在WC体积分数为36%时, 复合材料的磨损率最低, 耐磨性能是高铬铸铁的2.93倍<sup>[3]</sup>。ZHANG Guoshang采用化学镀的方法在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒表面镀活性镍, 并利用粉末冶金方法获得Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒增强钢基层状复合材料, 颗粒表面处理与未处理的相应复合材料耐磨性分别是高锰钢的2.5倍及1.6倍<sup>[4]</sup>。对于传统的增强陶瓷颗粒如WC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>C、SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>等, 由于其本身硬度高、脆性大, 同时存在与金属基体复合后出现颗粒溶解, 与金属基体发生反应影响颗粒的自身稳定性能, 或者存在由于陶瓷颗粒与金属基体热匹配性差, 造成颗粒的破碎等现象, 不适合产品规模化生产。

氧化锆增韧氧化铝(ZTA)陶瓷颗粒, 氧化锆(ZrO<sub>2</sub>)作为增韧相存在于颗粒中, 起到提高颗粒韧性作用。在高温条件下, 氧化锆的相变稳定了颗粒高温性能<sup>[5-8]</sup>。因此, 将其作为增强体用于增强钢铁基复合材料的研究日益成为新的热点。DU Jun采用有限元法模拟高铬铸铁金属熔液浸渗ZTA陶瓷颗粒, 通过工艺优化获得最佳浇注温度为1 843 K以及浇注速度为0.2 m/s<sup>[9]</sup>。Qiu B通过挤压铸造技术获得ZTA陶瓷颗粒增强高铬铸铁复合材料, 其耐冲击磨料磨损性能较高铬铸铁有所提高<sup>[10]</sup>。ZHENG Kaihong利用铸渗的方法获得了ZTA陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料, 预制体采用蜂窝结构使复合区域厚度达到20 mm<sup>[11]</sup>。RU Juanjian采用化学离子镀的方法在ZTA陶瓷颗粒表面镀层活性Ni, 利用铸渗工艺获得ZTA陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料, 三体磨料磨损性能结果表明, ZTA颗粒处理后复合材料的耐磨性较未处理的性能好<sup>[12]</sup>。刘侃等人采用Fe-Ti作为粘结剂, 采用粉末冶金的制备工艺制备出ZTA多孔陶瓷预制体, 通过浇注工艺获得ZTA颗粒增强高铬铸铁基复合材料, 得出Ti元素存在有利于复合材料界面性能提升<sup>[13]</sup>。

陶瓷颗粒增强金属基体复合材料制备方法通常是将陶瓷颗粒制备成预制体, 使预制体与熔融的金属基体复合, 从而获得相应的复合材料。因此, 预制体的结构不仅影响复合材料的铸渗效果, 而且对复合材料的力学性能产生重要影响。本文将ZTA

## 作者简介:

周谟金(1988-), 男, 博士, 从事金属基耐磨复合材料研究工作。

E-mail:631795569@qq.com

## 通讯作者:

蒋业华, 男, 博士, 教授。

E-mail: jiangyehua@kmust.edu.cn

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

01-0074-05

## 基金项目:

昆明理工大学自然科学研究基金资助项目(KKS201901004)。

## 收稿日期:

2020-05-25 收到初稿,

2020-08-12 收到修订稿。

陶瓷颗粒制备成蜂窝结构陶瓷预制体并与高锰钢金属基体复合获得ZTA陶瓷颗粒增强高锰钢基复合材料。通过研究蜂窝结构预制体蜂窝芯与蜂窝壁不同尺寸比例,获得复合材料的抗压强度及屈服强度。

## 1 试验方法

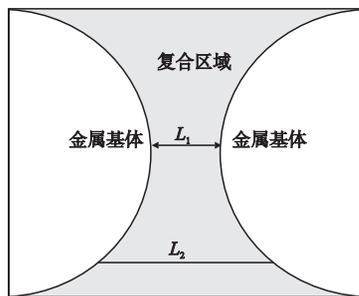
### 1.1 材料制备

选用ZTA陶瓷颗粒作为增强体,其中 $ZrO_2$ 含量为25%, $Al_2O_3$ 为73%,颗粒为150~180  $\mu m$ ,表面为非规则状,陶瓷颗粒的性能如表1所示。将ZTA陶瓷颗粒与

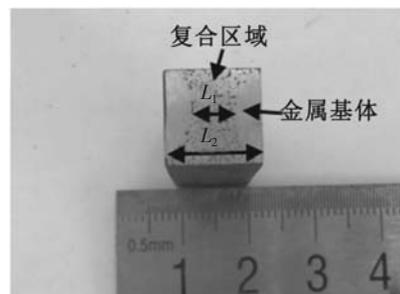
还原铁粉按质量比4:6进行混合,向混合物中加入粘结剂后填充到模具型腔中,从而获得所需形状的陶瓷预制体。将陶瓷预制体放入砂箱型腔中,浇注熔融的高锰钢(0.93% C, 13% Mn, 1.82% Cr, 0.8% Si)金属溶液,获得所需要的ZTA陶瓷颗粒增强高锰钢基复合材料。其中,金属熔液采用中频感应电炉进行熔炼,浇注温度为1 600  $^{\circ}C$ 。所制备的陶瓷预制体的形状选用圆柱形蜂窝结构,蜂窝壁(Wall)及蜂窝柱(Core)的结构如图1,尺寸如表2所示。

表1 ZTA25陶瓷颗粒物理参数  
Table 1 ZTA25 ceramic particle physical properties

密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	堆积密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	晶粒尺寸/ $\mu m$	熔点/ $^{\circ}C$	维氏硬度/GPa
4.3	2.0~2.4	17	1 950	21



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 复合材料结构

Fig. 1 Composite structure

### 1.2 检测手段

采用光学显微镜(LEICA EZ4D, OM)对复合材料金相组织进行观察,扫描电子显微镜(ZEISS EVO18, SEM)观察复合材料微观结构。洛氏硬度采用HR-150A台式硬度测量仪测量,压缩性能采用万能试验机。预制体孔隙率测量采用阿基米德原理,介质为无水乙醇。

## 2 结果与讨论

复合材料的性能与预制体的强度及孔隙率有着直接的关系,强度不够或孔隙率过低,容易造成复合区域出现铸渗不到位、缩孔等缺陷。不同预制体所测孔隙率及预制体的强度结果如图2所示。在保证蜂窝芯尺寸不变的条件下,随着蜂窝壁尺寸的增加,预制体的孔隙率降低,其抗压强度随之增加。蜂窝构型的存在,造成不同预制体的孔隙率与理论值产生偏差及预制体强度上发生改变。

高锰钢金属基体与预制体复合后所得复合材料实物图如图3所示。良好的预制体强度保证金属液在浸渗过程中抵抗金属液的冲击,使复合后预制体结构保持了完整性。

表2 复合材料预制体尺寸  
Table 2 Preform size of composites

试样号	蜂窝柱 $L_2/mm$	蜂窝壁 $L_1/mm$	$L_2/L_1$
N <sub>1</sub>	12	3	4
N <sub>2</sub>	12	5	2.4
N <sub>3</sub>	12	7	1.71
N <sub>4</sub>	12	9	1.33
N <sub>5</sub>	12	11	1.09
N <sub>6</sub>	12	13	0.92

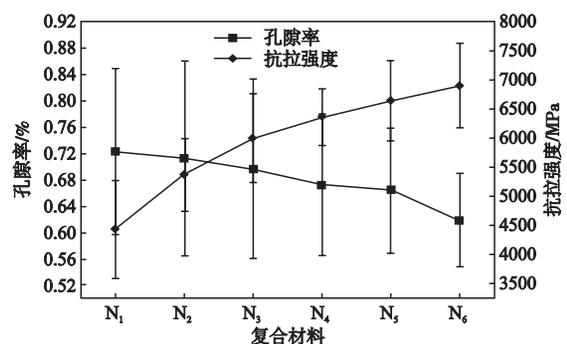


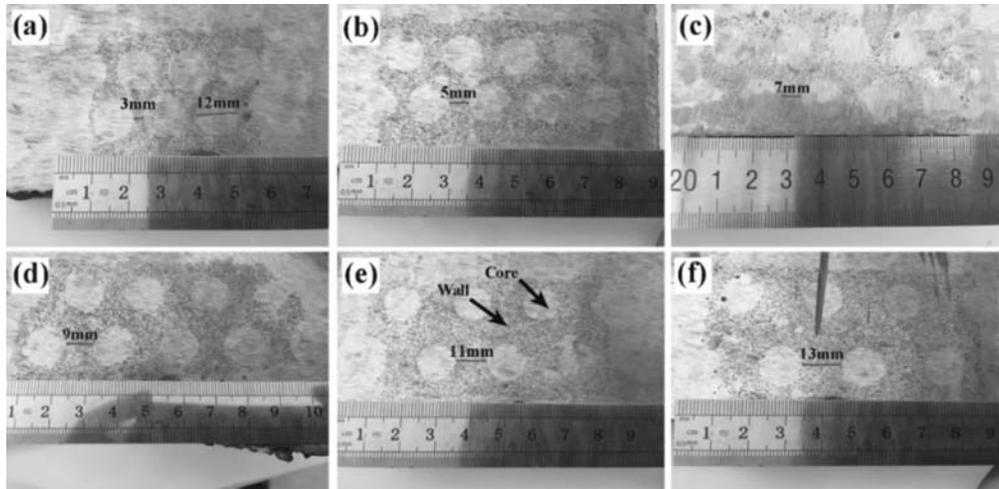
图2 复合材料预制体孔隙率与抗压强度

Fig. 2 Porosity and compressive strength of perform in composites

图4为复合材料复合区域的金相组织及硬度值。复合材料的硬度随着预制体结构尺寸参数的变化而发生改变,在HRC 41.7~46.3间波动,变化区间不大。结合金相图结果可得,相比较其他几种构型复合材料,  $N_3$  试样中的陶瓷颗粒分布较为均匀。对于试样  $N_1$  和  $N_2$ , 结合图2中的抗压强度及预制体的孔隙率可知,由于蜂窝芯与蜂窝壁的比值大,金属液在充型铸渗过程中对蜂窝壁的冲击作用大,蜂窝壁中的陶瓷颗粒间的结合强度低,在冲击作用下容易团聚在一起。而对于试样  $N_4$  和  $N_5$  而言,其孔隙率低,预制体强度高,在金属液浸渗过程中,金属液充型浸渗产生的压力不足以完全冲散颗粒之间的结合,造成了颗粒的团聚。金属基体包围着细小的颗粒,金属凝固过程中以颗粒的粗糙表面为形核质点,促进形核,从未对颗粒周围金属基体在性能(硬度)上产生影响。

构型参数的变化不仅对预制体的强度产生影响,对所得复合材料的抗压强度及屈服强度产生明显的改变,复合材料应力应变曲线如图5所示,其最大抗压强度结果如表3所示。从中可知,随着  $L_2/L_1$  比例值的增加,压缩强度及屈服强度先增大后减小,在比值为1.71时达到最高值。

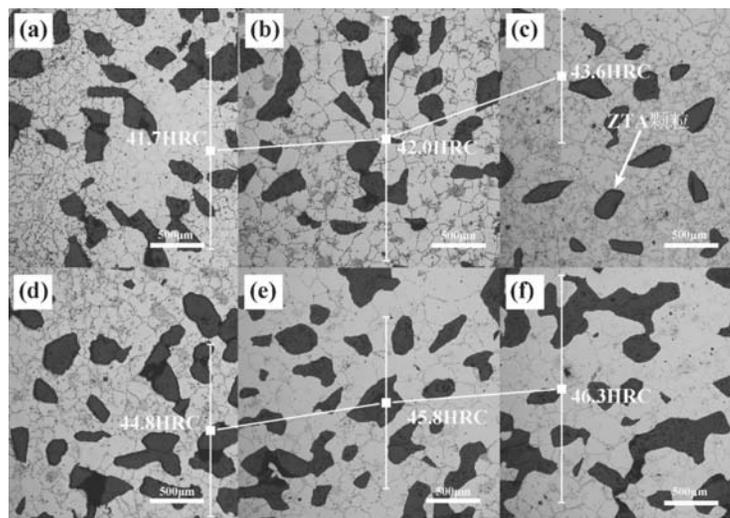
图6为不同  $L_2/L_1$  比值复合材料抗压强度试样SEM形貌图。陶瓷颗粒与金属基体由于热膨胀系数相差大,两者在结合处特别是陶瓷颗粒尖角处容易形成应力集中,形成裂纹源。在外加载荷作用下,裂纹从裂纹源处开始萌生并沿着金属及陶瓷颗粒进行扩展。金属基体中的裂纹遇到陶瓷颗粒时,由于陶瓷颗粒与金属基体的结合处通常是结合较弱区域,裂纹将沿着颗粒周围的界面处进行扩展。从各个试样裂纹扩展途径可以得出,复合材料中裂纹扩展方式主要是沿着陶瓷颗粒



(a)  $N_1$ ; (b)  $N_2$ ; (c)  $N_3$ ; (d)  $N_4$ ; (e)  $N_5$ ; (f)  $N_6$

图3 复合材料的宏观形貌

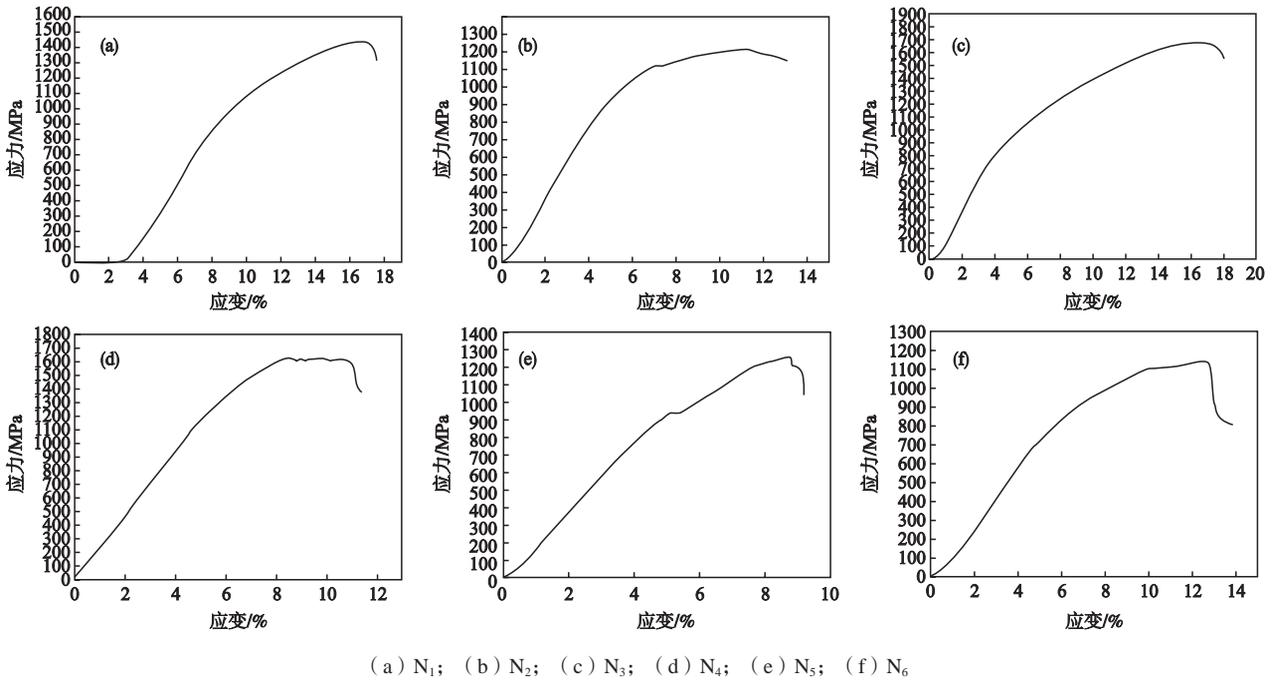
Fig. 3 Macro-morphology of composites



(a)  $N_1$ ; (b)  $N_2$ ; (c)  $N_3$ ; (d)  $N_4$ ; (e)  $N_5$ ; (f)  $N_6$

图4 复合材料金相组织及其平均硬度

Fig. 4 Metallographic structure and average hardness of composites



(a) N<sub>1</sub>; (b) N<sub>2</sub>; (c) N<sub>3</sub>; (d) N<sub>4</sub>; (e) N<sub>5</sub>; (f) N<sub>6</sub>

图5 复合材料应力应变曲线

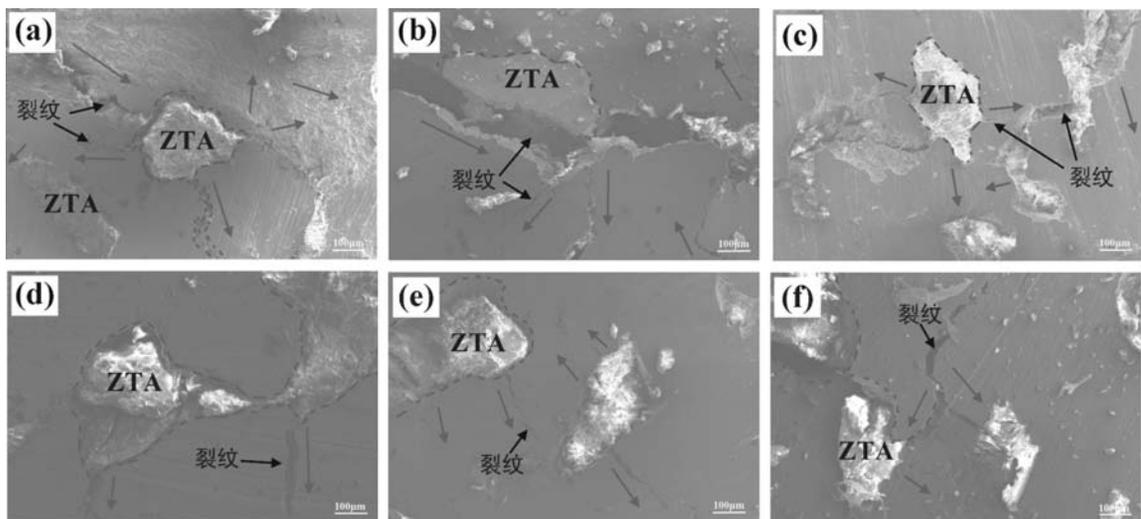
Fig. 5 Stress-strain curves of composites

周围界面进行扩展，而并没有裂纹沿着颗粒内部进行扩展。结合复合材料的压缩强度及金相图结果可知，团聚的颗粒相互堆积处容易形成浸渗缺陷及应力集中。裂纹在扩展过程中该区域不能很好地阻止裂纹的扩展，从而降低复合材料的综合力学性能。而对于颗粒分布较为均匀的复合材料而言，每个颗粒都有金属基体包围，相对于团聚颗粒而言，分散均匀的颗粒在裂纹扩展过程中能够阻碍裂纹的快速扩展，使裂纹进一步扩展需要更多的能量，由此提高复合材料的强度。

表3 复合材料压缩性能

Table 3 Compressive properties of composites

样品	抗压强度/MPa	屈服强度/MPa
N <sub>1</sub>	1 442.47	871
N <sub>2</sub>	1 213.4	893
N <sub>3</sub>	1 679.98	950
N <sub>4</sub>	1 624.91	908
N <sub>5</sub>	1 257.44	781
N <sub>6</sub>	1 142.09	690



(a) N<sub>1</sub>; (b) N<sub>2</sub>; (c) N<sub>3</sub>; (d) N<sub>4</sub>; (e) N<sub>5</sub>; (f) N<sub>6</sub>

图6 复合材料压缩后裂纹扩展形貌

Fig. 6 Crack propagation morphology of composites after compression

### 3 结论

(1) 不同 $L_2/L_1$ 值条件下的复合材料的硬度随之增加而增大; 抗压强度及屈服强度随之增加先增大后减小, 在比值为1.71时达到最大值, 分别为1 679.98 MPa、950 MPa。

(2) 复合材料中颗粒在金属基体分布均匀有利于阻碍裂纹的扩展, 提高复合材料的综合力学性能。

#### 参考文献:

- [1] 田山雪, 涂小慧, 杨浩.  $Al_2O_3$ 陶瓷增强高锰钢基复合材料耐磨性能的研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (5): 476-480.
- [2] KAMBAKAS K, TSAKIROPOULOS P. Solidification of high-Cr white cast iron-WC particle reinforced composites [J]. Materials Science & Engineering A, 2005, s413: 538-544.
- [3] ZHOU Rong, JIANG Yehua, LU Dehong. The effect of volume fraction of WC particles on erosion resistance of WC reinforced iron matrix surface composites [J]. Wear, 2003, 255: 134-138.
- [4] ZHANG Guoshang, GAO Yimin, XING Jiandong. The Effects of nickel-plating on  $Al_2O_3$  particles reinforced steel matrix composites [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 117: 777-781.
- [5] KOJI T, MASAHIKO S. Thermal stability of  $Y_2O_3$ -partially stabilized zirconia (Y-PSZ) and Y-PSZ/ $Al_2O_3$  composites [J]. Journal of Materials Science Letters, 1985, 4 (7): 857-861.
- [6] OKAD K, KAMESHIMA Y, MUTOH H. Preparation of Y-TZP/ $Al_2O_3$  whisker preform by an in situ, method [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29 (15): 4081-4085.
- [7] SUI Yudong, HANG Lina, JIANG Yehua. Effect of  $Ta_2O_5$  addition on the microstructure and mechanical properties of  $TiO_2$ -added yttria-stabilized zirconia-toughened alumina (ZTA) composites [J]. Ceramics International, 2018, S0272884218312550.
- [8] WANG J, STEVENS R. Zirconia-toughened alumina (ZTA) ceramics [J]. Journal of Materials Science, 1989, 24 (10): 3421-3440.
- [9] DU J, CHONG Xiaoyu, JIANG Yehua. Numerical simulation of mold filling process for high chromium cast iron matrix composite reinforced by ZTA ceramic particles [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 89: 872-883.
- [10] QIU B, XING S M, DONG Q. Wear behaviour of iron matrix composite reinforced by ZTA particles in impact abrasion [J]. 2017, 269 (1): 012028.
- [11] ZHENG Kaihong, GAO Yiming, LI Yefei. Three-body abrasive wear resistance of iron matrix composites reinforced with ceramic particles [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part J-journal of engineering tribology, 2013, 228 (1): 3-10.
- [12] RU Juanjian, JIANG Yehua, ZHOU Rong. Preparation of Ni-encapsulated ZTA particles as precursors to reinforce iron-based composites [J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19 (11): 1700268.
- [13] 刘侃, 徐方伟, 涂小慧. ZTA颗粒增强高铬铸铁基复合材料界面研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (5): 398-403.

## Effect of Honeycomb Wall Thickness on Strength of $ZTA_p$ /High-Manganese Steel Structural Composites

ZHOU Mo-jin, WANG Nan, SUI Yu-dong, JIANG Ye-hua

(National-Local Joint Engineering Laboratory for Technology of Advanced Metallic Solidification Forming and Equipment, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

#### Abstract:

The ZTA ceramic particles formed a ceramic preform with a honeycomb core and wall structure under the action of binder, and then the preform was compounded with the molten high-manganese steel metal liquid to obtain the ZTAP/high-manganese steel structure composite material. In this study, the honeycomb core parameters were controlled and the size of the honeycomb wall was adjusted to obtain the composites with different ratios of honeycomb core/honeycomb wall. The optimal ratio of honeycomb core to honeycomb wall in the composites was obtained by testing the compressive strength and yield strength of the composites, which provides a reference for the structure design of composites.

#### Key words:

composites; compressive strength; ZTA particles; honeycomb structure