

# 压铸 SiC/6061Al 复合材料表皮层、孔洞的形成机理及其对力学性能的影响

胡启耀<sup>1,2</sup> 郭文波<sup>1</sup> 肖 鹏<sup>1</sup> 赵海东<sup>2</sup>

(1.南昌航空大学航空制造工程学院; 2.华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心)

**摘 要** 进行了 SiC/6061Al 复合材料真空辅助压铸试验,研究了表皮层和不同壁厚试样内部孔洞的形成机理,并探讨了其对试样力学性能的影响。结果表明,不同壁厚试样均存在厚度约为 0.5 mm 的表皮层,2 mm 厚试样以分散的气孔为主,壁厚增大为 4 mm 后,孔洞转变为以气缩孔为主,并形成了大尺寸缩孔,孔洞集中于试样轴线心部区域。拉伸过程中,大尺寸缩孔易诱发试样脆性断裂,而处于表皮层中的颗粒易引起表皮层脆性破坏,导致试样力学性能下降。

**关键词** 金属基复合材料;真空压铸;表皮层;孔洞特征;力学性能

**中图分类号** TB331;TG249.2 **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2021.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Formation Mechanism of Surface Layer and Pores, and Their Effects on the Mechanical Properties of HPDC(High Pressure Die Casting) SiC/6061Al Composites

Hu Qiyao<sup>1,2</sup>, Guo Wenbo<sup>1</sup>, Xiao Peng<sup>1</sup>, Zhao Haidong<sup>2</sup>

(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University; 2.National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Materials, South China University of Technology)

**Abstract:** A vacuum-assisted die-casting experiments of SiC/6061 composites were carried out, and the formation mechanism of the surface layer and the internal pores of samples with different wall thicknesses, and their influence on the mechanical properties of the samples were investigated. The results show that there exists a surface layer with a thickness of about 0.5 mm in the samples with different wall thicknesses, and the 2 mm wall thickness samples are dominated by scattered gas pores. When the wall thickness is increased to 4 mm, the pores are dominated by gas-shrinkage pores. Large-sized shrinkage pores are discovered, and most of pores are concentrated in the central area of the sample axis. During the tensile test process, large shrinkage pores can induce brittle fracture of the sample, and the internal particles can cause brittle failure of the surface layer, resulting in a decrease in the tensile properties of the HPDC SiC/6061 composites.

**Key Words:** Metal Matrix Composites, Vacuum Assisted Die Casting, Surface Layer, Pore Characteristics, Mechanical Properties

颗粒增强铝基复合材料(PAMCs)自产生以来,主要应用于航天与军事领域,而在民用领域的应用报道很少,除价格因素外,主要是由于所添加的增强颗粒具有高强度、高硬度的特性,导致 PAMCs 的后续切削加工难度大,生产成本低<sup>[1,2]</sup>。压铸技术具有生产效率高,产品品质好及后续加工少的特点,广泛应用于铝及镁合金铸件的大批量生产<sup>[3,4]</sup>。采用搅拌铸造法批量制备

PAMCs 熔体,并利用压铸技术实现其近净成形,可减少后续切削加工以降低成本,对于 PAMCs 的推广与应用具有积极的意义。

压铸工艺较为复杂,导致压铸组织与普通铸造组织差异较大。压铸充型过程中,金属熔体由压室进入型腔后,与型壁接触发生激冷,形成由细晶组成的表皮层(亦称激冷层)。通常认为表皮层具有细晶材料的特性,可

收稿日期:2020-10-21;修改稿收到日期:2020-11-20  
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA031201);江西省自然科学基金资助项目(20192BAB206003);博士科研启动基金资助项目(EA201803210);华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心开放基金资助项目(DT201803376);江西省金属材料微结构调控重点实验室开放基金资助项目(EJ201903061)  
第一作者简介:胡启耀,男,1983 年出生,讲师,南昌(330063),E-mail:huqiyao2008@163.com  
引用格式:胡启耀,郭文波,肖鹏,等. 压铸 SiC/6061Al 复合材料表皮层、孔洞的形成机理及其对力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):420-425.  
HU Q Y, G W E B, X I A O P, et al. Formation mechanism of surface layer and pores, and their effects on the mechanical properties of HPDC (high pressure die casting) SiC/6061Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):420-425.

提高铸件的力学性能,但也有研究指出其对铸件性能的影响较小<sup>[5,6]</sup>。关于表皮层的形成,研究表明其主要受充型过程中熔体与型壁的碰撞方式及铸件的凝固顺序影响,直接碰撞时表皮层不易产生,而间接碰撞、回流及优先凝固的边缘区域易形成表皮层<sup>[7]</sup>。此外,压铸过程中熔体在高压下高速充填型腔,容易发生卷气并形成孔洞缺陷。大量研究表明,孔洞缺陷减少了材料的有效承载面积,且大尺寸孔洞容易诱发铸件断裂失效导致力学性能下降<sup>[8,9]</sup>,而采用真空辅助压铸技术可有效减少孔洞缺陷,提高铸件的力学性能<sup>[10]</sup>。

与基体铝合金相比,PAMCs 的密度、粘度及传热系数均有较大变化<sup>[11,12]</sup>,因此压铸工艺对 PAMCs 铸件组织与性能的影响存在较大差异。但是,目前关于 PAMCs 压铸成形的研究报道较少,针对压铸 PAMCs 表皮层、孔洞缺陷及其对力学性能影响的研究未见报道。因此,本课题开展了 PAMCs 真空辅助压铸试验,了解压铸 SiC/6061Al 复合材料表皮层、孔洞缺陷的形成机理,并探讨表皮层及孔洞缺陷对铸件力学性能的影响。

1 试验材料与方法

选择平均粒径为 50  $\mu\text{m}$  的 SiC 颗粒作为增强相,选择商用 6061 铝合金作为基体材料,其化学成分见表 1。图 1 为 SiC/6061Al 复合材料压铸试验装置。利用自主研发的 PAMCs 搅拌装置制备(见图 1a),采用半固态搅拌铸造法制备 SiC/6061 复合材料熔体,详细步骤见参考文献[13],制备出 SiC 体积分数为 10% 的 SiC/6061Al 复合材料熔体 65 kg。

表 1 6061 铝合金的化学成分

| Tab.1 Chemical compositions of 6061 aluminum alloys % |       |      |      |      |      |       |      |    |
|-------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|-------|------|----|
| $w_B$                                                 |       |      |      |      |      |       |      |    |
| Si                                                    | Fe    | Cu   | Mn   | Mg   | Zn   | Cr    | Ti   | Al |
| 0.79                                                  | 0.043 | 0.37 | 0.14 | 1.35 | 0.01 | 0.002 | 0.21 | 余量 |

SiC/6061Al 复合材料压铸浇注温度设定为 720  $^{\circ}\text{C}$ ,模具温度设定为 190  $^{\circ}\text{C}$ ,其他工艺参数见参考文献

[14],并利用真空辅助工艺防止卷气。采用 TOYO BD-360V4-T 冷室压铸机进行压铸试验,试验得到的 SiC/6061Al 复合材料压铸件见图 1b。从铸件上取壁厚为 2、4、6、8 mm 和宽度均为 6 mm 的拉伸试样,利用阿基米德排水法对试样的孔隙率进行检测,采用 SHI-MADZU AG-X 100KN 拉伸试验机进行拉伸试验,测试温度为室温,拉伸速率为 2 mm/min。每组壁厚测试 5 根拉伸试样然后计算出平均值,用以评价该工艺条件下的拉伸性能。利用 YXLON Precision SX-CT 对铸件进行了三维 X 射线断层扫描分析,采用 VGStudio MAX 3.0 软件对结果数据进行处理以获取孔洞的三维形貌。采用 FEI Quanta 200 环境扫描电镜(SEM)观察增强颗粒的分布及拉伸断口形貌。



(a) PAMCs 制备装置 (b) SiC/6061Al 复合材料压铸件

图 1 SiC/6061 复合材料压铸试验装置

Fig.1 The preparation apparatus and samples of HPDC SiC/6061 composites

2 试验结果与讨论

2.1 表皮层的形成及对增强颗粒分布的影响

图 2 为压铸 SiC/6061Al 复合材料不同壁厚试样的微观组织。可以看出,不同壁厚试样心部均存在少量的 SiC 颗粒团聚现象,试样外层组织中存在较厚的表皮层,且表皮层内部颗粒较为稀少,见圆圈标记处。这与文献[15]的研究结果相似,其发现  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al-Si}$  压铸件外层颗粒体积分数低而内部体积分数高。此外,由图 2c 和图 2d 可以看出,铸件心部存在缺陷带<sup>[16]</sup>,但缺陷带的宽度较窄,且等效半径较小。

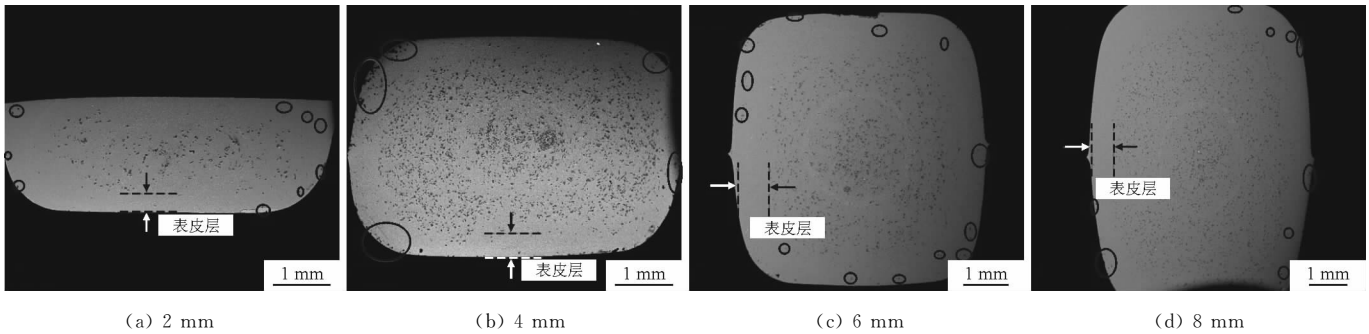
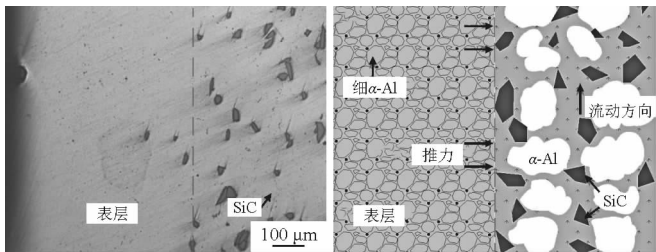


图 2 压铸 SiC/6061Al 复合材料不同壁厚试样的微观组织

Fig.2 The microstructures of the HPDC SiC/6061Al composites with different wall thicknesses

图 3 为 SiC/6061Al 复合材料压铸试样表皮层的金相组织及其对增强颗粒分布的影响机理。由图 3a 可知,表皮层中仅存在少量 SiC 颗粒,其厚度约为 0.5 mm。但是,发现在相同工艺条件下, SiC/A356Al 复合材料铸件不存在表皮层,详细可参见文献[14]。由此可见,表皮层的形成与基体合金的类型有关。分析发现 6061 铝合金的液相线温度为 653 ℃,而 A356 铝合金的液相线温度为 617 ℃,两者相差 36 ℃。因此,在相同的模具温度及浇注温度条件下,6061 铝合金熔体更容易获得较大的过冷度,在型壁处形成大量晶核,同时由于试样冷却速度较大,形成的晶核来不及长大,导致试样表面形成了激冷晶组织即表皮层。表皮层的形成对 SiC 颗粒的分布存在重要影响,表皮层中 SiC 颗粒较少。这是由于表皮层的形成能够将靠近型壁的颗粒推向试样内部,造成增强颗粒向铸件内部运动,图 3b 为表皮层对颗粒分布的作用机理。此外,表皮层对压铸件的耐压耐腐蚀性能、气密性、机加工及力学性能有重要影响[17]。



(a) 表皮层组织 (b) 作用机理  
图 3 表皮层组织及其对 SiC 颗粒分布的作用机理

Fig.3 The outer microstructures of the samples and the action mechanism of the surface layer on the SiC particle distribution

## 2.2 心部孔洞特征及其形成机理研究

图 4 为不同壁厚 SiC/6061Al 复合材料压铸试样孔洞的 X-CT 检测结果,图 5 为孔洞的数目与平均圆整度。结合图 5 和图 6 可以看出,试样中的孔洞包括气孔、气缩孔和缩孔 3 种类型[14]。其中 2 mm 壁厚试样中的孔洞分布范围较大,远离内浇口端出现了大尺寸的缩孔,孔洞的数目为 1178,平均圆整度为 0.51,表明试

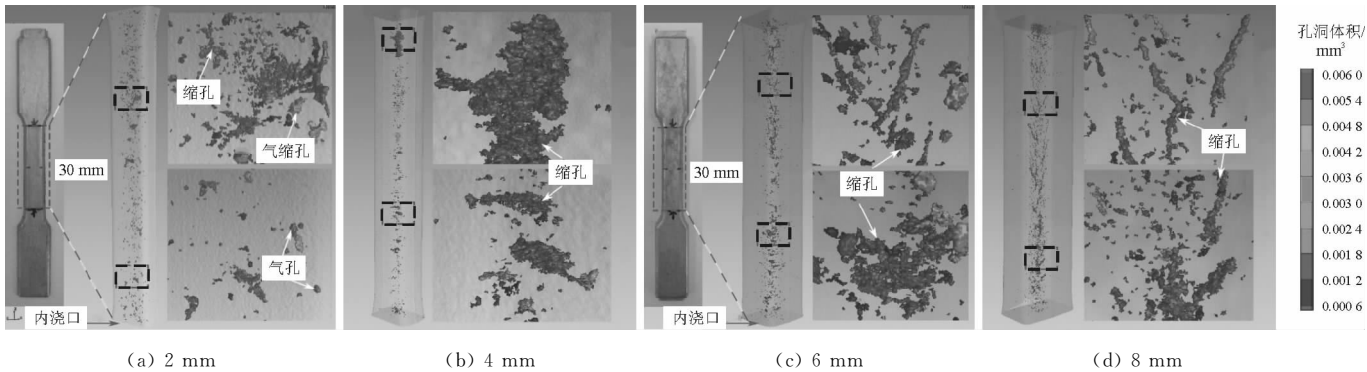


图 4 不同壁厚 SiC/6061Al 复合材料压铸试样孔洞的 3D 形貌与分布特征

Fig.4 The pores' distribution and characteristics of SiC/6061 composites with different wall thicknesses

样中的孔洞以气孔为主。4 mm 厚试样中的孔洞分布主要集中于试样轴心部,且在远离内浇口端出现较大尺寸的缩孔,孔洞的数目为 864,平均圆整度为 0.49,表明试样中的孔洞以气缩孔为主。6 mm 试样中大尺寸的缩孔数量明显增加,且出现少量的长条状缩孔,8 mm 试样中长条状缩孔数量明显增加,且这些长条状缩孔与充型方向均存在一定的夹角,孔洞数目由 1 684 个急剧增大至 2 324 个。对于孔洞数目与分布的变化,研究表明,增压压力对气孔压缩作用明显,能够显著减少气孔数量[18]。但是,由于试验试样壁厚为 2 mm 时,试样凝固时间较短,导致大量气孔来不及被压缩。壁厚增大为 4 mm 后,延长了增压压力的作用时间,绝大多数气孔被压缩从而导致孔洞数量明显下降。但同时,由于颗粒对增压压力的传递存在一定的阻碍作用及熔体固相率的增大[14],导致增压压力的有效作用降低而形成大量缩孔。因此,随着试样壁厚增加,孔洞数目先减小后增

大,并逐渐向试样轴线心部区域集中。

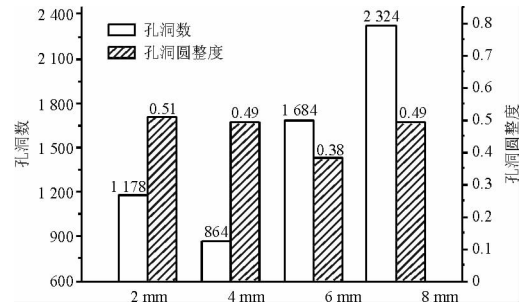


图 5 不同壁厚 SiC/6061Al 复合材料孔洞数目与圆整度  
Fig.5 The pores' numbers and average sphericity of the as-prepared SiC/6061 composites with different wall thicknesses

图 6 为 6061 铝合金基体固相率与温度关系曲线,条状缩孔形成机理。对于长条状的孔洞,壁厚为 6 mm 和 8 mm 时,试样心部可观察到大尺寸的长条状的缩孔,这是由于 6061 铝合金结晶温度范围较宽,为 528~653 ℃,且在 640 ℃ 以下将获得较大的固相率(>54%),

见图 6a,导致大壁厚铸件心部区域趋于糊状凝固方式。研究表明,增压压力作用产生的切应力,能够促使半固态晶粒发生相对运动产生间隙,并最终形成缺陷带<sup>[16]</sup>。本研究中增压压力所产生的切应力,会促使心部区域残余液相在半固态晶粒间向充型方向流动,受  $\alpha$ -Al 和 SiC 颗粒阻碍作用,流动方向发生偏转,部分残余液相形成了长条状的小熔池,最后由于补缩困难,凝固收缩后便形成了长条状缩孔,见图 6b。

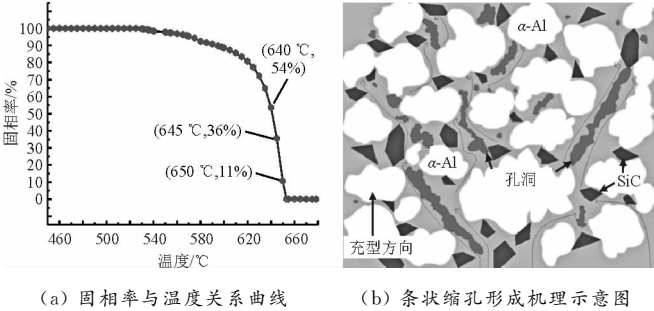


图 6 6061 基体合金固相率与温度关系曲线、条状缩孔形成机理  
Fig.6 The relationship of solid-phase rate and the temperature of 6061 aluminum alloy and the formation mechanism of long strip shrinkage pores

2.3 表皮层及孔洞对力学性能的影响

图 7 为压铸 SiC/6061Al 复合材料的力学性能、孔隙率及大尺寸孔洞数目的关系。可见等效超过 100  $\mu$ m 的孔洞对压铸件的力学性能影响最大<sup>[19,20]</sup>,因此利用 X-CT 分析结果,统计出等效超过 100  $\mu$ m 孔洞的数目进行研究。从图 7 可以看出,壁厚为 4 mm 时复合材料抗拉强度为 228 MPa,壁厚为 8 mm 时伸长率为 6.5% ;

壁厚为 2 mm 时,抗拉强度及伸长率分别为 196 MPa 和 4.5%。与文献[21,22]相比,本研究试样的孔隙率远高于铝合金真空压铸水平(约 0.4%),这可能是由于相比基体铝合金,复合材料粘度较大,而传热系数有所降低的缘故。与文献[23]采用挤压铸造法制备的 SiC/6061Al 复合材料相比,抗拉强度的范围比较接近,但伸长率明显提高。另外,从图 7 可以看出,SiC/6061Al 复合材料抗拉强度、孔隙率及大尺寸孔洞数目的变化规律相反,即随着孔隙率及大尺寸孔洞数目增大,抗拉强度下降。而伸长率的变化趋势不明显,这是由于壁厚为 2 mm 时,截面面积较小,在心部大尺寸孔洞的影响下更容易过早发生脆断;而随着壁厚增大,孔洞对截面面积的减小作用相对下降,因而伸长率有所提高并呈现出波动性。

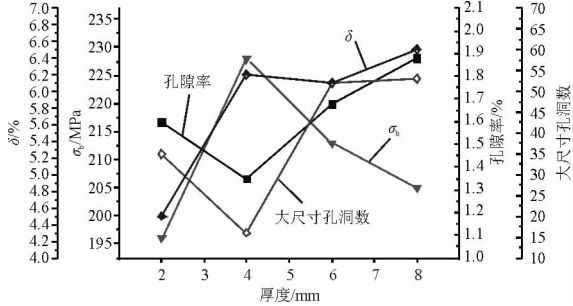


图 7 压铸 SiC/6061Al 复合材料试样的力学性能、孔隙率及大尺寸孔洞数目的关系  
Fig.7 The relationship between the mechanical properties of the HPDC SiC/6061Al composites with the sample's porosity and the number of large-sized pores

图 8 为不同壁厚压铸 SiC/6061Al 复合材料试样的

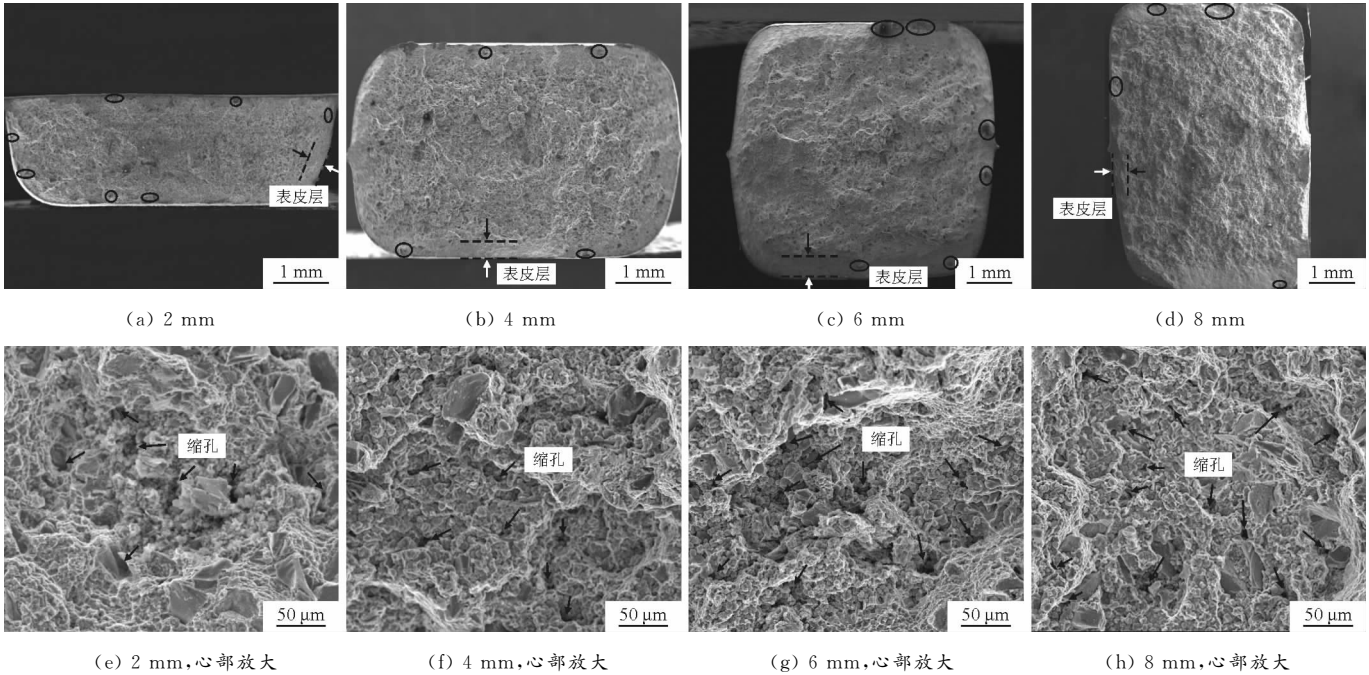


图 8 不同壁厚压铸 SiC/6061 复合材料的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies of the HPDC SiC/6061Al compositesamples with different wall thicknesses

拉伸断口形貌。从图 8a~图 8d 可以看出,试样拉伸断口较为平坦,表明试样断裂方式趋于脆性断裂。从图 8e~图 8h 可以看出,不同壁厚试样断口心部存在较明显的孔洞(见图中标记处),心部大尺寸孔洞诱发试样脆性断裂,而分散的孔洞促进了裂纹扩展。不难发现,上述断口形貌特征印证了图 7 中抗拉强度与孔隙率及大尺寸孔洞数目关系所呈现出的规律。

此外,从图 8a~图 8d 还可以看出,表皮层断裂面较平坦,其中在 6 mm 和 8 mm 壁厚试样中尤为明显,表皮层断裂面较宽阔而平坦。相关研究表明,表皮层与试样内部基体组织相比,其硬度较高,具有较大的脆性<sup>[24]</sup>。在本研究中,由于表皮层中存在少量的 SiC 颗粒(见图 2),破坏了细晶组织的连续性,且这些微米级颗粒尺寸与细晶晶粒尺寸相差较大,受力过程中容易导致应力集中。因此,其效果类似于夹渣物,导致表皮层脆性破坏,并由此显著降低试样截面有效作用面积。综上所述,为提高 PAMCs 的力学性能,应尽可能地减少表皮层的厚度,防止表皮层引起的脆性断裂。

### 3 结 论

(1)对于 SiC/6061Al 复合材料,由于基体 6061 铝合金的液相线温度较高,其压铸试样容易形成较厚的表皮层(约 0.5 mm);表皮层的形成过程中能够将 SiC 颗粒向内部推挤,导致表皮层中 SiC 颗粒较少。

(2)壁厚对压铸 SiC/6061Al 复合材料中孔洞的类型、数目及分布均有重要影响,壁厚为 2 mm 时试样凝固时间较短,大量气孔未能被增压压力压缩而分布于整个铸件;壁厚增大为 4 mm 时,增压压力作用时间延长,绝大多数气孔被压缩,孔洞类型转变为以气缩孔为主且缩孔数目明显增大,并集中于试样轴线心部区域;壁厚增大为 6 mm 后,试样心部区域倾向于糊状凝固,在增压压力的影响下形成了一定数目的条状缩孔。

(3)试样心部大尺寸孔洞容易成为断裂源,而分散的孔洞促进了裂纹的扩展,导致压铸 SiC/6061Al 复合材料试样脆断力学性能偏低,抗拉强度的变化与孔隙率及大尺寸孔洞数目关系呈相反的规律。

(4)处于表皮层中的少量颗粒破坏了细晶组织的连续性,且受力过程中容易产生应力集中,导致表皮层脆性破坏,也降低了试样的力学性能。综上所述,为提高压铸 SiC/6061Al 复合材料的力学性能,应优化压铸工艺、选择适当的铝合金基体,以降低孔隙率及大尺寸孔洞数目,控制表皮层的厚度。

### 参 考 文 献

[1] ZHOU L, WANG Y, MA Z Y, et al. Finite element and experi-

mental studies of the formation mechanism of edge defects during machining of SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 84: 9-16.

- [2] SUTHAR J, PATEL K M. Processing issues, machining, and applications of aluminum metal matrix composites[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33(5): 499-527.
- [3] LIU T, MORALES S, KARKKAINEN M, et al. The combined effects of Sr additions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of high pressure die cast A383 alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A756: 373-380.
- [4] ZHANG Y, PATEL J B, WANG Y, et al. Variation improvement of mechanical properties of Mg-9Al-1Zn alloy with melt conditioned high pressure die casting[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 498-504.
- [5] 顾金声, 崔越男. 对压铸件力学性能的思考[A]. 2005 年中国压铸、挤压铸造、半固态加工学术年会[C]. 重庆, 2005.
- [6] 钱万选. 提高压铸件品质的举措[J]. 特种铸造及有色合金, 2004(3): 52-54.
- [7] 白砚飞, 赵海东, 吴兆基, 等. 压铸件的表层微观组织及其形成分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S1): 739-742.
- [8] 董普云, 赵海东, 张璟, 等. 高速列车制动装置中气室压铸件 ADCI 疲劳失效起因分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(8): 731-733.
- [9] 杨润生, 赵海东, 李史华, 等. 压铸 ADC12 转向器数值模拟及微观孔洞的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(1): 70-74.
- [10] 张钰笔, 李德江, 胡斌, 等. 真空度对压铸 AZ91D 镁合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(1): 52-55.
- [11] GAN G S, YANG B, GAO Q, et al. Microstructure and viscosity of particles reinforced 7075 Al matrix composites[J]. Materials Transactions, 2016, 57(8): 1 296-1 299.
- [12] POZDNIAKOV A V, LOTFY A, QADIR A, et al. Development of Al-5Cu/B<sub>4</sub>C composites with low coefficient of thermal expansion for automotive application[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A688: 1-8.
- [13] HU Q Y, ZHAO H D, LI F D. Effects of manufacturing processes on microstructure and properties of Al/A356-B<sub>4</sub>C composites[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31: 1 292-1 300.
- [14] HU Q Y, ZHAO H D, LI F D. Microstructures and properties of SiC particles reinforced aluminum-matrix composites fabricated by vacuum-assisted high pressure die casting[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A680: 270-277.
- [15] ZHANG Z, CHEN X G, CHARETTE A. Particle distribution and interfacial reactions of Al-7Si-10B<sub>4</sub>C die casting composite[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42: 7 354-7 362.
- [16] 吴孟武, 侯莹滢, 李晓波, 等. 压铸镁合金缺陷带的组织特征及形成机理[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(2): 117-122.
- [17] CHEN Z W. Skin solidification during high pressure die casting of Al-11Si-2Cu-1Fe alloy[J]. Materials Science Engineering, 2003, A348(1-2): 145-153.
- [18] LI X B, YU W B, WANG J S, et al. Influence of melt flow in the gating system on microstructure and mechanical properties of high pressure die casting AZ91D magnesium alloy[J]. Materials Science Engineering, 2018, A736: 219-227.

Ti-25Nb 合金 BP 神经网络本构模型的建立

欧阳旭 王克鲁 吴俊慷 彭辉权  
(南昌航空大学航空制造工程学院)

**摘 要** 采用 Gleeble-3500 型热模拟试验机对 Ti-25Nb 合金进行等温恒应变速率压缩试验,研究合金在 470~620 ℃,0.001~10 s<sup>-1</sup> 条件下的流动应力行为,并基于 BP 神经网络建立合金的本构模型。结果表明,Ti-25Nb 合金的真应力具有负温度、正应变速率敏感性,合金在试验变形条件下均呈现流动软化型特征。基于 BP 神经网络所建立的本构模型计算精度较高,其相关系数为 0.999 6,相对误差为 4.27%,平均绝对相对误差为 1.33%,能够较好地描述并预测 Ti-25Nb 合金的流动应力行为。

**关键词** Ti-25Nb 合金;流动应力行为;本构模型;BP 神经网络

**中图分类号** TG146.23;TP311

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2021.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Construction of BP Neural Network Constitutive Model for Ti-25Nb Alloy

Ouyang Xu, Wang Kexu, Wu Junkang, Peng Huiquan

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

**Abstract:** The isothermal constant strain rate compression test was carried out by a Gleeble-3500 thermal simulation tester. The flow stress behavior of Ti-25Nb alloy at 470~620 ℃ and 0.001~10 s<sup>-1</sup> was investigated and constitutive model was established based on BP neural network. The results reveal that the true stress of Ti-25Nb alloy has negative temperature and positive strain rate sensibility, showing the characteristics of flow softening under any deformation condition. The constitutive model based on BP neural network has a high calculation accuracy with correlation coefficient of 0.999 6, relative error of 4.27% and average absolute relative error of 1.33%, which can well describe and predict the flow stress behavior of Ti-25Nb alloy.

**Key Words:** Ti-25Nb Alloy, Flow Stress Behavior, Constitutive Model, BP Neural Network

钛合金具有良好的耐蚀性、适当的密度和优异的生物相容性,受到生物医学领域研究人员的广泛关注<sup>[1]</sup>。加入适量 Nb 元素,Ti 合金中稳定的 β 相含量增加,具有更低的弹性模量,除对人体无毒无害外,还具有形状记忆等性能,在医用植入物领域具有良好的应用前景。

近年来,研究者对 Ti-Nb 合金进行了大量研究。郭孝云等<sup>[2]</sup>研究 Nb 含量对 Ti-Nb 合金薄膜微观形貌与力学性能的影响,发现 Nb 能提高薄膜抵抗塑性变形的能力。万小军等<sup>[3]</sup>研究合金元素对 β-Ti-25Nb 合金的结构稳定性与弹性的影响,发现 β 相中的 Ta 和 Mo

收稿日期:2020-10-21;修改稿收到日期:2020-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51464035)

第一作者简介:欧阳旭,男,1996 年出生,学士,南昌(330063),E-mail:905360941@qq.com

通信作者:王克鲁,男,1968 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:wangkulu@126.com

引用格式:欧阳旭,王克鲁,吴俊慷,等. Ti-25Nb 合金 BP 神经网络本构模型的建立[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):425-428.

OUYANG X, WANG K L, WU J K, et al. Construction of BP neural network constitutive model for Ti-25Nb alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):425-428.

[19] KOBAYASHI M, DORCE Y, TODA H, et al. Effect of local volume fraction of microporosity on tensile properties in Al-Si-Mg cast alloy[J]. Materials Science and Technology, 2010, 26(8): 962-967.

[20] 万谦,赵海东,葛继龙. 微观孔洞对铝合金压铸件疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2015,25(3):568-574.

[21] WAN L, HU Z Q, WU S S, et al. Mechanical properties and fatigue behavior of vacuum-assist die cast AlMgSiMn alloy[J]. Materials Science Engineering, 2013, A576:252-258.

[22] HU C, ZHAO H D, WANG X L, et al. Microstructure and properties of AlSi12Fe alloy high pressure die-castings under different vacuum levels[J]. Vacuum, 2020, 180:109 561.

[23] SARFRAZ M H, JAHANZAIB M, AHMED W, et al. Multi-response parametric optimization of squeeze casting process for fabricating SiC/6061Al composite[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102:759-773.

[24] ZHANG Y F, ZHENG J, XIA Y T, et al. Porosity quantification for ductility prediction in high pressure die casting AM60 alloy using 3D X-ray tomography[J]. Materials Science Engineering, 2020, A772:138 781.

(编辑:张正贺)