

# 等温锻造对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料颗粒分布的影响

魏少华 樊建中 张琪 左涛 邹利华

(北京有色金属研究总院国家有色金属复合材料工程技术研究中心,北京 100088)

**文 摘** 开展了粉末冶金法制备的 20% (体积分数) SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料坯锭的等温锻造实验,研究了不同变形量对锻件中 SiC 颗粒的分布以及力学性能的影响。结果表明,等温锻造变形量越大,锻件中的 SiC 颗粒分布越均匀,锻件强度和塑性越高。对于同一锻件而言,沿锻造轴向上,锻件的应变呈现中部变形量大、两端变形量小的正态分布趋势,并且中部 SiC 颗粒分布较均匀,而两端的分布较差;沿锻造径向上,锻件不同部位应变也存在差异,由此导致 SiC 颗粒分布均匀性不一致。

**关键词** SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料,等温锻造,力学性能,SiC 颗粒分布

## Effect of Isothermal Forging on Distribution of Particles of SiC<sub>p</sub>/Al Composites

Wei Shaohua Fan Jianzhong Zhang Qi Zuo Tao Zou Lihua

(National Engineering & Technology Research Center for Non-Ferrous Metals Composites,  
General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088)

**Abstract** 20vol% SiC<sub>p</sub>/2009Al composites fabricated by powder metallurgy (PM) method were processed by isothermal forging and the effect of different deformation on distribution of SiC particles and mechanical properties were studied. The result shows that, with total strain increasing, distribution of SiC particles is better, the intensity and plasticity are higher. For the same forging, the strain shows normal distribution in the longitudinal direction with bigger distortion in the central section and smaller distortion in both terminal sections. And distribution of SiC particles in the center is more uniform than that in the two terminal sections. Along the radial direction, there is obvious difference of distortion in different sections, which results in nonuniform distribution of SiC particles.

**Key words** SiC<sub>p</sub>/Al composites, Isothermal forging, Mechanical property, Distribution of SiC particles

### 0 引言

SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料具有高的比强度、耐疲劳、导热性能好、热胀系数小、尺寸稳定性好等优异的综合性能<sup>[1]</sup>,在航空航天领域作为结构材料具有广泛的应用前景。大量研究表明<sup>[2~6]</sup>,材料的强度和塑性等力学性能受 SiC 颗粒分布均匀性的严重影响,而不同的塑性成形方法会直接影响 SiC 颗粒的分布。因此,针对不同应用场合形状各异的复合材料零部件,如何保证其 SiC 颗粒均匀分布将是优化塑性成形工艺需要考虑的关键因素。

由铸造法、粉末冶金法等传统方法制备的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的 SiC 颗粒团聚现象比较严重,复合材料的伸长率较低,必须对其进行二次加工,如挤压、锻造和轧制等,通过大的变形量来改善 SiC 颗粒分布,

提高复合材料的力学性能。用平砧锻造粗圆柱形 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料坯料时,由于平砧与坯料之间摩擦力的作用,坯料的侧表面会形成鼓形,造成坯料整体变形不均匀<sup>[7]</sup>,从而影响锻件各部位 SiC 颗粒的分布情况,对锻件组织和力学性能的整体均匀性有不利影响。因此,掌握锻造过程中 SiC 颗粒分布情况的变化将对提高锻件性能、改善锻造工艺具有重要的意义。由于这方面的研究报道很少,因此,本文对粉末冶金法制备的 20% (体积分数) SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料圆柱形坯锭进行了不同变形量的等温锻造,研究不同变形量对锻件力学性能和 SiC 颗粒分布的影响,以及同一锻件不同部位的 SiC 颗粒的分布情况。

### 1 实验

#### 1.1 原材料

收稿日期:2008-10-14;修回日期:2008-12-12

作者简介:魏少华,1983 年出生,硕士,主要从事颗粒增强铝基复合材料的研究。E-mail:sencke222@163.com

所用的材料有  $\alpha$ -SiC 颗粒,直径为 3 ~ 10  $\mu\text{m}$ ; 2009Al 粉末,平均直径为 75  $\mu\text{m}$ ,其主要合金元素 Cu、Mg 质量分数分别为 3.2% ~ 4.4% 和 1.2% ~ 1.6%。

### 1.2 复合材料制备

选用的复合材料采用粉末冶金方法制备,即把烘干后的 SiC 颗粒和铝合金粉末经过混合、冷压,然后真空热压成  $\Phi 72 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  的坯锭。在坯锭上截取金相试样,经粗磨、细磨和抛光后,在 ZEISS - Axiovert 200 MAT 光学显微镜下观察金相显微组织。复合材料坯锭金相取样位置示意及金相显微组织如图 1 所示,图中白色区域为铝粉末,灰色区域为 SiC 颗粒。可以看出,复合材料中无孔洞、疏松等缺陷。在锻造轴向和径向上,铝粉均呈球形,SiC 颗粒团聚于铝粉的间隙,分布不均匀。这种现象的出现是由于 SiC 颗粒与铝粉末尺寸差距较大所引起的<sup>[8]</sup>。

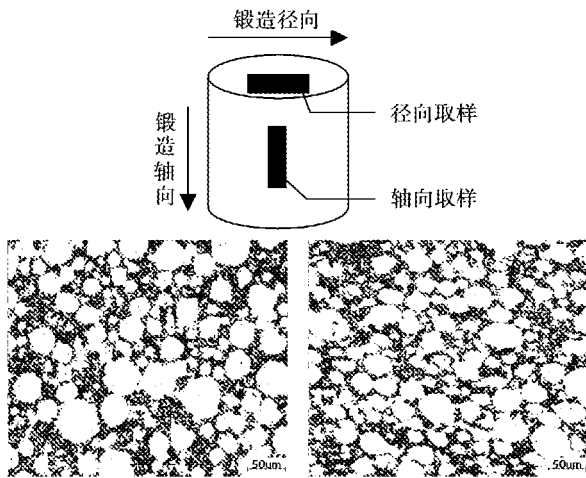


图 1 复合材料坯锭金相取样位置及金相显微组织  
Fig. 1 Schematic diagram of sampling and microstructures of composite billets

### 1.3 等温锻造与力学性能测试

20% (体积分数) SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料坯锭在 480 $^{\circ}\text{C}$  下进行无包套等温锻造,其工艺参数如表 1 所示。

表 1 复合材料坯锭等温锻造工艺参数

Tab. 1 Isothermal forging processing parameters of composite billets

坯料编号	原始尺寸/mm	锻后高度/mm	变形量/%
1 <sup>#</sup>	$\Phi 72 \times 80$	60	25
2 <sup>#</sup>	$\Phi 72 \times 80$	40	50
3 <sup>#</sup>	$\Phi 72 \times 80$	20	75

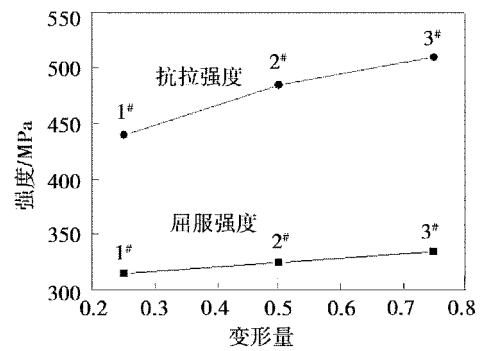
在锻后饼材沿锻造径向上截取  $\Phi 10.5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$  的圆棒,进行热处理,固溶温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ ,室温自然时效 96 h。热处理后的圆棒按照 GBT228—2002 制成  $\Phi 5 \text{ mm}$  的标准试样,在 AMSLER - 100 - 20 上

进行拉伸性能测试。

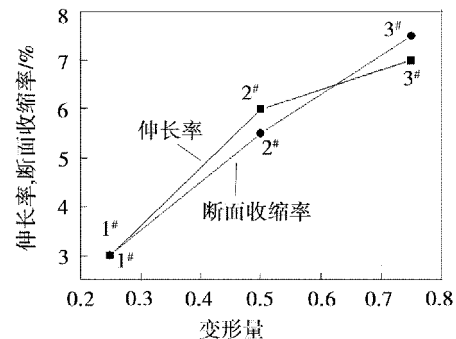
## 2 结果与讨论

### 2.1 变形量对锻件力学性能和 SiC 颗粒分布的影响

图 2 为经不同变形量锻造后的复合材料锻件的力学性能。可以看出,其强度和塑性均随着变形量的增加而增加。变形量从 25% 增加到 75%,抗拉强度则从 440 MPa 增加到 500 MPa 以上,屈服强度增加较少,而伸长率和断面收缩率从 3% 增加到 7%,已能达到航天航空领域结构材料的塑性指标<sup>[9]</sup>。



(a) 屈服和抗拉强度



(b) 伸长率和断面收缩率

图 2 复合材料锻件的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of composite forgings

图 3 给出了 1<sup>#</sup> ~ 3<sup>#</sup> 锻件沿锻造轴向上中心部位的金相显微组织。可以看出,变形之前呈球形的铝粉已经发生了变形,并且随着变形量的增加,铝粉被压成条带状,SiC 颗粒逐渐进入变形后的铝粉中且分布越来越均匀。

对比图 2 和图 3 给出的不同变形量锻造后复合材料的力学性能和金相组织可以发现,变形量越大,材料的强度和塑性越高,对应的 SiC 颗粒分布越均匀,由此可见,颗粒均匀分布有利于提高材料的力学性能。研究表明,SiC 颗粒团聚区域很容易形成裂纹源<sup>[10]</sup>,不利于材料性能的提高;如果 SiC 颗粒均匀分布,便能有效约束基体变形,承担基体传递的载荷<sup>[11]</sup>,充分发挥增强体颗粒的强化作用,从而提高复合材料的性能。

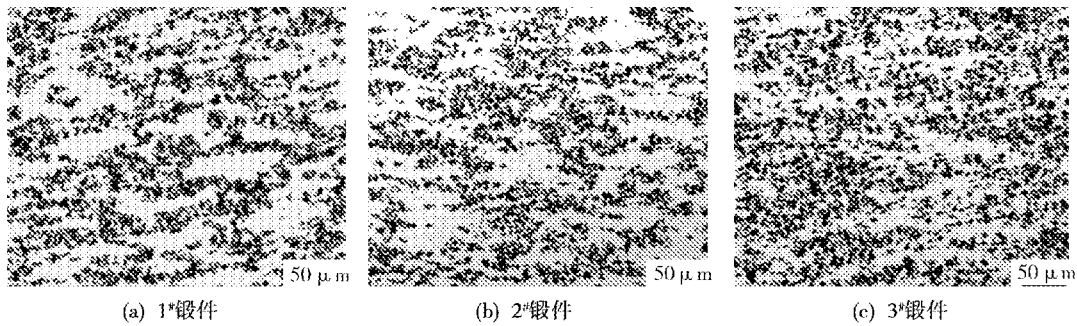


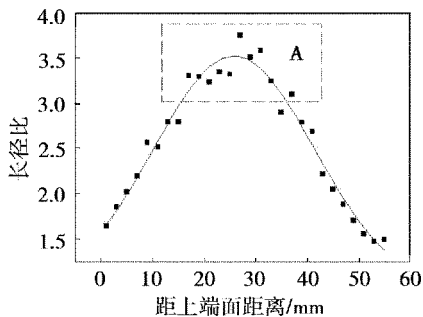
图3 复合材料锻件沿锻造轴向上中心部位的金相显微组织  
Fig. 3 Microstructures in center of composite forgings on longitudinal direction

## 2.2 锻件沿锻造轴向上的SiC颗粒分布

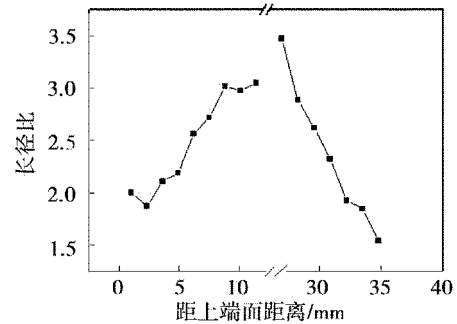
由文献[7]可知:圆柱体单向锻造时会产生三个不同的变形区,即位于端面附近的难变形区、位于侧面附近的自由变形区和中部区域的易变形区,这三个变形区的变形程度是依次增大的。

图4(a)为1#锻件铝粉沿锻造轴向上的长径比分布。可以看出,沿锻造轴向上铝粉的长径比呈正态分布,即从端部到中部变形量逐渐增大,从难变形区到易变形区是逐渐过渡的,无明显界线。在理想状态下,铝粉长径比随坯锭的位置曲线应该是轴对称的,但实际上由于两个端面上摩擦力的不同以及测量铝粉长径比时产生的误差等因素,实际测量的长径比曲线为非轴对称曲线。2#锻件沿锻造轴向上铝粉的长径比也有相似分布规律[图4(b)]。

对比1#和2#锻件沿锻造轴向上铝粉的长径比可以发现,变形量越大,图4(a)中区域A的范围就越宽,即铝粉长径比大于3(变形量约为0.4)的区域会变宽, SiC颗粒均匀分布的区域会变大,锻件的易变形区增大,难变形区和自由变形区减小,这有利于减小锻件组织和力学性能的不均匀性。据测量,铝粉长径比约为3的区域距端面实际距离为:1#锻件为18 mm,2#锻件为10 mm,测量结果与以上推断相符。因此,在材料塑性允许的条件下,应尽可能进行较大的变形,以减小难变形区,提高锻件的组织均匀性和材料利用率。



(a) 1#锻件

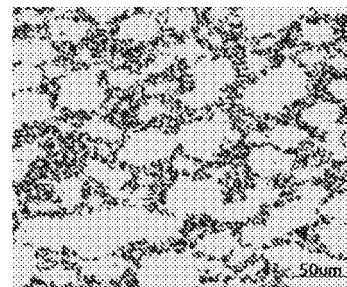


(b) 2#锻件

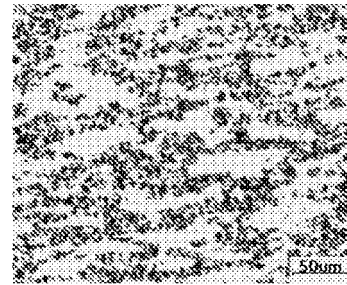
图4 锻件沿锻造轴向上铝粉的长径比

Fig. 4 Aspect ratio of aluminium powder of composite forgings on longitudinal direction

图5给出了1#锻件沿锻造轴向上端部和中部的金相显微组织。可以看出,从端部到中部,铝粉的形状从近球形逐渐变为近椭球形,甚至被压成条带状,同时, SiC颗粒分布均匀性逐渐改善。



(a) 端部



(b) 中部

图5 1#锻件沿锻造轴向上金相显微组织

Fig. 5 Microstructures of 1# on longitudinal direction

### 2.3 3<sup>#</sup>锻件沿锻造轴向和径向上的 SiC 颗粒分布

与 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>锻件相比,3<sup>#</sup>锻件变形量最大,其力学性能也最优,抗拉强度为 510 MPa,伸长率为 7%。

图 6 给出了 3<sup>#</sup>锻件沿锻造轴向上金相取样位置示意图及金相显微组织。可以看出,端面的 Z-1、Z-2 的铝粉变形较小, SiC 颗粒存在一定程度的团聚,

Z-3 的 SiC 颗粒分布略有改善。由于 Z-1 位于难变形区,受到平砧的摩擦力影响最大,此区域金属不易流动,变形很小, SiC 颗粒团聚较严重。然而, Z-3 基本位于自由变形区内,处于两向压一向拉的应力状态,所以铝粉有较大的变形, SiC 颗粒团聚程度有所减轻。

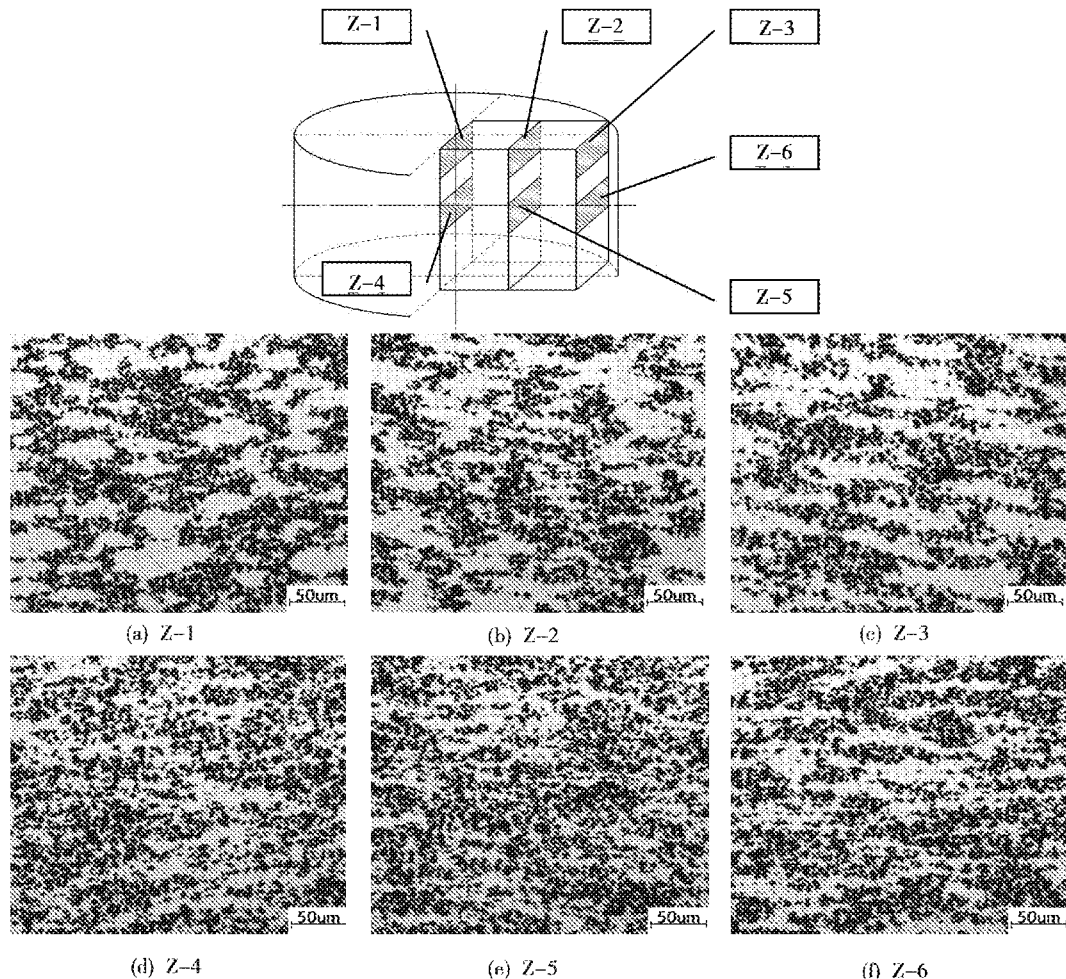


图 6 3<sup>#</sup>锻件沿锻造轴向上金相取样位置及金相显微组织

Fig. 6 Schematic diagram of sampling and microstructures of 3<sup>#</sup> on longitudinal direction

图 7 给出了 3<sup>#</sup>锻件沿锻造径向上金相取样位置及金相显微组织。可以看出,由于受到摩擦力的作用,位于端面的 J-1 和 J-2 中的铝粉基本没有变形, SiC 颗粒团聚于铝粉间隙,这与复合材料热压锭的微观组织相似(图 1)。而 J-3 位于自由变形区内,由于拉附应力的存在使得铝粉发生了一定程度的变形, SiC 颗粒团聚程度减小。对比 J-4 和 J-5 的金相显微组织可知,尽管铝粉没有发生变形,但是已有小部分 SiC 颗粒进入基体中,改善了 SiC 颗粒的分布。这种现象在 J-7 和 J-8 中体现地更加明显, SiC 颗粒分布越来越均匀。

沿锻造径向上位于侧面区域的铝粉有一定程度的变形,如图 7 中 J-3 和 J-6 的金相显微组织,一

方面是因为径向拉应力的存在,另一方面是由于锻粗变形时,金属沿着半径方向由心部向外流动,处于易变形区的金属流动变化较大,原来位于易变形区的金属可能流入自由变形区,并且已变形的铝粉发生一定程度的上翻,表现为在锻造径向上铝粉发生了变形。

在无包套等温锻造过程中,锻件只受到锻造轴向上压应力和端面工具摩擦力的作用,所以在锻造轴向上会发生较大的应变,而在锻造径向上的应变很小。沿锻造轴向上(图 6),当铝粉变成椭球形时, SiC 颗粒依然团聚于铝粉的间隙,两者有明显的界线,只有铝粉被压成带状,甚至变形量更大时, SiC 颗粒才进入基体中;而沿锻造径向上(图 7),在铝粉变形很小的情况下已有小部分 SiC 颗粒进入基体中,减轻了

SiC 颗粒团聚程度。这两个方向上的变形差异,是单向锻造致粗的必然结果,它加大了锻件组织和力学性能的各向异性,给锻件整体的均匀性带来了不利的影响。所以为了获得更加均匀的组织,提高复合材料的

力学性能,应该在材料本身塑性允许的情况下采用多向锻造<sup>[12]</sup>的方法,减少不同方向上的微观组织和力学性能的差异。

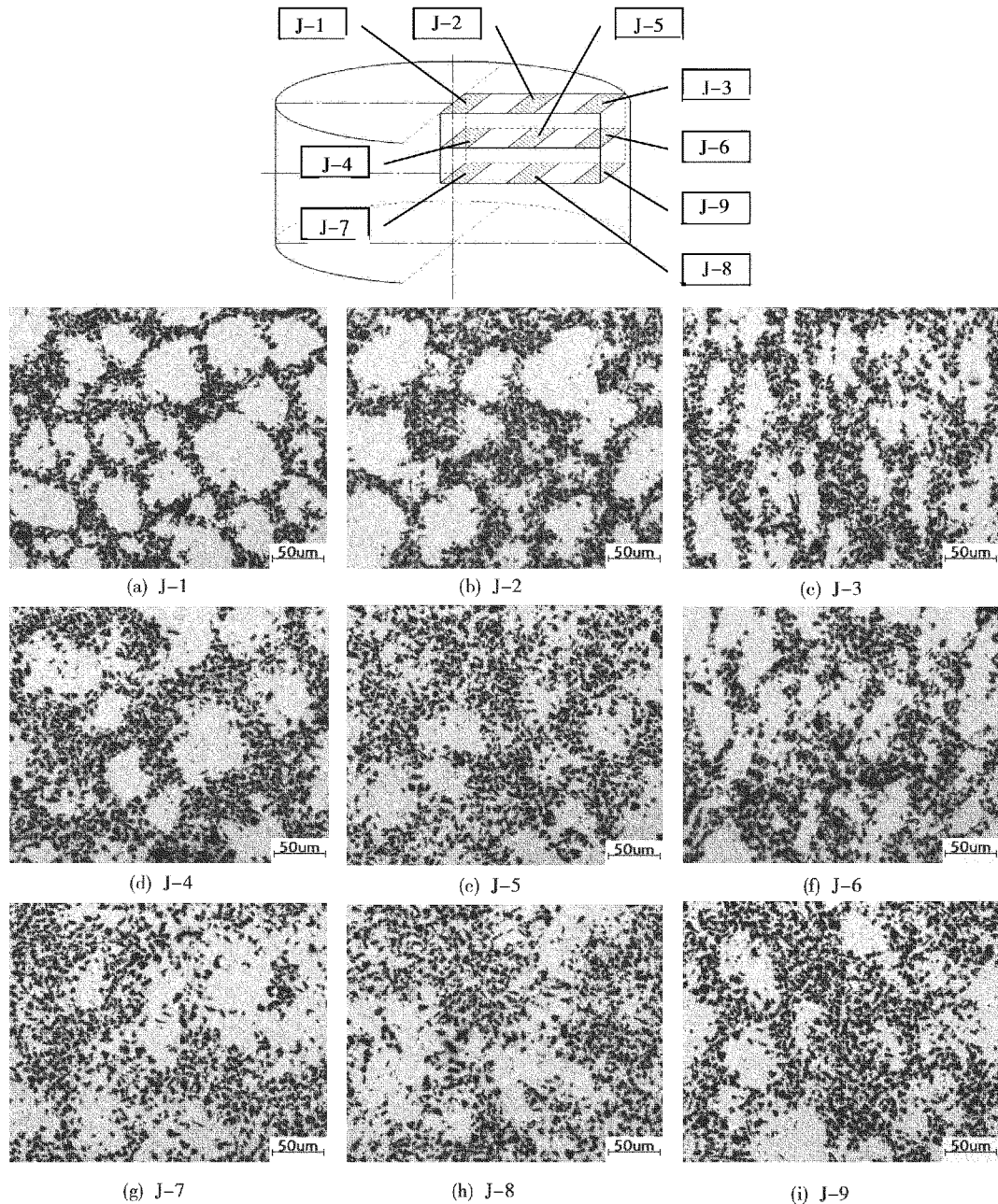


图7 3#锻件沿锻造径向上金相取样位置及金相显微组织

Fig.7 Schematic diagram of sampling and microstructures of 3# on radial direction

### 3 结论

(1) 粉末冶金方法制备的 20% (体积分数) SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料坯锭内存在严重的 SiC 颗粒团聚现象,经过等温锻造后, SiC 颗粒团聚减轻,并且变形量越大, SiC 颗粒分布越均匀,复合材料力学性能越高。

(2) 同一锻件沿锻造轴向上,两端部变形小,中

部变形大,变形量呈正态分布规律,并且中部的铝粉已被压成条带状, SiC 颗粒均匀分布。

(3) 同一锻件沿锻造径向上,铝粉的变形很小,并且不同位置的 SiC 颗粒分布差异较大。

### 参考文献

1 Geiger A L, Walke R J A. The processing and discontinu-

ously reinforced aluminum composites. JOM, 1991; 8: 8 ~ 15

2 See K S, Dean T A. The effects of the disposition of SiC particles on the forgeability and mechanical properties of co-sprayed aluminium-based MMCs. Journal of Materials Processing Technology, 1997; 69: 58 ~ 67

3 肖伯律, 樊建中等. 塑性变形对 15% SiC<sub>p</sub>/2009Al 复合材料的性能改善. 稀有金属, 2004; 28(1): 13 ~ 15

4 Cavaliere P. Isothermal forging of AA2618 reinforced with 20% of alumina particles. Composites: Part A, 2004; 35: 619 ~ 629

5 Badini C, Vecchia G M La, Fino P et al. Forging of 2124/SiC<sub>p</sub> composite: preliminary studies of the effects on microstructure and strength. Journal of Materials Processing Technology, 2001; 116: 289 ~ 297

6 Euh Kwangjun, Kang Suk Bong. Effect of rolling on the thermo-physical properties of SiC<sub>p</sub>/Al composites fabricated by plasma spraying. Materials Science and Engineering A, 2005; 395: 47 ~ 52

7 王允禧. 锻造与冲压工艺学. 北京: 冶金工业出版社,

1994; 10

8 Lloyd D J. Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites, International Materials Reviews, 1994; 39(1): 1 ~ 23

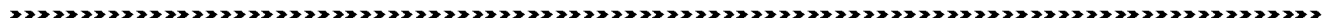
9 Mckimpson M G, Pohlemnz E L, Thompson S R. Evaluating the mechanical properties of commercial DRA. JOM, 1993; 1: 26 ~ 29

10 克莱因 T W, 威瑟斯 P J. 金属基复合材料导论. 北京: 冶金工业出版社, 1996

11 Shi N, Arsenault R J. Plastic flow in SiC/Al composites strengthening and ductility. Annu Rev. Mater. Sci., 1994; 24: 321 ~ 357

12 郭强, 严红革等. 多向锻造技术研究进展. 材料导报, 2007; 28(2): 106 ~ 108

(编辑 吴坚)



(上接第 9 页)

5 Malinov S, Sha W, McKeown J J. Modeling the correlation between processing parameters and properties in titanium alloys using artificial neural network. Computational Materials Science, 2001; 21(3): 375 ~ 394

6 周古为, 郑子樵, 李海. 基于人工神经网络的 7055 铝合金二次时效性能预测. 中国有色金属学报, 2006; (9): 1 583 ~ 1 588

7 Wan W S, Mabu S. Enhancing the generalization ability of neural networks through controlling the hidden layers. Applied Soft Computing, 2008; (1): 393 ~ 403

8 Bilgil A, Altun H. Investigation of flow resistance in smooth open channels using artificial neural networks. Flow Measurement and Instrumentation, 2008; (6): 404 ~ 408

9 Pidaparti R M, Neblett. Neural network mapping of corrosion induced chemical elements degradation in aircraft aluminium. Cmc-Computers Materials & Continua, 2007; (1): 1 ~ 9

10 Su J H, Li H J, Liu P. Aging process optimization for a

copper alloy considering hardness and electrical conductivity. Computational Materials Science, 2007; (4): 697 ~ 701

11 田景文, 高美娟. 神经网络算法研究及应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 35 ~ 37

12 飞思科技产品研发中心. MATLAB6. 5 辅助神经网络分析与设计. 北京: 电子工业出版社, 2003: 65 ~ 69

13 宋仁国, 张宝金, 曾梅光. 7175 铝合金时效“双峰”应力腐蚀敏感性的研究. 金属热处理学报, 1996; (2): 51 ~ 54

14 Artges C W. Changes in solid-solution composition as function of artificial aging time for aluminum alloy-7075. Journal of Materials Science Letters, 1994; (11): 776 ~ 778

15 Huang L P, Chen K H, Li S et al. Metal Materials and Engineering, 2007; 1 628 ~ 1 633

(编辑 任涛)