

文章编号:1673-9981(2010)01-0009-04

SiC_p/Al 复合材料力学性能的研究进展

方 玲, 张小联

(赣南师范学院化学与生命科学学院江西省镁合金工程技术研究中心, 江西 赣州 341000)

摘 要:从 SiC_p/Al 复合材料的颗粒性质、界面性质及基体性质等方面分析了 SiC_p/Al 复合材料的力学性能,综述了国内外对 SiC_p/Al 复合材料力学性能的研究进展,指出了今后研究的重点与难点,并对其未来的研究方向提出了一些建议。

关键词:SiC_p/Al 复合材料; 力学性能; 颗粒; 界面; 基体

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

SiC_p/Al 复合材料具有高的比强度和比模量以及低的热膨胀系数等优良性能,可广泛用于民用工业和军事、航空、航天领域,近年来部分产品已经开始工业化生产.发展 SiC_p/Al 复合材料的关键是低成本、高性能、一致性好和根据力学原理以及使用者的期望,设计出高性价比的材料.材料的力学性能是复合材料的一个重要的衡量指标,对复合材料力学性能的影响因素及其强化机理、断裂机理一直是研究的热点。

目前,对复合材料力学性能的研究主要是通过颗粒性质、界面性质和基体性质等方面来进行的。

1 颗粒性质

加入 SiC 颗粒可使基体金属的显微组织,如亚结构、位错组态、晶粒尺寸及材料密度等发生改变,可改善或弥补基体金属力学性能的不足,提高复合材料的抗拉强度和屈服强度.颗粒与基体的刚度错配和热膨胀系数错配导致基体流变能力降低,使得 SiC_p/Al 复合材料的韧性较低.材料承载时,材料中的刚性颗粒使塑性基体中的位错滑移受阻;刚性颗粒与基体的热错配则会在基体中产生热残余塑性应变,使基体处于较高的加工硬化状态,在外加应力很小时就会出现微屈服现象^[1]。

SiC 颗粒的含量对复合材料强度的影响,一般认为是强度随颗粒体积分数的增加而单调增加. Ramakrishnan N^[2]的理论研究表明,随着颗粒体积分数的增加,基体中位错密度增加,复合材料的强度也增加.丁占来等人^[3]在 SiC_p/Al 复合材料中发现随着 SiC 颗粒体积分数的增加,基体的显微组织细化,强度增加。

一般认为,强度与位错密度 ρ 的平方根成正比,而 ρ 与颗粒的直径成反比,即复合材料的强度随颗粒粒度的增大而降低.吕毓雄等人^[4]采用粉末冶金法制备不同粒度的 SiC_p/Al-Cu 复合材料,结果表明,增强相粒度大于 10 μm 时,复合材料的破坏归因于 SiC 颗粒解理断裂形成的裂纹;增强相粒度为 3.5 μm 时,复合材料的破坏则归因于 SiC-Al 界面撕裂形成的空洞和裂纹;小尺寸 SiC 颗粒增强的复合材料具有高的拉伸强度.张廷杰等人^[5]的研究表明,细小尺寸($<1 \mu\text{m}$)刚性颗粒的加入,可细化显微组织,提高 Orowan 强化及加工硬化率,使复合材料的基体得到强化,进而提高复合材料的强度。

秦蜀懿等人^[6]利用超显微硬度测试方法发现,在 SiC_p/6061Al 复合材料中, SiC 颗粒周围基体的硬度随颗粒的增大而减小,而且在颗粒的尖端,距界面很近的区域应力集中比较明显.酆定强^[7]认为,小颗粒易于聚集而形成颗粒簇,使得颗粒间距的均匀

收稿日期:2009-06-08

作者简介:方玲(1978-),女,江西上饶人,讲师,硕士。

程度比大颗粒差,不易形成稳定的位错胞结构,而且小颗粒增强的复合材料容易发生由于增强体与基体脱粘而造成的复合材料断裂.他们的试验结果表明,材料的力学性能并不随增强体颗粒粒度的增大而单纯的增高或降低.颗粒越小,弥散强化作用越强,但过细的颗粒容易造成颗粒混合不匀,而粗大的颗粒又会由于重力的影响产生严重的铸造偏析.王斌等人^[8]采用高能球磨混粉-半固态挤压的方法制取了亚微米级增强颗粒均匀分布的高强度 $\text{SiC}_p/2014\text{Al}$ 复合材料.

Lody^[9]在考察 SiC_p/Al 体系断裂韧性对颗粒粒度的依赖性时发现,在粒度很分散的颗粒群中,大颗粒最容易断裂,而小颗粒很少断裂.颗粒粒度越大,材料的塑性越低,但无论颗粒粒度如何,材料的断裂韧性却很接近,即断裂韧性对颗粒粒度并不敏感. Flom 等人^[10]发现,当颗粒粒度小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,几乎观察不到增强体的断裂.因此,在小颗粒增强的金属基复合材料中,基体的失效主宰着复合材料的断裂过程.而除了非常大的颗粒($250\text{ }\mu\text{m}$)增强复合材料外,其它颗粒增强体系的断裂韧性在很大程度上与颗粒的粒度无关. Downes 等人^[11]的研究也表明,对 $20\%\text{SiC}_p/8090\text{Al}$ 复合材料来说,断裂韧性依赖于基体的时效条件而与颗粒粒度无关.

SiC 颗粒的形状在一定程度上影响着复合材料的强度,一般认为,颗粒增强体为球形或近球状最佳.秦蜀懿等人^[12]采用有限元分析方法研究颗粒形状与 $\text{SiC}_p/\text{LD2}$ 复合材料微区力学环境和整体力学行为的关系,结果表明,尖锐颗粒会导致颗粒尖角附近基体塑性应变的集中和颗粒尖角上严重的应力集中,从而降低了材料的塑性,采用钝角颗粒作为增强体则可在一定程度上提高材料的塑性.颗粒的形状对材料的韧性无明显影响.

T. C. Tszeng^[13]研究了颗粒团聚对颗粒增强复合材料性能的影响. Tszeng 认为,颗粒的聚集会降低复合材料的强度,而且颗粒聚集区域的应力集中程度随聚集区长径比的增加而增加,球形区域对应力集中没有太大的影响.另外,大量研究已证明^[14], SiC_p/Al 复合材料中裂纹最有利的形核位置是增强体体积分数高的局部区域,在随后的裂纹扩展长大过程中,颗粒分布均匀的区域使裂纹扩展的随机路径增加,而颗粒在基体局部聚集的区域则会优先捕捉裂纹尖端,使裂纹迅速扩展,从而降低了复合材料的韧性.

2 界面性质

界面是复合材料中普遍存在且非常重要的组成部分,是影响复合材料行为的关键因素之一,材料的强化很大程度上是依靠界面把载荷从基体传递到增强体上实现的.界面结构与性能是基体和增强体性能能否充分发挥、形成复合材料最佳综合性能的关键.一般认为,要兼顾有效传递载荷和阻止裂纹扩展,必须要有最佳的界面结合状态和强度.

对碳化硅颗粒表面进行氧化处理是一种促进基体与增强体界面结合的方法.梅志等人^[15]在研究中发现,当采用纯铝为基体时,氧化层的存在有利于加强碳化硅颗粒与基体的结合,使复合材料的强度得到提高.另外,有研究者^[16]在研究预氧化碳化硅颗粒增强 LY12 铝复合材料时发现,原始态材料的弯曲强度明显高于氧化态材料的弯曲强度.但碳化硅表面的氧化层并不是越厚越好,像对硬铝这种基体中含 Mg 的材料,碳化硅表面的氧化层就不能太厚,否则氧化层中的氧化硅与基体中的 Mg 反应,既消耗了基体中的 Mg ,导致时效硬化效果的降低,又因为形成过厚的界面反应层,给材料带来脆性.理想的氧化层应该是既能促进碳化硅颗粒与基体的良好结合,又不会因界面反应层的形成而造成材料的脆化,也不影响基体材料原有的强化机制.另有研究者^[17]的研究结果显示,通过在空气中高温氧化后在颗粒表面形成的氧化膜,可得到界面结合强度较低的复合材料,这种复合材料的塑性明显增加,这可能是由于颗粒表面氧化层的存在有利于界面的相对滑动而不利脱粘所造成的.

3 铝基体性质

不同的基体成分对复合材料强度和性能的影响较大,并不是基体强度越高,复合材料的强度越高,而是存在一个最佳匹配^[18].

权高峰等人^[18]研究了不同基体的 $\text{SiC}_p/7075$, $\text{SiC}_p/2024$, SiC_p/Al (工业纯)等复合材料的力学性能,结果表明, $\text{SiC}_p/2024$ 具有最高的强度和增强效率,而 $\text{SiC}_p/7075$ 的强度低于基体合金, SiC_p/Al (工业纯)强度的提高幅度较大.这是因为在陶瓷颗粒增强的金属基复合材料中,塑性流变在微区是不均匀的,在粒子尖角附近的塑性流变量最大,如果此处

能发生显著的加工硬化,则可造成有效的应变转移,推迟界面裂纹萌生,从而起到增强作用.然而由于7075合金本身强度高,其形变硬化能力远低于2024合金和工业纯铝,所以造成以高强7075铝合金为基体的SiC_p/7075系列复合材料的增强效应较差.另外,陈尚平等^[19]研究了SiC_p/Al₂Cu₂Mg和SiC_p/Al₂Si₂Mg两种复合材料的机械性能.结果表明,由于SiC颗粒与两种基体间的结合力不同,导致复合材料的断裂行为不同.SiC_p/Al₂Cu₂Mg的界面结合力较大,断口中有大量的SiC颗粒断裂和基体的韧窝花样,裂纹起源于SiC颗粒的断裂,断裂应力低于基体的抗拉强度;而SiC_p/Al₂Si₂Mg的界面结合力较弱,断口是由基体的韧窝和SiC颗粒被抽而产生的大窝坑组成,裂纹萌生于SiC颗粒与基体的界面,抗拉强度高于基体的抗拉强度,表明复合材料得到了强化.吕毓雄等人^[4]的研究也表明,当基体具有较低的强度时,复合材料的破坏主要是由在拉伸载荷下SiC颗粒周围的基体产生的空洞形核、长大、聚合所引起的.当基体强度降低时,复合材料的塑性增加,强度明显下降.由此可见,基体的强度和成分均会影响SiC_p/Al基复合材料的断裂机理和增强效果.

适当的热处理也能对复合材料起到一定的强化作用.丁占来等人^[3]的研究结果表明,经固溶处理后SiC_p/Al复合材料的强度,特别是屈服强度明显提高,这是由于在淬火冷却过程中,增强体颗粒与基体的热膨胀系数差异较大,引起SiC_p-Al界面附近的基体发生热错配塑性变形,所产生的高密度位错强化了材料.王学政^[20]的研究结果也证实了时效温度及固溶温度对SiC_p/Al-Si复合材料的机械性能有影响.热处理后,复合材料的硬度提高了39%~46%.樊建中等人^[21]研究了挤压态和T4态复合材料的强度及塑性.结果表明,挤压态复合材料的断裂形式主要是颗粒附近基体的断裂,裂纹的形成与扩展均在基体中进行;T4态复合材料的断裂除颗粒附近的基体发生断裂外,部分SiC颗粒也发生了断裂.颗粒是否出现断裂与基体合金的强度密切相关,基体的强度越高,颗粒越易发生断裂.颗粒的断裂使得颗粒附近的基体所承受的附加应力减弱甚至消失,减少了基体断裂的概率,同时,颗粒对基体的塑性变形限制减弱,有利于基体的自由塑性变形,使得基体的塑性得到了进一步的发挥.

4 结 语

人们对SiC_p/Al复合材料中颗粒的性质、界面性质及基体性质等对材料强度及韧性等力学性能方面的影响已有较为广泛深入的研究,但这些研究还处于实验阶段,没有成熟的理论支持.同时,由于此类复合材料的韧性较低,目前,还未大规模应用于结构件中.因此,SiC_p/Al复合材料无论是在实际应用中,还是在理论研究上都还有许多工作要做,其中以下几方面是今后工作的重点:(1)加强对影响材料性能的机理的研究,建立相应的理论模型,以指导材料研究与设计的可控性;(2)通过理论分析及实验,找到解决复合材料低断裂韧性的办法,研制出高强韧复合材料.随着研究工作的深入开展,高强韧SiC_p/Al复合材料的应用领域会越来越广.

参考文献:

- [1] ZHANG F, LI X C, JIN C, et al. Studies on microyield behavior of a SiC_p/2024 Al composite[J]. Trans Non Met Soc China, 1998, 8(3): 449.
- [2] RAMAKRISHNAN N. An analytical study on the strengthening of particulate reinforced metal matrix composites[J]. Acta Mater, 1996, 44(1): 69.
- [3] 丁占来, 樊云昌, 齐海波, 等. SiC_p/Al合金基复合材料的室温拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(增刊): 265.
- [4] 吕毓雄, 毕敬, 陈礼清, 等. SiC_p尺寸及基体强度对铝基复合材料破坏机制的影响[J]. 金属学报, 1998, 34(11): 1188.
- [5] 张延杰, 曾泉浦, 毛小南, 等. 颗粒增强 MMCs 中小粒子的强化作用[J]. 稀有金属材料与工程, 1999, 28(1): 14.
- [6] 秦蜀懿, 刘澄, 陈嘉颐, 等. SiC_p/LD2复合材料的微区力学性能[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 748.
- [7] 郦定强, 洪淳亨. 增强体颗粒尺寸对SiC_p/2124Al复合材料变形行为的影响[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(3): 342.
- [8] 王斌, 易丹青, 李洪武, 等. 半固态挤压亚微米SiC_p/2014复合材料的组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2005(7): 26.
- [9] LOYD D J. Aspects of fracture in particulate reinforced metal matrix composites[J]. Acta Metall Mater, 1991, 39: 59.
- [10] FLOM Y, ARSENAULT R J. Effect of particle size on fracture toughness of SiC/Al composite materials[J].

- Acta Metall, 1989, 37: 2413.
- [11] DOWNES T J, KING J E. The effect of microstructure on the fracture toughness of a metal matrix composite [J]. Composites, 1993, 24: 276.
- [12] 秦蜀懿, 张国定. 改善颗粒增强金属基复合材料塑性和韧性的途径与机制[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 621.
- [13] TSZENG T C. The effects of particle clustering on the mechanical behavior of particle reinforced composites [J]. Composites Part B, 1998, 29B(3): 299.
- [14] SHI N, ARSENAULT R J. Plastic flow in SiC/Al composites strengthening and ductility [J]. Annu Rev Mater Sci, 1994, 24: 321.
- [15] 梅志, 顾明元, 蒋为吉, 等. 表面氧化层对 SiC_p/Al 复合材料界面的影响[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(增刊): 116.
- [16] 梅志崔, 顾明元, 吴人洁. 碳化硅氧化对硬铝基复合材料力学性能的影响[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(7): 94.
- [17] THANLL N, SUERY M. Influence of oxide coating on chemical stability of SiC particles in liquid aluminum [J]. Scripta Metall Mater, 1991, 25(12): 2781.
- [18] 权高峰, 柴东朗, 宋余九, 等. 增强体种类及含量对金属基复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 1999, 16(1): 62.
- [19] 陈尚平, 解念锁, 苏建璋, 等. 非连续增强铝合金复合材料的力学性能[J]. 材料科学与工程, 1997, 15(4): 72.
- [20] 王学政, 赵明. SiC_p 增强铝硅合金复合材料热处理工艺参数优化[J]. 有色金属, 2006, 58(1): 46.
- [21] 樊建中, 肖伯律, 左涛, 等. 热处理对 SiC_p/Al 复合材料强度和塑性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 228.

Progress on developments of mechanical properties of SiC_p/Al composites

FANG Ling, ZHANG Xiao-lian

(Jiangxi Magnesium Alloy Engineering Research Center Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The mechanical properties of SiC_p/Al composites were discussed in terms of properties of reinforced granular, interface and matrix. Progress in developments of mechanical properties of SiC_p/Al composites is reviewed. The key and the difficulties for their further research were outlined. Several suggestions for future development in this domain are proposed finally as well.

Key words: SiC_p/Al composites; mechanical properties; particle; interface; matrix