

挤压铸造中压强对复合材料强度的影响

Influence of Pressure in Squeeze Casting on Tensile Strength of the Metal Matrix Composites

赵平 高升吉 陈睿 董斌 沈保罗 涂铭旌 (四川联合大学金属材料系)
Zhao Ping Gao Shengji Chen Rui Dong Bin Shen Baoluo Tu Mingjing
(Department of Metal Materials, Sichuan Union University, Chengdu)

[摘要] 研究了挤压铸造中保压压强对莫来石纤维/Al 合金复合材料强度的影响规律。结果表明,对于试验所用的三种复合材料,保压压强是决定气孔类缺陷尺寸的主要因素,因而是影响复合材料强度的主要因素。

关键词 M/Al 复合材料 压强 强度 孔隙

[Abstract] A serial of pressure maintaining for solidification has been used to fabricate M/Al (mullite fibre/aluminum) composites, and the influence of the pressure on the tensile strength of the composites has also been investigated. The results indicate that the pressure significantly effect the dimension of the noninfiltrated defects and the tensile strength of the composites.

Keywords M/Al composites pressure tensile strength non-infiltrated defects

1 引言

从关于用成本较低的 $Al_2O_3-SiO_2$ 系短纤维增强铝合金的复合工艺、强度特性等方面的报导中,比较常见的是以制备良好的复合材料试样为基础,研究其断裂机制^[1],以及 $Al_2O_3-SiO_2$ 系短纤维增强铝合金复合材料的强度在某些条件下低于基体合金的强度并且强度数据的分散度也较大的原因^[2,3],很少看到研究工艺因素对复合材料强度的影响规律的报导。

研究工艺因素如最终压力即保压压强对复合材料强度的影响问题,必然涉及其对复合材料中缺陷的影响问题。

关于短纤维增强金属基复合材料中气孔类缺陷的形成,Long S. 等^[4,5]进行了描述和分析,认为:由于纤维在预制块中微观上的不均匀分布和合金液的优先浸渗行为,必定在高密度纤维区的小间隙处包住空气。Long S. 等认为,在浸渗过程中被包住的空气,其体积随浸渗压力增加而变化,最终被赶入小尺寸的间隙中。如果最终压力不够高,则被包围的空气肯定引起未充满缺陷。而 G. A. Chadwick^[6]则认为,包围在合金液体中的空气中的氧气和氮气会与合金中铝生成氧化铝和氮化铝,剩下的气体被压缩成非常小的气孔,其中的氮气在以后

还会继续和铝反应生成氮化铝。但是,没有看到关于最终压力即保压压强对气孔类缺陷的尺寸的影响规律的报导。

为清楚地描述保压压强通过影响预制块中气孔尺寸而影响复合材料强度的规律,本工作研究保压压强对 $Al_2O_3-SiO_2/Al$ 复合材料抗拉强度的影响。

2 试验方法

用铸铝合金 ZL101 和 ZL109 作基体合金,其成分如表 1 所示。

表 1 基体合金成分 (wt%)

Table 1 Composition of matrix alloys (wt%)

	Si	Cu	Mg	Ni	Mn	Fe
ZL109	11.85	0.98	0.85	0.95	0.09	0.28
ZL101	7.65	0.12	0.41	0.09	0.05	0.34

用洛阳耐火材料研究院生产的莫来石纤维作为增强体。

用挤压铸造法制取 M (莫来石短纤维)/ZL101, M/ZL109 和 M/ZL109 (B) 复合材料,其中 B 表示用 0.7% 富钕混合稀土变质。

挤压铸造工艺参数: 预制块预热温度为500 , 模具预热温度为400 ; 基体合金浇注温度为720 ; 保压压强分别为: 6MPa, 30MPa, 60MPa, 110MPa 和 150MPa; 保压时间均为1min。

3 试验结果

将在不同保压压强下得到的上述三种复合材料加

工成拉伸试棒, 在岛津 AG-TA10电子拉伸试验机上做室温拉伸试验, 所得数据汇集于表2。在表2中, 1 × × 表示 M/ZL101, 2 × × 表示 M/ZL109, 3 × × 表示 M/ZL109 (B)。

根据表2中复合材料强度平均值得到如图1所示的三种复合材料强度随保压压强变化的情况, P_b 表示保压压强。

表2 拉伸数据

Table 2 Tensile data

编号	压强 MPa	UTS MPa	平均 UTS, MPa	编号	压强 MPa	UTS MPa	平均 UTS, MPa	编号	压强 MPa	UTS MPa	平均 UTS, MPa
111	30	261	270	211	30	293	289	311	150	361	347
112	30	282		212	30	270		312	150	349	
113	30	268		213	30	303		313	150	331	
121	60	356	353	221	60	310	318	321	30	280	297
122	60	346		222	60	337		322	30	298	
123	60	356		223	60	308		323	30	312	
131	150	357	363	231	110	338	338	331	6	250	267
132	150	364		232	110	339		332	6	274	
133	150	369		233	110	336		333	6	277	
-	-	-	-	241	150	334	342	341	60	322	326
-	-	-		242	150	347		342	60	322	
-	-	-		243	150	346		343	60	333	

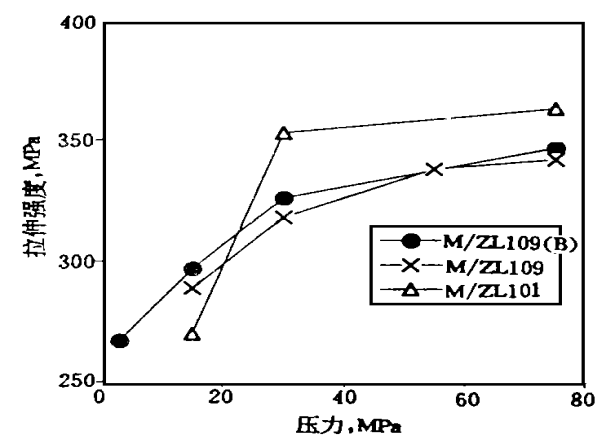


图1 保压压强对复合材料强度的影响

Fig.1 Influence of pressure on UTS of the composite

图2, 3分别是在扫描电镜下所观察到的复合材料断口形貌。图2为在保压压强等于30MPa 条件下得到的拉伸强度等于270MPa 的 M/ZL109 复合材料断口形貌, 图3为在保压压强等于150MPa 条件下得到的拉伸

强度等于347MPa 的 M/Z109 复合材料断口形貌。

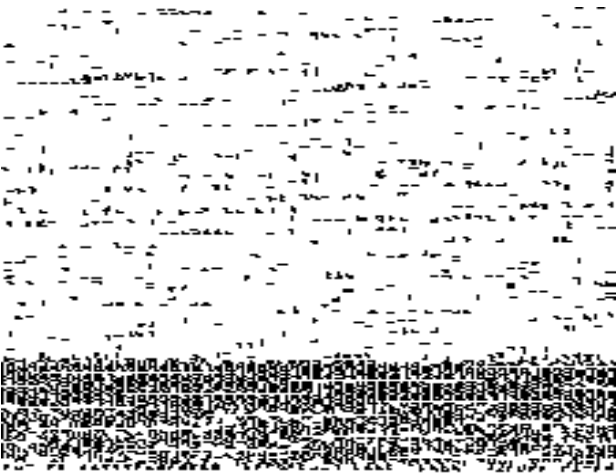


图2 M/ZL109断口形貌 $P_b=30\text{MPa}$; $\sigma_b=270\text{MPa}$

Fig.2 Fracture morphology of M/ZL109

$P_b=30\text{MPa}$; $\sigma_b=270\text{MPa}$

图1显示, 三种体系复合材料强度均随保压压强的增高而提高, 并且在保压压强等于60MPa 以前, 强度的提高幅度较大; 在保压压强等于60MPa 以后, 强度的提高幅度变小。



图3 M/ZL109断口形貌 $P_b = 150 \text{ MPa}$; $\sigma_b = 347 \text{ MPa}$

Fig. 3 Fracture morphology of M/ZL109

$P_b = 150 \text{ MPa}$; $\sigma_b = 347 \text{ MPa}$

比较 M/ZL109 和 M/ZL109 (B) 两种复合材料强度随保压压强变化的情况, 可以看到, 变质与否, 对强度的影响很小, 远远小于保压压强的影响。

4 讨论

按照文献 [7] 关于金属液渗入毛细管状孔隙的分析, 得:

$$P_c = -2\sigma_g \frac{\cos\theta}{R_{\min}} \quad (1)$$

式中 P_c 为外加压力 (在浸渗过程中即为浸渗压), σ_g 为金属液的表面张力, θ 为金属液与组成毛细管孔隙物质之间的润湿角 (在此即是金属液与纤维之间的润湿角), R_{\min} 为在 P_c 的作用下金属能够渗入的最小孔隙半径。式 (1) 的物理意义在于, 对应于一个浸渗压, 存在一个金属液能够渗入的等价毛细管最小半径。对于纤维接触或接近处的微小缝隙, 因曲率半径小, 填充难度大, 需待整个预制块的大孔隙都充满, 浸渗进一步提高, 方可实现进一步填充。而使孔隙被完全填充的条件是压力为无穷大, 即对于不润湿体系, 使两接触纤维间的缝隙完全充满金属液几乎是不可能的^[8]。即永远有小于 R_{\min} 的间隙在浸渗过程中不会被金属液渗入。也就是说, 在浸渗过程中不会被金属液渗入的孔隙是必然存在的。

按照文献 [9] 的分析, 在浸渗过程中被流动前沿所围住的充满空气的空间, 其体积将在提高压强进行保压过程中减小, 最终尺寸决定于保压压强。

在浸渗结束后, 即空气压缩阶段, 被包围在合金液中的空气承受着很高的压强, 如图4所示^[5]。图4中 P_{ex} 为外加压强, P_i 为被包围的空气压强, 两者在保压中达到平衡, r_{eq} 为纤维间合金液渗入前沿的当量半径。在被包围的空气中, 占总量79%的 N_2 因有氧气存在而仍然不失为惰性气体^[10], 即 N_2 基本不与铝发生化学反应。而氧气将使尚未凝固的铝合金液表面氧化生成氧化膜而消耗掉一部分, 剩余的氧气因氧化膜的隔离不再与铝合金液发生化学反应。这样, 绝大部分气体将仍然保留在合金液中; 同时, 在讨论其在压力下的行为时, 因其不与合金液反应而可以视作理想气体, 即其体积随压力的变化满足理想气体方程:

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2 \quad (2)$$

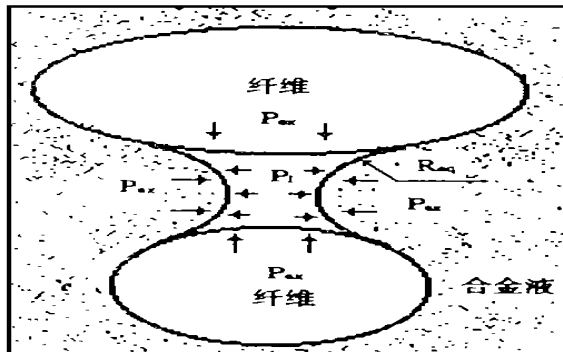


图4 被合金液包围的空气所受的压力^[5]

Fig. 4 Schematic showing the force equilibrium in the micro noninfiltration defect^[5]

即在温度不变的前提下, 理想气体的体积与压强之乘积为一常数。

因被合金液包围的气体在浸渗过程中所承受的压强为约0.1MPa (大气压) 加上0.064MPa (浸渗压)^[8], 则当浸渗压 $P_c = 0.164 \text{ MPa}$, $\theta = 120^\circ$ 时, 根据式 (1), 可以计算出 (为计算方便, 将间隙视为球形), R_{\min} 等于 $5.57 \mu\text{m}$, 即未浸渗间隙的最大半径为 $5.57 \mu\text{m}$ 。

设温度没有降低, 被合金液包围的气体在经过 150 MPa (本工作所用的参数) 加上 0.1 MPa (大气压) 保压以后, 根据 (2) 可计算得到, 气孔的体积为初始阶段体积的 $(150.1 \div 0.164 = 950) 1/950$, 而其半径将是初始阶段半径的 $1/9.8$, 即最大气孔的半径约为 $0.57 \mu\text{m}$ 。而当经过 30 MPa 保压后, 最大气孔半径约为 $0.98 \mu\text{m}$ 。

半径小到 $0.57\mu\text{m}$ 的微小气孔,在金相显微镜下不容易观察到,而在热处理过程中会长大,表现为试样表面鼓泡,将M/ZL109复合材料试样在 510°C 下长时间保温,观察到了表面鼓泡现象。其原因为(以前面的计算为例):凝固后的复合材料中气孔中压强为 156.1MPa 即在气孔周围的基体中存在 156.1MPa 的应力。温度由室温升高到 510°C 时,基体材料ZL109的强度低于 156.1MPa ,在没有外加压力的条件下,接近表面的基体材料向外变形以减缓应力即气孔中的空气压力,导致鼓泡。这种表面鼓泡现象也说明材料中存在气孔并且其中压力很高。

以上的讨论说明,存在于复合材料中的微小气孔,因为其中的高压气体,在凝固后的合金材料中造成较高的应力;另一方面,如图4所示,往往存在于纤维与基体之间界面上,很容易成为基体与纤维开裂的起源。

由(2)式可以得到,对应于试验所用的保压压强 6MPa , 30MPa , 60MPa , 110MPa 和 156MPa ,复合材料中气孔半径计算值分别为: $1.67\mu\text{m}$, $0.98\mu\text{m}$, $0.78\mu\text{m}$, $0.64\mu\text{m}$ 和 $0.57\mu\text{m}$,即经受较小压强保压的复合材料中气孔半径较大。图5为气孔半径计算值与复合材料强度之间的关系,从中可以看到,随着气孔半径增大,试验所用的三种复合材料强度均降低。

在经受较小压强保压、拉伸强度较低的212号试样断口上能够很容易地找到较大的孔洞,而在经受较大压强保压、拉伸强度较高的242号试样断口上看不到明显的孔洞。在试验所用的另外两种复合材料断口上也能看到这样的情况。

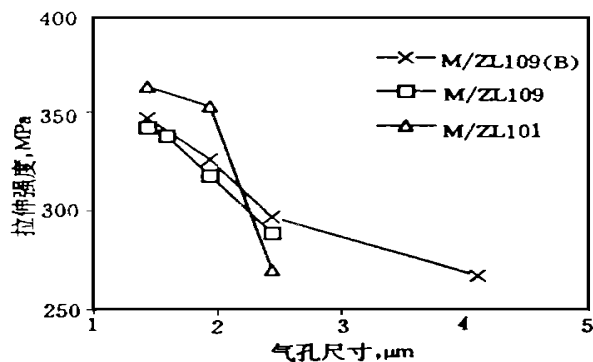


图5 气孔尺寸对强度的影响

Fig. 5 Influence of porosities dimension on UTS

根据文献[3]的分析, M/ZL109复合材料在常温

下的断裂主要由与拉伸方向呈大角度的纤维与基体之间脱粘所致。而挤压铸造法制备的复合材料中气孔往往存在于纤维与基体之间的界面上,很容易成为界面脱粘的起源。这样,气孔半径的大小,必然会影响到复合材料的强度,即大的气孔更容易造成复合材料断裂。这样,就可以解释图1所描述的复合材料强度随保压压强增高而提高的现象的。

由此可以认为,保压压强决定了复合材料中气孔的半径,从而也就决定性地影响了复合材料的强度。

5 结论

(1) 未浸渗孔隙被压缩成体积很小其中空气压力很高的孔洞存留于基体和纤维之间界面上,其体积的大小决定于保压压强的高低。

(2) 经受高的保压压强的M/A1复合材料中的气孔尺寸较小,材料的拉伸强度也高;经受较低的保压压强的M/A1复合材料中的气孔尺寸较大,材料的拉伸强度也较低。

参考文献

- 1 张吉喜,杨川,刘世楷.复合材料学报,1997,14(1):27
- 2 张茂勋,陈晓,钱匡武等.复合材料学报,1997,14(1):15
- 3 赵平,高升吉,陈睿等.复合材料学报,待发表
- 4 Long S., Zhang Z. and Flower H. M. Acta metall. mater, 1995, 43(9):3489
- 5 Long S., Zhang Z. and Flower H. M. Acta metall. mater, 1995, 43(9):3499
- 6 Chadwick G. A. Mater. Sci. and Eng. 1991, A135:23
- 7 胡汉起.金属凝固.北京:冶金工业出版社,1985,29
- 8 于思荣,何镇明.复合材料学报,1995,6(2):15
- 9 赵平,高升吉,陈睿等.中国有色金属学报,待发表
- 10 张承甫等.液态金属的净化与变质.上海:上海科学技术出版社,1989,70

国家自然科学基金资助项目(59631080)

收稿日期:1998.5.

修改稿收到日期:1998.10.18

赵平,男,1954年1月生,四川联合大学金属材料系,副教授。联系地址:四川省成都市四川联合大学金属材料系(邮编610065)