第 12 卷 第 2 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 12 No. 2
1995 年 6 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA June 1995

挤压浸渗金属基短纤维复合材料浸渗压的理论分析及应用

于思荣 何镇明
(吉林工业大学，长春 130025)

摘 要 本文根据 Laplace 方程及流体力学的基本原理建立了挤压浸渗法制备金属基复合材料的浸渗压模型，应用该模型对 ZA22/Al_2O_3 复合材料的浸渗过程进行了理论分析。以此为指导制出了性能优良的 ZA22/Al_2O_3 复合材料。

关键词 金属基复合材料，浸渗压，锌铝合金，Al_2O_3，预制块

1 前 言

短纤维增强金属基复合材料有优良的耐磨、耐热性，是近年来发展较快的一种复合材料，国内外已成功地将其用于汽车发动机的活塞上[1]。该复合材料主要采用挤压浸渗法制作，其关键在于工艺参数的控制。这些参数包括预制块及模具的预热温度，金属液的浇注温度及所加浸渗压力等。其中浸渗压是个重要参数，压力太小，浸渗不完全；压力太大，则增加设备投资及引起不必要的能源浪费。因此，浸渗压的合理选择对制得结构完整、性能优良的金属基复合材料有重要意义。

关于浸渗过程的理论分析，近年来已引起国内外复合材料研究者的广泛重视。现有的研究主要分两大类，一类是根据 Laplace 方程求复合材料的临界浸渗压[2~5]，不考虑浸渗过程阻力的影响；一类是对复合材料压力浸渗过程进行动力学分析[6~8]，忽略了因纤维接触产生的微小孔隙的难充填现象。

本文以 Al_2O_3 短纤维强化 ZA22 合金复合材料为研究对象，对其浸渗过程所需的压力进行深入的理论分析，以期对该复合材料的制作提供理论指导。

2 浸渗过程压力模型的建立

复合材料的加压浸渗可分四个步骤：(1)金属液所受压力逐渐升高并开始浸渗预制块；(2)金属液在预制块中流动；(3)金属液在高压下进一步填充预制块微小孔隙；(4)渗入预制块中的金属液在压力下凝固形成复合材料。

2.1 临界浸渗压

临界浸渗压指金属液开始浸渗预制块时所需的压力，根据 Laplace 方程，对非润湿体系，

本文于 1994 年 10 月 31 日收到第 2 次修改稿，1993 年 10 月 19 日收到初稿； 国家自然科学基金资助项目

临界浸渗压为：

$$P_c = \sigma_{lg}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) \tag{1}$$

式中 σ_{lg}为液态金属表面张力；R_1、R_2 分别为液体弯月面的两个主曲率半径。

对预制块来说，短纤维呈三维随机取向分布。空隙呈不规则形状，因此有必要求其等价毛细管半径。

设预制块由 n 根长为 l、半径为 R_f 的短纤维组成，每根短纤维体积为：

$$V = \pi R_f^2 l \tag{2}$$

预制块总体积为：

$$V_p = \frac{nV}{V_f} \tag{3}$$

式中 V_f 为预制块纤维体积分数。预制块空隙体积与纤维总表面积之比为：

$$\frac{V_s}{S_f} = \frac{V_p \cdot (1 - V_f)}{n \cdot 2\pi R_f l} = \frac{R_f(1 - V_f)}{2V_f} \tag{4}$$

如果每根等价毛细管半径为 R，长为 l_c，则 n 根毛细管的体积与表面积之比为：

$$\frac{V_c}{S_c} = \frac{n\pi R^2 l_c}{2n\pi R l_c} = \frac{R}{2} \tag{5}$$

如果二者等价，则$\frac{V_c}{S_c} = \frac{V_s}{S_f}$[9]，由此可得等价毛细管半径 R 为：

$$R = R_f \frac{1 - V_f}{V_f} \tag{6}$$

可见，增强剂体积分数 V_f 越大，预制块越致密，其等价毛细管半径 R 越小。

如果金属液与纤维润湿角为 θ，式(1)中 $R_1 = R_2 = \frac{-R}{\cos\theta}$，则临界浸渗压为：

$$P_c = \frac{-2\sigma_{lg}\cos\theta}{R} = \frac{-2\sigma_{lg}V_f\cos\theta}{R_f(1 - V_f)} \tag{7}$$

外加压力(抵消大气压力)只有高于 P_c，金属液才能渗入预制块。当 σ_{lg}、θ、R_f 一定时，随 V_f 增大，临界浸渗压增大。

2.2 金属液在预制块中流动

当金属液开始向预制块中流动后，随浸渗距离的增加，所受阻力也增大。为使问题简化，作如下假设：

1. 预制块内有若干平行于浸渗方向的毛细管道，金属液通过这些管道进入预制块(见图1)。

2. 因预制块和模具在浸渗前均经预热，且浸渗过程很快完成，故忽略传热的影响，假定浸渗过程中金属液温度不变。

3. 忽略冲头与模具、金属液与模具间的摩擦力。

4. 金属液在毛细管中的流动为稳态流动，忽略液流前沿的端部阻力。

5. 预制块及模具排气通畅，忽略气体反压力的作用。

取毛细管之一为研究对象，建立图 2 所示的圆柱坐标系。在半径 r 处取增量为 Δr，长为 h 的薄壳微元体。在该微元体中，由于金属液的粘性作用，过半径为 r 的表面输入微元体的动量率为 $2\pi r h \tau_{rz|r}$；过半径为$(r+\Delta r)$的表面输出微元体的动量率为 $2\pi(r+\Delta r)h\tau_{rz|r+\Delta r}$；通过微元体

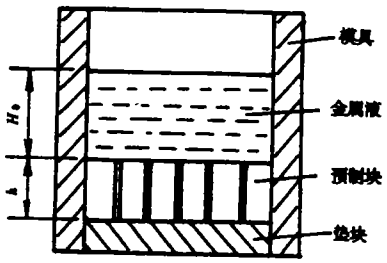

图 1　金属液浸渗预制块的简化模型

两端输入、输出的动量率大小相等、相互抵消。作用于微元体的重力为$(2\pi r\Delta rh)\rho g$，压力差为$2\pi r\Delta r(P+\rho gH_0)$，毛细力为$2\pi r\Delta r\dfrac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{R}$。这里$\tau$为金属液流动切应力，$\rho$为金属液密度，$g$为重力加速度，$P$为浸渗压，$H_0$为初始液面高。

根据稳态流动时，微元体内动量平衡有：

$$2\pi rh\tau_{rz|r}-2\pi(r+\Delta r)h\tau_{rz|r+\Delta r}+2\pi r\Delta rh\rho g+2\pi r\Delta r(P+\rho gH_0)+2\pi r\Delta r\frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{R}=0 \quad (8)$$

整理得：

$$\frac{d(r\tau_{rz})}{dr}=\frac{r}{h}\left[P+\rho g(H_0+h)+\frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{R}\right] \quad (9)$$

边界条件为：$r=0$时，$\tau_{rz}=0$。解式(9)得：

$$\tau_{rz}=\frac{r}{2h}\left[P+\rho g(H_0+h)+\frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{R}\right] \quad (10)$$

将牛顿粘性定律　$\tau_{rz}=-\eta\dfrac{dv_r}{dr}$　(式中η为动力粘度，v_r为半径r处的金属液流速)代入式(10)，考虑边界条件$r=R$时，$v_r=0$，解得：

$$v_r=\left[P+\rho g(H_0+h)+\frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{R}\right]\frac{(R^2-r^2)}{4\eta h} \quad (11)$$

毛细管中金属液平均流速为：

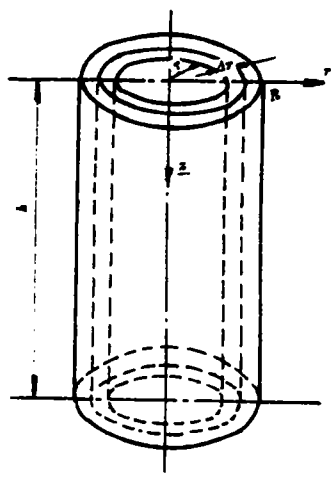

图 2　毛细管圆柱坐标系

$$\bar{v}=\frac{1}{\pi R^2}\int_0^{2\pi}\int_0^R v_r\cdot r\,dr\,d\Omega=\frac{R^2}{8\eta h}\left[P+\rho g(H_0+h)+\frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{R}\right] \quad (12)$$

经变换并将式(6)代入得浸渗压为：

$$P=\frac{8\eta h\bar{v}V_f^2}{R_f^2(1-V_f)^2}-\frac{2\sigma_{lg}V_f\cos\theta}{R_f(1-V_f)}-\rho g(H_0+h) \quad (13)$$

可见，当纤维体积分数V_f为变量，其它参数为常量时，浸渗压与$\left(\dfrac{V_f}{1-V_f}\right)$呈抛物线关系；$V_f$越大，所需浸渗压越高；而当浸渗距离$h$为变量，其它参数为常量时，浸渗压与浸渗距离$h$呈直线关系，$h$越长，所需浸渗压越高。

2.3　纤维间微小缝隙的进一步填充

浸渗过程中，金属液总是优先填充预制块内较大的孔隙。而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，浸渗压进一步提高，方可实现进一步填充。

图 3 为随机取向短纤维预制块中，两接触纤维间位置关系。β为两纤维轴线间夹角。$\beta=0°$

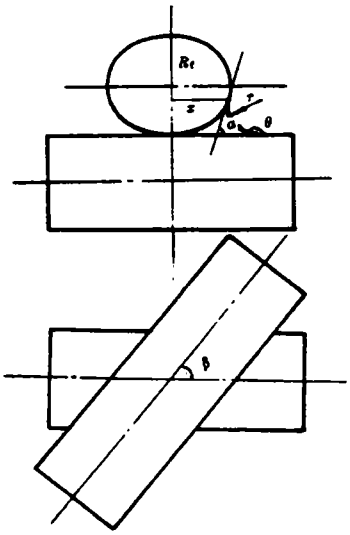

图 3 两接触纤维

时，两纤维平行接触，此时金属液进入纤维间夹角所需压力为[3]：

$$P=\frac{\sigma_{lg}\sin(\theta-\alpha-\frac{\pi}{2})}{R_f\sin(\alpha)\mathrm{tg}(\frac{\alpha}{2})} \tag{14}$$

式中 α 为与金属液前沿位置有关的角，金属液前沿越接近纤维接触点，α 越小。

当 $0<\beta\leqslant 90°$ 时，两接触纤维表面间最小夹角如图 3 所示。金属液若能渗入该夹角，渗入其它部位则不成问题。由图 3 中的几何关系不难导出金属液前沿曲率半径为：

$$r=-\frac{R_f-\sqrt{R_f^2-(\sin^2\beta)x^2}}{\cos(\theta-\alpha)+\cos\theta} \tag{15}$$

假定另一主曲率半径为无穷大，根据 Laplace 方程，金属液渗入该夹角所需压力为：

$$P=-\frac{\sigma_{lg}[\cos(\theta-\alpha)+\cos\theta]}{R_f-\sqrt{R_f^2-(\sin^2\beta)x^2}}$$

$$(R_f\neq\sqrt{R_f^2-(\sin^2\beta)x^2},\quad R_f\geqslant(\sin\beta)x) \tag{16}$$

式中 $\alpha=\mathrm{arctg}\dfrac{(\sin^2\beta)x}{\sqrt{R_f^2-(\sin^2\beta)x^2}}$。

由式(14)和式(16)可知，当 $\alpha\to 0$ 或 $x\to 0$ 时，金属液前沿趋近纤维接触点，此时 $P\to\infty$，也就是说，对一不润湿体系，使两接触纤维间的缝隙完全充满金属液，几乎不可能。只能在可能的条件下，尽量增大浸渗压，并在压力下完成凝固，才能减少材料中的微观孔洞。

3 ZA22/Al_2O_3 复合材料的浸渗

为考察预制块在压力下的变形行为，在 AG－10TA 型电子万能试验机上对 Al_2O_3 短纤维预制块进行压缩试验，其结果如图 4 所示。可以发现，随着压力的增大，预制块的变形分三个阶段，第一阶段是弹性变形阶段，纤维不发生断裂；第二、第三阶段，纤维断裂，预制块被压实。

由式(7)可算得 ZA22 合金液浸渗 $V_f=20\%$ 的 Al_2O_3 短纤维预制块的临界浸渗压 $P_c=64.16$kPa(计算所用参数见表 1)，处于预制块受压变形的第一阶段内，这说明 ZA22 合金液渗入 Al_2O_3 短纤维预制块之前，仅引起预制块的少许弹性变形，不会产生预制块被压坏的现象。

表 1 ZA22/Al_2O_3 计算参数(t＝680℃)

η(Pa·s)	ρ(kg/m³)	σ_{lg}(N/m)	R_f(m)	θ(°)	H_0(mm)	$\bar{v}$(m/s)	g(m/s²)
1.25×10^{-3}	4.5×10^{3}	0.77	3×10^{-6}	120	40	5×10^{-3}	9.8

4 结 论

1. 随机取向、均匀分布短纤维预制块等价毛细半径与$\frac{V_f}{1-V_f}$成反比。

2. 短纤维预制块的临界浸渗压与$\frac{V_f}{1-V_f}$成正比。

3. 金属液浸渗预制块过程中，当浸渗距离一定时，浸渗压与$\frac{V_f}{1-V_f}$呈抛物线关系，$\frac{V_f}{1-V_f}$越大，浸渗压越大；当 V_f 一定时，浸渗压与浸渗距离成直线关系，距离越长，浸渗压越大。

4. 随 V_f 增大，纤维间接触几率增大，使金属熔体完全充满两接触纤维间的缝隙难度较大，需要较高的浸渗压。

5. ZA22/Al_2O_3 体系最终压力取 100MPa，基本能满足要求。

参 考 文 献

1 兰民国，佟国栋，姜兆梦等. 特种铸造及有色合金，1992；2：31—33

2 耿林，姚忠凯. 复合材料学报，1990；7(4)：73—77

3 Mortensen A. Cornie J A. Metall Trans A, 1987; 18A:1160—1163

4 Clyne T W, Mason J F. Metall Trans A, 1987; 18A:1519—1530

5 Said Nourbakhsh, Feilin Liang, Harold Margolin. Metall Trans A, 1989; 20A:1861—1866

6 Mortensen A. Masur L J. Cornie J A, Flemings M C. Metall Trans A, 1989; 20A: 2535—2546

7 夏振海，毛志英，周尧和. 金属学报，1991；27(6)B：426—432

8 Danis M, lacoste E, Girot F. Fonderie—Fondeur D'Aujourd' Hui 116—Juin—Juillet 1992; 45—54

9 盛敬超. 工程流体力学. 北京：机械工业出版社，1988；274—275

10 于思荣，何镇明，孟长生，陈凯. 中国稀土学报，1994；12(4)：323—327

THEORETICAL ANALYSIS OF THE INFILTRATION PRESSURE OF SQUEEZE INFILTRATION MMCs AND APPLICATION

Yu Sirong He Zhenming

(Jilin University of Technology, Changchun 130025)

Abstract Infiltration pressure models fabricating MMCs by the squeeze infiltration method were established according to the basic principle of hydromechanics and Laplace equation. The infiltration process of ZA22/Al_2O_3 composites was analysed and ZA22/Al_2O_3 composites with excellent properties were prepared under the guidance of the models.

Key words MMCs, infiltration pressure, Zn-Al alloy, Al_2O_3, preform