第 12 卷 第 1 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 12 No. 1
1995 年 2 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Feb. 1995

纤维增强金属基复合材料液相浸渗充填过程

王浩伟 张国定 吴人洁
(上海交通大学复合材料研究所,上海 200030)

摘 要 液相浸渗法是制造纤维增强金属基复合材料的先进工艺,其浸渗充填过程是复合材料的组织和性能的主要决定因素之一。本文通过纤维增强金属基复合材料液相浸渗填充过程阻力及充填形式的研究,发现纤维分布状态及纤维与基体的润湿性决定着浸渗充填形式。探讨了通过控制纤维分布状态、改善纤维与基体的润湿性和优化工艺参数等方法,以控制浸渗充填过程,获得高性能复合材料的途径。

关键词 金属基复合材料,纤维,液相浸渗

1 前 言

纤维增强金属基复合材料(FRM)具有高比模量、比强度、低热膨胀系数和良好的高温性能,在许多领域具有广阔的应用前景。但由于制造工艺复杂、成本高、性能低且不稳定,迄今仍未在工业上得到广泛的应用[1,2]。

FRM 的制造方法有固相成形和液相成形两大类。液相成形法中的液相浸渗法工艺简单、成本较低而且零件适用性强,被认为是目前最有效而经济的方法[3,4]。该工艺包括液体金属浸渗充填纤维预制型及其后的凝固过程。其中液相浸渗充填过程是工艺的关键,该过程常导致增强纤维分布状态的变化,而浸渗的不完整性导致复合材料中孔洞等缺陷的产生,进而影响复合材料的组织与性能。本文通过 FRM 液相浸渗充填过程阻力及充填形式的分析,探讨了充填过程控制途径,为获得高性能的纤维增强金属基复合材料提供依据。

2 液相充填过程阻力及形式分析

在纤维预制型的流动充填过程中,液态金属受到各种阻力的作用,其中毛细作用力和凝固阻力是主要的作用力。

毛细作用力是由液态金属流动前端表面张力引起的作用力,该作用力对浸渗过程的作用取决于液态金属对纤维的润湿性。当液态金属润湿纤维时,毛细作用力促进浸渗的进行,浸渗为自发过程;当液态金属不润湿纤维时,毛细作用力成为浸渗阻力,浸渗非自发进行。

凝固阻力是液态金属在充填过程中,由于温度降低而形核、结晶,在金属液中形成固相而阻碍金属液的流动。凝固阻力随浸渗的进行、温度的降低而增大,固相分数达一定值后封闭堵塞流动通道,从而限定了液态金属的浸渗程度。

本文于 1993 年 4 月 4 日收到。国家自然科学基金资助课题

其它阻力还有重力、铸型内气体受压缩而产生的气体反压力、液态金属流动与纤维表面的摩擦阻力以及充型时端部紊流引起的非线性力。液态金属在纤维中的浸渗充填过程是上述阻力与浸渗压力共同作用的结果。液态金属在纤维中的浸渗速度为[7,8]

$$u = \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}z}/16.8\left[\frac{v_f}{R_f(1-v_f)}\right]^2\eta \tag{1}$$

其中 P 为各阻力与外加浸渗压力的叠加,z 为浸渗方向,R_f 为纤维半径,v_f 为纤维体积分数,η 为金属液动力学粘度。

液态金属在预制型中的充填流动形式不仅与上述阻力有关,而且决定于预制型中纤维的分布形式。当纤维均匀分布时,无论金属液与纤维是否润湿,毛细作用力在各处形成的浸渗动力或阻力相同,而且其它各种阻力也在各处相同。此时金属液均匀浸渗充填纤维间隙,浸渗液体前沿宏观为大平面。

由于纤维在制造时常以几千根单丝组成束,在预制型中则呈不均匀的成束分布状态,特别是当成束纤维经涂层或其它预处理后。此时束间局部体积分数小于束内体积分数。根据式(1)可知金属液在束间的流动速度大于束内。因此金属液首先充满束间的较大空隙,随后沿垂直纤维方向横向浸渗,与纤维束内平行于纤维方向的金属液流共同充填纤维束内的间隙。

根据 Kelvin 方程

$$\Delta P_\sigma = 2\sigma\sum_{i=1}\frac{1}{r_i} \tag{2}$$

其中 ΔP_σ 为由曲率半径 r_i 引起的表面总压力降,σ 为液体表面能,束内与束间空隙的差异使其毛细作用力不同。当金属液与纤维不润湿时,束间大空隙产生的毛细作用阻力小于束内小空隙中的毛细作用阻力,其差别增大了束间与束内浸渗速度差,进一步加剧了浸渗的非均匀程度;当金属液润湿纤维时,毛细作用力作为浸渗动力,束间大空隙毛细作用动力同样小于束内,其差别减小了束间与束内浸渗速度差,使浸渗非均匀性得到改善和减缓。

由式(1)、(2)推知充填速度与曲率半径呈高次方关系,毛细作用力与之成一次方关系,而且与充填速度呈一次方关系,加上润湿铺展速度限制了毛细作用力的效用,所以间隙的大小通过毛细作用力而对充填速度影响的程度较小,界面润湿与否不能改变其非均匀浸渗的性质,只能加剧或减缓非均匀的程度。

3　浸渗充填过程的控制

浸渗充填过程的控制是通过其过程因素的控制来完成的。由于过程中的各种阻力以及纤维分布对浸渗充填的重要作用,液相浸渗过程的控制必须通过降低和克服各种阻力以及控制纤维分布来完成。

3.1　纤维分布状态的控制

由上节知,纤维分布的均匀性直接决定着浸渗充填的均匀性。在非均匀分布的预制型中,特别是当液态金属与纤维不润湿时,液态金属对各处的充填速度不同。纤维成束分布时,束内充填迟于束间充填,束间金属液横向流动时对纤维束的挤压,使束内空隙进一步减小而使束内的充填更为困难,很容易造成充填不完整等材料缺陷。例如不润湿金属液充填纤维相互接触所形成的尖角或楔形空间,在热力学上是不可能进行的[9],即浸渗缺陷是不可避免的。为获得无缺陷的复合材料必须控制纤维的分布状态。

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

反应过量。

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

9 Mortensen A. Metall. Trans A, 1987: 1160—1163
10 王浩伟 等. 西北工业大学学报, 1993; 3: 279—284
11 Clyne T W. ICCM-Ⅵ, London, 1987: 2.275—2.286

THE LIQUID INFILTRATION AND FILLING PROCESS FOR FIBER REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITES

Wang Haowei Zhang Guoding Wu Renjie
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract Liquid infiltration processing is advanced technique for the preparation of fiber reinforced metal matrix composites (FRM). The morphology and properties of FRM are influenced greatly by the infiltration and filling process. In this paper the resistance to the process and the filling form of FRM are studied. It is found that the filling form is determined by the distribution of fibers and the wettability between fibers and matrix. The way of controlling the infiltration and filling process to get perfect FRM was discussed by controlling the distribution of fibers, improving the wettability between fibers and matrix, and optimizing the parameters of the processing.

Key words metal matrix composites, fiber, liquid infiltration

中日耐蚀高分子材料展览会简况

本报讯 '94 中日耐蚀高分子材料国际交流会暨展览会 1994 年 10 月 10 日在上海华亭宾馆开幕。大会学术气氛浓厚，展出的中外耐蚀产品（材料）品种繁多，引起了与会者和参观者的极大兴趣。三天的会议在融洽和热烈的气氛中胜利闭幕。

这次展览会上值得一提的是，占据整个展台九分之一、设置五个展台的上海科欣中心（上海科欣防腐蚀新技术发展中心、上海世江科欣防腐工程技术有限公司、上海科欣防腐蚀材料厂、上海求鑫鳞片厂、上海七友水处理实业公司），以强大的科技优势，向参观者推出十多大类、数十个品种的耐蚀高分子材料及耐蚀制品。由上海科欣防腐蚀新技术发展中心研制、上海科欣防腐蚀材料厂专业生产的乙烯基酯不饱和聚酯树脂 YX 系列，其耐蚀性能经日本权威机构测定，其中一些产品各项指标均达到或接近世界同类产品。乙烯基酯树脂在工业发达国家使用十分广泛，它既具有环氧树脂优良的粘结性又具有不饱和聚酯树脂优良的加工工艺性，在乙烯基酯树脂分子中羟基的存在提高了树脂对玻璃纤维的浸润性，具有更优良的施工工艺性；乙烯基酯树脂可采用紫外线或电子束等光固化工艺，提高了施工的水平和质量。

近年来，随应用水平的提高及同国外技术接轨的需要，乙烯基酯树脂产量已呈迅速上升趋势，目前，我国乙烯基酯树脂的品种主要有下述几类： （下转第 49 页）