

玻璃/铝复合材料断裂性能的研究

马 天 飞

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 本工作以玻璃为基质, 以金属铝粉为分散相, 制备了玻璃/铝复合材料。通过对复合材料断裂韧性的测试及对其断裂表面形貌的分析, 提出了金属铝对玻璃的增韧机理。并讨论了影响增韧效果的工艺因素。

关键词: 复合材料; 断裂韧性; 铝; 玻璃

1 前 言

复合材料是材料科学中目前比较活跃的领域之一。玻璃/金属复合材料是以玻璃为基质, 金属粉体为分散相, 采用特种陶瓷工艺制备而成。它是一种新型复合材料。由于它具有比重小, 硬度高、耐磨和化学侵蚀性能好及较高的强度、韧性和良好的导热性, 可用作特殊环境下使用的抗热冲击部件, 耐蚀部件以及用于核废料的贮存等。

玻璃/金属复合材料是基于玻璃分散增强的设想提出来的。从六十年代起, 一些材料工作者曾将氧化铝, 氧化锆, 莫来石等陶瓷颗粒引入到玻璃中, 研究了分散相对玻璃强度及弹性模量等性能的影响^[1-3]。而对玻璃/金属复合材料的研究, 到目前为止仍处于起步阶段。

本文选择了金属铝粉作为分散相, 研究了玻璃/铝复合材料的断裂性能及其影响因素。并采用光学显微镜和电子扫描显微镜 (SEM) 等研究方法探讨了金属铝对玻璃的增韧机理。

2 实验方法

复合材料的制备是以 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 系统玻璃为基质玻璃, 分别选用三种不同的金属铝粉作为分散第二相。玻璃及铝粉的物理性能见表 1, 铝粉的颗粒形状及表面状态如图 1 所示。

将所用铝粉经高温预氧化处理后, 与玻璃粉料相混合, 并进行均匀化处理, 加压成型后在 540°C 下烧结 2 小时, 最后经退火和研磨加工获得测试样品。试样的尺寸为 $3\times 6\times 40\text{mm}$ 。

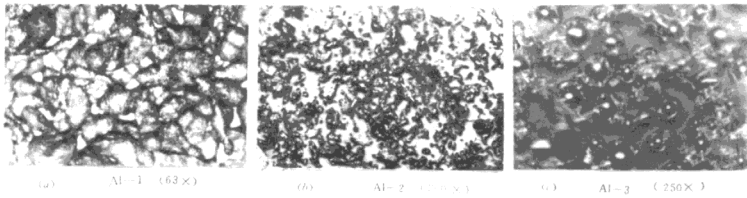


图1 金属铝粉的显微形貌(反光)

断裂韧性的测试采用 Gobin 等^[4]所述方法,并按下式计算试样的断裂韧性 K_{Ic} :

$$K_{Ic} = \frac{P_R \cdot L}{B \cdot W^{3/2}} [31.7(\frac{a}{W}) - 64.8(\frac{a}{W})^2 + 211(\frac{a}{W})^3]^{1/2}$$

式中: P_R —断裂时负荷压力;

L —跨距;

B, W, a —为试样的几何尺寸(见图2)。

断裂表面形貌的观察在 Leitz 光学显微镜和 JEOL Super prob 733 型电子显微镜下进行。

3 结果与讨论

3.1 玻璃/铝复合材料的断裂韧性

玻璃/铝复合材料的断裂韧性的测试结果示于图3。所用铝粉为经过 450℃ 预氧化处理 5 小时(空气中)的 Al-1 铝粉。随着铝含量的增加,复合材料的断裂韧性得到明显的提高,最大可比基玻璃(0.75MNm^{-3/2})提高近 3 倍。当铝含量超过 15Vol% 后,复合材料的断裂韧性不再随之而提高,反而有所降低。

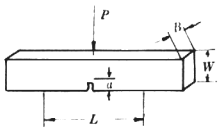


图2 断裂韧性测试示意图

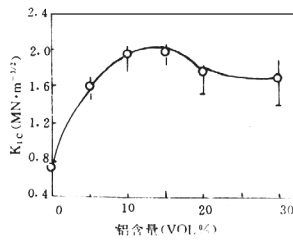


图3 断裂韧性随铝含量的变化
(所用铝粉为 450℃ 预氧化 5 小时的 Al-1)

通过对烧结过程的观察,可以发现,试样的气孔率随着铝含量的增加而变大^[5]。这些气孔的产生与搪瓷烧结过程所发生的情况相类似。由于气相的存在,削弱了金属铝颗粒的增韧作

用，这可能是在铝含量较高时，复合材料的断裂韧性不再继续提高的原因所在。

3. 2 金属铝颗粒对玻璃的增韧机理

一般说来，玻璃在常温下的破坏为脆性断裂。在外力作用下，玻璃中的微裂纹在其尖端处产生应力集中，当该应力值超过玻璃的临界应力时，裂纹就迅速扩展使玻璃断裂。比较玻璃和复合材料的断裂表面（图4），发现玻璃的断裂面比较平滑，裂纹扩展呈放射状（图4-a）；而复合材料的断裂面则凹凸不平，裂纹扩展呈弯曲走向（图4-b）。说明铝颗粒的存在，对裂纹的扩展起到了阻碍作用。

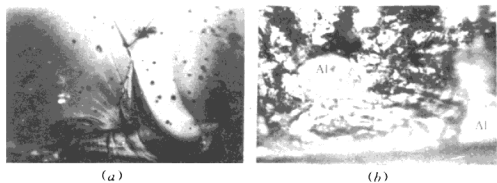


图4 玻璃和复合材料的断裂表面（反光400×）
(a) 基玻璃；(b) 含15Vol.%Al-2的复合材料



图5 复合材料断裂面显微形貌 (SEM)
(a) 裂纹绕过铝颗粒；(b) 裂纹改变方向；(c) 裂纹通过界面

在扫描电子显微镜下观察复合材料的断裂表面（图5），发现当裂纹与铝颗粒相遇后，或者沿着两相边界绕过铝颗粒向前扩展（图5-a）；或者改变扩展方向折回玻璃相（图5-b）。其结果都分散了裂纹尖端应力场的能量，起到了增韧作用。

另一方面，裂纹在经过两相界面时，有时穿过中间过渡层（其组成为氧化铝薄膜+富含 Al³⁺ 的玻璃相），直接与金属铝发生作用（图5-c）。这种断裂方式可用图6 示意地描述由于铝具有良好的延展性，在裂纹尖端应力场的作用下，铝颗粒产生微小的局部变形，吸收了部分应力场的能量，从而使玻璃的韧性得到进一步的提高。

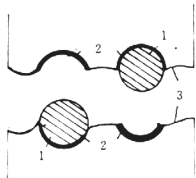


图6 复合材料断裂模型
1-金属铝；2-中间过渡层；
3-玻璃断裂面

3.3 影响复合材料断裂韧性的因素

(1) 不同金属铝粉的影响

在相同的实验条件下，分别采用表 1 中的三种铝粉制备复合材料。其断裂韧性的测试结果如图 7 所示。其中 Al-1 和 Al-2 两种铝粉的差别在于颗粒尺寸的不同，说明采用颗粒尺寸较小的铝粉更有利于提高复合材料的断裂韧性。根据上述增韧机理，这种颗粒尺寸的影响

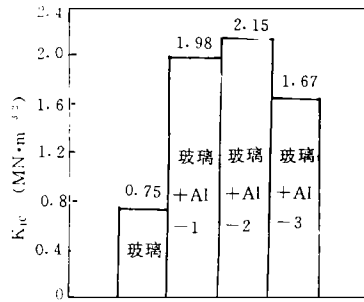


图 7 不同铝粉对断裂韧性的影响 (铝粉经 450℃ 预氧化 5 小时，加入量为 15Vol%)

可以归结为，是由于单位体积内铝颗粒数的增加，增大了裂纹在扩展过程中与铝颗粒作用的几率，从而改善了增韧效果。尽管如此，Al-3 铝粉比 Al-1 铝粉的颗粒尺寸小的多，但其增韧效果却远不如后者。这说明除了颗粒尺寸外，金属颗粒的形状和表面状态也具有一定的影响。根据 Tammala^[3]对玻璃中不同形状氧化锆颗粒的增强作用研究结果，可以认为 Al-3 和 Al-1 两种铝粉的增韧效果不同主要是由于表面状态的差异造成的。电子探针对于玻璃与铝两相界面处中间过渡层的分析结果表明，在相同的制备条件下，使用表面粗糙的 Al-1 铝粉与表面光滑的 Al-3 铝粉相比较形成的中间过渡层厚度大一些^[5]。中间过渡层厚度的增加，提高了界面的粘附强度，降低了界面应力，因此可以获得更好的增韧效果。

表 1 玻璃及铝粉的物理性质

性能材料	粒度 (μm)	热膨胀系数 $\alpha \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	弹性模量 E kg/mm ²	泊松比 ν	颗粒形状
基质玻璃	13	16.0	7410	0.22	-
Al-1 铝粉	120	25.6	7031	0.33	蠕虫状
Al-2	21	25.6	7031	0.33	蠕虫状
Al-3	40	25.4	7031	0.33	球状

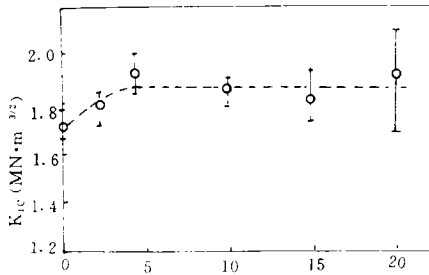


图 8 铝粉预氧化时间对断裂韧性的影响 (450℃ 下预氧化，15Vol% Al-1)

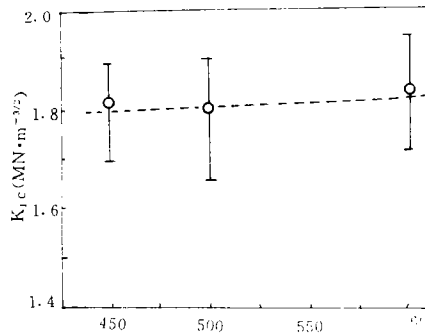


图 9 铝粉预氧化温度对断裂韧性的影响 (预氧化 5 小时，15Vol% Al-1)

(2) 铝粉预氧化条件的影响

在通常的情况下，玻璃对金属的润湿和粘附能力较差，玻璃—金属两相界面的结合，主

要是通过金属表面的氧化层来实现的。图 8 给出了 Al-1 铝粉在空气中 450℃ 下不同预氧化时间对复合材料断裂韧性的影响。随着预氧化时间的增加，断裂韧性明显提高了；但是超过 5 小时以后，进一步延长预氧化时间，复合材料的断裂韧性几乎不再增加。

复合材料的断裂韧性随铝粉预氧化温度的变化示于图 9。随着氧化温度的提高，断裂韧性增加的幅度不大。这些结果表明，在玻璃/铝复合材料制备过程中，金属铝的预氧化处理是十分必要的。但当铝表面形成一定厚度的氧化层后，进一步的氧化相当缓慢。因此，过分地加强预氧化条件意义不大。

4 结 论

(1) 在玻璃中引入金属铝分散相，可以起到增韧作用。其增韧机理在于：在断裂过程中，由于铝颗粒的存在，改变了裂纹的扩展方向，分散和吸收了裂纹尖端应力场的能量，进而增大了裂纹扩展的阻力。

(2) 玻璃/铝复合材料的断裂韧性受到金属铝分散相的颗粒大小，表面状态及预氧化处理条件等因素的影响。在满足良好预氧化处理的条件下，引入表面粗糙的小颗粒铝粉有利于提高复合材料的断裂韧性。

参 考 文 献

- [1] P. L. Studt & R. M. Fulrath, J. Am. Ceram. Soc., 1962, 45 (4): 182-88
- [2] D. P. H. Hasselman & R. M. Fulrath, ibid, 1965, 48 (4): 218-19
- [3] R. R. Tummala & A. L. Friedberg, ibid, 1969, 52 (4): 228
- [4] P. Gobin et al., Influence de la composition sur la ténacité des verres. Thèse, université' des sciences et techniques du languedoc, 1978: 7
- [5] 马天飞, 玻璃-铝复合材料的研究。华东化工学院硕士论文, 1986

The Study on the Fracture Characters of Glass/Alluminium Composite

Ma Tianfei

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130022)

Abstract

In this work, the glass/alluminium composite was prepared by using glass as matrix and metallic alluminium as disperse phase. The toughening mechanism of this composite was proposed by measuring the fracture toughness and analysing the morphology of its fracture surface. Some Factors affecting its fracture toughness were discussed.

Key words: Composite, Fracture Toughness, Alluminium, Glass