

# 揭密美国隐形飞机之利器-吸波材料

1991 年，美国 F-117 战机在海湾战争中一战成名。据称其承担了战争中美国空军攻击目标总数的 40%，总计出击达 1271 次，无一受损。同年，F-117 的原型机退役并收藏于美国空军国家博物馆。只是将飞机送往博物馆之前，为了防止泄密事件发生，制造商洛克希德采用喷砂处理彻底剥除了覆盖机身的吸波材料。



使用第一代隐身涂料的 F-117 战斗机（左）和 B-2 轰炸机（右）

如今，用于 F-117 的耐腐蚀多晶羰基铁吸波涂料早已被解密，随着雷达技术进步，针对隐形飞机的吸波材料除了要求具备更宽的吸波频率和更强的吸波能力，再就体现在轻薄和耐候性上。美国第五代战机 F-35 的飞行时速、巡航能力，甚至雷达探测距离都不过和三代战机相当，但是隐身能力却得到大大提升，新型吸波材料自然功不可没。引用洛克希德官方说法，新一代隐身涂料具有耐久性高、

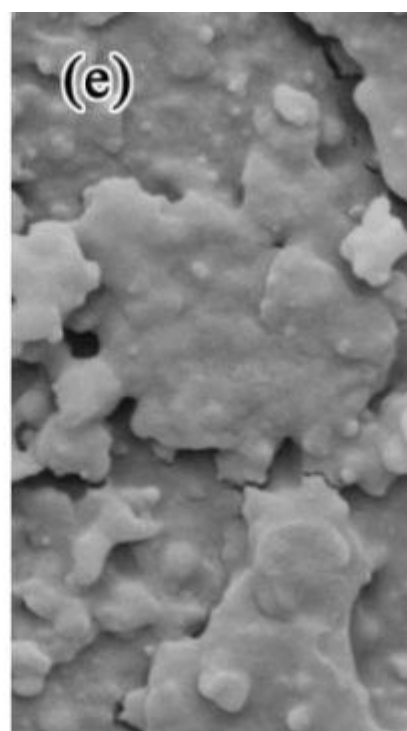
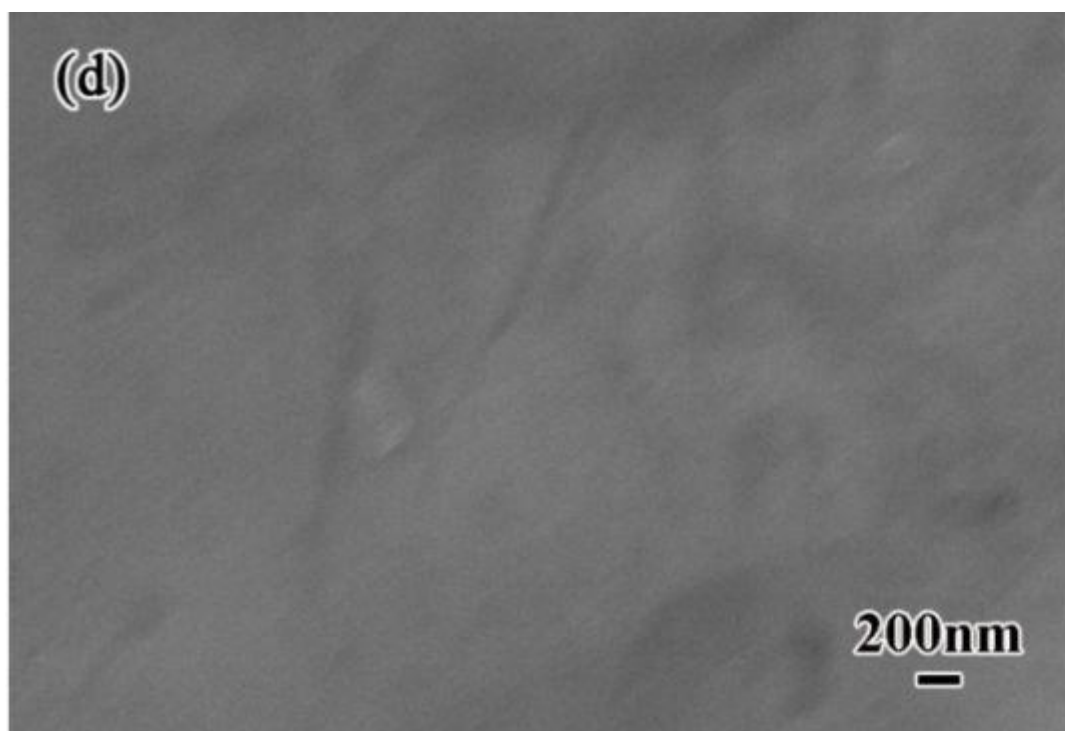
易维护的特点。据悉，片状和微细化正是提升这种吸波材料效果的有效途径，它又刚好是离子球磨机所擅长的。



PBMS 型等离子球磨机（华南理工大学朱敏教授团队研制）

等离子技术在粉体工业的应用已经有很多相关研究和成果。比如常见的等离子球形化技术已经成熟应用于 3D 打印金属合金粉体制备中。但将其技术引入并成功嫁接到振动球磨机上，并且用于制备片状粉体是怎么回事呢？

首先，等离子球磨机是将冷场放电等离子体引入到机械振动球磨中，利用近常压下气体在球磨罐中形成的高能量的非平衡等离子体和机械球磨的协同作用。在密封球磨罐体系内形成非热等离子体作用下，物质分子容易转化成原子态和激发态进行重新结合，促进粉末的组织细化、合金化、活性激活、化合反应及加速原位气-固相反应等，能极大的提高球磨效率，显著降低球磨污染，并形成独特的结构而显著提高材料的性能。

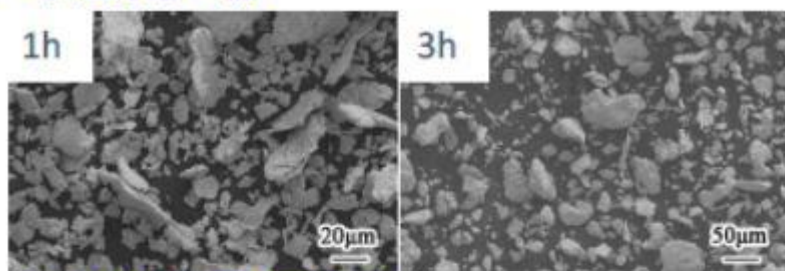


(a)单纯机械力作用下的片状铝粉表面；（b）机械力与电场协同作用下的铝粉表面

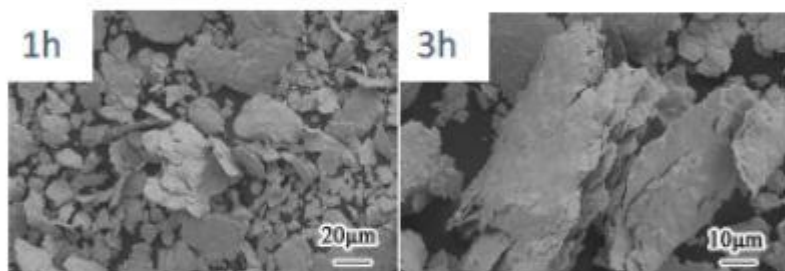
继而，等离子体产生的高能电子通过撞击造成晶体的晶界滑移甚至位错，在短时间球磨过程中表现出超高塑性（电致塑性效应），形成超细片状结构。简单介绍电致塑性效应就是，脉冲电流通过金属材料时，产生大量的定向漂移的自由电子(电子风)，漂移电子群频繁地定向撞击位错，会对位错段产生一个类似于外加应力的电子风力，促进位错在其滑移面上的移动，并打开位错缠结，使得已经加工硬化的金属得以进一步塑性变形。同时，施加脉冲电流时电能、热能和应力是被瞬时输入到材料中，原子的随机热运动在脉冲电流瞬时冲击力作用下获得足够的动能离开平衡位置，原子的扩散能力加强，位错更容易滑移、攀移，从而提高了金属的塑性。



◆普通球磨Fe粉



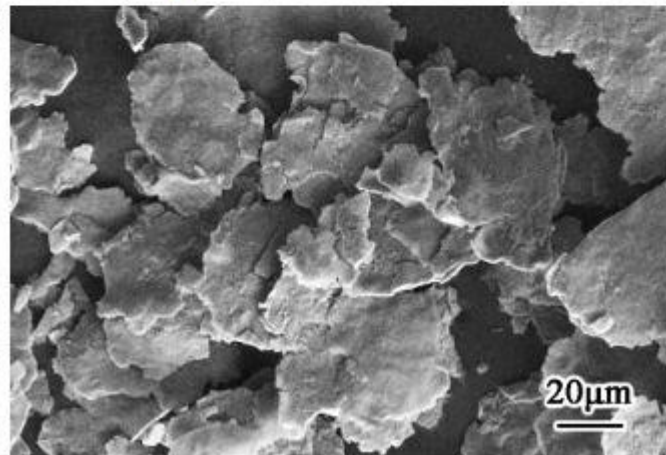
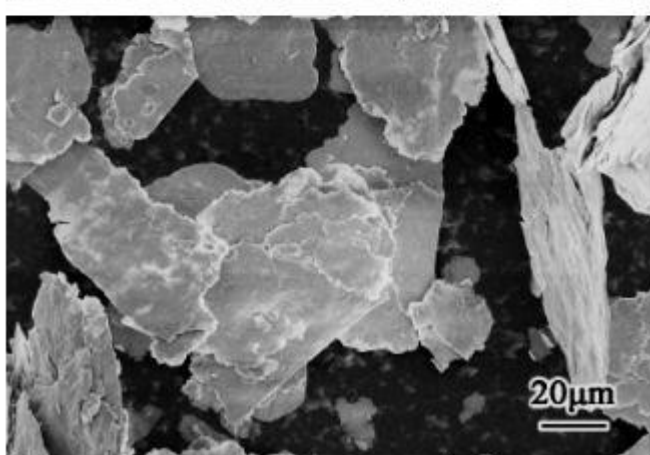
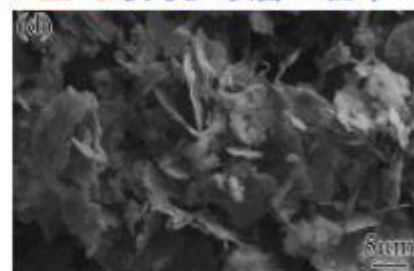
◆氩气等离子球磨Fe粉



◆氩气等离子球磨Al粉, 3h



◆氩气等离子球磨Fe粉, 7h



氩气等离子体球磨 Al 粉 2h( 左 );氩气等离子体球磨 Al 粉 4h( 右 )

随着对吸波材料研究的深入，开发出了碳系、铁系、陶瓷以及导电聚合物、手性材料等多种体系的新材料，但应用需求方面对材料轻、薄、强的追求方向不会改变。回到前文介绍的美国战机采用的第一代的羰基铁吸波材料，其重量达涂层重量的 50%以上，这不仅增加了战机的负载，并且也导致成本高和耐候性差的结果。

除了上述作为军事隐形用途，吸波材料已经广泛应用于日常民用领域。比如作为 OLED 屏手机内必不可少零件之一的噪声抑制片，也势必追求越来越薄，且需不断提高磁导率，抑制手机使用时电磁产生的噪声。日本先进产品可以做到 20 微米，这首先就要求在源头提升粉体制备水平。

综上，等离子球磨机在吸波材料制备方面的优势，相信一定能够在通信电子和国防建设等领域取得更多成果。