

# 颗粒增强铝基复合材料的组织与性能<sup>①</sup>

凌兴珠 徐振民

(中南工业大学粉末冶金研究所, 长沙 410083)

**摘要** 用熔铸法制备了 TiB<sub>2</sub> 和 SiC 颗粒增强铝基复合材料, 评价了 TiB<sub>2</sub>/Al 和 SiC/Al 复合材料的硬度, 研究了增强剂的加入方式和体积分数对 TiB<sub>2</sub>/Al 复合材料拉伸性能的影响; 并用扫描电镜分析了复合材料的显微组织。结果表明, TiB<sub>2</sub> 颗粒对 Al 基体的增强效果比 SiC 颗粒好, Ti, B 化合物的增强效果优于 TiB<sub>2</sub> 粉末, 复合材料的力学性能随 TiB<sub>2</sub> 体积分数增加而提高; 用含 Ti, B 化合物的混合物增强的 1.5% TiB<sub>2</sub>/Al(体积分数) 复合材料的热轧退火态性能为  $\sigma_b$  160.4 MPa,  $\delta$  13.1%, 铸态 HB 451 MPa。SEM 观察结果表明, 在铝基体中添加 Ti, B 化合物的混合物能在基体中原位生成 TiB<sub>2</sub> 颗粒。

**关键词** 颗粒增强 铝基复合材料 TiB<sub>2</sub>

**中图法分类号** TB323

60 年代以来, 金属基复合材料(MMC) 已成为竞相研究开发的一类多用途新型结构材料, 采用的增强颗粒有两类: 一类是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, TiC, B<sub>4</sub>C 等陶瓷颗粒, 目的是提高材料的硬度、强度和耐磨擦磨损性能; 另一类是固体润滑剂颗粒, 如石墨, 云母, MoS<sub>2</sub> 和 BN 等, 用以减少滑动摩擦和磨损<sup>[1]</sup>, SiC 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是使用最多的增强颗粒。近年来, TiB<sub>2</sub> 颗粒增强铝基复合材料的研究日益增多, 其中以美国、日本、欧洲研究最为活跃<sup>[2-8]</sup>, TiB<sub>2</sub> 具有高的熔点、硬度和弹性模量, 耐热、耐蚀和抗氧化能力强。在某些情况下, TiB<sub>2</sub>/Al 的硬度和强度比 SiC/Al 更高<sup>[2]</sup>, 因此 TiB<sub>2</sub> 是一种很有潜力的增强剂。

颗粒增强铝基复合材料的制造工艺有粉末冶金法和熔铸法。如果按颗粒的加入方式, 又可分为强制加入和原位生成两种方法, 原位生成法制备的 MMC 有更优良的性能。本试验用熔铸法制备了 TiB<sub>2</sub>/Al 和 SiC/Al 复合材料, 探索了用熔铸法制备原位生成 TiB<sub>2</sub>/Al 复合材料的可行性。

## 1 试验方法

试验采用常规铝合金熔炼工艺与设备制取铝基复合材料。以工业纯铝(L1) 为基体, 增强剂有 TiB<sub>2</sub> 粉(3.33 $\mu$ m),  $\beta$ -SiC 粉(4.01 $\mu$ m) 和 Ti, B 化合物。增强剂加入方式选用强制加入和原位生成两种, 前者即直接加入粉末, 后者即加入 Ti, B 化合物的混合物, 熔炼过程中原位生成 TiB<sub>2</sub> 颗粒。制备时先熔化纯铝, 加熔剂保护, 再加增强剂并同时搅拌均匀, 于金属模中浇注然后进行冷、热轧制并加工成拉伸试样。为了作比较, 本实验还用相同条件制备了纯铝基体材料。测试了  $\sigma_b$ ,  $\delta\%$ , HB, 进行了 SEM 分析等。实验结果 HB 取 3 个样品的 9 个测量值的平均值,  $\sigma_b$  和  $\delta\%$  均为 8 个样品的平均值。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 增强剂种类对铝基复合材料硬度的影响

用强制加入 3% 的  $\text{TiB}_2$  (体积分数) 粉或 SiC 粉的方法, 制备了  $\text{TiB}_2/\text{Al}$  和  $\text{SiC}/\text{Al}$  两种材料; 其铸态布氏硬度 HB 结果比较列于表 1。

表 1 增强剂种类对铝基复合材料硬度的影响

**Table 1 Influence of reinforcing agents on hardness of aluminium matrix composite**

Material	Reinforcing agent	HB / MPa	Hardness increase/ %
SiC/Al	$\beta$ -SiC powder	361	52.3
$\text{TiB}_2/\text{Al}$	$\text{TiB}_2$ powder	412	73.8
Pure Al	/	237	/

由表 1 可见,  $\text{TiB}_2/\text{Al}$  的 HB 值明显高于  $\text{SiC}/\text{Al}$ , 与基体相比, 布氏硬度提高约 74%, 可以认为  $\text{TiB}_2$  颗粒硬化纯铝的效果要比 SiC 好。两种增强剂的性能见文献[2, 3]。 $\text{TiB}_2$  与 SiC 相比, 熔点、显微硬度、弹性模量和热膨胀系数都较高, 这些都可能是  $\text{TiB}_2$  增强效果优良的原因。此外, 润湿性是熔铸法制备 MMC 时至关重要的问题。实验中,  $\text{TiB}_2$  和 SiC 粉经同样的预处理, 但  $\text{TiB}_2$  粉与 Al 液的润湿性优于 SiC 粉。熔体上部灰渣较少, 实际进入复合材料的  $\text{TiB}_2$  量多于 SiC, 这也是  $\text{TiB}_2/\text{Al}$  的 HB 值高于  $\text{SiC}/\text{Al}$  的重要原因。SiC 与 Al 的润湿性较差, 用熔铸法制备  $\text{SiC}/\text{Al}$ , 一般都应对 SiC 粉表面进行涂覆处理, 否则加入效果太差。SiC 与 Al 的润湿角只有在高于 1000 °C 时才会急剧减小<sup>[4]</sup>。Roebuck 等人<sup>[2]</sup>的研究表明, 由于  $\text{TiB}_2$  的弹性模量比

SiC 高, 故  $\text{TiB}_2$  对提高 2014Al 合金的弹性模量比 SiC 更有效。例如添加 11%  $\text{TiB}_2$  (体积分数的) 2014Al 合金其弹性模量与添加 16% SiC 的 2014Al 合金相当, 若两者添加的体积分数相同时,  $\text{TiB}_2$  的增强效果优于 SiC, 且  $\text{TiB}_2$  在提高复合材料的强度和硬度方面比 SiC 更为有效<sup>[2, 5]</sup>。本实验两种复合材料 HB 值的比较显示了同样的趋势。

## 2.2 增强剂加入方式的选择

以  $\text{TiB}_2$  颗粒为增强剂, 比较强制加入  $\text{TiB}_2$  粉与加入 Ti, B 化合物原位生成  $\text{TiB}_2$  颗粒两种方式对复合材料性能的影响, 其结果如表 2 所列。

由表 2 可知:

(1) 添加 Ti, B 化合物的复合材料, 其  $\sigma_b$  和 HB 明显高于添加  $\text{TiB}_2$  粉末的复合材料的相应性能, 且冷轧态  $\sigma_b$  的提高趋势比热轧退火态更明显。与纯铝基体相比, 当加 1.5%  $\text{TiB}_2$  (体积分数) 时, 添加 Ti, B 化合物与  $\text{TiB}_2$  粉末的复合材料, 其冷轧态  $\sigma_b$  的提高率分别为 49.6% 和 18.2%; 铸态 HB 的提高率分别为 71.5% 和 18.3%。

结果表明, 加入 Ti, B 化合物的增强效果明显优于强制加入  $\text{TiB}_2$  粉末的增强效果。马宗义等人<sup>[6]</sup>研究认为, 原位生成的  $\text{TiB}_2$  粒子具有亚微尺寸 (约 0.1  $\mu\text{m}$ ), 且表面清洁无反应产物, 与铝基体界面结合良好。这类复合材料比常规材料具有更高的强度和模量, 本实验方法尽管与文献[6]不同, 但在高温下 Ti, B

表 2 增强剂加入方式对  $\text{TiB}_2/\text{Al}$  复合材料性能的影响

**Table 2 Influence of addition method of reinforcing agent on properties of  $\text{TiB}_2/\text{Al}$  composite**

Addition method	Addition amount (Volume fraction) / %	$\sigma_b$ / MPa		$\delta$ / %		HB / MPa Casting
		Cool rolling	Hot rolling and annealing	Cool rolling	Hot rolling and annealing	
-	0	114.0	-	11.1	11.5	262
$\text{TiB}_2$ powder	0.9	128.1	127.6	8.5	11.6	315
	1.5	134.7	129.8	6.5	13.2	311
Ti, B compound	0.9	160.6	126.2	7.0	12.6	319
	1.5	170.6	160.4	6.7	13.1	451

化合物与铝液反应也原位生成  $TiB_2$  颗粒, 这一点由下面的微观分析可以得到验证。强制加入  $TiB_2$  粉时, 它与 Al 的润湿性比 SiC 好, 但其润湿角不为 0, 现有的预处理工艺仍不能使  $TiB_2$  粉全部搅入 Al 液中。实验中亦发现熔体上方的灰渣较多。此外, 由于润湿性欠佳, 已进入熔体内部的细  $TiB_2$  粉也容易聚集, 不如加 Ti, B 化合物所生成的  $TiB_2$  颗粒弥散均布。 $TiB_2$  的实际加入量较少以及可能团聚这两方面的原因使强制加入方式的增强效果不理想。

(2) 两种加入方式所得  $TiB_2/Al$  复合材料在相同状态时的延伸率接近, 但对同种方式而言, 冷轧态延伸率均明显低于热轧退火态。这是由于冷作硬化使塑性明显降低, 而热轧后退火消除加工硬化使塑性改善。

### 2.3 增强剂加入量对 $TiB_2/Al$ 性能的影响

两种加入方式, 不同加入量的  $TiB_2/Al$  力学性能如图 1 所示。

由图 1 可以看出:

(1) 随强制加入的  $TiB_2$  粉末量的体积分数由 0.6% 增加到 1.5%, 材料冷轧和热轧退火态的  $\sigma_b$  稍有提高, HB 则几乎不变。当加入量相同时, 冷轧态  $\sigma_b$  比热轧退火态提高。如前所述, 这种结果与实验中润湿性差以及  $TiB_2$  粉的真实加入量较少等因素有关, 在未进一步改善润湿性的情况下,  $TiB_2$  粉加入量增多, 实际进入熔体的粉末量并不成比例增加, 因而  $\sigma_b$  提高幅度有限, 而 HB 则几乎不变。

(2) 随 Ti, B 化合物加入量增加, 材料冷轧和热轧退火态的  $\sigma_b$  以及铸态 HB 均迅速提高。与基体相比, 添加 1.5%  $TiB_2$  (体积分数) 的复合材料冷轧态  $\sigma_b$  和铸态 HB 分别提高 49.6% 和 71.5%。

在弥散均布的  $TiB_2$  颗粒周围会产生高的位错密度, 形成应力场, 增加变形阻力引起强化。当 Ti, B 化合物加入量增多, 原位生成的  $TiB_2$  微粒也增多, 因而强化效果亦愈加明显。

### 2.4 SEM 微观分析

为验证 MMC 中增强相的存在, 对试样进

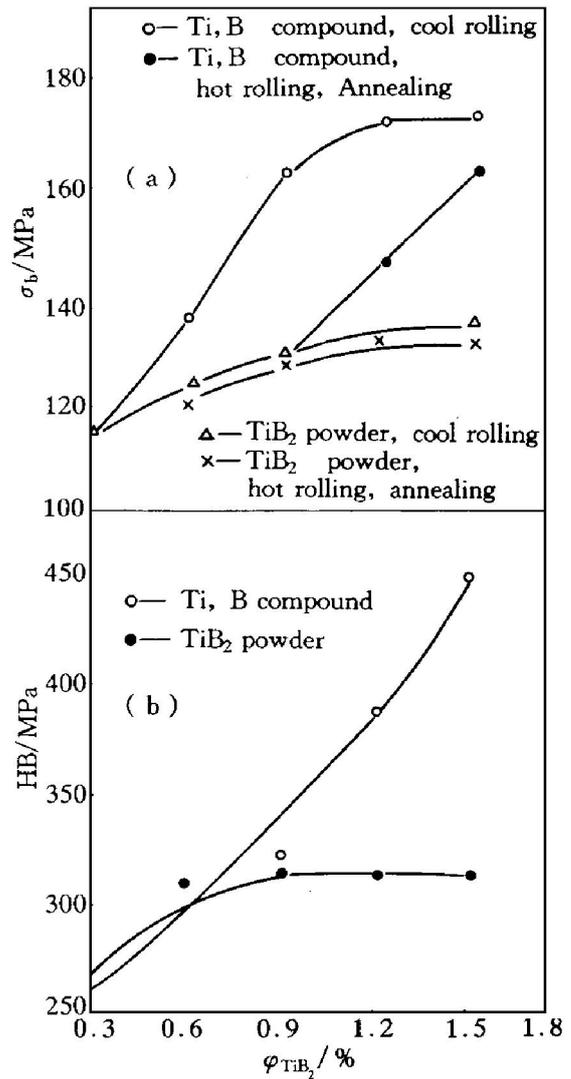


图 1  $TiB_2$  颗粒增强铝基复合材料力学性能  
**Fig. 1 Mechanical properties of  $TiB_2$  particles reinforced aluminium matrix composite**

(a) —Tensile strength; (b) —Brinell hardness

行 SEM 分析。其结果如图 2, 3 所示。

分析图 2, 3 结果可得:

(1) 图 2(a) 的 SEM 形貌表明, 在铝基体上分布有大小不等的灰白色粒状物。由 Ti 面分析(b) 看出, 与(a) 中粒状物对应处有密集的含 Ti 白亮点, 说明粒状物为含 Ti 化合物。由于试样添加的就是  $TiB_2$  粉, 故该粒状物即强制加入的  $TiB_2$  颗粒。尽管润湿性不够理想, (c) 中还存在团聚现象, 但  $TiB_2$  粉末确已进入铝基体中, 说明本实验熔铸工艺可行。

(2) 图 3(a) 的形貌与图 2(a) 明显不同,

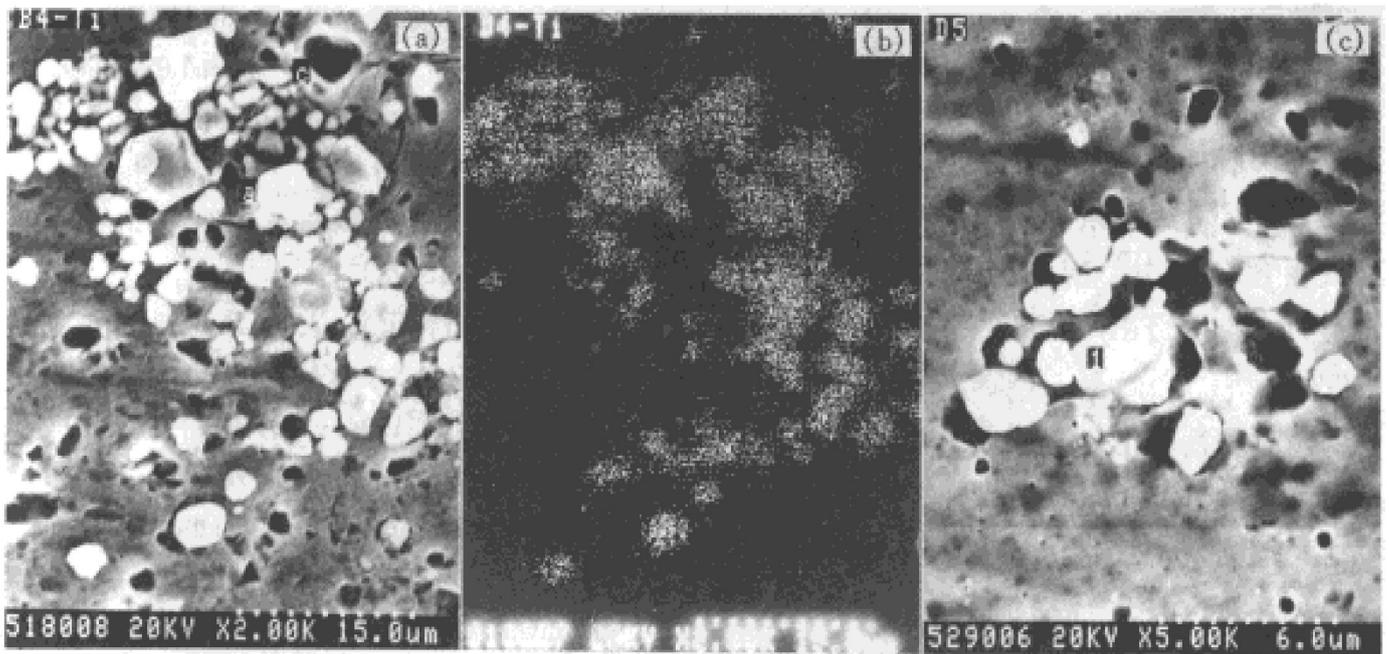


图 2 1.5% TiB<sub>2</sub>/Al(体积分数)复合材料 SEM 分析(加入 TiB<sub>2</sub> 粉末)

**Fig. 2 SEM analyses of 1.5% TiB<sub>2</sub>/Al(Volume fraction) composite (added TiB<sub>2</sub> powder)**

(a) —1.5% (Volume fraction) TiB<sub>2</sub>/Al; (b) —Surface scanning of (a); (c) —Aggregation of TiB<sub>2</sub> particle

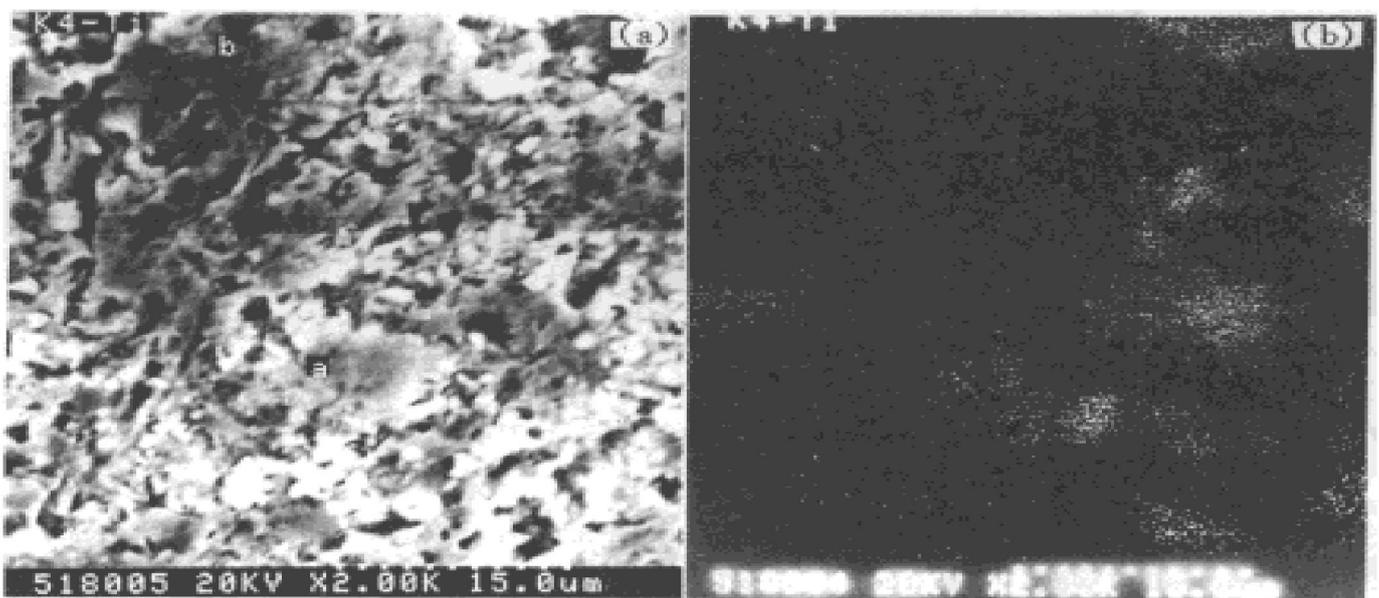


图 3 1.5% TiB<sub>2</sub>/Al(体积分数)复合材料 SEM 分析(加入 Ti, B 化合物)

**Fig. 3 SEM analyses of 1.5% TiB<sub>2</sub>/Al(Volume fraction) composite (added Ti, B compound)**

(a) —1.5% TiB<sub>2</sub>/Al(Volume fraction); (b) —Surface scanning of (a)

图 3(a) 组织较均匀弥散, 放大 2000 倍仍分辨不清 TiB<sub>2</sub> 颗粒的外形。与分析添加 TiB<sub>2</sub> 粉末的情况相似, Ti 面分析(b) 证明了添加 Ti, B

化合物时, 在铝基体中形成了含 Ti 的化合物。本实验同期工作<sup>[9]</sup>表明, 这些化合物是高温反应原位生成的 TiB<sub>2</sub> 颗粒。

### 3 结论

(1) 采用熔铸法制备 TiB<sub>2</sub>/Al 复合材料的工艺简单, 增强剂加入量少, 增强效果明显。

(2) 在相同实验条件下制备的 TiB<sub>2</sub>/Al 和 SiC/Al 复合材料中, 前者的布氏硬度比后者明显提高, 说明 TiB<sub>2</sub> 对工业纯铝的硬化效果比 SiC 好。

(3) 将 Ti, B 化合物加入工业纯铝熔体中在高温下反应, 可能原位生成弥散分布的 TiB<sub>2</sub> 颗粒, 其增强效果比直接加入 TiB<sub>2</sub> 粉末好。

(4) 随 Ti, B 化合物加入量增多, TiB<sub>2</sub>/Al 复合材料的  $\sigma_b$  和 HB 提高。

#### REFERENCES

1 Tong Jin (佟金), Chen Bingcong (陈秉聪) and Ren Luquan (任露泉). *Ordnance Material Science*

and Engineering (兵器材料科学与工程), 1990, 6: 30.

2 Roebuck B and Forno A E J. *Modern Developments in Powder Metallurgy*, 1988, 20: 451.

3 Wang Lingsen (王零森). *Sepecial Ceramics (特种陶瓷)*. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 35.

4 Sarappa M K and Ronatgi P K. *J of Materials Science*, 1981, 16: 983.

5 Fu Zhengyi (傅正义), Yuan Runzhang (袁润章) and Munir Z A. *Acta Material Composite Sinica (复合材料学报)*, 1994, 11(2): 91.

6 Ma Zongyi (马宗义), Bi Jing(毕敬), Lu Yuxiong (吕毓雄) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica (金属学报)*, 1992, 28(9): B419.

7 Kuruvilla A K, Prasad K S, Bhanuprasad V V *et al.* *Scripta Metallurgical et Meterlalia*, 1990, 24: 873.

8 Mccoy J W, Jones C and Wawner F E. *SAMPE Quarterly*, 1988, 19(2): 27.

9 Ling Xingzhu (凌兴珠) and Xu Zhenmin(徐振民). *Journal of Central South University of Technolgy (中南工业大学学报)*, 1997, 28(6): 564.

## STRUCTURE AND PROPERTY OF PARTICLE REINFORCED ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE

Ling Xingzhu and Xu Zhenmin

*Powder Metallurgy Research Institute,*

*Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China*

**ABSTRACT** TiB<sub>2</sub> and SiC particle reinforced aluminium matrix composites were prepared by casting. The hardness of TiB<sub>2</sub>/Al and SiCp/Al composites were evaluated. The effects of addition method and volume fraction of reinforcement on tensile property of TiB<sub>2</sub>/Al composites were studied. The microstructrues of the composites were analyzed by SEM. The results indicate that hardening efficiency of TiB<sub>2</sub> particle is better than that of SiC particle, the reienforcement efficiency of Ti or B compound is superior to TiB<sub>2</sub> powder; the mechanical properties of composites increase with increasing volume fraction of TiB<sub>2</sub>. The properties of 1.5% TiB<sub>2</sub>/Al (volume fraction) reinforced using a mixture of Ti and B compound are  $\sigma_b = 160.4$  MPa,  $\delta = 13.1\%$  as hot rolled and annealed and HB = 451 MPa as cast, respectively. SEM observation show that the TiB<sub>2</sub> particle in-situ formed in an aluminium matrix when a mixture of Ti and B compound were added to matrix.

**Key words** particle reinforcement aluminium matrix composites TiB<sub>2</sub>

(编辑 黄劲松)