

硅线石/2024 液态挤压成形件的摩擦学特性^①

罗守靖 杜之明 张 磊 霍文灿

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要 以2024铝合金为基体,使之与硅线石颗粒搅融混合成均匀浆料,经半固态挤压成形,获得一种新型的复合材料制件。对它进行摩擦磨损性能测定后发现,虽然增强体硅线石颗粒是直接从矿石开采获得的,但由于采用搅融混合-半固态挤压新技术,其耐磨性明显高于ZQSn6-6-3铜合金。为此,对其摩擦学特性进行了研究,以便为硅线石颗粒作为一种廉价的增强剂应用提供依据。

关键词 硅线石颗粒 铝合金 搅拌 半固态挤压 摩擦学特性

在颗粒增强铝基复合材料的研究中,增强相主要选用SiC和Al₂O₃。它们由人工通过化学方法制得,但成本高,其应用受到限制。硅线石颗粒(Sillimanite particulate)由硅线石矿直接开采获得,理论成分为:Al₂O₃ 62.9%、SiO₂ 37.1%,密度为3.23~3.27 g/cm³,其硬度高,耐高温,热稳定性好,并且价格便宜^[1-3]。本文采用搅融混合-半固态挤压新技术,使硅线石颗粒与铝合金紧密复合,获得一种与SiC_p增强相当的新型复合材料,并进行了相应的摩擦学特性研究。

1 试验方法

1.1 材料选择

选用2024(Al-4.5% Cu-1.8% Mg)为基体;选用鸡西市特种耐火材料厂提供的硅线石为增强相,成分见表1,粒度70 μm,加入量体积分数为0%、7.5%、10%、15%、20%五种。

1.2 复合过程

(1) 搅融混合

首先将基体合金加热至固液区(640~660℃),在氩气保护下进行搅拌,随后加入硅线石颗粒。颗粒加入前需高温烘烤(800℃, 2

h),以脱离所吸附的气体,然后再预热(350℃),才能加入基体金属中。

表1 硅线石化学成分(质量分数, %)

Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
56.68	39.31	0.34	0.05
MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO
0.68	1.88	0.09	0.97

(2) 半固态挤压

将已搅融的均匀混合的浆料,升温至710~720℃,注入挤压模内,在1000 kN液压机上进行半固态挤压。工艺参数为:挤压比分别为6、9、12,模具预热温度为200~250℃,挤压力为200 MPa,挤压速度为3 mm/s。

1.3 摩擦磨损性能测试

摩擦磨损性能测试是在M-200型摩擦磨损试验机上进行。沿挤压棒材纵向截取尺寸为6 mm×7 mm×20 mm的试样,经T4(485℃, 2 h)处理。对磨偶件为GCr15钢环,转速为400 r/min(0.98 m/s)。以磨痕宽度代表磨损量。试验条件为两种,一种为边界润滑,在滑动中滴油速度为4滴/min,20号机油,压力分别为294、490 N;另一种为半干润滑,在开始加入20号机油后,不再加油,压力为80、294 N。以

① 国家自然科学基金资助项目(59475055)和黑龙江省自然科学基金资助项目

上对磨时间均为 30 min。与之相对比的耐磨材料为 ZQSn6- 6- 3。

2 试验结果

表 2 为试验结果。其中摩擦系数是取五次检测量(10、15、20、25、30 min) 的平均值; 相对减摩性是将几种材料的摩擦系数倒数作为减摩性能指标, 再将它们与 ZQSn6- 6- 3 的减摩性能指标相比获得, 相对减摩性能指标愈高, 减摩性能愈好; 相对耐磨性指标以相似方法获得, 指标愈高, 耐磨性愈好。相对抗咬合性指标愈高, 抗咬合性也愈好。从表 2 可知:

- (1) 在同一压力下, 2024 摩擦系数大于 ZQSn6- 6- 3; 当复合硅线石后, 小于后者, 且随体积分数增加, 摩擦系数减小; 但在半干摩擦、体积分数为 0. 1 时, 摩擦系数仍高于 ZQSn6- 6- 3。
- (2) 在不同压力下, 对同一材料, 压力大, 摩擦系数也大。
- (3) 在不同润滑条件、同一压力下, 对同一材料半干摩擦的摩擦系数远高于边界摩擦。
- (4) 在同一压力下, 2024 磨损量大于 ZQSn6- 6- 3; 当复合硅线石后, 小于 ZQSn6

- 6- 3, 且随硅线石体积分数增加, 磨损量下降; 不同压力下, 对同一材料, 压力大, 磨损大; 同一压力下, 对同一材料, 半干摩擦的磨损量远高于边界摩擦。

(5) 在干摩擦条件下, 对 2024 铝合金, 10 min 前不稳定; 10 min 时破坏, 抗咬合性极差。当含硅线石颗粒后, 抗咬合性改善, 但体积分数为 0. 1 时, 材料抗咬合性依然不如 ZQSn6- 6- 3, 只是当达到 0. 2 时, 才显著高于后者。

3 分析与讨论

3.1 固-液挤压下复合材料的组织特征

经搅融使硅线石粒子与铝液均匀混合, 然后施以高压, 发生在凝固中流动、在流动中挤压塑性变形的物理化学和力学过程, 具有诸多特征(图 1):

(1) 在基体和硅线石颗粒界面上, 有镁和铜富集^[4], 吸附于硅线石颗粒表面, 发生界面反应, 生成镁铝尖晶石(MgAl₂O₄) 和铜铝尖晶石(CuAl₂O₄) , 沉淀于晶界, 组成了基体与颗粒之间的增强带。由于过程很短, 硅线石与铝界面处反应物不会太厚, 使硅线石颗粒与基体结合紧密。

表 2 材料摩擦磨损性能

摩擦 类型	压力 /N	材 料	减摩性		耐磨性		抗咬合性		
			$\bar{\mu}$	相对 减摩性	磨痕宽 /mm	相对耐 磨 性	μ	1/ μ	相对抗 咬合性
边界 摩擦	294	ZQSn6- 6- 3	0. 075 8	1. 00	2. 42	1. 00			
		材料体	0	0. 103 3	2. 84	0. 85			
		积分数	0. 1	0. 061 8	1. 50	1. 24			
			0. 2	0. 050 7	0. 92	1. 85			
	490	ZQSn6- 6- 3	0. 075 4	1. 00	5. 22	1. 00			
		材料体	0	20 min 破坏	5. 90	0. 88			
		积分数	0. 1	0. 069 3	1. 50	1. 24			
			0. 2	0. 068 1	1. 04	1. 85			
半干 摩擦	294	ZQSn6- 6- 3	0. 109 5	1. 00	5. 54	1. 00	0. 113 5	8. 811	1. 000
		材料体	0	10 min 破坏	9. 32	0. 62	破坏	-	-
		积分数	0. 1	0. 119 4	3. 26	1. 69	0. 120 6	8. 292	0. 941
			0. 2	0. 104 3	1. 82	3. 04	0. 100 7	9. 930	1. 123

(2) 在挤压冲头作用下, 凝固过程与塑性流动同步, 颗粒在基体金属塑性流动的胁迫下, 或者顺挤压方向转动和基体金属一起流动并承受基体的减径塑性变形; 或者断裂乃至破碎, 留下十分明显的塑性变形流动痕迹。

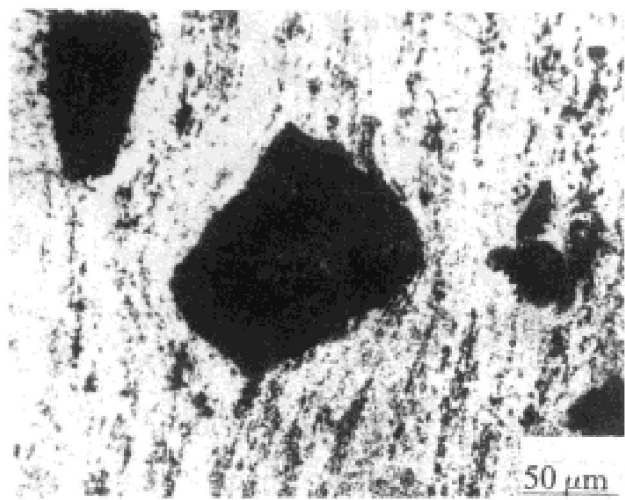


图 1 挤压变形组织中的硅线石颗粒

(3) 基体组织致密, 无任何显微孔洞和其它铸造缺陷, 为典型的细小再结晶组织。

3.2 减摩特性

(1) 在干摩擦条件下, 摩擦副直接接触, 容易发生粘着现象, 互溶性好的摩擦副更是如此。由于铝元素在铁中的溶解度是铜的 100

倍, 对铁的粘着力是铜对铁的 2 倍^[5], 因此, 铝合金在同钢对磨时, 摩擦系数比铜合金大, 这与表 1 列出的试验数据一致。硅线石的加入改变了摩擦界面的性质。由于硅线石颗粒与基体结合紧密, 颗粒在材料对磨时不易脱落, 摩擦面转为金属-非金属界面。在金属-金属接触界面情况下, 要使粘着处金属切断, 必须使粘着处金属发生塑性变形, 才能使滑动继续, 表现为摩擦系数大。而在复合材料与钢的对磨面上, 是通过硅线石颗粒破碎、脱落以实现继续滑动, 而硅线石的断裂能只有金属的 1/1 000^[6], 滑动过程消耗能量小, 表现为摩擦系数小。从试验中发现, 在 294 N 力作用下, 2024 合金在摩擦 10 min 后破坏, 破坏前滑动不稳定, 而在含有硅线石的材料中, 摩擦过程平稳。图 2 给出了三种材料在 80 N 压力下的摩擦形貌图, 可见, 随着硅线石体积分数减小, 摩擦痕纹粗化, 犁沟加深, 有更多粘着撕裂形貌。因此, 复合材料摩擦系数比铝基体小很多, 也比铜合金小, 且体积分数愈大, 摩擦系数愈小。

(2) 在边界润滑条件下, 润滑剂在金属表面形成吸附膜, 摩擦面相对滑动时, 吸附分子之间发生的相对位移代替了金属之间的直接摩

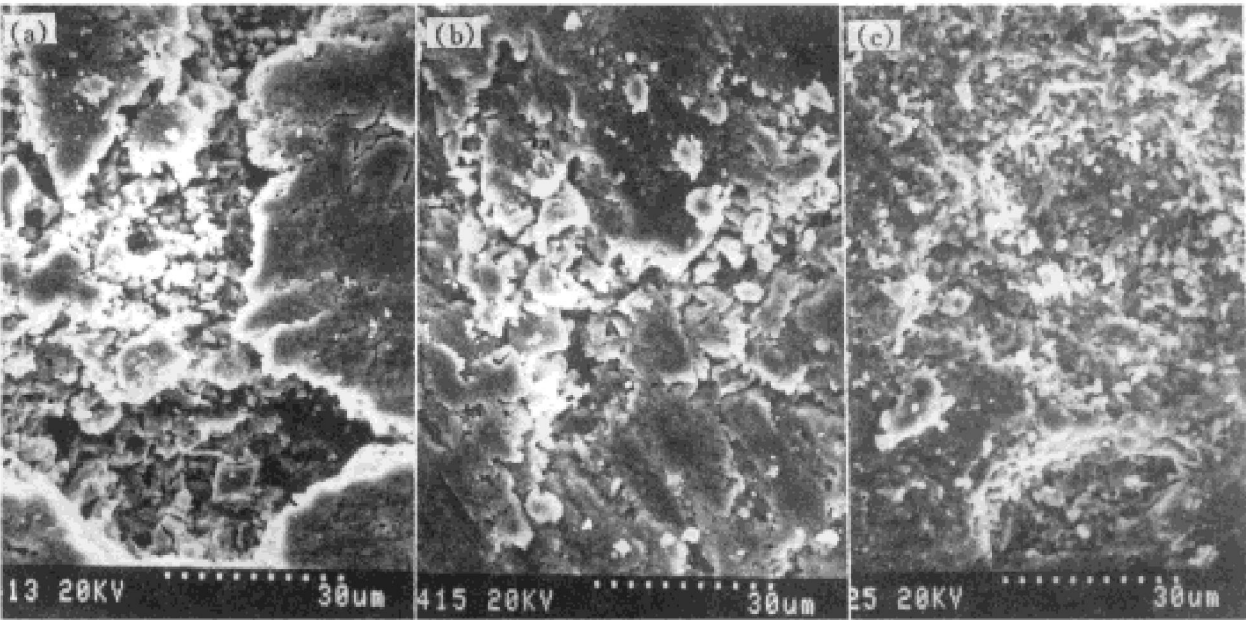


图 2 80 N 力作用下, 对磨时间 8 min 材料摩擦形貌
(a) —硅线石 0%; (b) —硅线石 7.5%; (c) —硅线石 15%

擦,降低了摩擦系数。但是由于边界膜很薄,在载荷作用下很易破坏,而使金属直接接触,在基体表面上形成细划膜。从图3可看出有微孔存在,乃是颗粒脱落所致。孔洞内新鲜表面具有很强的活性,宽度约 $5\mu\text{m}$,是硅线石磨粒磨成。细小磨粒使金属-金属界面接触面减小,从而减轻了粘着程度,降低了摩擦系数。

3.3 磨损特性

(1) 铝合金、铜合金在同钢摩擦时,一般为氧化磨损,而当氧化膜的破坏速度大于其生成速度时,磨损就转变为粘着磨损。由于铜的热传导系数是铝的1.7倍,在对磨过程中,铝合金升温快,增加了氧化磨损;粘着磨损主要由金属间粘着力引起,铝比铜对钢更容易粘附^[5],所以铝合金粘着磨损亦比铜大,与试验结果一致。

(2) 在边界摩擦条件下,硅线石颗粒作为微凸点同钢环先接触,氧化铝膜不易破坏,即破坏速度小于生成速度;同时,脱落的硅线石夹在摩擦副中,不断对复合材料表面进行压缩,生成一层致密的加工硬化层,提高了材料的耐磨性。

(3) 在干摩擦条件下,虽然表面没有完整的附着层,但是硅线石颗粒脱落后,夹在摩擦副中。从试验中可以观察到一层粉料吸附在GCr15钢环上,使金属-金属界面减小,减轻了粘着磨损程度(图2(b)、(c)),摩擦系数降低,同样也减少了因磨面发热所导致的氧化磨损。

(4) 在试验中还发现,在半干摩擦下,压力294N、对磨30min、体积分数为0.1的复合材料相对减摩性比ZQSn6-6-3低,而相对耐磨性却比它高,其主要原因是2024的摩擦系数比铜大很多(表2)。当加入硅线石颗粒后,随体积分数增加摩擦系数降低;且在干摩擦条件下,其降低幅度比边界摩擦时要小,因此后者的粘着可能性比前者小。磨损下降的规律与边界摩擦一样,其原因是在半固态挤压下,基体与颗粒结合紧密,在干摩擦条件下仍有强的抗磨性,即颗粒剥落和基体的磨损下降比铜与钢直接对磨具有较大优势。



图3 在边界摩擦条件下,压力为294N对磨时摩擦形貌

3.4 抗咬合性

咬合后,在摩擦副之间完全没有相对运动。它是粘着发展到极端的结果,即分隔的润滑油膜或者保护性的吸附层和反应层破裂时,接触副双方的内边界层相互发生接触,粘着结合力便发生作用^[7]。显然,在干摩擦条件下比在边界摩擦条件下更容易发生咬合。而且,在干摩擦条件下,铝与铜相比,铝更容易发生咬合。从表2可见,对磨10min以前极不稳定,到10min即破坏,过程结束。而加入硅线石颗粒以后,情况发生变化,相对抗咬合性增加;但在体积分数为0.1时,仍不如ZQSn6-6-3,达0.2时,才高于后者。

4 结论

(1) 采用搅融混合-半固态挤压新技术,将硅线石颗粒与铝进行复合成形,其制件具有良好的结合界面和典型的塑性变形组织;无论在边界摩擦条件下,还是在半干摩擦条件下,其相对减摩性及耐磨性均随着硅线石体积分数的增加而提高;在干摩擦条件下,相对抗咬合性也随着硅线石体积分数增加而提高。

(2) 在复合材料中, 由于硅线石颗粒的加入, 改变了摩擦过程的接触面性质, 从而减轻了金属间的粘着磨损。在滑动摩擦过程中, 部分硅线石颗粒破碎、脱落, 在基体中留下孔洞, 具有储油作用, 摩擦条件得以改善, 而且硅线石颗粒本身也起着自润滑作用。这就是硅线石颗粒增强铝合金具有良好的减摩性和耐磨性的机理所在。

参考文献

1 赖宝衡. 硕士论文. 哈尔滨工业大学, 1990.

2 蒋 鹏. 硕士论文. 哈尔滨工业大学, 1992.

3 王文旭. 硕士论文. 哈尔滨工业大学, 1994.

4 张 磊. 硕士论文. 哈尔滨工业大学, 1995.

5 蔡泽高等. 金属磨损与断裂. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 11.

6 张 锦, 张乃恭. 新型复合材料力学机理及其应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993: 232.

7 Habig K 著, 严 立译. 材料的磨损与硬度. 北京: 机械工业出版社, 1987: 181.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SILLIMANITE

PARTICULATE/ 2024 COMPOSITES MANUFACTURED BY

EXTRUSION OF SEMI-SOLID SLURRY PREPARED

BY STIRRING

Luo Shoujing, Du Zhiming, Zhang Lei, Huo Wencan

School of Materials Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

ABSTRACT 2024 aluminium alloy was used as matrix, and mixed with sillimanite particulates by stirring to form semi-solid slurry, then the slurry underwent extrusion. By this way, sound composite workpieces were obtained, and the tribological properties were measured. Although sillimanite paricaulate was gained from natural minerals, the friction and wear properties of the composites were better than those of ZQSn6- 6- 3, because of the use of stirring mixture semisolid extrusion. Therefore, the experimental observation and the theoretical analysis of the wear and friction mechanism were undertaken.

Key words sillimanite particulate aluminum alloy stirring semi-solid extrusion composite tribological properties
(编辑 彭超群)