

塑料复合材料与金属对摩时的磨损

Mark P. Wolverton John E. Theberge

(LNP Corp. Malvern, PA)

在设计时, 增强热塑性塑料零件一个常见的问题是缺乏磨损性能的数据。最近的研究提供了有关塑料与金属磨擦面磨损性能的新数据可弥补这一不足。

大多数关于塑料复合材料的磨损和摩擦性能的研究, 重点一直放在具有相同光洁度和硬度的塑料对塑料或塑料对钢环的对摩上。随着铝在汽车结构件和轴承零件上应用的增加, 对关于热塑性复合材料对铝的磨损性能的可靠数据提出了要求。此外, 办公机械和仪表工业方面为了削减成本, 导致了取消对某些零件的精加工。这样就需要了解塑性复合材料与粗加工金属面的作用特点。

最近进行了一些试验, 其中包括热塑性复合材料与几种具有不同表面粗糙度金属的对摩性能。此外, 还对与热塑性复合材料摩擦时金属面的磨损因数进行了研究。选作不动面材料的金属有1141冷轧钢, 304和440不锈钢, 70/30黄铜, 2024铝合金及磷青铜。

磨损因数的定义

热塑性复合材料的摩擦性能与金属的显然不同, 即使是高强度树脂也不服从经典的摩擦定律。而金属对热塑性塑料的摩擦以粘着和形变为特征, 结果摩擦力并不与载荷成正比(摩擦系数随载荷增加而下降), 却与速度成正比。

磨损率通常定义为单位时间内材料的体积损失。材料从磨损界面被磨掉时, 几种机

理同时在起作用, 但主要的机理是粘着磨损。这是以聚合物微粒从表面被磨掉为特征, 这种微粒的出现说明摩擦面在正常磨损。另一方面, 若磨损面上出现了熔融的聚合物或粗沟, 则表明材料被擦伤, 即PV值超过材料的极限值。

无润滑表面的磨损正比于作用载荷和移动距离之积: $W = KFVT$ 或 $K = W/FVT$
式中W为体积磨损, cm^3 ; F为负荷, N; V为速度, m/s ; T为作用时间, s; K为磨损因数, $\text{cm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。

试 验

磨损因数和摩擦系数是用止推环试验装置测出的。塑料试件采用注射成形, 其成份见表1。

金属试件自制棒料, 其任意方向光洁度均为规定值, 即 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 及 $1.27 \sim 1.77 \mu\text{m}$, 这是典型的切削加工的粗糙度。

塑料试件安架在上试件夹头中, 并以 0.254 m/s 的速度旋转。与之磨合的金属试件装在下试件夹头中, 配合面间压力为 $2.75 \times 10^5 \text{ Pa}$, 每次评价均采用新试样。在试验中, 对各试件的重量变化和摩擦力矩进行频繁的检测, 同时测出两试件的表面粗糙度值。

试验的持续时间由金属环和塑料件的突出部分间达到充分接触所需的时间来决定。

表1 复合物成份

基体成份 及牌号*	润滑剂及强化材料 (wt%)				
	PTFE	聚硅 氧烷	玻璃 纤维	碳纤维	芳香尼 龙纤维
尼龙6/6					
RL4040 20	—	—	—	—	—
RF1006	—	—	30	—	—
RFL4036 15	—	—	30	—	—
RFL4536 13	2	30	—	—	—
RC1006	—	—	—	30	—
RCL4036 15	—	—	—	30	—
RAL4032 15	—	—	—	—	10
聚碳酸酯 DEL403 15	—	—	80	—	—
聚苯硫醚 OFL4036 15	—	—	30	—	—
PTFE FP-EL-4060 30	—	—	—	—	—

* LNP公司复合物牌号

所报道的各种复合物的磨损因数是以与跑合期的磨损无关的稳定磨损率为根据的。

利用该止推环试验装置还可测出摩擦系数。先将试件对标准环进行磨合直到360°方向均接触,然后使试件达到试验状态下的热平衡 $PV = 7 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ ($2.75 \times 10^5 \text{ Pa}$, 0.254 m/s)室温,干燥空气。热平衡达到后,测定其动摩擦力矩,数据是至少5次读数的平均值。

结 果

在热塑性复合材料与AISI1141冷轧钢试件摩擦试验中,复合材料的最高磨损因数(最大磨损)发生在金属表面光洁度最高时。与预期相反的这种结果的出现,是由于金属与塑料偶件间的粘着和变形摩擦机理。对大多数复合材料(非增强者除外),在 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 范围得到的磨损因数最低,摩擦在 $1.27 \sim 1.77 \mu\text{m}$ 段通常得中等的磨损因数(见表2)。

表2 钢表面光洁度对热塑性复合材料及AISI1141钢的磨损特性的影响

复合材料 +	Ra = 0.3~0.4								Ra = 0.2~0.3								Ra = 1.27~1.77							
	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D	K _p	K _M	μ_s	μ_D				
RL4040	16	171	20	0.2	8	9	0.05	0.10	12	176	30	0.1	15	14	0.10	0.14	24	0.2	0.11	0.13				
RF1006	143	150	126	2.2	8	12	0.16	0.21	75	173	99	1.1	14	24	0.25	0.31	100	0.8	0.22	0.28				
RFL4036	30	64	34	1.1	8	16	0.20	0.26	16	102	40	0.6	12	9	0.19	0.26	16	0.6	0.17	0.20				
RFL4536	20	90	50	0.9	8	17	0.20	0.26	9	168	83	6.6	14	17	0.18	0.20	20	1.0	0.16	0.19				
RC1006	36	95	29	1.3	8	15	0.13	0.014	20	140	48	0.6	14	13	0.16	0.20	30	0.5	0.17	0.21				
RCL4936	27	159	53	1.0	10	6	0.12	0.15	13	185	41	0.4	13	14	0.11	0.15	15	0.5	0.13	0.16				
RAL4032	18	120	85	0.3	10	12	0.18	0.21	13	195	36	0.1	12	10	0.12	0.13	14	0.2	0.11	0.12				
DFL4036	75	142	180	3.9	9	20	0.22	0.25	22	127	170	3.5	13	46	0.18	0.20	52	4.2	0.17	0.20				
OFL4036	28	143	70	27	8	22	0.20	0.18	11	135	115	15	13	8	0.15	0.17	18	17	0.16	0.17				
EPEL4060	9.5	—	—	2.1	—	—	0.10	0.12	7.1	—	—	1.3	—	—	0.09	0.12	12	2.4	0.10	0.12				

注: Ra—钢试件的平均粗糙度, μm ; +—复合材料分类见表1; 试验在 $PV = 70000 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 下进行。

表中: K_M (K_p): 金属(塑料)磨损因数, $2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$;
 M_i (M_f): 金属磨损前(后)的表面粗糙度, ($\times 0.254 \mu\text{m}$)
 P_i (P_f): 塑料磨损前(后)的表面粗糙度, ($\times 0.254 \mu\text{m}$);
 μ_D (μ_s): 动(静)摩擦系数

只有以PTFE润滑剂、玻璃纤维增强的聚碳酸酯在与钢对摩后,其表面粗糙度值有所增加。而其它塑料复合材料在相同的试验中,表面粗糙度值都至少降低1/8。这样使所有试验的金属表面都变得更粗糙了。

热塑性复合材料的磨损特性受不锈钢和黄铜试件的表面粗糙度的影响,为此在金属的两个粗糙度段进行了考察。如同预期的那样,当与之对摩的304和440不锈钢试件表面粗糙度由 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 增加到 $1.27 \sim 1.77 \mu\text{m}$

时, 各种复合材料的磨损因数随之增高, 但摩擦系数则趋向降低 (见表 3 ~ 5)。

表 3 钢表面光洁度对热塑性复合材料及 AISI304 不锈钢的磨损特性的影响

复合材料	Ra = 0.2~0.4								Ra = 1.27~1.77							
	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D
RL4040	7	170	18	0.1	11	11	0.05	0.09	13	175	41	0.3	55	45	0.04	0.09
RF1006	33	160	31	0.5	10	12	0.12	0.22	45	113	42	0.1	50	32	0.10	0.18
RFL4036	12	166	34	0.2	8	6	0.17	0.18	13	172	42	0.2	56	25	0.13	0.15
RFL4536	15	157	73	0.2	8	5	0.17	0.20	26	144	64	0.7	44	34	0.15	0.18
RC1006	24	96	33	0.1	8	6	0.11	0.21	34	160	45	0.1	44	38	0.11	0.17
RCL4036	15	154	49	0.2	16	12	0.17	0.22	17	109	43	0.3	46	24	0.16	0.20
RAL4032	18	32	21	0.2	7	21	0.08	0.11	39	198	23	0.4	67	32	0.07	0.11
DFL4036	20	56	23	0.4	13	8	0.10	0.16	29	85	34	0.5	38	25	0.09	0.15
OFL4036	4	72	72	0.2	12	6	0.10	0.17	8	153	40	0.5	55	67	0.10	0.15

注: 同表 2。

表 4 钢表面光洁度对热塑性复合材料及 AISI440 不锈钢的磨损特性的影响

复合材料	Ra = 0.2~0.4								Ra = 1.27~1.77							
	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D
RL4040	7	172	18	0.1	10	9	0.10	0.12	12	160	21	0.2	72	80	0.08	0.11
RF1006	48	119	114	0.5	10	8	0.10	0.22	49	52	49	0.2	50	50	0.15	0.18
RFL4036	22	185	35	0.2	18	7	0.14	0.21	16	70	44	0.2	65	59	0.13	0.15
RFL4536	59	100	55	2.0	10	12	0.10	0.40	18	95	23	0.3	56	43	0.10	0.16
RC1006	41	95	20	0.5	10	9	0.08	0.28	50	100	44	0.1	60	52	0.13	0.16
RCL4036	16	169	50	0.2	12	5	0.10	0.23	45	55	42	0.4	55	51	0.15	0.21
RAL4032	18	96	89	0.3	10	10	0.10	0.13	23	186	33	0.3	60	62	0.08	0.12
DFL4026	24	76	38	0.5	9	5	0.20	0.20	50	60	25	1.3	50	23	0.19	0.23
OFL4036	11	83	63	0.3	13	10	0.13	0.15	12	65	42	0.3	55	38	0.15	0.16

注: 同表 2。

表 5 黄铜表面光洁度对热塑性复合材料及 70/30 黄铜的磨损特性的影响

复合材料	Ra = 0.2~0.4								Ra = 1.27~1.77							
	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D	K _p	P _i	P _f	K _M	M _i	M _f	μ_s	μ_D
RL4050	8	96	55	0.2	12	8	0.06	0.09	21	197	50	0.3	61	36	0.05	0.09
RF1006	53	163	79	42	12	193	0.17	0.22	52	50	152	17	62	>200	0.16	0.19
RFL4036	21	47	68	12	10	164	0.18	0.15	18	72	76	12	43	>200	0.16	0.15
RFL4536	20	190	100	12	10	118	0.18	0.17	18	122	188	12	70	189	0.19	0.18
RC1006	40	95	140	34	10	162	0.21	0.21	34	84	39	19	76	>200	0.18	0.18
RCL4036	18	131	44	5.0	11	181	0.15	0.15	13	66	59	6.0	62	75	0.13	0.14
RAL4032	16	169	53	0.2	11	9	0.12	0.15	19	183	34	0.3	47	30	0.10	0.14
DFL4036	22	113	59	8.0	11	182	0.10	0.17	12	113	62	4.0	85	36	0.10	0.15
OFL4036	9	176	70	4.0	11	45	0.10	0.14	10	151	71	4.0	55	10	0.11	0.14

注: 同表 2。

一般说来, 塑料基复合材料与 440 不锈钢对摩得到的磨损因数和摩擦系数比与 304 钢对摩的大。440 钢也具有比 304 钢高的磨损因

数, 其原因也许是 304 钢磨损时的工作硬化。

塑料对表面粗糙度为 0.2~0.4 μ m 的黄铜对摩时的磨损因数基本上与对不锈钢时的

相同。但与玻璃纤维或碳纤维增强的复合材料对摩时，黄铜试件的磨损比不锈钢要快 8 倍。以 PTFE 作润滑剂的尼龙 66 及 PTFE、芳香尼龙纤维增强的尼龙 66 复合材料对黄铜试件会产生极低的磨损。但某些黄铜试件磨损后的表面粗糙度值比不锈钢在类似对摩件上的高出 4 倍。

与其它金属比较，2024 铝合金试件的粗

糙度可在较窄的区间获得可接受的复合材料磨损因数，最低磨损率出现在 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 的区间内。以 PTFE 作润滑剂无增强尼龙 66 及芳香尼龙纤维增强尼龙 66 复合材料，对任何金属包括铝合金，都具有最低的磨损速率。但所有塑料复合材料对铝的磨损因数都比对钢、不锈钢或黄铜的相应磨损因数要高（见表 6）。

表 6 铝表面光洁度对尼龙复合材料及 2024 铝的磨损特性的影响

复合材料	Ra=0.2~0.3				Ra=0.3~0.4				Ra=1.27~1.77			
	K_f	K_M	μ_s	μ_D	K_f	P_i	P_f	K_M	M_i	M_f	μ_s	μ_D
RL4040	250	10	0.07	0.09	26	90	>200	5.6	16	>200	0.06	0.09
RF1006	>4000	>4000	0.18	0.20	400	160	>200	265	15	>200	0.15	0.20
RFL-4036	2,250	1,500	0.15	0.18	320	85	>200	175	16	>200	9.15	0.18
RAL4032	500	8	0.10	0.17	43	110	>200	4	15	84	0.11	0.16
RCL4036	2,000	600	0.13	0.14	176	152	140	105	15	169	0.12	0.12

表 7 青铜表面光洁度对尼龙复合材料及磷青铜的磨损特性的影响

复合材料	Ra=0.3~0.4			
	K_f	K_M	μ_s	μ_D
RF1006	>4,000	>4,000	—	—
RFL4036	>4,000	>4,000	—	—
RC1006	>4,000	>4,000	—	—
RCL4036	>4,000	>4,000	—	—
RAL4032	25	0.3	0.09	0.12
RL4040	19	0.4	0.06	0.10

注：同表 2。

表 8 金属偶件光洁度对氟基聚合复合材料及金属的磨损特性的影响

PTFE 基复合材料 + 填充或增强材料		钢, Ra=3.0~0.4				铝, Ra=0.3~0.4			
		K_f	K_M	μ_s	μ_D	K_f	K_M	μ_s	μ_D
FC103	15% 玻璃粉	7	0.4	0.05	0.09	183	38	0.24	0.19
FC122	10% 石墨粉末	6	9.2	0.95	0.07	187	0.8	0.07	0.13
FC132	10% 焦炭粉	12	0.7	0.06	0.07	47	0.9	0.12	0.21
FC146	60% 青铜	5	0.3	0.07	9.13	1.2	0.3	0.10	0.14
FC113/SM	15% MoS ₂ 增效剂	8	<0.1	0.08	0.13	1	<0.1	0.10	0.20
PC142	PPS + 润滑剂	1	0.1	0.08	0.14	23	0.4	0.14	0.25
PC149	PPS + 润滑剂	2	<0.1	0.08	0.12	1.2	0.2	0.13	0.28
PC158	PPS + 润滑剂	4	<0.1	0.07	0.11	2.7	0.2	0.21	0.32
PC161	聚氧化乙烯苯甲酸酯	5	<0.1	0.05	0.13	4.1	<0.1	0.12	0.21
PC184	PPS	1	<0.1	0.09	0.11	1.5	<0.1	0.12	0.19
PDX 81199	矿物	1.4	0.6	0.11	0.14	2.8	0.6	0.13	0.18
PDX 83275	ARP	4.0	<.1	0.07	0.12	3.5	<0.1	0.10	0.11

注：Pa：金属试件的平均粗糙度， μm ；+ LNP 公司复合材料牌号。
试验在 $PV = 175000 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ ($1 \times 10^6 \text{ Pa}$, $.0166 \text{ m/s}$) 下进行。

可以看到，除了两种均是以 PTFE 润滑的复合材料外，磷青铜试件同各种热塑性复合材料对摩都会使系统产生极度磨损（见表 7）。

对氟塑料基复合材料与钢和铝的磨损特性也进行了考察。含有象石墨粉、焦炭粉及玻璃粉的一类无机填料的 PTFE 复合材料，与铝对摩比与钢对摩时得到了更高的磨损因数及对偶面的磨损。反之，同时含有青铜及

MoS₂的PTFE复合材料与铝对摩时比与钢对摩时得到了较低的复合材料及对偶面的磨损率。含有PPS、聚对羟基苯甲酸及芳香族强化聚合物(ARP)等有机填料的PTFE复合材料,在与钢和铝对摩时,得到了相近的磨损率和对偶面的磨损。所有氟塑料基复合材料与铝的摩擦系数都要比对钢的摩擦系数大(见表8)。

磨损试验结果概要

1.与塑料复合材料对摩时,金属试件的平均粗糙度在0.3~0.4μm时通常得到最低的磨损率。

2.大多数热塑性复合材料与表面粗糙度为0.3~0.4μm的低碳钢、黄铜及不锈钢对摩时,得到的磨损率相近。

3.与铝、磷青铜一类软金属对摩,以

PTFE为润滑剂的无增强尼龙66及芳香族尼龙纤维增强的尼龙66复合材料得到最低的磨损率。

4.玻璃纤维增强PPS复合材料对黄铜和不锈钢的磨损率极低。

5.填充PTFE复合材料与铝对摩要比与钢对摩的摩擦系数高。

6.填充玻璃粉、焦炭粉或石墨粉的PTFE复合材料对铝的磨损因数要比对冷轧钢的高,当与PTFE基复合材料对磨时,铝比钢磨损得快。

7.青铜/PTFE和MoS₂/PTFE复合材料对铝的磨损因数较对钢的低。

8.聚合物填充的PTFE复合材料对冷轧钢和铝的磨损因数基本相同。

(张光跃译自Machine Design, 58 (1986), 3:67~71.方嘉宝校)