

石墨耐磨材料

[苏联] Л. А. 普鲁塔洛娃 著

31274
97

化学工业出版社

本书叙述了石墨耐磨材料，并探讨了石墨密封环、轴承及活塞和制造问题，指出了机器制造中应用石墨材料的可能性。

本书可供机器设计、制造及操作人员参考。

本书系1966年无产阶级文化大革命前发稿；在运动中虽经几由我们水平所限，仍会存在缺点错误，请读者多提意见，帮助我i。

Л. А. ПЛУТАЛОВА
ГРАФИТОВЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ
ЦИНТИАМ (МОСКВА 1963)

*
石 墨 耐 磨 材 料
*

化学工业出版社出版（北京安定门外和平里七区八号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第129号

中国人民大学出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092毫米¹/₃₂ 1968年6月北京第1版

印张：15/8

1968年6月北京第1版第1次印刷

字数：35,000

印数：1—2,537

定价：（科六）0.22元

书号：15063·1105

目 录

序言.....	1
各种石墨的结构及性能.....	1
各种石墨耐磨材料的制造工艺及其物理机械性能.....	3
各种石墨材料的耐磨性能.....	9
石墨耐磨机器零件及组合件的结构.....	16
活塞环.....	22
密封装置.....	31
轴承.....	43
結論.....	48
参考文献.....	49

序 言

在高速、高压及高温条件下用潤滑油来改善零件的耐磨特性，往往是不可能的。結果，出現了以石墨和二硫化鉬为基体的新型粉末状、悬浮状及糊状的潤滑剂，帶有添加剂的潤滑油和无机潤滑液。多孔性金属陶瓷軸承、浸油或者浸漬塑料的卡普綸以及氟塑料軸承材料也得到了广泛的用途。應該特別指出的是，石墨耐磨材料可以保証軸承、活塞、活塞杆和軸在 -200°C 至 $+2000^{\circ}\text{C}$ 溫度下的腐蝕性介质中，在很高的滑动速度下（至100米/秒）不用潤滑剂而工作。但是，石墨耐磨材料并不是万能的，由于这类材料的某些特性而使其用途受到限制。这一点，在設計时應該考慮。

本书叙述石墨材料的性能及其应用范围，可以帮助設計人員及生产技術人員更正确、更順利地利用石墨材料。

各种石墨的結構及性能

石墨具有特殊的层状晶体結構。其晶体层的排列如下（图1）：第一层六角形的一个角位于下一层六角形的中心上；第三层完全与第一层相对，而第四层对应于第二层。晶体层与层之間的距离大（ $3.354\text{\AA}$ ），因而各层碳原子之間的結合 force 显著小于同一层內的原子結合 force^[1]。石墨晶体中結合力的不同，使晶体层平行和垂直方向的性能产生了差异。例如，沿石墨层方向的硬度接近于金刚石，而垂直方向的硬度值却十分微小。在平行和垂直方向上，石墨晶体的导热率及导电率相差数倍，热膨胀系数相差2—3倍。

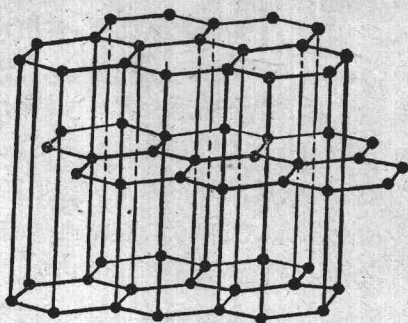


图 1 石墨的晶体结构

另一种碳素异形体——金刚石，其晶格是十分稳定的，亦就是说，不同样品中碳原子的布置方式及碳原子之间的距离是恒定的。金刚石晶格中碳原子稳定的布置于晶层面（晶层中，每个碳原子有三个“邻居”，相邻碳原子的距离为 $1.415 \text{ \AA}$ ），而天然石墨和人造石墨晶体，晶层之间的距离（包括最接近完全石墨化的材料在内）为 $3.354-3.347 \text{ \AA}$ 。结构完善的石墨晶体是很稀见的，其晶格尺寸很小，因此对于石墨单晶的性能研究得很少。所有的天然石墨和人造石墨都是复杂的“多晶体”，是由许多取向不同的晶粒所组成。多晶体石墨的性能决定于晶粒完善化的程度、晶格尺寸及其定向程度。其物理机械性能在很大范围内改变。

所有的碳素物质（煤、焦炭、炭黑）都具有石墨的晶体结构。但在个别情况下，单个晶体中碳原子层的尺寸及原子数量很小，以致可以看成是无定形碳。同时，在煤内除了纯净的碳素之外，一般含有大量挥发性有机化合物。由于已证实这些物质中都含有石墨晶体结构单元，所以都可能制成单个晶粒完善程度很高的多晶体石墨。这一点，已经被一种热处理方法——石墨化所实现了。碳素原料在 2900°C 左右的高温作用下，石墨结构进行调整，同时单个晶粒产生定向及晶体增长的变化，工业生产中就是以这一过程为基础，由焦

炭和无烟煤制成人造石墨。

由各种碳素原料（焦炭、炭黑、煤、石墨）粉末制成的石墨材料，与其它非金属材料相比较，优点是具有很高的导热率（80—180 千卡/米·小时·度）及导电率（ 5×10^{-4} — 60×10^{-4} 欧姆·厘米），在 3000°C 以下具有还原性以及中性介质中其热稳定性很高，而线膨胀系数却很低（ $2-3 \times 10^{-6}$ ）。石墨材料可以耐住大多数酸、碱、盐类溶液以及有机溶剂的侵蚀。在无润滑剂条件下与许多种金属摩擦时，石墨零件的摩擦系数为 0.04—0.05，也就是说，其磨损率不大。由于石墨材料具有足够的强度（抗压强度极限为 500—4000 公斤/厘米²），同利用普通结构材料一样，可以用它制造精度高、结构复杂的零件。

适当选择原料和制造工艺，可以大大改变石墨材料的各项特性，因此工业生产的各种石墨材料，其特性各不相同，专门适宜于不同用途。

各种石墨耐磨材料的制造工艺 及其物理机械性能

根据工艺特征，石墨耐磨材料可以分作如下 5 类（每类有若干不同标号）：（1）焙烧的硬质石墨材料；（2）石墨化耐磨材料；（3）浸渍树脂的焙烧及石墨化耐磨材料；（4）浸渍金属的焙烧及石墨化耐磨材料；（5）以聚合树脂为粘结剂的石墨材料。

石墨耐磨材料常常采用加有少量天然石墨的石油焦炭制造，有时也采用不同配比的瀝青焦炭、炭黑和无烟煤。碳素

原料須磨碎至 40—60 微米，以便制成的石墨材料密实。往往先将不同粒度的粉末配制成糊料。

第 1 类碳素耐磨材料的制造过程如下：原料粉末与粘結剂（各种配比的煤瀝青、煤焦油和油^①）混合后，在压模內以 600—2500 公斤/厘米²的压力成型。压制的毛坯于温度为 1000—1500°C 的还原性气氛中（煤气炉）焙烧。在焙烧过程中作为基体的固体顆粒状原料不发生結構变化，只是粘結剂发生焦化作用。焦化过程中，各单个粉末顆粒被焦炭膜牢固的粘結成一体，使制得的材料具有高硬度及高强度。

当焙烧的硬质碳素材料在 2200—2900°C 电炉內再次进行处理时（石墨化），即制得第 2 类石墨材料，即石墨耐磨材料。石墨化过程中，原始碳素材料发生再結晶，形成石墨的結構。石墨晶体的完善程度决定于热处理的温度及其所延續的时间，并与原料的性能有关。

用上述方法制成的耐磨材料具有多孔性，这是由于揮发物质自有机粘結剂中逸出，以及焦化残渣的体积小于液体粘結剂的体积造成的。第 1 类和第 2 类石墨材料用聚合树脂或金属浸漬之后，即具备不为气体和液体渗透的性质。一般的說，浸漬处理可以显著提高材料的强度。第 3 类和第 4 类石墨材料，即浸漬树脂或金属的焙烧及石墨化耐磨材料，就是用这种方法制造的。第 5 类耐磨材料可以采用上述同样原料或者由純淨的天然石墨或人造石墨制造。碳素粉末与热塑性树脂粉末混合后，加热至聚合温度經模压成型。这种加工方法的优点在于成型后即制得精度高的零件，而不必輔助机械加工。这是这种方法制造石墨零件的特点。

① 此处意指蒽油。——譯者

后面三类石墨材料的耐热性能及耐腐蚀性能較低，因为这些特性已經不决定于石墨的性能，而是决定于加入石墨材料中的聚合树脂或金属。

根据在机械中的工作条件，苏联采用前两类石墨材料（即焙烧的和石墨化的耐磨材料），制造机械零件。美、英則慣用第1类石墨材料（焙烧碳素耐磨材料），而法国仅应用第2类（石墨化耐磨材料）^[2,8]。

苏联机械研究所对苏联及外国石墨耐磨材料进行了性能試驗^[4]（見表1和表2）。

由于石墨材料强度測定方法尚无标准規定，抗压强度試驗往往是以立方体試样进行（类似于混凝土型脆性建築材料的試样）。这种試驗方法不能在試样体积內产生均一的应力状态，而应力是集中于立方体的側面。因此，所測得的强度极限值一般低一半，而試驗誤差达15—20%。当采用直径与高度尺寸相同（为8毫米①）的圆柱形試样測定石墨材料的抗压强度时，其試驗誤差不超过5%。試驗結果記錄成綫图，由图2所列举的压缩图可以确定出各种材料的弹性模数。从該图看出，石墨耐磨材料是脆性材料，至破坏前瞬間的变形都是发生在弹性范围內（仅仅在全面压缩和在很小的加負荷的速度下，才显示出有塑性）。

根据苏联及外国石墨耐磨材料的試驗結果，可以认为归于同一类石墨材料，其物理机械性能十分接近。石墨材料經浸漬后，其机械强度可提高40—200%。利用显微分析方法可以确定，强度提高直接决定于浸漬的均匀性及所有气孔（包括毛細孔）被填充、从而在整个石墨材料試样內形成均匀的紆

① 表1和表2所列之石墨材料强度极限值，就是采用这种試样測得的。
——原注

苏联生产的石墨耐磨材料的物理机械性能

表 1

材 料 标 号	类别	强度极限, 公斤/厘米 ²		弹性模数, 公斤/厘米 ²	肖氏硬 度	线膨胀系数, 厘米/厘米· °C·10 ⁶	导 热 率, 千卡/米·小 时·°C	视 比 重, 克/厘米 ³
		抗 压	抗 弯					
AO-1500	1	1500—1800	600—800	160000	60—65	2.5	80	1.65—1.7
AO-600	1	1100—1500	500—700	140000	55—60	2.5	75	1.5—1.6
ITK-0	1	1200—1500	500—600	170000	70—75	2.5	75	1.5—1.6
2 II-1000	1	1600—1700	600—750	140000	70—75	2.5	80	1.65—1.7
AI-1500	2	800—1000	400—500	130000	45—50	2.7	160	1.7—1.8
AI-600	2	600—800	350—400	100000	43—45	2.7	160	1.6—1.7
ЭП-2А	2	500—550	200—300	95000	55—60	2.6	160	1.6—1.65
Э-46	2	350—450	150—200	70000	43—45	—	140	1.6—1.62
AO-1500-Φ	3	3000—3500	1400—1700	165000	70—75	2.5	80	1.75—1.8
AO-1500-K	3	2300—2500	900—1000	160000	70—72	2.5	80	1.7—1.75
ITK-0-Φ	3	2100—2200	800—1000	175000	75—80	2.5	75	1.7—1.75
AI-1500-Φ	3	1600—1800	700—800	135000	55—60	2.7	160	1.75—1.8
AI-1500-K	3	1000—1200	500—600	130000	50—60	2.7	160	1.7—1.75
AO-1500-CO ₅	4	2600—2800	1000—1200	170000	70—75	3.7	90	2.7—3
AO-1500-B ₈₃	4	2500—2700	900—1000	170000	70—75	3.7	90	2.6—2.9
AI-1500-CO ₅	4	1500—1600	600—750	135000	65—70	3.8	180	2.5—3.1
AI-1500-B ₈₃	4	1400—1500	500—600	135000	70—72	3.8	180	2.4—2.8
AI-1500-BpC ₃₀	4	1500—1600	600—700	132000	70—75	3.7	175	2.2—2.5
AI-1500-A	4	1300—1400	500—600	145000	60—70	3.8	180	2.3—2.6
ATM-1	5	1000—1200	400—500	90000	50—60	8.5	35	1.8—1.85

Φ—酚醛树脂; K—有机硅树脂; CO₅—含 5% 锡的铅; B₈₃—巴氏合金; BpC₃₀—铅青铜。

各国生产石墨耐磨材料的物理机械性能

表 2

材 料 标 号	类 别	强度极限, 公斤/厘米 ²			弹性模数, 公斤/厘米 ²	肖氏硬 度	线膨胀系数, 厘米/厘米· °C·10 ⁶	导 热 率, 千卡/米·小 时·°C	视 比 重, 克/厘米 ³
		抗 压	抗 弯	抗 拉					
CV-10	1 (英)	1500—1700	600—700	—	150000	70—75	3.3	90	1.65—1.7
石墨-特-4(Графит-ep-4)①	1 (美)	900—1000	—	—	140000	70—72	—	85	1.7—1.72
SE-8	1 (捷)	700—800	—	—	180000	50—55	—	95	1.55—1.6
T-3	1 (捷)	900—1000	—	—	120000	60—65	—	95	1.65—1.7
EK-40	2 (法)	1200	500—550	—	75000	65—70	4	—	1.7—1.75
EK-461	2 (法)	600—700	300—400	—	60000	35—45	3	—	1.6—1.65
CV-10	3 (英)	2000—2100	700—800	—	170000	77—80	2.5	80	1.7—1.75
CV-10 WA	3 (英)	2700—2800	1000—1100	—	170000	77—80	2.5	80	1.65—1.7
CV-10 C	3 (英)	2100—2200	900—1000	—	165000	80—85	2.5	80	1.75—1.78
CV-2 W	3 (英)	1600—1700	600—700	—	150000	68—70	2.3	80	1.7—1.8
MV-10 A②	4 (英)	3600—3700	1200—1300	—	165000	70—75	5.3	110	2.6—2.7
EK-312②	4 (法)	1500—1600	800—900	—	130000	40—50	3.0	—	2.5—2.6
石墨合金 (Графал-лол)③	4 (美)	2700—2800	1000—1100	—	150000	70—75	3.2	—	2.9—3
EK-2092	5 (法)	1400—1500	600—700	—	130000	60—70	10	—	1.6—1.65

① 由于试样尺寸不足, 个别项目未进行测定。

② 浸渍铅青铜的石墨材料。

③ 浸渍巴氏合金。浸渍所用聚合树脂的成分未测出。

細網絡的程度。图 3 列举出四种石墨材料試样的显微照片：
未經浸漬的 AF-1500 石墨材料
(见图 3, a)，浸漬巴氏合金的
 AO-1500-B83 (见图 3, b)，浸漬
鉛的 AF-1500-CO5 (见图 3, c)
和浸漬鉛青銅的 AF-1500-

Ba , 公斤/厘米²

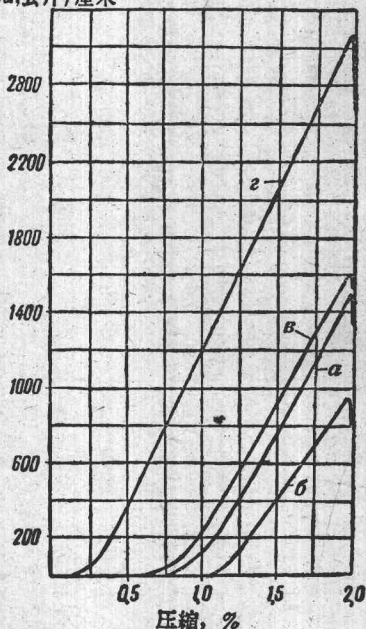


图 2 石墨耐磨材料的压缩图

a —CV-10 焙烧材料， b — AF-1500 石墨化材料， c —CV-2W 浸渍塑料的焙烧材料， 2 — AF-1500-CO5 浸渍金属的石墨化材料

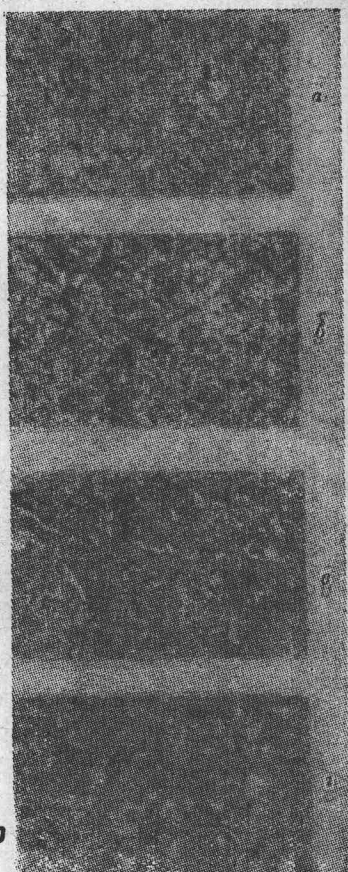


图 3 石墨耐磨材料的显微照片
(100倍)

БрС-30 (見圖 3, з)。АО-1500-Б83 石墨材料的气孔填充程度最高, 浸漬后, 其强度大約提高 1 倍。气孔填充程度較低的石墨材料, 其强度仅提高 85% (АГ-1500-С05) 和 60% (АГ-1500-БрС-30)。

由前四类石墨耐磨材料毛坯制造精度高、表面光洁度好的零件时, 一般須进行机械加工。脆性石墨材料加工过程中不能产生連續的切削削末, 并且在进刀时, 由于切削力的作用而可能使工件产生缺口及掉块現象。因此在加工石墨制品时應該在吃刀量小、切削深度不大的条件下进行。硬度十分高的第 1、3 和 4 这三种石墨材料, 要采用鑲有硬质合金刀片的切削刀具加工。各种石墨材料都可以采用細粒砂輪磨削, 其加工精度与金属相同。

各种石墨材料的耐磨性能

石墨在摩擦过程中的行为在很大程度上决定于石墨晶体的結構。石墨晶体有易于沿晶层剝离的性能。当石墨粉处于两个摩擦面之間时, 由于形成一层极为微薄的石墨晶体膜而使金属的摩擦系数显著降低。石墨材料与金属摩擦时, 在两个摩擦面上所形成的定向晶体膜, 是由石墨材料剝离下来的石墨顆粒所組成的。由于石墨晶体剝离时所产生的不飽和鍵, 致使晶体膜与摩擦面一般都具有足够的連接强度。石墨晶体薄膜只有在正常的切向应力作用下才能生成, 上述应力足以使石墨顆粒自摩擦面的突起处脫离下来。在低压下不能形成定向薄膜, 而压力过高, 則会显著加剧石墨的磨損。当两个石墨材料試样相互摩擦时, 由于其摩擦面实际上不发生塑性变形, 不能形成良好的定向薄膜, 而只是在压力作用下

使突起处产生脆性破坏。用电子衍射法所进行的研究工作表明，经过一段时间在金属及石墨表面形成石墨薄膜（磨合运转），其厚度及其定向程度都达到一定的值。在这段时间内，起初，石墨的磨损速度很高，而后，即逐渐降低至恒定数值；摩擦系数的变化也是与上述情况相同的。当磨合运转終了时，薄膜厚度及定向程度即达到极限值，而当同一种石墨材料与不同金属摩擦时，磨合运转終了所达到的薄膜极限厚度、定向程度以及恒定磨损速度数值和摩擦系数各不相同。洁净金属-石墨摩擦面的定向程度最好，晶体薄膜的极限厚度最小，粘附力数值最大。这种摩擦面可以保证磨合終了时的磨损率及摩擦系数最小。此刻，恒定磨损速度值为每 100 小时 3—5 微米（容许压力范围内），摩擦系数为 0.04—0.05^[4]。

试验表明，第 1 类及第 2 类石墨材料在大气介质和室温条件下与镀铬层干摩擦时，能够形成良好的定向薄膜（其摩擦系数及磨损率都很低），而在同样情况下与铜、铝及其合金摩擦时，结果却不令人满意。第 1 类石墨材料对铸铁的耐磨性能良好，而对钢却很坏；第 2 类石墨材料对于铸铁及钢的耐磨性能，恰恰与第一类材料情况相反。任何一对金属-石墨摩擦副，即使不能形成良好的定向薄膜，也只是常常磨损石墨材料。石墨与金属干摩擦过程的特性直接由摩擦系数及磨损率之间的关系表示。图 4 为 АГ-1500 石墨耐磨材料与各种金属摩擦时磨损率与时间的关系。该试验是在压力为 10 公斤/厘米²，滑动速度为 0.24 米/秒的条件下进行的。试样对全部金属的磨合运转大致都是在开始试验三小时以后終了，而磨合运转试验所得到的薄膜定向程度各不相同。试验所得的恒定磨损速度值如下：与铬磨合为 0.05 微米/时，与铜磨

合为4.6微米/时。由于继续运转时其磨损率已恒定，这一标号的石墨材料制成的零件用于铜磨面时，每100小时的磨损率竟达0.5毫米左右，显然，这是不容许用于机械制造中的。

对于实际应用来说，石墨材料的耐磨性能与滑动速度和单位压力的关系，是具有更为现实意义的特

性。由于石墨材料的导热系数很高，耐热性优良，因而滑动速度对摩擦系数和磨损率的影响甚微。滑动速度增大，一般会使摩擦面的温度升高，摩擦材料发生不可逆的变化，并使其耐磨特性降低。特别是在用于塑料磨面时，这种情况就更为显著。石墨材料所具有的高导热系数，有助于自摩擦面把热量快速传开，以便在临近固定的温度条件时使材料内部及其摩擦面的温度得到平衡。固定温度值与单位压力及传热强度有关，一般不超过50—100°C。这一温度范围不会改变石墨及金属的性能。

上述试验表明，随着滑动速度的提高，可以缩短石墨材料与金属的磨合运转的时间，亦即磨合运转的时间与滑动速度呈反比关系。磨损速度及摩擦系数的数值与滑动速度关系不大，在0.25—0.3米/秒范围内，滑动速度对磨损率及摩

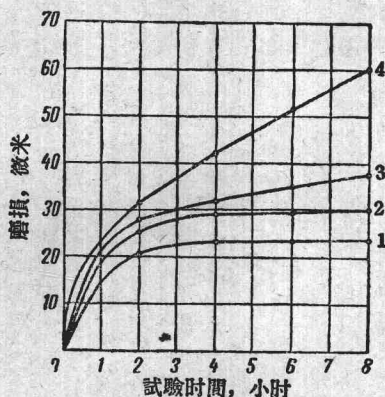


图4 AG-1500 石墨材料与各种金属摩擦时的磨损率
1—与铅；2—与1X18H9 钢；
3—与黄铜；4—与铜

擦系数的影响很小（当石墨与金属零件之間不存在由于膨胀系数的差异而形成間隙的时候），这一点可以用石墨軸承中鋼軸运轉为例加以說明。在自由間隙和单位压力为 10 公斤/厘米²的条件下，滑动速度在上述范围内变化，会使 АГ-1500 石墨材料对 1X18H9 号鋼摩擦时的磨損率增长 1 倍，而在所有滑动速度范围内，其摩擦系数都保持在 0.05—0.07 之間。

上述定向石墨薄膜的摩擦机构，使磨損速度很少随压力而改变，这一情况只有在摩擦面上达到某一单位压力值时才能保持。压力繼續增大，会使定向薄膜剧烈破坏，从而引起磨損率和摩擦系数急剧增高。对于不同的石墨-金属磨面来说，其“过渡”容許压力在很大范围内变化。在所有的情况下，容許压力越高，摩擦面上所形成的石墨薄膜的定向程度就越好。那末，对于第 1 类耐磨材料而言，当与鉻或鑄鉄构成摩擦副时，其“过渡”单位压力为 30—40 公斤/厘米²，与銅或黃銅組成摩擦副时，其过渡单位压力則为 5—8 公斤/厘米²左右。

图 5 所示，为第 1 类（焙烧）中不同标号的石墨材料沿鑄鉄运轉时磨損率与单位压力的关系曲綫，其滑动速度为 0.24 米/秒（见图 5, a）。纵座标为 8 小时的合計磨損率，其中包括磨合运轉时的磨損。根据該曲綫可以准确地确定出每种材料沿該种金属运轉时的容許单位压力。以磨損的对数值 ($\log f$) 和单位压力制成图表，則容許的单位压力值即由两段直綫的交点表示。图 5, б 所示，是第 2 类耐磨材料沿 1X18H9 号鋼运轉 8 小时的磨損率表，其滑动速度为 0.24 米/秒。浸漬聚合树脂或金属的石墨材料，在正常溫度及干摩擦条件下，会使容許单位压力提高。但当浸漬物强度显著提高时（АГ-1500 浸漬金属），有时其耐磨性能会变坏。浸漬有机硅

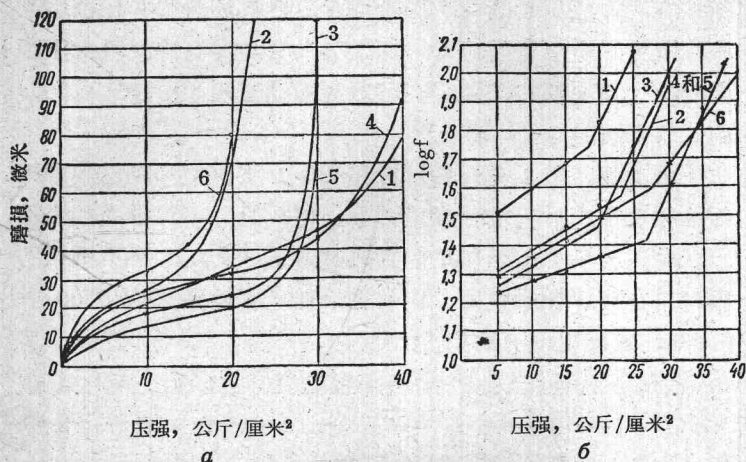


图 5 石墨材料磨损率

a—第 1 类材料与铸铁运转时，磨损率与单位压力的关系

(1—AO-1500; 2—ПK-0; 3—2 П-1000; 4—CY-10;

5—石墨-特 4; 6—SE-8)

б—第 2 类材料与 1X 18 H 9 钢运转时，磨损率与单位压力的关系

(1—ЭГ-2 А; 2—АГ-600; 3—Э-46; 4—EK-461;

5—EK-40; 6—АГ-1500)

树脂的石墨耐磨材料，其磨损率大大降低，而容许的单位压力将提高。图 6 列举出浸渍石墨材料沿 1X 18 H 9 号钢运转时磨损率与单位压力的关系；当磨损率较小时（大部分是在磨合运转阶段磨损掉），容许的单位压力为 70—100 公斤/厘米²。

工作气体介质的成分会影响到石墨材料的摩擦系数和磨损率。例如对于大多数金属-石墨磨面来说，在真空或干燥的中性气体中工作时，其容许的单位压力均降至 $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ ，而在干燥的化学腐蚀性介质——氧、氯和酸性气体——中，则未见有此现象^[5]。在含饱和水蒸汽或油蒸气的气体中，当摩擦面上

凝結有液体微粒或形成凝皮时，石墨材料的磨損率在很小的单位压力下也会急剧增大。第 3 类和第 4 类石墨材料对于蒸汽凝結过程的敏感性很低，可以成功地应用于湿度为 100% 的气体介质中。

第 1 类和第 2 类石墨材料在液体介质中工作时，其摩擦系数和磨損率虽远較干摩擦时大，但数值并不算很高。当不存在对浸漬剂有破坏作用的物质时，第 3、4、5 类不透性石墨材料在液体介质中的工作效果最佳，摩擦系数为 0.001—0.005，实际上沒有磨損^[6]。

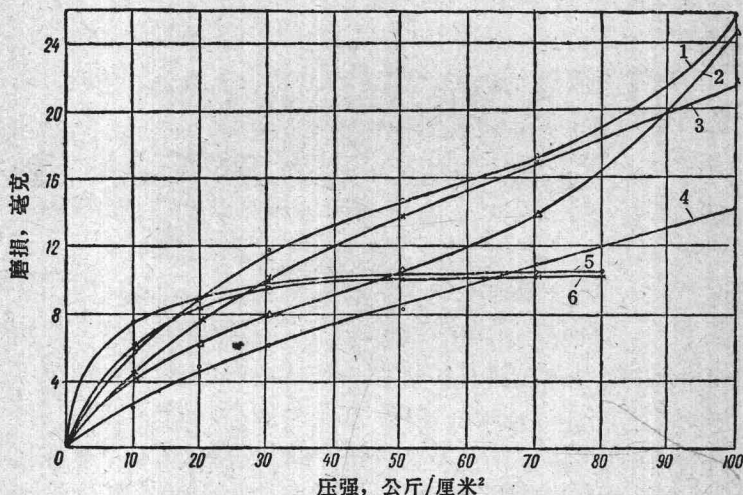


图 6 浸漬石墨材料与 1X 18 H 9 号鋼摩擦时 磨損率与单位压力的关系

1—AO-1500-CO 5; 2—CY-10 C; 3—AO-1500-B 83;
4—CY-10 WA; 5—AO-1500-Φ; 6—Γ-1500-K

在 -200 至 +2500°C 温度范围内，第 1 类和第 2 类石墨材料的强度随温度升高而增大。同时，無論是在正温^[6]或是