

# 耐热合金的現狀 (一)

現今，对耐热材料的研究是材料研究的最为重要的一个方面，世界各国自第二次世界大战以来，在这方面都获得了惊人的进展，新合金的陸續涌現，特別值得注意。

一般說来，热机的效率是随工作燃气温度的上升而提高的，我們取蒸汽渦輪机和燃气渦輪机为例，并繪其热效率曲綫如下：

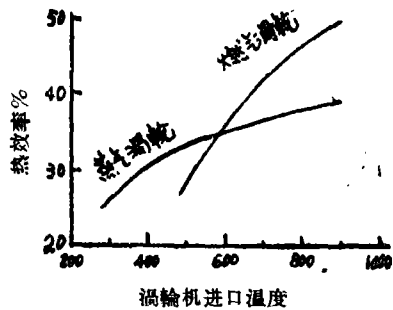


圖 1 蒸汽渦輪机和燃气渦輪机的热效率。

最新而性能較高的蒸汽渦輪机，采用的蒸汽溫度在550°C以上，燃气渦輪机在工业上应用的工作溫度为650~750°C，在飞机上采用的燃气渦輪机則为800~900°C，用于噴气式发动机的渦輪叶片，可以期望耐900~1000°C的高热。工业用燃气渦輪机的寿命，可望达到数万小时，而渦輪噴气式发动机至少需要有150小时以上的寿命。耐高温持久使用的材料，从来都是以铁为基的合金，現在，再不能对它抱以更大的期望了。当前，出現了逐漸减少合金中的鉄含量，而代之以鎳和鈷的一种所謂超耐热合金（以下簡称超合金）。这种合金在600~900°C溫度范围内，能保持高的持久强度，在900~1000°C的高溫度状态下，如果在短時間內，也具有优良的高温特性。为增加渦輪噴气发动机的推力，需要在这种发动机上，安装一种瞬时使用的加力燃烧室(atafter burner)，在这种加力燃烧室和不需要渦輪和压缩机的，具有高速度推力的冲压式噴气发动机上使用需要的材料中，这种超耐热合金有很大用途。因此，在

本文中，首先縱观一下各种超合金的高温特性，然后再对这些合金在燃气渦輪机，噴气发动机上面，使用的情況加以考察，最后，述說一下我們对耐热合金的将来的見解，以供我国工业界，在这方面的参考。

## I 超合金的高温特性及其加工性

### (1) 合金元素的功用

耐热合金采用許多种元素，因此，要煉出質量高的合金，必須充分了解加入的各种合金元素的功用，把这些元素适当地加以配合是很必要的。蠕变强度的提高，蠕变以外的机械性能的提高，組織的稳定，沉淀硬化的發生，都由于元素的各自不同而有很大差別。現将耐热合金中所采用的合金元素，选其有代表性的，簡單地介紹一下它們的功用：

**鉄**：主要作为合金的基；

**鎳**：具有較强的抗高温蠕变性能的合金的基本元素，可以稳定奥氏体，改善合金的高温强度，抗氧化性和耐蝕性；

**鈷**：具有最强的抗高温蠕变性能的合金的基本元素；

**鉻**：可帮助合金显著提高其抗氧化性，同时加此种元素可生碳化物和氮化物，帮助提高高温强度；

**鋁**：能高高在含氮（氮可提高高温强度）的奥氏体合金中，作为氮化物，起沉淀的硬化作用；

**鎢**：改善高温强度；

**鈮**：可以稳定碳化物和氮化物，提高高温强度；

**鈦**：具有与鈮同样的功用，可以在鎳基合金中起沉淀硬化作用；

**鋇**：可提高合金中的抗氧化性，或与鈦沉淀一起并用，作为沉淀硬化的元素；

表 1 鉻-鎳-鉄系合金

合 金	化 学 組 成 (%)												
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	其他
19-9DL	0.30	1.10	0.60	19.0	9.0	—	1.25	1.2	0.40	0.30	—	66	0.15N* 0.15 0.15B 0.3V
19-9DX	0.30	1.00	0.55	19.2	9.0	—	1.50	1.2	—	0.55	—	66	
Type321	0.08*	2.00*	1.00*	18.0	8.0	—	—	—	—	0.40	—	—	
Typ1 310	0.25*	2.00*	1.50*	25.0	20.0	—	—	—	—	—	—	其余	
Croloy15-15N	0.15*	2.0*	0.75*	16	15	—	1.55	1.40	1.05	—	—	其余	
Timkln16-25-6	0.10	1.35	0.70	16.0	25.0	—	6.0	—	—	—	—	50	
Discaloy24	0.04	1.38	1.00	13.5	26.2	—	3.9	—	—	1.61	0.11	其余	
Haynes Alloy№88	0.07	1.50	0.50	12.5	15.0	—	2.0	0.6	—	0.6	—	其余	
A-286	0.05	1.35	0.95	15.0	26.0	—	1.25	—	—	2.00	0.20	其余	
S-588	0.42	1.5	0.8	18.4	20	—	4.0	4.0	4.0	—	—	其余	
IncoloyT	0.10	1.0	0.4	20.5	32	—	—	—	—	1.0	—	其余	
H. R. Crown	0.23	0.65	1.16	23.2	12.3	—	—	3.0	—	—	—	其余	

合 金	100小时及1000小时破断强度(公斤/公厘 <sup>2</sup> )									
	649°C		732°C		816°C		871°C		982°C	
	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000
19-9DL	36.6	26.7	19.7	13.4	12.0	7.0	—	—	—	—
19-9DX	36.9	29.5	—	—	—	—	—	—	—	—
Type321	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Type310	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Croloy15-15N	—	—	—	12.7	—	7.0	—	—	—	—
Timkln16-25-6	31.6	23.9	17.6	12.0	9.4	6.3	—	—	—	—
Discaloy24	38.7	28.8	22.5	14.1	10.5	—	—	—	—	—
Haynes Alloy№88	41.5	34.5	29.5	21.8	17.9	11.3	9.6	—	—	—
A-286	42.9	32.3	24.6	14.1	9.7	5.4	—	—	—	—
S-588	28.8	21.1	17.6	12.7	10.5	7.0	—	—	—	—
IncoloyT	23.2	18.3	14.1	10.2	7.6	4.9	—	—	—	—
H. R. Crown	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

\* 最大

**钒**：跟鈦起的作用相同，可强化合金中氮，用。  
碳的稳定性，提高合金的蠕变强度；

**硅**：添加2%硅，可以改善某种不銹鋼的抗氧化性質；

**錳**：可利用它作为稳定奥氏体的元素，来代替鎳；

**碳**：稳定合金中的奥氏体，其沉淀的硬化作用可改善合金的蠕变强度，为提高合金的鑄造性亦可添加此种元素；

**氮**：是使奥氏体获得較强的稳定性的元素，由于析出氮化物，可起提高蠕变强度的作

    (2) 超合金的种类及其破断强度 (Rupture stress)

    超合金大别分为鉻-鎳-鉄系合金，鉻-鎳-鈷-鉄系合金，鎳基合金、鈷基合金、鎢基合金及钼基合金等六种。現将这六种合金的化学成分及其破断强度表述如下。

**鉻-鎳-鉄系合金**

    如表 1 所示，将钼、鎢、鈳以及形成碳化物的元素如鈦，添加到本合金系中，可以使不銹鋼系合金更为坚实，而 Discaloy24 和 A-286

两型合金由于含有鋁及鈦，經過热处理其性能則可以提高前。一类型的合金，可以 19-9DL 和 Timken16-25-6 等为代表，这类合金 虽經過热处理，也得不到充分的强度，因而，主要在 650~760℃时，使用它进行热冷作工 (hot-cald-working)。本系合金可在 760℃ 以下使用，用它制造噴气式發动机的渦輪盘。

鉻-鎳-鈷-鉄系合金

本系合金，一般在溶固处理后时效状态使用。这种合金，亦可大別分为两种类型。一种是添加鋁、鎢、鈳提高其强度，另一种是不含鋁、鎢、鈳，而添加鈦和鋁。前一类型合金，有大家所熟知的 S-588、N-155、S-590、

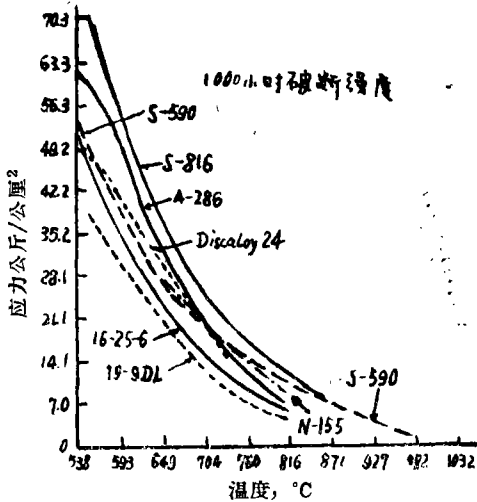


圖 2 各种超合金 1000 小时的破断强度。

表 2 鉻-鎳-鈷-鉄系合金

合 金	化 学 組 成 (%)												
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Cb	Ti	Al	Fe	其他
N-153	0.32	1.5	0.5	17	15	12	3.0	2.0	1.0	—	—	其余	—
N-155	0.15	1.5	0.5	21	20	20	3.0	2.5	1.0	—	—	其余	0.15N
S-590	0.40	1.5	0.7	20	20	20	4.0	4.0	4.0	—	—	24	—
S-816	0.38	1.5	0.7	20	20	43	4.0	4.0	4.0	—	—	3	—
V-36	0.31	0.9	0.5	25	20	42	4.0	2.0	2.2	—	—	3	—
K-42-B	0.05	0.7	0.7	18	43	22	—	—	—	2.5	0.2	13	—
Rlfractaloy26	0.05	0.7	0.7	18	37	20	3.0	—	—	2.8	0.2	18	—
Rlfractaloy80	0.10	0.6	0.7	20	20	30	10.0	5.0	—	—	—	14	—
Haynes Alloy№99	0.10	1.5	0.7	21	18	12	4.0	2.5	—	—	—	其余	0.058
G-18B	0.4	0.8	1.0	13	13	10	2.0	2.5	3.0	—	—	其余	—
G-32	0.27	0.8	0.5	19	10.5	46.6	2.2	—	1.4	—	—	其余	3.0V

合 金	100小时及1000小时破断强度(公斤/公厘²)									
	649°C		732°C		816°C		871°C		982°C	
	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000
N-153	—	26.7	—	16.2	13.7	8.4	—	—	—	—
N-155	35.2	28.1	21.8	16.9	12.7	9.1	8.5	5.6	3.5	8.8
S-590	33.7	26.7	21.1	15.5	14.1	11.3	8.8	6.3	3.9	2.5
S-816	46.4	35.2	28.1	21.1	18.3	12.7	10.9	7.0	3.8	2.1
V-36	—	—	24.6	18.6	16.2	12.7	10.5	7.7	6.0	3.5
K-42-B	46.4	28.1	26.0	19.0	12.3	7.7	—	—	—	—
Rlfractaloy26	56.2	44.3	35.9	26.7	19.0	12.7	—	—	—	—
RlfractaloyBo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Haynes Alloy№99	35.2	—	—	—	10.5	—	—	—	—	—
G-18B	33.8	25.2	17.6	13.2	99	91	9.1	5.7	—	—
G-32	—	—	29.6	24.6	18.8	14.2	132	8.5	—	—

S-816, Refractaloy80 等, 无论那一种, 都可以薄板和锻件状态供应使用。S-816 和 V-36 可以考虑放在钴基合金范围内, 虽然它的含铁量, 比其他钴基合金的含铁量多一些。喷气式发动机涡轮盘大量使用 S-816 的锻件。第二种类型合金 K42B, Refractaloy26 也是我们熟知的。铬-镍-铁系合金和铬-镍-钴-铁系合金加工状态或热处理状态, 1000 小时的破断强度曲线图如图 2 所示。

Timken16-25-6 和 19-9DL 合金制涡轮盘具有适宜在 540~650°C 温度范围内使用的强度。如 Discaloy24 和 A-286 经过热处理的合金, 其破断强度更高。然而, 这些含铁量多的铬-镍-铁系合金, 在高温时强度急剧降低, 在 760°C 以上非常危险。为此, 采用铬-镍-钴-铁系合金, 其温度则可使用到 810°C。

镍基合金

镍基合金如表 3 所示。Hastelloy 系合金含有多量的钼, 可用来铸造, 或在锻造状态下供应使用。Hastelloy 系较具有热处理效果的合金的强度为低。具有热处理效果的合金, 一般其钛和铝的含量跟可生成碳化物的钼和铌含量相同。此种镍基合金中, 著名的有: Inconel "X" 550 型, Nimonic 80A、90、95 以及 100, Waspaloy, M-252 等。这些合金可用来制造喷气式发动机涡轮叶片。由于美国的钴原料不足, 用 M-252 及 Waspaloy 等镍基合金, 代替钴基合金的研究比较发达, 例如可寻找像 S-816 那样新合金代替优秀的钴基合金。铸造用镍合金具有良好的性能, 也很引人注目。Inco 700 是含有铝和钛, 同时也有相当钴和钼含量的镍基合金, 可进行锻造和热处理, 是一种很有前途的合金。此相类似的 Nimonic 100 是 Nimonic 系合金中最新的, 抗蠕变性能很强的合金, 现在, 英国飞机上使用的燃气涡轮叶片大量使用这种合金, 在接近 1000°C 高温时, 仍有很好的性能。一般来说镍合金可在 700~900°C 的温度下使用。

钴基合金

钴基合金如表 4 所示。钴基合金中重要的合金有 Haynes alloy No21、No30、No31 (X-40) 及 No36 (L-251)。Haynes alloy No 25 (L-605) 是一种低碳锻造钴基合金, 用于锻件和薄板材。

一般来说, 钴基合金多用于涡轮排气传动机盘, 喷气发动机的导向叶片及涡轮盘。图 3 表示镍基合金和钴基合金 1000 小时的破断强度。图 3 与图 4 相较, 这些合金在 315°C 时, 其强度较 Timken16-25-6, 19-9DL, A-284 及 Discaloy24 的强度高。为使这一比较, 容易了解, 在图 3 上, S-816 合金与其他合金作了比较。锻造后的镍基合金的强度, 在 650°, 730° 以及 815°C 时, 比 S-816 合金稍高, 但在 870°C 时, 则几乎相同。因此, 这些镍基合金虽不采用钴、钼、铌等特殊元素, 不仅性能优于 S-816 合金, 同时其强度也不劣于它。铸造用钴基合金中 Haynes alloy No31 在 790~900°C 的温度范围可保持较好的破断强度。钴基合金一般能用到 800~900°C。

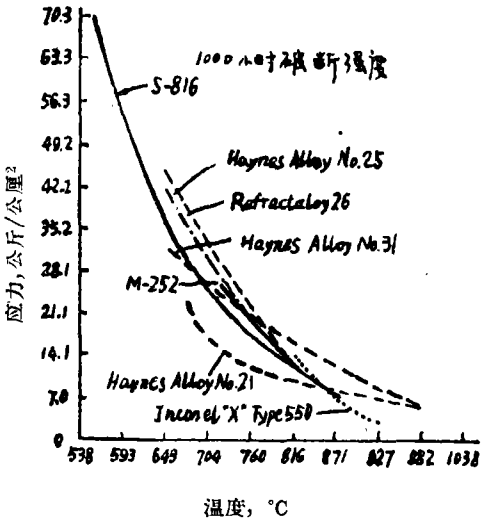


图 3 镍基及钴基超合金 1000 小时的破断强度。

铬基合金

铬基合金可试做耐 900~1000°C 的涡轮叶片材料, CM469 是这种合金的代表型。从第 5 表可以知道, 铬基合金的高温破断强度比镍基

表 3 镍基合金

合 金	化 学 组 成 (%)												
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Cb	Ti	Al	Fe	其他
Inconel	0.04	0.35	0.20	15.5	76	—	—	—	—	—	—	7	—
Inconel W	0.04	0.60	0.25	15	75	—	—	—	—	25	0.6	7	—
Inconel“X”	0.04	0.7	0.3	15	73	—	—	—	0.9	25	0.9	7	—
Inconel“X”Type550	0.04	0.7	0.4	15	73	—	—	—	0.9	2.4	0.9	7	—
Hastelloy A	0.10	2.0	0.7	—	56	—	20	—	—	—	—	20	—
Hastelloy B(c)	0.10	0.8	0.7	1.0	65	—	28	—	—	—	—	5	—
Hastelloy C(c)	0.10	0.8	0.7	16	57	—	17	4	—	—	—	5	—
Hastelloy D(c)	0.10	1.0	0.01	—	85	—	—	—	—	—	—	1	4.0Cu
Hastelloy X	0.15	—	—	22	45	—	9	—	—	—	—	其余	—
Waspaloy	0.05	0.7	0.4	19	58	14	3	—	—	25	1.2	2	—
M-252	0.10	10	0.7	19	54	10	10	—	—	2.5	0.75	2	—
Hastelloy R	0.10	0.25	0.6	15	66	2.5*	5	—	—	2.5	2.25	7	—
Inco739	0.07	0.5	0.15	15.5	77	—	—	—	—	1.7	2.7	0.5	—
Nimonic75	0.12	0.4	0.6	20	76	—	—	—	—	0.4	0.06	2.4	—
Nimonic80	0.05	0.70	0.50	20	76	—	—	—	—	2.3	1.0	0.5	—
Nimonic80A	0.05	0.70	0.50	20	76	—	—	—	—	2.3	1.0	0.5	—
Nimonic90	0.08	0.50	0.40	20	58	16	—	—	—	2.3	1.4	0.5	—
Nimonic95	0.08	0.50	0.40	20	58	16	—	—	—	25	1.6	0.5	—
Nimonic100	0.3*	0.50	0.5*	12	其余	25	5.5	—	—	2.0	6.0	2.0*	—

合 金	100小时及1000小时破断强度(公斤/公厘 <sup>2</sup> )									
	649°C		732°C		816°C		871°C		982°C	
	100	1000	100	1000	100	1000	100	100	100	1000
Inconel	15.5	10.1	7.4	4.7	4.0	26	2.9	1.9	1.7	1.1
InconelW	41.5	26.7	—	—	91	—	—	—	—	—
Inconel“X”	54.8	43.6	35.2	28.1	19.7	12.7	12.7	6.3	2.3	1.6
Inconel“X”Type550	—	—	—	—	23.9	14.8	12.7	7.1	3.3	—
Hastelloy A	—	—	—	—	8.1	6.1	—	—	—	—
Hastelloy B(c)	35.9	28.4	24.6	17.9	13.0	8.8	—	—	—	—
Hastelloy C(c)	34.8	29.8	27.5	17.6	13.4	10.2	9.2	6.4	—	—
Hastelloy D(c)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hastelloy X	31.3	21.4	18.3	13.0	10.9	7.0	—	—	—	—
Waspaloy	—	—	37.3	—	19.0	—	12.7	—	—	—
M=252	—	—	38.7	27.8	19.4	10.9	—	—	—	—
Hastelloy R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Inco 739	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nimonic 75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nimonic 80	44.0	35.5	27.4	18.1	12.1	5.4	—	—	—	—
Nimonic 80A	47.3	39.4	32.6	21.8	15.1	6.8	—	—	—	—
Nimonic 90	53.5	44.3	35.	26.7	19.7	12.6	—	—	—	—
Nimonic 95	—	—	39.0	—	23.2	—	14.8	—	—	—
Nimonic 100	—	—	39.2	28.7	27.4	18.1	19.5	12.7	6.6	2.0

注: (c)=铸造 \* 最大。

和钴基合金还要高。含钛的镍基合金虽具有较 优良的性能,但这种合金切削加工困难,在室温

条件下質脆。在870℃作拉伸試驗时,其延伸率为2~4%。含鉻 60%,鉄 28%,鉬12%的鉻基合金的加工性尙佳,可以压延成板材。一般,这一

系合金在1800℃以及高温度下,也不熔解,在大气中熔煉时,由于混入杂质,而使材料質脆,得不到加工性好的材料。

表 4 鉻基合金

合 金	化 学 组 成 (%)												
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Cb	Ti	Al	Fe	其他
Haynes Alloy№21, Vitallium(c)	0.25	0.60	0.60	27	3	62	5	—	—	—	—	1	—
Haynes Alloy№25, L605	0.12	1.50	1.0	20	10	51	—	15	—	—	—	1	—
Haynes Alloy№30, 422-19(c)	0.40	0.60	0.60	24	16	51	6	—	—	—	—	1	—
HaynesAlloy№31, X-40(c)	0.40	0.60	0.60	25	10	55	—	8	—	—	—	1	—
HaynesAlloy№36, L251(c)	0.40	12	0.50	19	10	54	—	14.5	—	—	—	1	003B
合 金	100小时及1000小时破断强度(公斤/公厘 <sup>2</sup> )												
	649℃		732℃		816℃		871℃		982℃				
	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	
HaynesAlloy№21, Vitallium(c)	35.9	31.1	22.5	15.5	15.5	9.9	11.8	93	6.7	4.9			
HaynesAlloy№25, L605	49.2	40.8	30.2	23.2	16.2	12.0	10.9	7.4	49	26			
HaynesAlloy№30, 422-19(c)	—	—	33.1	25.3	20.1	15.2	11.1	10.4	7.0	5.0			
HaynesAlloy№31, X-40(c)	38.7	32.3	31.6	23.2	19.9	16.5	14.8	12.7	7.9	6.9			
HaynesAlloy№36, L251(c)	—	—	33.7	29.1	20.4	17.9	16.2	13.1	7.4	5.1			

注: (c)=cast。

表 5 鉻基合金

合 金	化 学 組 成 (%)								100小时及1000小时破断强度 (公斤/公厘 <sup>2</sup> )	
									870℃	
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	Fe	Ti	100	1000
CW382	—	—	—	60	—	20	20	—	16.9	—
CM469	0.05	—	—	60	25	—	15	—	24.6	14.8
CM554	0.03	—	—	60	15	—	25	—	14.1	—
CMT	0.10	0.50	0.60	58	25	—	15	20	32.3	26.0

鉬基合金

用純鉬以及鉬基合金来做超耐热材料,最近,頗引人注意。以前,都是用鉬来做粉末冶金的原 料,制綫和板,自从电弧熔煉法發达以来,現在,熔煉大型鉬錠已成为可能。純鉬的破断强度可如第 4 表所示,它在 870~1095℃的高溫状况下,比鉻基、鎳基或鉻鎳鈷鉄系合金中最好的合金品种的强度还要高。

圖上划斜綫部分表示被測定的强度范围。因此,取某一領域的測定值,应注意原料金屬

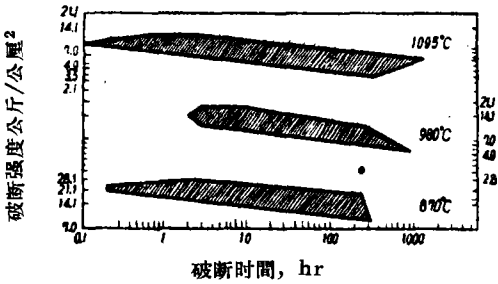


圖 4 商品鉬的破断强度。

的提取,熔煉法,加工以及热处理条件等不同的原因,超合金中全有这种共同情况,應該特別注意。再結晶后的鉬,很显然比加工

后的破断强度低。经过加工的钼，在1095°C下使用时，发生再结晶的现象，预先已经再结晶的材料又回到原来强度。S-816和Haynes alloy №31 (X-40) 合金在860°C搁置100小时的破断强度各为9.8和14.8公斤/公厘<sup>2</sup>，980°C时的强度各为7.4和7.7公斤/公厘<sup>2</sup>。这两种钼基合金是超合金中特别好的，其最高强度如图  
所示，在870°C时，等于纯钼的平均强度。钼的良好性能，在980°C及1095°C高温情况下，是十分明显的。钼添加少量的铌、锆、钛等元素（如表6所示），其高温强度可大大提高。这样的钼基合金，在经过电弧铸造后，除去变形的状态下进行试验。此种合金可用来进行锻造，压延及拉丝等加工，钼在750°C以上时，极易氧化，钼的氧化层没有防止挥发能力，是一个很大的缺点。

为防止钼的氧化，现在考虑采取一些适当的办法。用抗氧化的金属或合金，如镍，18-8 铬镍不锈钢，Inconel 等包复，如用这种方法，在 980°C 温度下，可使用 1500 小时。其他方法，尚有蒸发硅，形成抗氧化的硅化钼皮膜，以及使用陶瓷涂层等。

### (3) 各种合金的耐热温度和高溫强度的比較

上述各种超合金及铁素体系，奥氏体系钢，在各种温度下，放置 1000 小时的破断强度如图 5 所示。使用碳素钢作耐热材料的最多，其使用温度约达  $540^{\circ}\text{C}$ 。超过这一温度以上，要保持材料的强度和抗氧化性能，必需采用合金钢。低合金铁素体钢可耐  $480\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，不锈钢根据应力，温度以及容许变形量的条件，可在  $650^{\circ}\text{C}$  以上， $815\sim 870^{\circ}\text{C}$  温度下使用。其次，所有超合金，除钴基外，其强度范围均表示在划斜线的部分内。

各系各基合金，由于含有种种合金，圖上所佔圖面不免重复，垂直綫影的一般是加工状态使用的合金，粗斜綫部分的，一般是經過固溶处理后时效状态使用的鉻鎳鉄系或鉻鎳鈷鉄系合金。細綫部分相当于經過热处理的鎳基合金。如均在650°C溫度下加以比較，根据这

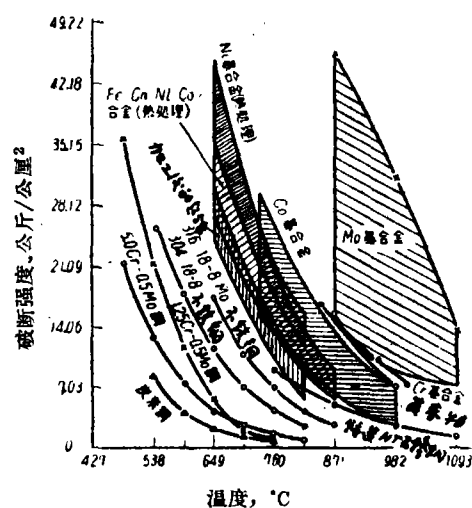


圖 5 各种合金1000小时的破断强度。

些合金的成分，組織，熱處理方法等，就可以知道合金的強度為什麼會高。含鉛的316型不銹鋼具有保持到高溫時的非常好的強度。

在 650°C 时, 具有最高强度的合金有: Inconel X550 型 Nimonic90, Refractaloy26; 在 815~870°C 时, 具有最高强度的合金有: Inconel X550 型和 V-36。

水平綫影部分为經過鍛造及鑄造鈷基合金，其中最好的，在730~870°C溫度範圍，优于前述三个合金系的破断强度。鈷基合金的破断强度表示到980°C，其中在730°C时，强度最高的为含14.5%鎢的Haynes alloy №36，在980°C时，为含8%鎢的Haynes alloy №31 (X-40)。K-161B的溫度比現在鈷合金中最好的型号还稍高一些，鉻基合金較比更高一些，它甚至几乎跟純鉬的强度相同。

圖 5 中右上方比較大的斜綫圖面，是鉬及鉬合金，圖面的下限表示純鉬的破斷強度，上限表示實驗中得到的最好型號的鉬合金的強度。鉬合金與其他超合金比較，從在一定溫度下的破斷強度，或者在一定應力下的溫度來看，比其他超合金优越是顯而易見的。

鋁合金的實用問題，目前尚處於初級階段，如果對熔煉進一步加以研究，可能在工業上會得到性能更好的合金型號。但遺憾的是，目前如何防止鋁的氧化問題尚未解決。

(下期待續)

赵中译自日本“金属”杂志1958. №3.