

“Промышленность”, оборонгиз, Москва, 1957, N11, стр 52-63.

11) М. Д. Глезер, С. В. Буртаков, М. В. Сергеев, А. Н. Кокошвили. Справочник по металлам и металлическим материалам том 1 стр. Москва, оборонгиз. 1957.

12) “Metall”, 1957, Jg. 11, N. 12. S. 1067-1069, 4 111.

13) The Journae of the Instatute of metaes, 1956-57, vol. 85, part 11, 473-479.

14) И. И. Корнилов. Центробежный метод исследования прочности металлов и сплавов при высоких температурах. Журнал “Заводская лаборатория” N1 1949, стр 76.

15) И. П. Булыгин, П. Т. Власова, А. Т. Горбодей, П. М. Селиверстова, С. Е. Чупахин. Атлас диаграмм растяжения при высоких температурах, Кривых ползучести и длительной прочности сталей и сплавов для двигателей. Москва, Оборонгиз, 1957.

16) “Alloy metals Review”, 1957, vol. 8, N86, P 28, i 11.5.

17) “the Iron Age”, 1957, vol. 180 N19. P. 128-129

18) Kiefber und seharzkopf. Hartstoffe und Hartmetalle. 1953.

曾少潜譯

耐热合金的现状(二)

(4) 高温下合金的各种性质:

耐热材料的主要条件是可供高温条件下長時間使用。伴随着飞机和火箭等的發展則对高温下可供短時間使用的材料亦加以注視。一般的金屬其强度均随着温度的上升而下降,經时效硬化的合金則产生过时效,經加工硬化的則因再結晶而發生軟化現象。其次由于不同的合金在某一温度时新的相在結晶粒界析出减弱,因而脆化。但产生此現象的温度及其速度則因合金种类之不同而各异,所以瞬時試驗具有高强度的合金不一定都有很好的蠕变强度。現仅就以上所提各种合金中有代表性的几种在不同温度下短時間使用时所具有的一些高温特性加以研討。

(一) 机械性能:

表 7 所列為在各种温度下超合金的机械性能,其抗拉强度見圖 6。在 760 °C 左右进行热处理的 Inconel X 及 Rofract 26 等为最强固的材料, 760 °C S-816, Hastellog B, L-605 等合金則具有高强度。但这些合金在 1000 °C 以上时其强度則有显著下降。1200 °C 瞬時使用的加力燃燒室和冲压式噴气發動机等所需材料采用

此种材料。如有一定厚度,也可保持其强度。加力燃燒室和冲压式噴气發動机普通所使用的合金在 1~1000 小时以內的蠕变和持久强度見表 8、9。跟踪導彈和彈道導彈所需合金則应对具有更好的高温特性的合金加以究研。

(二) 物理性質:

为了更有效地使用耐热材料,不仅要了解它們的机械性能,还应知道它們的物理性質: 热膨脹率,热傳导率,放射率等。热膨脹率不同的两种金屬其連接部位将产生热应力,此力等于材料允許負荷的 50%,如超过此負荷材料往往發生破損。因此一般以热膨脹系数小的为最

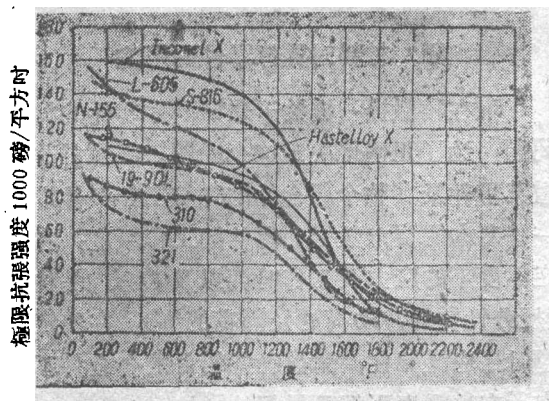


圖 6 几种高温合金的温度与强度的关系

表7 高温合金短时间试验的机构性能

合金	室 温			1000°F			1200°F			1400°F			1500°F			1600°F			1700°F			2000°F		
	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %	抗拉强度 1000 磅/平方英寸	屈服点 1000 磅/平方英寸	延伸率 %
19-9DX ⁽¹⁾	130	102	26	95	77	20	80	70	20	53	50	24	39	33	43	—	—	—	13	10	85	—	—	—
19-9DL ⁽¹⁾	118	69	58	89	42	43	75	39	34	43	36	36	33	30	53	18	—	56	13	—	61	—	—	—
16-25-6 ⁽²⁾	114	68	42	93	42	35	88	40	36	53	33	42	41	30	49	30	—	57	18	—	59	—	—	—
Discalloy 24 ⁽³⁾	145	106	19	125	94	16	104	91	19	73	60	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
321	92	39	55	61	27	35	46	25	34	28	15	70	22	13	73	14	11	82	5	—	—	—	—	—
310	82	40	55	67	26	50	48	23	24	42	21	27	32	19	37	24	17	43	11	—	55	7	—	—
L-605	155	70	55	100	35	67	75	35	25	53	37	14	50	—	17	37	34	18	23	—	19	14	—	—
Hastelloy B	135	63	44	109	42	31	94	42	16	77	40	16	66	—	17	55	39	19	24	—	30	12	—	—
Hastelloy C	130	54	38	97	55	22	87	50	23	63	47	32	51	—	36	38	36	39	19	—	38	16	—	—
Hastelloy X	113	56	44	94	42	45	83	41	37	63	38	37	52	37	33	37	26	50	21	17	43	16	—	—
Inconel X ⁽³⁾	162	92	24	140	84	22	120	82	9	80	62	—	52	44	22	34	24	47	9	6	89	—	—	—
Nimonic 75	92	60	50	—	—	—	—	—	—	46	20	28	36	15	33	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nimonic 80 ⁽³⁾	—	—	—	108	73	41	88	73	15	67	63	7	60	47	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nimonic 90 ⁽³⁾	148	90	39	123	82	27	111	77	24	90	63	14	64	52	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N-155	116	57	43	85	—	37	72	40	35	50	35	38	37	33	39	32	24	42	17	12	38	12	7	30
S-590 ⁽³⁾	118	72	—	128	79	—	100	70	—	65	50	—	52	47	—	40	37	—	22	20	—	13	14	—
S-816 ⁽³⁾	140	63	31	121	46	27	112	45	22	88	40	25	73	41	23	51	—	17	25	—	20	12	—	—
Refract 26 ⁽³⁾	153	96	18	142	91	17	134	95	14	108	90	13	73	72	28	48	84	49	—	—	—	—	—	—
Refract 70	133	—	—	117	—	—	104	—	—	83	—	—	64	—	—	50	—	—	—	—	—	—	—	—
Inconel	91	37	47	84	29	47	65	27	39	28	17	46	—	—	—	15	9	80	8	4	118	—	—	—
Inconel W ⁽³⁾	146	81	—	123	72	—	117	62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注: 1) 热压延, 消除变形; 2) 热压延; 3) 时效, 其他为退火。

表8 高温合金的蠕变强度 (1000磅/平方吋)

温度°F	延伸率 %小时	321	310	19-9DL	Inconel X	Hast. C	Hast. X	N-155	S-816	L-605
1200	0.01	—	—	22.0	82.0	—	30.0	—	62.0	—
	0.001	9.5	—	21.0	73.0	—	—	—	52.0	—
	0.0001	8.0	8.6	20.0	64.0	—	—	—	42.0	—
1350	0.01	—	—	16.0	55.0	—	18.5	34.4	39.5	33.0
	0.001	—	—	13.0	47.0	—	9.5	25.0	26.8	26.0
	0.0001	3.0	4.0	10.0	38.0	—	—	18.4	18.0	—
1500	0.01	—	—	15.3	30.1	—	11.0	18.3	23.2	21.0
	0.001	—	—	10.4	19.6	—	7.0	13.8	16.4	17.0
	0.0001	1.0	1.0	7.1	12.3	—	—	10.3	11.5	—
1600	0.01	—	—	—	13.0	—	5.0	—	12.3	16.0
	0.001	—	—	—	11.0	—	3.2	—	8.5	12.5
	0.0001	—	—	—	9.0	—	2.4	—	5.8	—

表9 高温合金的持久强度

	时 間 (小时)	321	310	19-9DL	InconelX	Hast. C	Hast. X	N-155	S-816	L-605
1000°F	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	122.0	—	—	—	—	—
	100	—	—	—	115.0	—	—	—	—	—
	1000	—	32.0	—	110.0	—	—	—	—	—
1200°F	1	33.0	38.3	—	—	—	—	—	100.0	—
	10	31.0	—	70.0	92.0	—	58.0	80.0	80.0	—
	100	25.0	27.0	60.0	80.0	53.0	45.0	60.0	62.0	45.0
	1000	17.5	13.7	40.0	55.0	35.0	30.0	46.0	50.0	—
1400°F	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	45.4	52.0	—	30.0	33.0	45.0	40.0
	100	—	—	28.0	42.0	—	21.0	25.7	32.0	30.0
	1000	5.6	5.1	16.5	33.0	—	16.0	19.5	27.0	23.0
1500°F	1	20.0	—	—	—	—	—	—	43.0	—
	10	12.0	16.6	18.0	38.0	—	21.0	33.0	35.0	35.0
	100	3.8	8.3	13.0	30.0	15.0	14.0	20.0	29.0	22.0
	1000	3.7	3.5	10.5	18.5	9.5	10.0	15.0	22.0	18.0
1600°F	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	17.0	—	16.0	18.0	20.0	24.0
	100	—	—	—	11.0	—	8.0	15.0	15.0	15.0
	1000	—	2.4	—	6.6	—	6.0	7.3(1650)	10.0	11.0
1800°F	1	—	6.3	—	—	—	—	10.0	—	—
	10	4.8	—	—	—	—	7.0	8.8	8.8	13.0
	100	2.9	—	—	—	4.0	3.4	3.3	5.5	7.0
	1000	—	1.0	—	—	1.4	—	2.8	3.1	4.5
1900°F	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	3.2	4.5	3.0	—	5.7	—
	100	—	—	—	1.7	2.7	—	—	3.2	—
	1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表内所列材料均經退火, 仅19-9DL須在1200°F消除变形, Inconel X經时效处理。

表10 高温合金的物理性质

材 料	321	310	19-9DL	Inconel X	Hastelloy C	Hastelloy X	N-155	S-816	L-605
密度lb/in ³	0.290	0.290	0.287	0.298	0.322	0.297	0.300	0.313	0.330
熔点°F	2575	2600	2600	2540	2350	2400	2500	2400	2570
平均热膨胀 系数1°F× 10 ⁻⁶	温度°F	系数	温度°F	系数	温度°F	系数	温度°F	系数	温度°F
	32~212	9.3	32~212	8.0	70~600	7.6	70~600	8.70	70~600
	32~600	9.5	32~600	9.0	70~800	7.7	70~800	8.89	70~800
	32~1000	10.3	32~1000	9.4	70~1000	7.9	70~1000	9.10	70~1000
	32~1200	10.7	32~1200	9.7	70~1200	8.0	70~1200	9.40	70~1200
热 导 率 Btu/ft ² /in /hr/°F	32~1800	11.2	32~1800	10.6	70~1600	10.2	70~1600	9.77	70~1600
	—	—	—	—	70~1800	10.5*	70~1800	8.0	70~1800
	—	—	—	—	70~2000	11.0*	70~2000	8.3	70~1800
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
弹性系数 psi×10 ⁶	200	112	200	96	—	85	392	101	85
	600	—	600	—	—	137	572	119	600
	1000	152	1000	130	—	144	752	142	800
	—	—	—	—	—	156	932	155	1000
	—	—	—	—	—	168	1112	155	1200
弹性系数 psi×10 ⁶	—	—	—	—	—	180	—	—	1400
	—	—	—	—	—	195	—	—	1600
	—	—	—	—	—	—	—	—	1800
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
弹性系数 psi×10 ⁶	200	29.0	200	29.0	—	30.8	29.3	35.2	—
	600	28.0	600	28.2	—	30.4	—	33.8	—
	1000	25.2	1000	25.7	—	28.1	—	31.9	—
	—	22.5	—	23.2	—	25.0	24.2	29.7	—
	—	21.1	—	22.0	—	23.0	—	28.7	—
弹性系数 psi×10 ⁶	—	19.8	—	20.8	—	20.2	20.8	27.6	—
	—	—	—	—	—	—	—	25.4	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* 参考值。

好。遇有不同金屬相結合等情況時，應採用熱膨脹係數大小相等的金屬為宜。

需要迅速散熱的燃燒室等所採用的材料必需重視熱傳導率。應特別加以注意的是由於不均勻燃燒有產生白熱點 (hot spots) 的現象。耐熱性高的合金由於其熱傳導率比較低，局部過熱和白熱點的產生則易於將金屬燒壞。燒壞的原因是由於材料中不斷地產生熱擴散不均勻而形成熱應力的結果。不同溫度各種合金的物理性質參看表 10。

目前飛機及火箭等動力裝置的設計師所重視的是透過性，也就是為了反射燃氣所產生的輻射熱，燃燒室內層需要透過率低的材料。另外沖壓式噴氣發動機燃燒室的外面露在空氣中為了使壁板易於向空氣中放散更多的熱量則應使用透過率高的材料。各種材料的透過能見表 11，有關耐熱合金的透過能數據還很少。透過能即是測定必要的表面所吸收或是殘留的輻射熱量，準確的說透過能也就是在相同溫度下一物體的輻射熱與黑體輻射熱的比。對普通燃燒室材料來講其透過能數值與吸收能相等。能最大限度吸收或輻射熱的黑體其透過率等於 1。

(三) 化學性質：

無論材料本身具有如何優良的高溫抗蠕變性質，但對易於高溫氧化或易受燃氣中所含灰分腐蝕時亦不可做為耐熱材料使用。一般融點高的金屬其再結晶強度也高，不易軟化，因此最好具有較高的蠕變性。

鈦、鉻、鈮、鋇、銅、鎢等是較鎳基和鈷基合金等的溫度更高的金屬，目前已引起人們的重視，但其中除鉻外，其他金屬抗氧化性均較差，只能做為少量使用的添加元素。因此目前所使用的耐熱合金中常含有鉻。含鉻量達 15~20% 的合金在 980~1050°C 高溫下仍能抗氧化。310 型不銹鋼含鉻量增至 25% 時，在 1200°C 高溫下尚具有抗氧化性能，超過此溫度則所有合金均開始氧化。由於氧化的程度決定於溫度，周圍大氣及時間，因此應特別注意合金的

使用條件。例如，加力燃燒室的壽命決定於是否能耐 1050°C 的材料，壽命較短的跟蹤導彈動力裝置要求耐溫 1100°C 或 1100°C 以上，壽命更短的沖壓式噴氣發動機則要求耐溫 1100~1200°C 的耐熱材料。現有抗氧化性最好的合金將含鉻最高的 310 型不銹鋼及 Hastelloy X 兩種。

其次是燃氣對材料的腐蝕問題。含鎳多的耐熱合金必含硫亦多，在燃氣中使用時極易於腐蝕。這是由所產生的硫化鎳 (Ni_3S_2) 和鎳在 650°C 低溫下溶解呈共晶反應的緣故。在用煤或重油做為燃料時，不宜於使用這種合金，另外由於燃燒所產生的灰分中含有氧化鈮 (V_2O_5)，對渦輪葉片有極快的腐蝕作用。這種現象稱為鈮的浸蝕 (Vanadium attack)。 V_2O_5 的融點為 670°C，其沸點亦低，燃氣中升華的 V_2O_5 接觸到溫度為 700°C 左右的動葉片或固定葉片時則凝結在葉片表面上並對於材料表面堅固的氧化層有破壞作用。鎳基和鈷基合金比奧氏體系耐熱鋼容易產生鈮侵蝕，800°C 以上的 Timken 16-25-6 比不銹鋼更易於發生上述現象。防止鈮侵蝕的方法是使用產生高融點灰分的燃料，使燃氣渦輪的工作溫度低於灰分的融點，或是在重油中添加氧化鈣，氧化鎂等鹽基性物質來提高灰分的融點使 V_2O_5 成為比較安定的化合物，此外對防止腐蝕還可考慮採用陶瓷塗層 (Cermic Coating) 等保護層方法。

(5) 合金的加工性：

一般超合金較低合金鋼或不銹鋼的加工要困難。18-8 不銹鋼的加工性是人們比較熟悉的，現將超合金與不銹鋼的加工性加以比較敘述如下：

(一) 焊接性：

現有大多數的超合金焊接性均很好。在惰性氣體中採用電弧焊接在焊接部位不易感染炭或氧，因此對這種合金最為適宜。在使用復有焊藥的電極棒以及液狀或糊狀焊藥時，必須將

焊接部位所附着的焊藥澈底清除。因为如附有焊藥在高溫中使用時，对材料將产生腐蝕。薄板材在焊接時对其耐热性有很大的影响，如不使用焊接剂而以惰性电弧法进行对焊，然后将突起的焊缝压平，这种办法为最好。由于平面压延作用可使焊接部位金屬延展至板材内部，因此而获得与冷加工相似的平接缝。超合金采用对焊時所加压力，要比焊接不銹鋼还大。

(二) 成型性:

現有的超合金多采用一般的成型法来成型。但容易發生加工硬化，进行退火必須是不銹鋼內退火溫度的倍数。一般，退火溫度均在1100°C以上，应备有高溫爐和清除氧化層的特殊設備。

(三) 机械加工性:

超合金一般說來是难于机械加工的。机械加工最困难的是鈷基合金和含有各种元素的合金，鎳基合金稍好，含鉄量多的合金为最好。超合金的切削速度，在进行銑、刨等普通切削加工時以不銹鋼的切削速度的1/3~1/2为宜。

(四) 鍛造性:

現今所用的超合金大多数都可以进行鍛造，但其鍛造压力及溫度比不銹鋼要高的多。一般說來，超合金的加工条件較不銹鋼难的多，因此，超合金的变形率跟不銹鋼或合金鋼之間不能加以比較。

(五) 鑄造性:

超合金多可鑄造。Haynes Alloy 21、30、31等机械加工困难的合金在制造复杂零件時可采用精密鑄造法。渦輪叶片及加力燃燒室的尾噴口等部件最宜于使用上述鑄造方法。鈷基合金多用于鑄件。超合金的流动性均不很好，应特別注意鑄造溫度，它将決定鑄造性的好坏。

表11 透过能

鋼 鉄 类 別	溫度範圍°F°	透 过 能
金屬表面		
經過研磨的鉄	800~1800	0.144~0.377
經過研磨的鑄鉄	392	0.21
經過研磨的可鍛鉄	100~480	0.28
車削鑄鉄	72	0.435
經研磨的鋼鑄件	1420~1960	0.52~0.56
經磨削的鋼板	1720~2010	0.55~0.61
平滑鉄板	1650~1900	0.55~0.60
車削鑄鉄	1620~1810	0.60~0.70
氧化表面		
鉄板酸洗后生紅銹	68	0.612
全部生銹	67	0.685
压延鋼板	70	0.657
輕氧化的鉄 (Oxidized Iron)	212	0.736
鑄鉄，1100°F 氧化	390~1110	0.64~0.78
鋼，1100°F 氧化	390~1100	0.79
平滑的氧化电解鉄	260~980	0.78~0.82
氧化鉄 (Iron Oxide)	930~2190	0.85~0.89
粗鉄錠	1700~2040	0.87~0.95
鋼板，結实的粗氧化層	75	0.80
鋼板，密而有光澤的氧化層	75	0.82
鑄鉄，粗氧化很重	100~480	0.95
鍛鉄，輕微氧化	70~680	0.94
其他合金		
18-8不銹鋼，噴砂	180~350	0.5
18-8不銹鋼，1000°F 氧化	180~340	0.32~0.36
18-8不銹鋼，1500°F 氧化	165~330	0.63~0.69
Inconel，未热处理	193~250	0.16~0.20
Inconel，1400°F 氧化	185~340	0.19
Monel	1000	0.10
Monel，氧化	1000	0.46
顏料		
黑色漆	750	0.95
黑色(CuO)	750	0.85
紅色(Fe ₂ O ₃)	750	0.70
綠色(Cr ₂ O ₃)	750	0.67
黃色(PbO)	750	0.49
白色(MgO)	750	0.84
白色(ZrO ₂)	750	0.77

田知行譯自日本“金屬”杂志1958№4

赵中校对

上期本文中將RuPture Stress譯成破断强度，
应譯持久强度为宜，特此更正——譯者