

耐热合金的加工

科学出版社

52

75.52

75.52
52

耐热合金的加工

В. И. 吉庫欣 主编

熊 大 達 譯

科学出版社

1964

ОБРАБОТКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Ответственный редактор В И Дикушин

Издательство АН СССР

Москва 1960

內容簡介

本論文集中发表了在耐热合金加工学术会议上宣讀过的 30 篇論文。这次学术會議是在苏联科学院机械研究所机械制造工艺委员会主持下，于 1957 年 12 月 18—21 日举行的。

本論文集計分四部分：（1）耐热合金的材料及其鑄造；（2）耐热合金的压力加工；（3）耐热合金的焊接；（4）耐热合金的切削加工。

本論文集的出版，可以总结机械制造工作者在耐热合金加工方面所积累的資料，指导和协调这个有待迫切发展的学术领域中的研究工作，促进生产实践中耐热合金加工效率的提高。

耐热合金的加工

〔苏〕В. И. 吉庫欣 主編

熊 大 達 譯

*

科学出版社出版

北京朝陽門大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

大众文化印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1964 年 11 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1964 年 11 月第一次印刷 印张：9 1/2

印数：0001—8,150 字数：246,000

統一书号：15331·161

本社书号：3047·15

定价：〔科六〕1.40 元

序 言

工程技术的发展与工作过程效率的提高，是休戚相关的。对于材料的质量，对于材料的结构性能、工艺性能、以及其他有关设备使用和生产方面重要性能的改善，特别是对于持久强度，要求是愈来愈高了。

在新式蒸汽发动机和內燃机中，在锅炉装置、其他加热装置和热交换装置中，在高温介质的反应器、管件、以及贮存器中，在冲模和铸型中，在高速度和重负荷的摩擦零件中，尤其是在金属切削加工用的刀具中，对于结构材料的耐热强度的要求非常之高。可以说，在现代蒸汽锅炉和蒸汽轮机中，工作温度达到 600°C ，而在燃气轮机中，则达到 $800^{\circ}\text{—}1000^{\circ}\text{C}$ ，甚至更高。

采取设计上的措施(改变给定过程的条件或者冷却措施)，在许多情况下，并不能成功地降低介质和零件的工作温度。因此，就要经常不断地创造新的耐热材料。除珠光体类和奥氏体类的耐热钢之外，还必需采用铁基、镍基、钴基、钼基、钛基、铬基、锆基的耐热合金和其他合金。这些合金在温度达到 800°C 和更高时，保证具有最小蠕变和持久强度。

以碳化钨和碳化钛、钼、钽、铌等为基底的耐热金属陶瓷，已经在工业上得到应用。硼化物、铬化物、硅化物，可以在 1000°C 和更高的温度下工作。氧化铬、氧化硼等，则用做铬钢和其他钢的保护层，以抵抗侵蚀。

为了获得和利用新的特殊耐热材料，就免不了要克服一些重大的困难和完成一些复杂的科学研究工作。为了首先满足设计要求而新创造出来的大多数耐热材料，往往加工困难而且价格很高。因此，对设备设计师在耐热强度问题上所提出的任务是，要寻找出利用耐热强度较低的材料就能应付得了的工作过程和结构方案。

由于耐热零件毛坯的精度不高，所以在从毛坯制成产品时，贵

重合金和材料的消耗很大。工艺师应当寻找出提高毛坯精度和降低贵重材料消耗的经济生产方法。

冶金师在创造新的耐热合金时，面临的任务不仅要满足设计要求，而且也要满足工艺要求。近年来所创造出许多耐热材料的成分元素，也就是加工它们时所用刀具当中所含有的元素。因此，它们只能以很低的切削速度来加工。

在切削加工领域里，摆着一项任务，即要创造出能够提高耐热材料加工效率的刀具。

当利用新的刀具材料还不能解决这项任务时，就必需创造和采取新的金属加工方法，例如电腐蚀加工法。考虑到耐热材料的价格昂贵，所以一般说来，最好是免除那种取下切屑的成形加工方法，而采用压力加工、铸造方法来得出产品的最后形状，随后对产品表面进行精整加工。

相应于耐热材料来说，特别明显，有关最佳切削加工条件问题的研究应该综合地进行：既要考虑毛坯的应力状态和变形，热现象，工作规范、刀具材料和机床刚度对于刀具耐磨性的影响，又要确定在自动循环中应当实现的物理-化学和工艺过程规律。

耐热材料加工过程中发生的这些复杂问题，只有在充分利用各种现代研究方法的情况下，才能得到满意的解决。在这里，现代研究方法包括，以切削原理为基础的解析方法，金相学实验方法，以及应用同位素、电子仪器等进行研究的方法，等等。

大家知道，与高强度材料的物理参数和工艺性能有关的一些基本规律，例如材料的成分、组织和机械性能对于经济切削速度和刀具耐磨性的影响规律，还没有充分综合地查明。

应当更加注意提高零件毛坯的精度和性能的均一性。应当充分利用那减少或免除最后切削加工的机会。

寻找和采用新的铸造方法，可使铸件得到最小的残余应力，得到较高的均一性、强度和精度，降低随后加工中的材料消耗。

关于合金的结晶、凝固、组织改善的研究，关于提高铸件水平、性能恆定性、精度的研究，乃是铸造工作者的任务。在合金的压力

加工领域中,在以粉末原料为基础而获得新的耐热材料方面,也都摆着一些重大的任务。

当利用能够实现耐热材料最佳加工条件的自动化设备来进行压力加工时,可能出现某些新的希望。

耐热合金的焊接经常是很困难的,因为其中含有各种新元素。耐热合金的焊接是很复杂的,掌握得很不够。

这里面有残余应力的问题、避免热裂缝的问题、堆焊材料和基底材料达到均一性的问题、焊缝质量检查的问题等等。研究这些问题,就可扩大焊接结构的应用和提高焊接结构的效率。

强化处理的问题,诸如热处理、扩散处理、加工硬化、防蚀层和其他保护层等,也包括在这次学术会议所研讨的范围之内。

耐热强度的问题,是引起苏联科学院和许多专业部门研究所重视的首要问题之一。

根据第一次学术会议的决议,由苏联科学院机械研究所机械制造工艺委员会召开了这次学术会议,并将会议上宣读过的论文汇编成这本论文集。在第一次会议上曾经研讨了耐热材料切削加工的问题。

会议的工作结果,对于指导和协调机械制造中耐热强度问题的研究工作来说,是很有用的。

Б. И. 吉庫欣院士

目 录

序言.....	(i)
---------	-------

第一部分 材料及鑄造

现代的耐热合金.....И. И. 科尔尼洛夫(1)	
Я1Т、ЭИ435、ЭИ589 和 ЭИ415 号耐热材料渗铝处理 以提高耐热性的研究.....	
.....А. С. 斯特罗叶夫、Е. Л. 扎鲁宾娜(12)	
熔炼镍合金的某些特点.....К. Я. 什彭特(21)	
燃气轮机的铸造工作叶片.....Ф. В. 阿克谢诺夫(26)	

第二部分 压力加工

钼基和铬基难熔耐热合金压力加工的热力规范.....	
.....Н. И. 科尔涅叶夫、И. Г. 斯库加列夫、С. Б. 佩符兹涅尔、Е. И. 拉祖瓦叶夫(37)	
加工硬化对于耐热钢高温疲劳强度的影响.....	
.....И. В. 库德里亚符切夫、Б. И. 阿列克桑德罗夫(48)	
耐热金属薄板零件的低温冲压-拉深.....В. Н. 列维诺夫(64)	
钛合金的工艺塑性和机械性能与热态变形条件的关系.....	
.....В. Я. 克列伊缅诺夫、Т. Н. 萨佐诺娃(71)	
耐热合金和钛合金薄板冲压的工艺特点.....	
.....Ю. П. 达维多夫(81)	
耐热钢标准件的顶锻.....И. С. 彼得罗夫(91)	
利用热态变形法制造钢叶片的精密模锻件.....	
.....М. Я. 库列绍夫(96)	
叶瓣余量极小的耐热合金涡轮机叶片毛坯的制造工艺.....	
.....Е. М. 埃菲尔(106)	

钛合金热态模锻的特点.....Л. А. 尼科利斯基(119)

第三部分 焊 接

论耐热合金涡轮机零件的焊接.....Г. А. 尼科拉叶夫(134)

耐热合金的自动电弧焊和电渣焊.....Б. И. 麦多瓦尔(140)

耐热合金的保护气体电弧焊.....Е. М. 普罗尼娜(153)

马丁体钢的焊接.....Г. А. 尼科拉叶夫、А. В. 莫尔德文切娃(164)

钛的接触焊.....П. Л. 丘洛什尼科夫(173)

第四部分 切削加工

耐磨耐热合金切削加工的两个例子.....А. В. 潘金(181)

采用硬质合金刀具车削、铣削和钻削耐热钢和合金时的

可加工性.....Н. И. 列兹尼科夫(193)

加工耐热合金和耐热钢时制件和刀具中的温度场.....

.....А. Н. 列兹尼科夫(203)

ЭИ617 号耐热合金可切削加工性的若干因素的研究

.....А. С. 库罗奇金(220)

耐热合金的电脉冲加工.....А. Т. 克拉维茨(230)

用螺旋齿圆柱铣刀高速铣削耐热材料.....И. Г. 扎尔科夫(240)

用端铣刀加工耐热钢和合金时提高生产率的途径.....

.....Ф. П. 乌雷夫斯基(246)

不锈钢、耐热钢和合金切削加工的国外经验.....

.....А. И. 希弗林(256)

加工高强度金属时的刀具耐用度.....Д. Т. 瓦西利叶夫(263)

不锈钢在车削、铣削和铰削工序中的可加工性.....

.....Я. Л. 古列维奇(272)

在耐热材料和钛合金零件中切螺纹的问题.....

.....О. В. 莫罗津科(283)

耐热合金可切削加工性的若干问题.....С. А. 戈卢别夫(288)

现代的耐热合金

И. И. 科尔尼洛夫(Корнилов)

金属及其化合物——耐热合金的基底

耐热合金根据其中那一种金属占优势，而具有铁合金、镍合金、钴合金、铬合金、钼合金等名称。

由 102 种化学元素组成的门捷列夫周期系当中，包含大约 80 种金属和非金属，其中绝大多数在炼制耐热合金上都能得到广泛的应用。但是，某种金属要想作为创造耐热合金用的基底，就只有当这种金属：

- 1) 在自然界中广泛地分布着；
- 2) 具有较高的熔化温度，

那才是可能的。同时，这种金属的比重 also 具有重要意义。

在创造耐热合金方面具有或可能具有意义的主要金属和非金属，它们在地壳中的分布量、熔化温度和比重的数据，列于表 1 中。

分布量最大而又具有较高熔化温度的非金属是硅和碳，这样的金属则是铁、钛、铬、锆、镍和钒。对于炼制耐热合金来说，有意义的轻金属当中，分布最广的是铝和镁。最难熔的几种金属，如钨、钼、铌、钽，由于它们的分布量很小，所以只能在有限的情况下用做合金的基底。由于同样的原因，钽也很少用做耐热合金的基底。

对于航空方面使用的耐热合金来说，在选择某种纯金属作为合金的基底时，这纯金属的比重有很大的意义。几种主要耐热元素的比重，在宽阔的范围内变化：镁的是 1.74 (克/厘米³)，铝的是 2.7 (克/厘米³)，而铁的则是 7.8 (克/厘米³)。某些难熔金属，如钼和钨、铌和钽，还有铂族金属——铂、铱和钌，由于比重太大，对于用做耐热合金的基底来说，都没有多大的意义。

表 1 某些金属和非金属在地壳中的分布量和性能数据

元 素	在地壳中的分布量 (重量%)	熔化温度 (°C)	比 重 (克/厘米 ³)	元 素	在地壳中的分布量 (重量%)	熔化温度 (°C)	比 重 (克/厘米 ³)
Si	26.0	1440	2.20	Th	0.001	1850	11.5
Al	7.45	660	2.70	Mo	0.001	2620	10.2
Fe	4.20	1538	7.86	Be	4×10^{-4}	1284	1.84
Ca	3.25	849	1.55	Hf	4×10^{-4}	2230	13.3
Mg	2.35	651	1.74	U	4×10^{-4}	1125	18.7
Ti	0.61	1660	4.50	Nb	3.2×10^{-5}	2560	8.5
C	0.35	3900	2.25 (石墨)	Ta	2.4×10^{-5}	3030	16.6
Mn	0.10	1244	7.30	Ag	1×10^{-5}	960	10.5
Cr	0.03	1825	7.10	Pt	5×10^{-6}	1773	21.4
Zr	0.025	1860	6.53	Ru	5×10^{-6}	2820	12.28
Ni	0.02	1454	8.8	Pd	5×10^{-6}	1555	11.5
V	0.02	1900	5.7	Os	5×10^{-6}	2700	22.5
Cu	0.01	1083	8.93	Au	5×10^{-6}	1063	19.3
W	0.007	3370	19.1	Rh	1×10^{-6}	1960	12.3
B	0.005	1490	1.73	Ir	1×10^{-6}	2454	22.4
Ce	0.002	1490	8.8	Re	1×10^{-7}	3440	21.1

最好是把纯金属的比重与熔化温度结合起来进行考虑。在这方面,最适于航空上应用的可能是比重小的金属,例如镁(1.74克/厘米³),但其熔化温度低(651°C);而另一方面,熔化温度很高的金属,例如钨(3370°C),则具有较大的比重(19.1克/厘米³)。某些纯金属的比重和熔化温度的变化情形,如图1所示。比重小的金属(镁和铝)具有较低的熔化温度。比重为1.84(克/厘米³)的铍,熔化温度为1284°C;而比重为4.5(克/厘米³)的钛,熔化温度则为1660°C。比重和熔化温度结合良好的,还有钒(5.7克/厘米³和1900°C)、锆(6.53克/厘米³和1860°C)、铬(7.1克/厘米³和1825°C)。

铁族金属(铁、钴、镍)和铜的比重范围是从7.86(铁)到8.93克/厘米³(铜),熔化温度范围则是从1538°C(铁)到1083°C(铜)。图1中所示的其余金属则属于重金属(比重大于10克/厘米³),并

原 书 缺 页

原书缺页

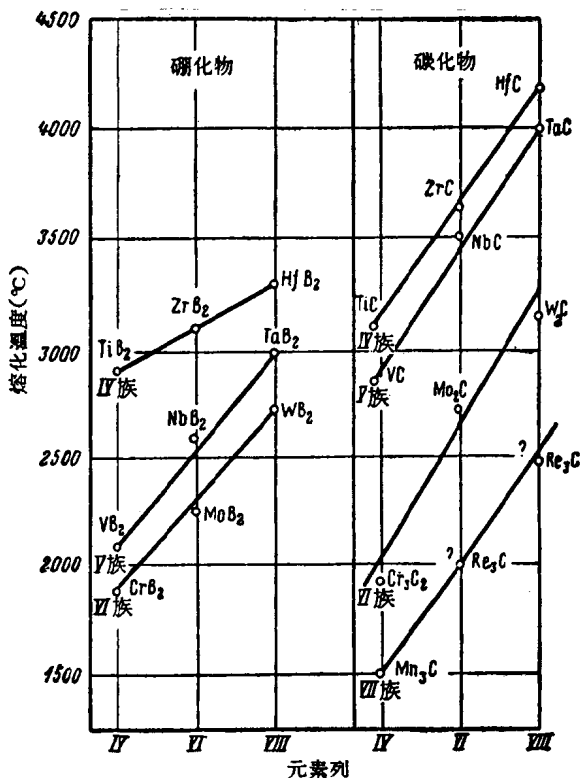


图 2 某些金属的硼化物和碳化物的熔化温度

从实际应用的观点出发,对于耐热材料来说,可以把周期系中的元素划分出几个系族。其中,第一个系族的元素是如今广泛用作基底的,另一个系族的元素对于创造新的耐热合金来说是有前途的,第三个系族的元素用来制备难熔化合物,而第四个系族的元素则用作填充合金元素。上述四个系族的元素,以周期系的展开形式而表示在图 3 上。

第一个系族包含金属镁、铝、钛、铁、镍、钴;第二个系族——钨、钼、钒、铌、铬、钼;第三个系族——某些非金属,如硼、碳、硅、氮;第四个系族则可以包括周期系中所有其余的金属和非金属,但是它们要能够与任何一种金属相互作用并形成固溶体或金属化合

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
H																
Li	Be	B											C	N	O	F
Na	Mg	Al											Si	P	S	Cl
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
Fr	Ra	Ac	Tb	Pa	U											

 用做基底的主要金属

 有希望用做基底金属

 用来制备难熔化合物的非金属

 用做填充合金元素的金属

图 3 周期系中用于创造和填充耐热合金的主要元素

物。也可以利用那些被我们划分在其他系族里的元素，作为填充合金元素。这时，应当注意到，不适合于填充某一种金属-基底的金属（例如锌，不适合于铁、铌或钼），对于另一种金属-基底可能成为适合的填充合金元素（同样是锌，适合于镁或铝）。反之，钼和钨，对于铁和镍来说是最主要的填充合金元素，但对于镁和铝来说则没有什么填充的意义。

按照周期系中各种元素在耐热材料中的效能和应用范围，根据元素的化学性质而把它们分类整理出来，这样就能够便利问题的概括研究，并且可以确定每种元素在这个实践上十分重要的问题中的作用。

金属合金——最重要的耐热材料

决定耐热材料适用性的主要特征是，短时和持久耐热强度、在高温下的蠕变、以及在材料应用温度范围内所必需的最小塑性。在室温和高温下的短时强度，借普通的方法来确定。塑性则根据试样断裂时的伸长率 δ 和收缩率 ψ 、以及材料的冲击韧性 a_k 来确定。

耐热材料的持久强度，是根据试样在恒定应力下经受持久试

验(连续负荷试验)直至破裂时所得数据来评定的。破裂以前的试验时间, 根据材料的应用条件而表达为 100, 1000, 10000, 100000 小时, 或者更久些。这时, 应当确定材料在经受 100, 1000 小时或者更久试验后发生破裂时的极限应力。

关于蠕变的耐热强度特征, 则用试样在恒定应力和温度的持久作用下(从 100 至 10000 小时或者更久)所产生的微小伸长率(小于 0.2%)来表达。

各种纯金属, 对于耐热强度要求的上述指标, 几乎是一项也满足不了。在加热时, 纯金属就会迅速丧失短时强度极限, 而持久强度极限则丧失得更快。这时, 金属中的杂质愈少, 其强度数值就愈低。由于金属的塑性随着温度的升高而迅速地增大, 使得金属的蠕变和冲击韧性也就急剧地

增大起来。在温度提高时, 纯金属的短时强度极限下降的特点, 如图 4 所示。在所有温度下, 化学纯镍的强度极限数值都比工业纯镍的低。两种镍的强度极限, 都随着温度的提高而显著地下降。化学纯镍的强度, 甚至从 200°C 开始, 就出现特别急剧的下降。工业纯铁的强度变化特点, 略微显出另一个样子。首先, 在 150°—300°C 范围内, 强度极限略有提高。这可以用杂质的影响来解释: 由于在这种温度下会发生弥散硬化过程, 所以杂质就能够引起铁的强化现象。其次, 在铁的强度对温度的变化曲

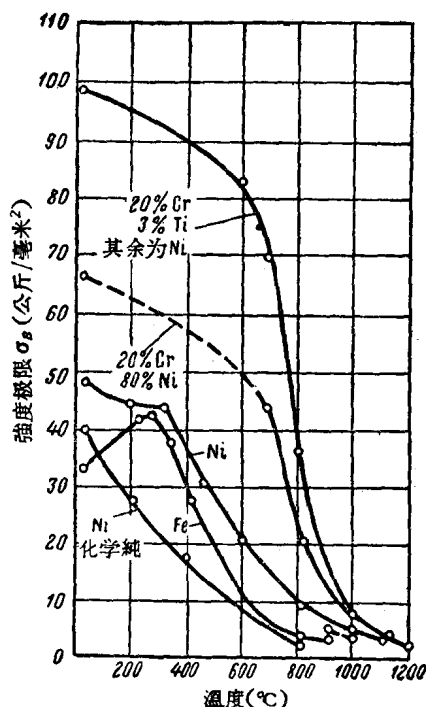


图 4 铁、镍、镍合金的短时强度与温度的关系

线上, 900°C处, 出现强度极限的突然上升(上升的数值不大)。这符合于 910°C时低强度的 α 铁转变成高强度的 γ 铁。

纯金属在加热时强度极限的急剧下降, 使得纯铁和纯镍在 800°—900°C工作温度范围内的短时强度极限不超过 2—3 (公斤/毫米²)。持久强度极限则比这更低, 约为短时强度极限的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ 。

上述数据说明, 纯金属不能用做耐热材料。存在着什么样的门径, 在纯金属的基底上, 来创造耐热合金呢? 依靠纯金属与周期系中其他元素(金属和非金属)的化学相互作用, 来产生纯金属的高温强化, 就是这样的门径! 这种相互作用在于重新分配金属系中参加反应原子的外电子。

从耐热强度的观点出发, 在大多数各式各样的金属相互作用当中, 最有意义的是形成固溶体和金属化合物。在固体状态下过饱和和固溶体区域内进行的、同时形成弥散状态金属相的反应过程, 对于最大强化作用来说, 具有特殊的意义。在金属基底上形成固溶体, 照例会引起纯金属在低温时的显著强化。与纯金属相比, 固溶体的这种强化状态能在较高的温度下保持着。图 4 所示含 20% Cr 的镍固溶体的曲线, 可以作为说明。镍固溶体系列的这种合金成分, 符合于镍铬类工业合金。

如果对比一下含 20% Cr 的 Ni 固溶体与纯镍的强度极限依温度而变化的特点(图 4), 那末就不难证实: 与纯镍相比, 镍固溶体得到了显著的强化, 并且这种强化状态能够保持到较高的温度。例如, 含 20% Cr 的 Ni 合金在 700°C 时的强度极限几乎与纯镍在室温下的相同, 而这种合金在 800°C 时的强度极限则大约比纯镍在同样温度时的强度极限高四倍。随着固溶体化学成分的进一步复杂化, 合金就将得到更大的强化。这种强化与固溶体中异种原子相互作用所引起化学键强度的提高, 有密切的关系。引入的异种原子数目愈多, 它们的强化效果就显得愈大。不同作者的研究结果证明, 具有有限固溶体的金属系的耐热强度, 随着固溶体浓度的提高而平稳地提高。最大耐热强度, 是在从临界饱和固溶体向过饱和和固溶体的过渡区域内达到的, 而在具有过剩相粗结晶组织的相

图的多相区域内则降低一些。最大强化区域符合于弥散强化的合金。随着系统内组元数目的增大,这最大强化就呈阶梯式地加强。

已经证明,与固溶体中异种原子间化学键强度的提高一样,有限可溶元素数目的增大也能引起耐热强度的阶梯式提高。在所有情况下,最大耐热强度老是处在从临界饱和固溶体向析出微细弥散状态过剩相的过渡区域内。二元、三元和五元镍合金中扩散系数的研究和扩散激活能的计算,也证实了这一点。

假定采取在应力 15 (公斤/毫米²) 下的持久强度 $\sigma_{100 \text{ 小时}}$, 作为耐热强度的指标,那末以镍合金为例就可指出,强化状态的极限温度提高情况是:二元合金(镍铬合金)的提高到 $0.5T_{\text{нп}}$,三元合金(ЭИ437 号合金)的提高到 $0.65T_{\text{нп}}$,五元合金的提高到 $0.70T_{\text{нп}}$,而更复杂镍合金的则提高到 $0.80T_{\text{нп}}$ 。这里熔化温度 $T_{\text{нп}}$ 是按绝对温标来计算的。

这些极限温度,称为合金软化临界温度。合金软化温度符合于固态合金中显著化学反应的开始,尤其是符合于过剩相的形成和凝聚、或者过剩相在较高温度下溶解在固溶体中。超过临界温度时,就会发生急剧的软化。这已在实践上得到了证明。

当温度超过 $0.80T_{\text{нп}}$ 时,在单元系和多元系的成分-耐热强度曲线图上,耐热强度的最大值就会从过饱和固溶体区域向未饱和稀固溶体区域移动。

这最大耐热强度区域对于固态溶解度曲线的关系受到改变,即在适中的温度下,最大耐热强度区域就处在临界饱和附近的区域,并且包含弥散硬化合金的成分。在较高的温度下,上述区域则向未饱和固溶体甚至稀固溶体方面移动。

这样看来,从上述理论原则出发,为了以某种金属为基底而创造出高耐热合金,必要的前提是:

- 1) 这种金属能够与周期系中许多元素形成固溶体;
- 2) 能够借同时添加可溶于该金属中的几种合金元素,来形成多元有限固溶体;
- 3) 能够从过饱和固溶体形成以微细弥散状态析出的过剩