

現代的真空熔煉

为了滿足当前最迫切的需要，在鋼和高温合金的制备中正在扩大真空技术的使用。相当大量的活性元素都可以作为合金組元加入，而且气体和雜質的含量也有降低。人們曾經使用过不少的真空冶煉合金，而且将来还会更多的采用它。

数年以前，真空冶煉还仅限于实验室内，而今天却有了显著的进展。真空冶煉金屬的优点正为人们所承認而对更大的熔煉設備的要求則不断提高。目前正规的真空感应冶煉爐每爐容量为2000到3000磅，不久即将建成每爐5000磅的真空感应爐。采用的真空电弧鑄錠已超过12000磅，而更大的鑄錠即将到来。如果需要更

大的真空度来处理鑄錠，則現代真空除气的方法可达250吨。

为什么对金屬的真空冶煉技术突然發生兴趣呢？主要是因为很多軍事的和工业的要求日趋严格的緣故。渦輪燃燒室需在1500到1800°F下工作一相当長的时间。新型的高温合金为了提高其高温强度只有在真空中进行冶煉。由于飞机特別需要强度重量比更高的金屬材料，所以使用超高强度鋼日益增多。若用热处理提高强度，則其心部由于偏析而韌性显著降低。真空方法对于心部韌性大有帮助。真空冶煉的合金用于軸承方面在極艰巨的工作条件下，使用寿命也很長。在制造大型鍛件方面，真空鑄造的

真空冶煉合金*

表 1

合金名称或牌号	化 学 成 分 %												用 途	
	C	Cr	Mo	W	Nb	Ti	Al	Co	B	Zr	Fe	Ni		
鎳基高溫合金														
Udimet500	0.10	19.0	4.0			3.0	3.0	19.0				基	噴气發动机部件, 高溫薄板。(吊桶, 渦輪盤, 螺栓及轉動子)	
Udimet600	0.10	18.0	4.0			3.0	4.0	18.0	≤0.4			基	噴气發力机部件。	
Udimet700	0.15	17.0	4.0			4.0	4.0	18.0	≤1.0			基	同上	
M-252	0.15	19.0	9.75			2.5	1.1	10.0	0.005	0.06	1.25	基	同上	
Waspaloy	0.08	19.5	4.3			3.1	1.3	13.5			1.25	基	渦輪叶片及渦輪盤。	
Iuco700	0.14	16.0	3.0			2.35	3.1	30.0	0.005	0.05	1.50	基	噴气發动机燃燒室, 輪盤, 螺栓。	
Iuconel 713C		12.0	4.5		2.0	0.5	6.0					基	渦輪叶片。	
Iucoloy901	0.04	13.0	6.0			2.4					余	42	渦輪, 輪緣及軸。	
GMR235	0.15	16.0	5.3			2.2	3.2		0.075		10.0	基	噴气發动机高温部分。	
GMR235D	0.15	15.5	5.25			2.5	3.6		0.075		4.25	基	GMR235 的鑄造型。	
Hastelloy合金R-235	0.16	15.5	5.5			2.5	2.0				10.0	基	后燃燒室, 叶片等。	
Hastelloy合金F	0.02	22.0	6.5		Nb+Ta 2.2							余	45.5	盛硫酸紙漿器具。
Hastelloy合金X	0.15	22.0	9.0	0.6	1.5							余	45.0	噴气發动机热端法兰环。
D979	0.07	14.3	3.8	3.9		3.9	1.1		0.01			余	45.0	高温合金, 有良好的可鍛性。
DCM	0.05	14.3	5.3			3.4	4.3		0.08		4.6	基		叶片 (G. E. 合金-非商品)。
Nicrotung	0.10	12.0		8.0		4.0	4.0	10.0	0.05	0.02		基		高温鑄件
Rene41	0.09	19.0	9.75			3.15	1.65	11.0	0.005			余	52.5	噴气發动机部件及薄板。
Nimonic80A	0.04	20.5				2.4	1.2					基		噴气發动机部件。
Nimonic90	0.08	19.0				2.7	1.7	20.0				基		同上。
Rofractaloy26	0.03	18.0	3.2			2.6	0.2	20.0				余	38.0	同上。
K-42B	0.03	18.0				2.1	0.2	22.0				余	42.0	低的热膨脹系数。

* 此表系经过重新編排而成，以便查閱。原来的厂商代号均已略去——譯者。

續表 1

合金名称或牌号	化 学 成 分 %											用 途
	C	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Ti	Al	B	Fe	
铁基高温合金												
A-286	0.06	14.8	25.5	1.3		0.3		2.0		0.003	基	喷气发动机涡轮及外壳。
Discaloy	0.06	13.5	26.0	3.0				1.7			基	涡轮盘。
W545	0.05	13.5	26.0	1.5				2.85	0.20	0.08	基	喷气发动机部件。
Unitemp312	0.08	16.0	25.0			Zr 0.05	0.50	4.0	0.35	0.07	基	同上。
M-308	0.08	14.0	33.0	4.0	6.5	Zr 0.25		2.0	0.25		基	同上。
Ferrovac42%Ni			42.0								58.0	磁性合金。
合金工具钢												
AISIA-2	1.0	5.0		1.0							余	量具和轧辊。
AISID-2	1.5	12.0		1.0							余	模具，量具和轧辊(仪表合金用)。
AISID-4	2.2	12.0		1.0							余	较D-2更耐磨。
AISIH-11	0.35	5.0		1.5		0.4					余	} 模具，量具和轧辊(含硅1.0%宜于 用作高温高强度结构)。
AISIH-13	0.35	5.0		1.5		1.0					余	
AISIM-1	0.80	4.0		8.0	1.5	1.0					余	高温轴承钢。
AISIM-2	0.85	4.0		5.0	6.0	1.0					余	高速钢。
AISIM-10	0.85	4.0		8.0		2.0					余	高速钢(轴承，丝攻，钻头)。
AISIM-50	0.80	4.0		4.25		1.0					余	高温轴承，热模。
AISIT-1	0.70	4.0			18.0	1.0					余	高速钢，高温轴承。
AISIT-15	1.55	4.0	CO 5.0		12.0	5.0					余	高温轴承。
Rex Superc-Cuf	0.80	4.0	CO 8.0	0.60	18.5	2.0					余	T-5含 Mo 工具钢，高温轴承。
不锈钢和耐热钢												
Greek Ascology	0.18	12.5	2.0		2.75						余	高温合金。
Turbine Alloy	0.20	13.0	0.75	1.0	1.0	0.4					余	高温合金。
Armco17-4PH	0.07	16.5	4.0				0.35				Cu 4.0	高强度耐酸合金。
AISI304	≤0.08	19.0	10.0								余	电子管。
AISI310	≤0.25	25.0	20.0								余	耐酸。
AISI316		17.0	12.0	2.5							余	耐酸。
AISI347	0.08	18.0	9.9				Nb+Ta 0.9		Mn 1.9		余	焊丝，喷气发动机部件。
AISI403	≤0.15	12.5						Si 0.5			余	蒸气或燃气涡轮部件。
AISI410	≤0.15	12.5						Si 1.0			余	403的铸造型。
AISI430	≤0.12	16.0									余	铁素体型不锈钢。
AISI431	≤0.20	16.0	1.8								余	耐酸。
AISI440C	1.05	17.0		0.5							余	仪表用的轴承及高强度轧辊。
18-8B	0.06	19.0	9.5							2.15	余	用于原子能(中子控制棒)。
18-15B	0.01	18.0	15.0							0.80	余	同上。
Lapelloy	0.30	11.5		2.75		0.25					余	燃气涡轮部件。
LapelloyC	0.25	11.5	CO 2.0	2.75				N 0.08			余	同上。

鋼錠也很有希望解決問題。以上只是用真空方法得到更好产品的几个例子。当燃其优点尚不

止于此。現行采用的真空冶煉合金見上表 1 的資料。

續表 1

合金名称或牌号	化 学 成 分 %												用 途
	C	Si	Mo	W	Cr	V	Co	Ni	Nb	Ti	Al	Fe	
钴基高温合金:													
G. E. 1570	0.18			7.3	20.0		基	29.0		4.3		1.4	发动机高温部分(Co. 37.5%)。
X-40				7.0	23.0		基	10.0					喷气发动机高温部分。
S-816			4.0	4.0	20.0		基	20.0	Nb+Ta 4.0			Mn 1.5	高温合金。
J-1650	0.20			12.0	19.0		基	27.0	Ta 2.0	2.8	B 0.02		喷气发动机部件。
各种型号特殊合金													
AISI4340	0.40		0.25		0.80			1.80				余	超高强度结构钢。
AISI6150	0.50				1.00	0.20						余	飞机阀簧, 螺栓。
AISI9310	0.10		0.12		1.20			3.20				余	齿轮合金。
AISI9317	0.16		0.12		1.20			3.20				余	高强度钢。
Incouns鋼	0.43	1.65	0.37		0.80	0.05		1.80				余	飞机着陆结构。
AISI51100	1.00				1.00							余	滚珠钢。
AISI52100	1.00				1.50							余	滚珠钢。
Alnico 5							24.0	14.0			8.0	余	铸造永久磁铁。
Hipermik								50.0				50.0	高透磁率, 低矫顽力合金。
Magnetic Alloy	0.75			4.0	4.0		0.4					余	铸, 锻各型磁铁。
Thermenol	0.03		3.3								15.4	余	用于磁性和耐热方面。
Alfenol	0.01										15.6	余	同上。
Alfenol 12	0.01										12.0	余	同上。
Himü80	0.05		4.0					79.0				余	用于磁性方面。
Supermendur							49.0	2.0				其余	磁性合金。
Core Iron	0.06					0.10						余	对磁时效具有高的抵抗力。
Polar	调整过的 1020 鋼												磁气管的極片。
Halmo	0.60	1.1	5.2		4.7	0.5						余	耐高温到500° F。
HTB-1	1.00				1.45						1.0	余	高温轴承。
MCS	0.70	1.0	5.5		3.5							余	高温轴承。
VSM	0.70	1.1	5.2		3.0							余	高温轴承, 阀座嵌镶合金。
Unimach№2	0.50	1.0		1.4	5.0	1.0		1.50				余	高温高强度结构钢。
Extrad	0.35	1.0	1.4	1.25	5.0	0.2						余	含 Si 的 H-12 工具鋼, 耐热部件。
Kovar							17.0	29.0				余	玻璃封合合金。
TBS600	1.00	1.00	0.30		1.40							余	高温轴承。
CBS600	0.20	1.10	0.10		1.50							余	高温轴承。
HS-220	0.30	0.55	0.45		1.20			2.00				余	超高强度鋼。
HS-250	0.40	0.60	0.50		1.40			2.20				余	超高强度鋼。
Peerless56	0.40	1.00	2.50		3.25	0.33						余	超高强度结构部件。
鉬	(1) 純鉬; (2) 含Ti0.5%												喷气发动机部件。

生产方法:

商用真空冶炼方法分为三种: (a) 真空感应冶炼; (b) 真空自耗电极重熔; 以及 (c) 真空除气。每一方法均有它的优点和缺点。然而, 所有方法都可以生产较普通空气中冶炼要更纯的金属材料。用自耗电极法重熔合金时,

系在真空中重熔和重铸。在除气处理时, 只是在真空中进行浇注。真空方法能够降低杂质和气体的含量已是肯定不移的了。当其采用图 1 中的两种真空方法时会减少杂质的来源, 而从表 2 中也可以看出气体含量的减低。

真空感应冶炼是在一个装有真空壳的感应

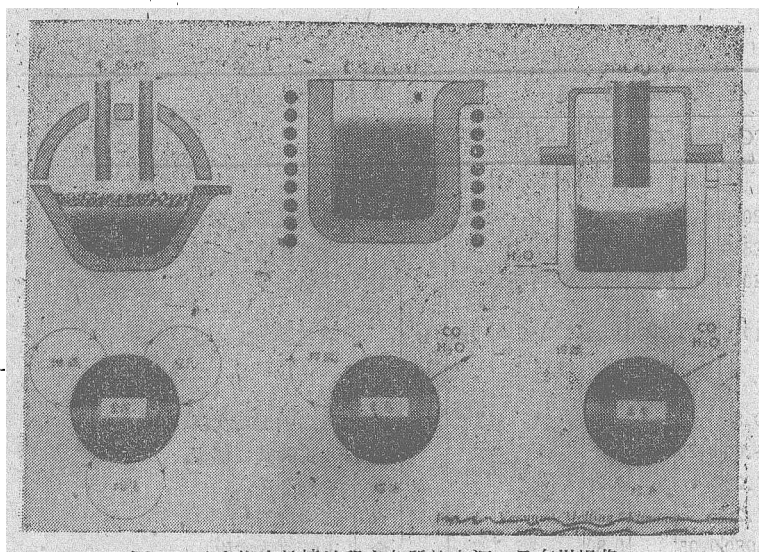


圖1 减少真空熔煉过程中雜質的来源。只有坩堝將雜質帶入真空感應爐內的合金中，但在真空自耗電極電弧重熔爐中便截斷了这个来源

爐中进行的。虽然在冶煉过程中压力常有变化。但加料、熔化及澆注均在約5公微的压力下进行。圖2为一套标准真空感應熔煉装置。其他鑄模設備可安装在另一室內，这样才有可能进行半連續式操作。据說在此种情况下繼續工作一星期也不至破坏爐子的密封性。

标准的冶煉操作可如下：用精选廢料和純金屬（加入合金用）进行配料。將配料裝入漏斗中，并將其室抽成与爐室一样的真空。將配

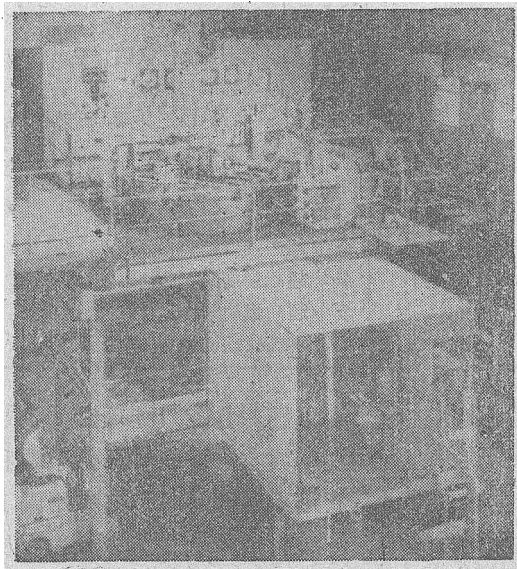


圖2 一套标准的真空感應熔煉設備。加料、熔化及澆注均在高真空中进行

料卸入坩堝中，然后用关闭通抽气泵的閥来檢查其压力升高的方法以測定其漏气率。标准極限为每分鐘升高5公微。虽然大多数的合金成份都是开始配料时加入，但亦有極少数的合金（如錳，因其蒸气压很高），必須在熔融材料快澆注以前加入。

这种加料方法对于鈦和鋁也是必須的；它們都具有高度的活潑性并且能够立即与任何殘留的氧和氮相化合。在这种情况下，漏气率显然很重要。現代的真空泵的压力真空度能够达到1公微，而其漏气率則达100公微/分

之多。当所有材料加完之后，測量溫度（一般用光学高溫計，經常插入热电偶进行校对），然后将熔融金屬澆入真空室內的鑄模中。

大量生产中若干爐的平均气体含量 表2

牌 号	冶 煉 方 式	O ₂	N ₂	H ₂
A-286	空气冶煉电弧爐	13.0	300.0	13.1
	真空电弧重熔	5.0	20.0	2.8
	真空感應爐	3.0	50.0	2.3
Waspuloy	空气冶煉电弧爐	31.0	420.0	17.7
	真空电弧重熔	2.0	120.0	2.2
	真空感應爐	12.0	120.0	2.5
M-252	空气冶煉电弧爐	15.0	160.0	16.0
	真空电弧重熔	6.0	40.0	1.7
	真空感應爐	5.0	30.0	1.5

因为在整个生产过程中都没有气体（除二氧化碳之类由熔融金屬中放出的气体外），所以不需要采用錳和硅等脫氧剂。这是一个优点，因为錳、硅二者均有害于高溫机械性能。雜質的唯一来源就是坩堝（真空感應爐的主要問題就是受坩堝的侵染）；坩堝通常是用鎂砂或鋇砂（magnesia 或 zirconia）制成。如果鎂是反应产物，就会气化跑掉，但鋇和某些其他微量元素則为熔融金屬所吸收。这个特性导致了鋇和硼均能改进高溫合金的性能；所以在若干高溫

合金中，規定必須加入鎢和硼。

普通真空感應爐生產高純度材料時，有時雜質反會增高。要想保持一個爐室的高真空度，由於在機械操作方面存在着困難而限制了爐子的容量。目前，一般人認為現正在凱爾斯-漢斯公司所屬優特卡金屬分公司 (Utrca Metals Div of Kelsey-Hayes Co)，即將建成的容量為5000磅的設備可能是一個極限。另一問題就是凝固後的鑄錠內部產生中心偏析。這個缺點僅可能用正確的模型設計和冷卻方法才能減少。卡登特爾鋼鐵公司 (Carpenter Steel Co) 採用了一個設計的鑄模，其上帶有一個厚銅底座（為了快速冷卻）。此鑄模的設計是為了澆出一個短的鑄錠；全部凝固過程幾乎都是由底部往頂部進行並迫使夾雜物浮向頂端和最大限度的減少偏析程度。某些真空熔煉者們面臨着一個專門問題這就是“爐室的結冰”。當有小量的水漏發生時，水即噴入真空中；其膨脹如此之速以致在320°F以下起冷卻作用而在漏氣的地方結成了冰。

真空自耗電極熔煉

重熔一次可以解決一些偏析問題。在自耗電極爐中進行一次真空電弧重熔，即可得到真空熔煉的良好效果。此法須用規定的合金作成電極。將此極懸於真空室中，並在此極之端部與“發火墊”之間通以低壓高電流的電弧。當電弧徐緩地熔化電極的時候，其熔化的金屬即在下面的水冷銅模中再行凝固。這種爐子與一部巨大的自動焊接機相似。

此法的優點是：能鑄出較感應爐更大得多的鋼錠。1957年底已生產了12,000磅的鑄錠，今年預計可得到18,000磅的鑄錠。另一優點是大大地減少了偏析。適當地調整電流與電壓可在全極切面上保持一個淺的熔池，以便在水冷模中迅速凝固。

採用自耗電極重熔時，鑄錠的質量受電極本身質量的限制，例如空氣熔煉的電極，其所含的某些夾雜物又可能在重鑄的錠**中出現，但其分布情況可能比較好一些。其中的氣體迅

速逸出。若用真空熔煉的材料作為電極，*則成本很高；但現代飛機要求如此嚴格以致雙重真空熔煉法很快被採用。真空熔煉材料做成的電極加上真空再鑄成的錠就全無偏析，這就可獲得質量優良的產品。

真空除氣

嚴格的說來，這並不是一種真空熔煉方法。鋼在普通的電爐或平爐中熔煉，並按一般方法傾注入盛鋼桶中。然後將此盛鋼桶置於如圖3所示在裝有鋼錠模真空室上部的小盛鋼桶之上。將小桶用鋼水充滿；當將小盛鋼桶的鋼水塞打開之後，熔融的金屬燒穿了鉛制封蓋層而流入鑄模中。真空除氣的壓力雖然相當高（在200與1000公微之間），然而因氫的擴散速度大故很快地逸出；使鑄錠內的含量低於百分之一（1 ppm）。既有除氫的能力又能生產極大的鋼錠（可到500,000磅），故此方法極宜於冶煉蒸汽渦輪和發電機轉子鍛件用的鋼種。這樣可能用比較低的費用而消除了自燃的疵病——據作者談到低於一分錢一磅。

每一種真空加工的方法都有優點和缺點（見表2、3）。採用這類方法不僅要考慮性能的需要，並且要考慮經濟效果。表3提供了每種冶煉方法所製合金的特性。

質量的控制

製造這樣高標準材料的時候，質量控制很重要。在冶煉和加工的每一階段中，都必須細心調整。例如在感應熔煉方法中，原材料必須為高強度。每批廢料和加料用合金的化學分析都非常重要，因為這樣才能進行準確的計算配料。

當材料正在坩堝中熔化的時候，必須經常保持穩定的高真空。每一個短的階段中將通真空泵的閥關閉而測其漏氣率。如果發生漏氣，

* “發火墊”就是一片真空熔煉的金屬與電極系同樣材料，置於底部以保護銅模。

** 事實上，電弧的熱足夠分解氮化物、氧化物以及磷化物，只須達到了平衡。然而，由於此法原有的熔化速度即很快而又未經調整，致使此反應近乎不可能。

冶煉方法的比較 表 3

方法的类别	鑄錠重, 磅	优 点	缺 点
真空除气	500,000	設備和操作的费用低; 容量大小限制少	不可能加合金; 除 O_2 和 N_2 較少; 一般的鑄錠困难; 質量大部視原来空气熔煉而定
真空感应爐	3,000	沒有熔渣和空气的沾染; 可能最好全部除气; 不須采用錳和硅; 允許使用更多的如 Ti, Al, B 和 Zr 之类的活性元素; 方法完善; 控制良好	操作費用高; 每爐量小; 耐火材料沾污; 一般的鑄錠困难; 原材料的限制; 設備費用很高
空气熔煉的自耗電極真空电弧重熔	13,000 (26"直徑)	改善鑄錠組織; 无熔渣和空气; 耐火材料的粘污; 控制良好; 尚可能除气	操作費用中等; 精煉能力有限; 方法本身不完善-特別依賴電極質量; 設備費高。
感应真空自耗極真空电弧重熔	3000 (16"直徑)	結合上述两法的优点	費用昂貴。

則通氮氣入室中并用一个質量分光計確定漏氣的部位。為了確定氧與碳是否低到足以允許加入活性元素的程度，也必需確定漏氣率。偶爾也需要几公厘的壓力來控制熔爐。這個可以用由熔液放出來的氣體提高或通入一種如氫的惰性氣體。

在自耗電極方法中控制真空度在 0.5 公厘以下就可以了。如果高了，电弧就不會穩定地達到熔池；而會迷失方向極襲銅坩堝且常將其燒成空洞。這是一個危險的情況，并且過去曾造成過最壞的事故。电弧的動力也應該保持一個穩定的高的數值。由於重熔的鑄錠的質量依賴於電極的質量較多，故控制電極的方法是顯然必要的。電極必須進行磨琢以去其粗澀面；

檢查保證其為成份準確的堅實的鑄錠也是需要的。

鍛造和軋制

對真空熔煉鑄錠的成形工藝亦與用於空氣熔煉的高溫合金和工具鋼相似。大多數的鑄錠在進行鍛制時，開始都使用輕的壓力去破壞鑄成的大晶粒。鍛制完畢之後，用擺動磨制的方法修整其表面。這是一個比較好的修整方法并須於每一軋制工藝操作之後進行修整，防止在下一道工序中發生裂紋。這些高合金材料的工作範圍太窄，故必須在所有工作程序中檢查其溫度。大多數由真空熔煉成的合金可以按標準尺寸的棒材，薄板供應；如果需要亦可供應特殊型材。

檢 驗

材料在啓運前必須經過全面的檢驗。一般包括用某種探測方法（如 zygló）進行 100% 表面檢查，持久強度以及用顯微組織檢查材料的純潔度。常常因為材料用於某種特殊的用途，使用單位提出了一些特別試驗的要求。有

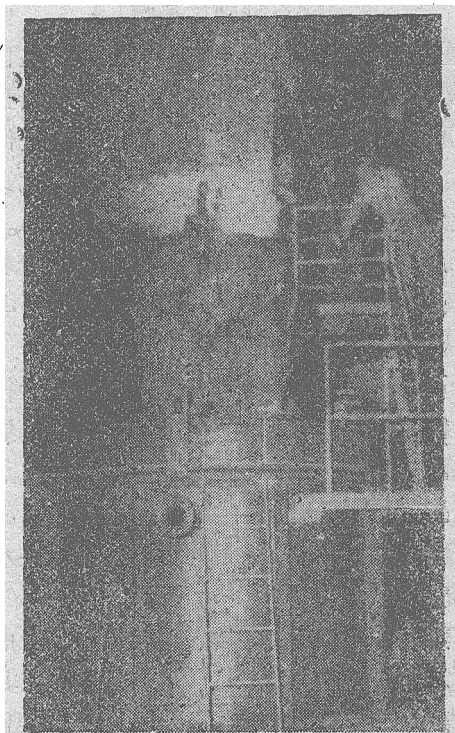


圖 3 真空除氣的設備。空氣熔煉的鋼中的氫可用此法大大地減少

时爐材料的5~10%都用来試驗；这就提高了成本。

用途：

目前，真空熔煉合金大多用于噴气式發动机。它們用作如像渦輪吊桶，外壳，噴嘴膜，加力燃燒室，螺栓等部件——簡言之，那里的溫度高，高强度性能就很重要。可是，倘有其他不少用途，而且不

斷随时提出更多的用途。一个有力的例子就是高溫軸承。为了这个目的現在冶煉了大量的52100号鋼。不少其他高溫用途也为真空冶煉金屬开辟了途徑——排汽閥，过热管，蒸气渦輪，高压容器等。似乎任何受热与应力的部件选用真空熔煉的材料都会有利。

由于生产自动化以及經常需要提高进刀量和切削速度，所以工具鋼就必须具有比以往更要强又要韌的性能。一般用真空熔煉来改进这些性能是可能的。

真空冶煉又对空气冶煉的材料提出了問題。例如，AISI4340号鋼都在大量熔煉。因为真空熔煉(常常是自耗电極熔煉)得到空气熔煉

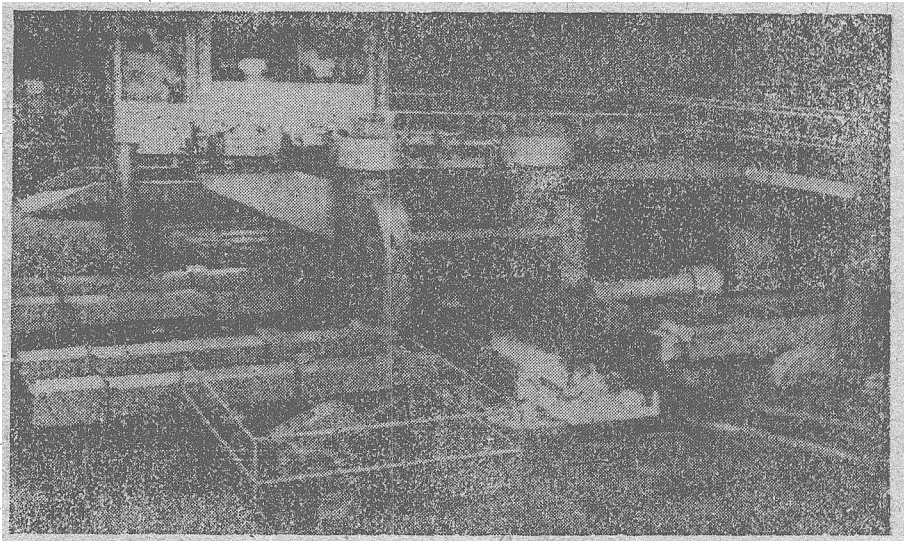


圖4 去年建成的用于高溫合金及高速鋼加工的32号軋鋼車間。这是第一次大量地用軋延方法代替錘鍛方法將此类合金由鋼錠变为鋼坯

所不能达到的性能——至少是均匀性。經過熔煉具有橫向韌性的，超高强度鋼之后，便已定型。特別在心部。有不少的飞机制造者們現正使用着强度由260,000至280,000磅/吋²的AISI 4340号鋼。他們覺得虽然真空熔煉的材料費用高昂，但却改进了性能。

不久的将来就会看到大量的使用真空熔煉的合金作为制造在高速飞行中所能达到的溫度範圍內使用的夾層和蜂巢結構所需特薄的金屬帶。正在設計未来的飞机和導彈的工程師們已經准备这样办。

吳世澤譯自“金屬进展”1958年8月

第94~99頁

宇宙飞行用金屬材料的預測(二)

III 鈦

鈦的最突出的特性就是它的强度对密度的比值。在一个居中的而又相当寬的溫度範圍內，在这方面，鈦比若干金屬都优越。圖4系就鈦、鈹和一些鉄基合金比較其屈服强度对密度的比值与溫度的关系。在这一基础上，热模鋼是最有力的競爭对手。具有低密度的鈹，若更多地

被采用，也将参加竞争。圖4頂上的曲線系表示新型的全β-相的鈦合金。这种鈦合金有可能热处理到超过250,000磅/吋²的極限强度。在實驗室中曾經热处理和冷加工到超过270,000磅/吋²的抗拉强度。

鈦的使用溫度的極限：对于極短的时间，似乎可达到約2,000°F；而对于長時間的性能，則約达1,100°F。在高溫时，蠕变强度