

国外钒冶金

廖世明 柏谈论 编著

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 钒的发现及其生产与消耗	(1)
第二节 钒在钢铁工业中的应用	(4)
第三节 钒在钛工业中的应用	(13)
第四节 金属钒及钒基合金的应用	(15)
第五节 钒在化学工业及其它工业上的应用	(18)
第二章 钒的资源	(20)
第一节 自然界中的钒	(20)
第二节 钒的矿物与矿床	(23)
第三节 钒的矿产资源与生产	(28)
第三章 钒及其化合物的性质	(35)
第一节 钒的性质	(35)
第二节 钒的氧化物	(51)
第三节 钒酸	(61)
第四节 钒的钠盐	(85)
第五节 钒的铵盐	(93)
第六节 钒的卤化物	(96)
第七节 钒-金属-氧系	(100)
第八节 钒的合金系	(109)
第四章 钒的湿法冶金	(120)
第一节 概 述	(120)
第二节 氧化钠化焙烧	(121)
第三节 钒的浸出	(136)
第四节 含钒浸出液的净化	(143)
第五节 钒的水解沉淀	(147)
第六节 钒酸铵沉淀	(155)
第七节 钒酸钙与钒酸铁沉淀	(158)
第五章 从含钒铁矿中提取钒	(161)
第一节 概 述	(161)

第二节	从含钒生铁吹炼钒渣的过程	(165)
第三节	高炉-转炉法生产钒渣	(170)
第四节	回转窑-电炉-摇包法生产钒渣	(184)
第五节	从钒渣生产五氧化二钒	(191)
第六节	用钒钛磁铁矿生产五氧化二钒	(202)
第六章	从其它含钒原料中提取钒	(223)
第一节	从钒铀矿中提取钒	(223)
第二节	从含钒页岩中提取钒	(229)
第三节	从含钒磷铁中提取钒	(237)
第四节	从钒铅矿中提取钒	(242)
第五节	从生产氧化铝过程中回收钒	(244)
第六节	从碳质含钒原料中提取钒	(248)
第七节	从二次钒资源中回收钒	(253)
第七章	钒铁及钒合金剂的生产	(257)
第一节	概 述	(257)
第二节	还原钒氧化物的热力学分析	(263)
第三节	电硅热还原法生产钒铁	(267)
第四节	铝热还原法生产钒铁	(270)
第五节	真空碳还原法生产钒铁及钒合金	(275)
第六节	用钒渣生产钒合金剂	(279)
第七节	钒碳型合金剂的生产	(290)
第八节	钒铝合金的生产	(297)
第八章	金属钒的生产	(304)
第一节	概 述	(304)
第二节	钙还原法生产金属钒	(306)
第三节	真空碳还原法生产金属钒	(309)
第四节	镁还原法生产金属钒	(314)
第五节	熔盐电解精炼法提纯钒	(325)
第六节	碘化物热分解法提纯钒	(338)
第七节	真空熔炼法提纯钒	(344)
第八节	区域精炼法提纯钒	(356)
第九节	电迁移法精炼钒	(362)

第一章 概 论

第一节 钒的发现及其生产与消耗

钒的发现 钒的发现经过了一个曲折的过程^[1,2,3]。1801年墨西哥矿物学教授安德烈斯·曼纽尔·德·里奥(1776~1849)研究集马帕褐铅矿试样时,发现了一种新元素,这种新元素的化学性质和铬、铀相似。因为它的盐在酸中加热时呈红色,因而命名为“erythronium”(从希腊字 $\epsilon'ρυθρο's$ 而来)。1805年法国化学家科利特·德斯科蒂尔分析了上述集马帕褐铅矿试样,德·里奥赞同这一错误结果是基性铬酸铅,含有80.72%的氧化铅和14.80%的铬酸。实际上,因而使钒的发现推迟了约30年。

1831年瑞典化学家尼尔斯·加布里尔·西弗斯特姆(1787~1845)宣布在研究瑞典斯莫兰德的塔堡铁矿生产的铸造生铁时,发现了一种新元素,并以瑞典女神维拉斯之名命名为“Vanadium”。至此正式宣布钒的发现。

英国化学家亨利·恩菲尔德·罗斯科(1833~1915)对钒进行研究后,认为钒属于第五周期的磷族,是正三价与正五价元素。他认为 V_2O_5 与 P_2O_5 性质相似, $VOCl_3$ 与 $POCl_3$ 相似。他制得了 V_2O_5 、 V_2O_4 、 V_2O_3 、 V_2O_2 、 $VOCl_3$ 、 $VOCl_2$ 、 $VOCl$ 等。

1867年罗斯科用氢还原 VCl_2 ,第一次得到了一种比较纯的银白色的金属钒粉末。

1927年J.W.马登和M.N.里奇把钒氧化物、金属钙和氯化钙放在钢弹中用电炉外加热,于900~950℃下保温一小时,冷却经水洗后得到含99.3~99.8%钒的金属。

钒的生产与消耗 钒属高熔点金属,容易变形加工,并有许多可贵的性能。世界上主要工业国五氧化二钒的生产规模、产量与消耗量的数据列在表1-1。美国钒产品消耗量列在表1-2,其中

表 1-1 主要工业国五氧化二钒的生产
规模、产量与消耗量⁽¹⁾

单位：吨

	1978	1979	1980	1981	1982
生产规模：					
美国	14496	14496	16082	16924	17712
南非	24281	24281	25368	28313	28313
芬兰	5210	5210	5210	5210	5210
挪威	1133	1359	1359	906	906
日本	1133	1359	1359	1359	1359
委内瑞拉	—	—	—	—	—
澳大利亚	—	—	—	453	1586
苏联—东欧	16988	16988	16988	16988	16988
产量：					
美国	11959	12458	12005	13545	13726
南非	20068	22016	22650	21065	20793
芬兰	4983	4938	5028	5210	5210
挪威	815	997	951	906	906
日本	1087	453	634	1178	1178
澳大利亚	—	—	—	453	1359
苏联—东欧	16988	16988	16988	16988	16988
消耗量：					
美国	13183	12956	11325	12729	12865
西欧	13771	14270	14949	15221	16444
日本	4439	5617	5072	5617	6433
苏联—东欧	20838	21019	21518	22152	22559
其它	2627	3080	3352	3760	4213

表 1-2 美国钒产品的消耗情况⁽⁸⁾

单位: 吨钒

年 份	钒 铁	氧 化 物	偏钒酸铵	其 它	合 计
1955	1318	116	61	47	1542
1956	1385	117	76	225	1803
1957	1246	120	91	167	1624
1958	927	63	80	73	1142
1959	1353	138	102	122	1715
1960	1350	120	110	249	1829
1961	1350	130	76	272	1828
1962	1551	150	114	284	2099
1963	2088	122	111	315	2636
1964	2597	120	133	370	3220
1965	3666	115	159	330	4270
1966	4091	180	145	555	4971
1967	3904	138	104	610	4757
1968	4274	141	85	484	4984
1969	4710	103	100	670	5582
1970	3923	125	40	569	4657
1971	4075	171	43	452	4741
1972	3783	130	32	411	4356
1973	5079	180	41	498	5798
1974	5511	198	37	785	6530
1975	4266	196	24	504	4989
1976	3759	159	37	327	4281
1977	4257	130	39	346	4772
1978	5439	90	28	456	6013
1979	5504	43	34	513	6094
1980	4842	37	20	669	5568

钒铁一项是指各种牌号的钒铁和钒合金剂，其它形式一项包括金属钒、钒铝合金等，基本上属钛工业使用的钒铝合金。

第二节 钒在钢铁工业中的应用

世界上的钒约90%用于钢铁工业。高速工具钢是钒的传统用户。六十年代中期至七十年代钒在高强度低合金钢上的使用量已经达到其总量的40%以上。1978年世界上钒在不同钢种上的消耗比例如下(%)^[6]：

高强度低合金钢	42
合金结构钢	27
碳素钢	18
工具钢	13
其 它	<1

关于钒在钢铁工业中消耗的增长与变化情况参见表1-3与表1-4。根据威斯报导^[13]，美国每生产100万吨钢约消耗50吨钒，其中32%用于高强度低合金钢，22%用于合金钢，18%用于工具钢，其余28%用于碳素钢、铸铁等。

近几年来美国含钒钢的产量如下(吨)^[7]：

	1976	1977	1978	1979 [●]
高强度低合金钢	4640000	5130000	6447000	6750000
合金结构钢	8626000	9115000	10452000	10200000
碳素钢	3870000	4172000	4688000	51700 0
工具钢	76300	85400	91800	94700
铸铁	11923000	12582000	12524000	11860000

钒是强化铁素体和 γ 相的形成元素之一，它和碳、氮、氧有极强的亲和能力并生成稳定的化合物。钒很少单独在钢中使用，而是与铬、锰、钨、钼、铌、氮等一起使用。钒在钢中主要以碳化物相存在。

● 根据9~10月估计。

表 1-3 美国六十年代的消耗情况⁽⁵⁾

单位: 吨钒

使用部门	年 份									
	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969
钢:										
高速钢与工具钢	411	383	526	501	466	485	701	679	553	588
不锈钢	27	25	17	31	32	29	34	35	45	34
合金钢	843	923	1000	1427	1374	2567	2676	1910	2350	2484
碳钢	106	64	134	224	334	595	742	746	991	1175
其它钢								5	6	
铸铁	16	15	19	17	24	32	36	49	52	50
切削及耐腐蚀材料								12	15	
焊条								11	11	11
合金等								4	5	63
非铁基合金	239	270	213	271	301	318	539	557	416	561
化工、陶瓷	145	105	148	126	155	179	166	120	152	177
其他	42	41	41	39	34	65	77	629	386	439
总计	1829	1828	2099	2636	3220	4270	4971	4757	4984	5582

表 1-4 美国七十年代钒的使用情况^(5,12)

单位: 吨钒

使用部门	年 份										
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
钢铁工业											
高速钢与工具钢	429	400	562	904	1582	1185	512	547	778	773	596
不锈钢耐热钢	44	27	27	24	34	18	—	25	29	41	36
合金钢	2195	2295	987	1400	849	375	1189	1292	1366	1380	1288
高强度低合金钢	—	—	1870	2043	2175	1818	1484	1663	2213	2186	1801
碳素钢	952	753	571	623	816	844	468	649	953	994	1011
铸铁	46	51	54	51	47	54	151	43	54	56	49
超合金	37	13	15	34	50	24	—	17	24	18	35
焊条等	10	9	10	10	9	11	—	8	10	9	9
非铁合金 (主要是钛合金)	440	329	320	478	655	385	284	317	424	511	660
其它合金 (包括磁合金)	15	6	18	15	—	—	—	—	—	—	—
催化剂	113	103	133	148	231	217	192	163	112	73	54
各种杂用	375	369	171	69	82	59	—	46	51	53	29
总计	4657	4355	4741	5798	6530	4989	4281	4772	6013	6094	5568

钒在钢中所起的主要作用有：

(1) 细化钢的组织 and 晶粒，提高晶粒粗化温度，从而降低钢的过热敏感性，并提高钢的强度和韧性。

(2) 当在高温把钒溶入奥氏体时能增加钢的淬透性。反之，如钒以碳化物相存在时则将降低钢的淬透性。

(3) 钒能增加淬火钢的回火稳定性，并产生二次硬化效应。

合金工具钢 合金工具钢包括各种切屑工具、热加工工具与模具，是用钒最早和最多的传统钢种。主要工具模具钢的化学成分列在表1-5。高速工具钢约含1~5%钒。高速工具钢中的钒在热处理时大部分以碳化物相存在，因而可得到细的奥氏体组织；在最终的结构中因有碳化物存在而具有良好的耐磨性；溶解于奥氏体中的钒对钢的可硬性的作用比钨、钼大；在回火时溶解的钒以细的碳化物沉淀而使钢得到较高的硬度与热强性。

钒在一般工具钢中所起的作用与在高速工具钢中的作用不同，主要是在热处理过程中起到细化奥氏体晶粒的作用，从而能提高钢的耐磨性。添加钒还可以改善工具钢的塑性与韧性。

高强度低合金钢 高强度低合金钢 (HSLA) 是近十多年来飞速发展的钢种。由于高强度低合金钢的强度较普碳钢大，所以用作结构部件能减少钢材的使用量和减轻部件的重量。另外，由于添加少量合金元素使钢材可以在低温地区(如北极)使用。高强度低合金钢主要用作输油(气)管道、高强度钢筋、汽车部件、桥梁、压力贮存罐、高层建筑物的构件、输电塔、车厢架等。钒是高强度低合金钢的重要合金元素之一，它的产量对钒的用量起决定性作用。

高强度低合金钢是指屈服极限大于30公斤/厘米²的钢，这种钢种是在Si-Mn系钢的基础上加入0.2%以下的碳化物、氮化物的形成元素如钒、铌、钛等与控制硫化物形状元素如稀土、锆等制得的。这些元素在钢中起到细化晶粒、沉淀硬化、消除夹杂物延伸等作用。

一些含钒高强度低合金钢钢种的化学成分列在表1-6。目前

表 1-5 合金工具钢的主要成分

钢 类	化 学 成 分, %							
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	Co	V
W-Cr-V型高速工具钢	0.70~1.55			3.5~5.0	9~19	0~1.0	—	0.7~5.0
W-Cr-V-Co型高速工具钢	0.70~1.55			3.5~5.5	12~21	0~1.0	0.5~16.0	0.7~5.0
Mo-W-V型高速工具钢	0.75~1.50			3.5~4.0	1.0~7.5	2.0~10.0	—	0.8~5.0
Mo-W-V-Co型高速工具钢	0.75~1.60			3.5~5.0	1.0~11.0	3.0~9.0	4.0~13.0	1.5~5.5
W-Cr-V工具钢	0.30~1.50	≤0.40	≤0.35	0.30~7.00	0.80~9.00	—	—	0.20~0.70
W-Cr-Si-V工具钢	0.30~0.60	0.20~0.40	0.80~1.10	0.80~1.10	1.80~4.20			0.15~0.30
Cr-V工具钢	0.80~1.25	0.30~0.60	≤0.35	0.45~0.75				0.15~0.30
Cr-W-Mo-V工具钢	0.40~0.50	0.30~0.50	0.50~0.80	1.20~1.50	0.40~0.60	0.30~0.50		0.75~0.85
Cr-Mo-V工具钢	1.45~1.70	≤0.35	≤0.40	11.00~12.50		0.40~0.60		0.15~0.30
Cr-Mn-Si W-V工具钢	0.40~0.50	1.35~1.65	0.80~1.20	2.50~3.00	0.80~1.20			0.20~0.40
Si-Cr-V工具钢	0.40~0.50	≤0.40	1.20~1.60	1.30~1.60				0.15~0.25
Si-Mn-Mo-V工具钢	0.45~0.55	0.50~0.70	1.50~1.80	0.20~0.40		0.30~0.50		0.20~0.30
Si-Mn-V工具钢	0.55~1.50	0.70~1.20	0.70~1.10					0.15~0.30
Mn-Cr-W-V工具钢	0.95~1.05	1.00~1.30	≤0.35	0.40~0.60	0.40~0.60			0.16~0.30
Mn-V工具钢	0.85~0.95	1.20~2.00	≤0.35					0.10~0.25

表 1-6 含钒高强度低合金钢成分

钢 种	化 学 成 分, %										
	C	Mn	Si	V	Nb	N	S	P	B	Al	稀土
Mn-V钢	0.17~ 0.45	1.20~ 2.10	0.17~ 0.37	0.07~ 0.12							
Mn-V-B钢	0.17~ 0.44	0.17~ 0.37	1.00~ 1.40	0.05~ 0.12					0.001~ 0.005		
Si-Mn-V-B钢	0.17~ 0.24	1.30~ 1.60	0.50~ 0.80	0.07~ 0.12					0.001~ 0.005		
北级用管道钢 (联合碳化物公司)	0.08~ 0.10	1.40~ 1.60	0.25~ 0.30	0.08~ 0.12	0.015~ 0.02		≤0.015			0.02~ 0.04	1公斤/ 吨钢
管道钢 (北海油田)	0.10~ 0.12	1.50~ 1.70	0.25~ 0.30	0.10~ 0.14	0.015~ 0.02	0.012~ 0.015	≤0.015			0.02~ 0.04	1公斤/ 吨钢
API×65管道钢 (控制轧制)	0.10 0.09	1.40 1.3	0.33 0.3	0.06 0.04	0.02 0.03	0.004	0.005 0.005			0.04	
JLY-50CC	0.08~ 0.12	0.75~ 1.10	0.05~ 0.15	0.03~ 0.07		0.008~ 0.012	0.007~ 0.020	0.008~ 0.013		0.03~ 0.05	0.02~ 0.06
VAN-80	0.12~ 0.17	1.20~ 1.55	0.30~ 0.35	0.10~ 0.14		0.015~ 0.022	0.007~ 0.020	0.008~ 0.013		0.03~ 0.05	0.02~ 0.06
VNT-N (阿姆科公司)	0.22	1.50	0.50	0.11	0.05	0.03					
60-N (美国钢铁公司)	0.22	1.15~ 1.50	0.15~ 0.50	0.04~ 0.11		0.01~ 0.03					
BS436055E型桥梁钢 (巴西)	≤0.22	≤1.6	≤0.60	0.08		0.03					
冷压钢	0.14	1.2	0.37	0.07		0.018	0.011	0.009		0.06	

表 1-7 含钒高强度低合金热轧钢板成分及性能

	化 学 成 分, %											力 学 性 能			
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Mo	Cr	Ni	V	N	屈服强度 公斤/毫米 ²	抗拉强度 公斤/毫米 ²	延伸率 %	最大厚度 毫米
京风化钢 ASTMA-242, A-588 No. 1	0.10~0.19	0.90~1.25	≤0.04	≤0.05	0.15~0.30	0.25~0.40		0.40~0.65		0.02~0.10		33.0	47.1	—	38
												35.2	49.2	22	16
												35.2	49.2	21	102
												42.2	56.2	—	25
No. 2	0.10~0.20	0.75~1.25	0.04	0.05	0.15~0.30	0.20~0.40		0.40~0.70	0.25~0.50	0.01~0.10		35.2	49.2	21	102
No. 3	0.15	0.50~0.10	0.04	0.05	0.15~0.30	0.30~1.0	≥0.10	0.30	0.40~1.10	0.01~0.02		42.2	56.2	21	102
X钢 (屈服强度 30~50公斤/毫米 ²), ASTMA-572	0.20~0.06	1.0~1.65	0.04	0.05	0.30					≥0.02		29.5	42.2	24	102
												31.6	42.2	22	51
												35.2	45.7	22	51
												38.7	49.2	20	51
V-N钢	0.10~0.14	1.35	0.04	0.025	0.45							42.2	52.7	18	32
												45.7	56.2	16	19
												49.2	59.8	14	10
												56.2	66.8	18	19

常用的含钒高强度低合金钢热轧钢板的成分与力学性能列在表1-7〔8〕。

往热轧铁素体-珠光体钢中添加0.05%钒能细化铁素体晶粒，从而增加了钢的强度和韧性。添加钒对含0.17%碳热轧钢屈服强度的影响如图1-1〔8〕，添加钒和氮对钢的性能的影响如图1-2〔8〕。

由于细的碳氮化钒在钢中沉淀得到细的组织结构，而使钢的性能提高。也因空冷时（碳、氮化钒）在铁素体区的上部沉淀而使钢强化。钒与氮的综合强化效果比单独的钒或氮更显著。

往含钒高强度低合金钢中加入少量铌能阻止奥氏体的再结晶，并在奥氏体中提供了更多的晶核。添加0.02%Nb能显著提高钒与氮的作用，但还要添加稀土金属来改善钢的性能。采用控制轧制的加工方法能使含钒、铌的高强度低合金钢的性能得到进一步的提高。

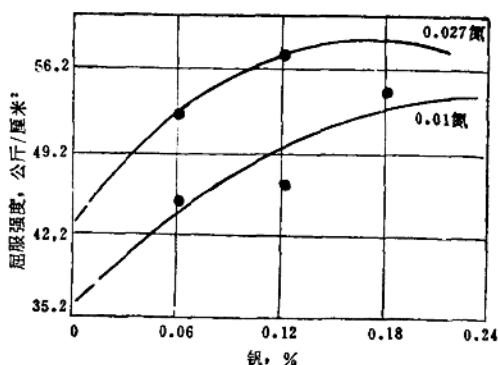


图 1-1 0.17%碳钢中钒含量与屈服强度关系（终轧温度900°C，空气冷却）

合金结构钢 合金结构钢也是早期钒的主要用户。这些钢种包括Cr-V、Ni-Cr-Mo-V、Cr-Mo-V等，一般称它们为热处理钢。另外，重型锻件用钢中也含有钒。但这些钢含钒量都不高，一般在0.2%以下，大多数在0.10%左右。近年来也发展了一些新

的含钒量较高的合金结构钢，人们称它为超高强度合金钢，其含钒在0.5%以上。超高强度合金钢的成分列在表1-8。

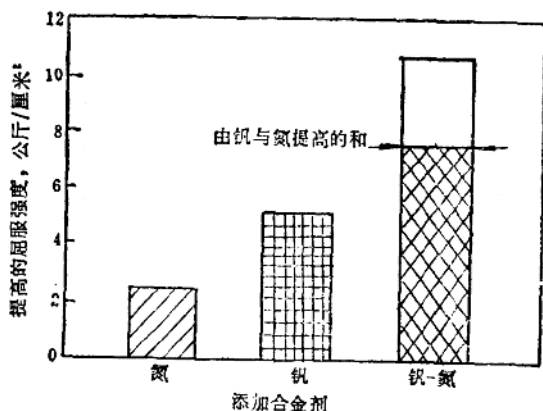


图 1-2 添加钒、氮对碳素钢屈服强度的影响

表 1-8 超高强度合金钢成分

牌 号	化 学 成 分, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Co	W	Cu
AISI A9	0.50	0.40	1.00	5.00	1.50	1.40	1.00			
H-11 改型	0.38~0.43	0.20~0.40	0.80~1.00	4.75~5.25	≤0.25	1.20~1.40	0.40~0.60			≤0.35
Porome M	0.40	0.30	1.00	5.00		1.00	1.00			
H-13	0.35		1.00	5.00		1.50	1.00			
Vasco Jet MA	0.50			4.50		2.75	1.00	8.00	2.00	
Matrix II	0.55			4.00		5.00	1.00	8.00	1.00	
HT13	0.55	0.30	1.15	4.75		5.25	0.55	8.00		
17-22 A (V)	0.28~0.33	0.45~0.65	0.55~0.75	1.00~1.50		0.40~0.60	0.75~0.95			
Lddishd11	0.46	0.75	0.35	1.05	0.55	2.00	0.50			

钒同铬、钼一样，都能提高钢的耐热性。钒能阻止钼向碳化

物相扩散而使钼保留在固溶体中。钒在钢中起脱氧和细化晶粒作用，从而能改善钢的塑性与韧性而不降低其强度，并能提高钢的冲击性能与疲劳强度。钒可以减小锰钢的热敏感性与增加其回火稳定性。

高温及耐热不起皮钢中的含钒量不高。钒是通过形成细小的弥散碳化物来提高钢的热强性的，而在Cr-Mn-V系钢中加钒则是利用氮化钒的弥散强化来提高其热强性。铁基高温合金中的钒主要是作为碳化物生成剂与稳定剂而添加进去的。这类合金主要用作汽轮机与燃气轮机的结构材料。

含钒的弹簧钢由于钒提高其淬透性，而能在高温条件下使用。含钒钢轨在低温条件下具有较好的缺口韧性的特点，而作为架空起重机的特殊钢轨使用。含钒钢轨的硬度大，适用于高速铁路的路轨。

铸铁 往铸铁加入钒可以获得组织均匀、石墨化良好和细晶粒的铸件。加入0.10~0.15%钒可以提高铸件强度10~25%，而且能明显改善铸件的韧性。含钒的铸铁具有优良的耐磨性，较高的抗冲击性和很高的硬度。钒是普通的碳化物生成元素，主要生成碳化物和控制石墨的生成。在生铁中生成碳化钒与适当降低石墨的含量都能提高生铁的硬度。钒含量低至0.25%也能明显影响铸件的表面硬化深度。如往灰口铸件（3.15% C、0.5% Si）添加0.1% V，经正常冷却后，其表面硬度为490HB，而在表面下9.5毫米处为300HB。往轧辊（3.05% C、0.5% Si）中加入0.22% V，能增加其25%的硬化深度。含钒铸铁由于铁素体被强化，因而当加热至高温时比较缓慢地失去强度。

第三节 钒在钛工业中的应用

钛工业消耗的钒约占钒总消耗量的7~10%（美国约10%），主要用于生产钛合金。钛合金主要用作飞机和火箭的高温结构材料。如Ti6Al4V用作F15、F16和F18战斗机，运输机和新型直升飞机等的燃气涡轮材料。钛合金具有重量轻、强度大的特点，

占钛材料产量的70~80%。近年来美国钛材料的产量如下(吨)^[7]:

1976年	13152
1977年	14013
1978年	16009
1979年	19274

钛的相变点在1155K。钛的低温稳定 α 相的结构为密排六方晶格,高温稳定 β 相为体心立方晶格。因为 α -Ti与 β -Ti的机械性能与受力的破坏情况不相同,因此钛金属的变形受结晶结构的影响。 β -Ti转变为 α -Ti的相变过程随添加合金元素的种类、加入量以及冷却条件或热处理条件的不同而要经过过渡相 ω 相。在 α 钛中既能比较大量固溶,又能提高 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变温度和扩大 α 相区域的合金元素叫 α 相稳定型元素。 α 相稳定型元素有金属元素铝、锡、锆、铅、镓等(置换型)与非金属元素氧、氮、碳(间隙型)。在 β 钛中大量固溶,同时又能降低 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变温度并扩大 β 区的合金元素称 β 相稳定型元素。 β 相稳定型元素有钒、铌、钽、铬、钼、钨、铁、钴、镍、锰、铜等(置换型)以及氢(间隙型)。

钛合金按晶型区分为 α 型、 β 型与 $\alpha + \beta$ 型。实际使用的 $\alpha + \beta$ 型合金是以钛-铝系为基础,并添加适量的合金元素熔炼而成的。目前用量最多的Ti-6Al-4V合金就属二相结构。Ti-6Al-4V合金性能良好,可以加工成板、棒、管和锻材,其焊接性良好。目前使用的含钒钛合金有:Ti-6Al-4V、Ti-8Al-1Mo-1V、Ti-3Al-2.5V、Ti-4Al-3Mo-1V、Ti-6Al-6V-2Sn、Ti-3Al-8Mo-2Fe-8V、Ti-1Al-8V-5Fe及Ti-13V-11Cr-3Al等。部分含钒钛合金的主要性能如下:

	晶型	屈服强度	延伸率	最小弯	奥尔森	顶锻性
		公斤/毫米 ²	%	曲半径	试验,毫米	D_f/D_i ●
Ti-6Al-4V	$\alpha + \beta$	87.9	15	4t [●]	4.57	1.3

● t 为试样厚度。

● D_i 为顶锻前试样直径(试样长度为直径的2倍), D_f 为顶锻断裂时直径。