

表 6.1-17 美国制造的汽车中粉末冶金零件应用例

应用部位	粉末冶金零件	应用部位	粉末冶金零件	应用部位	粉末冶金零件
发动机	平衡轴链轮、齿轮 凸轮轴凸角 凸轮轴轴承盖 凸轮轴固定支架 凸轮轴护圈 连杆 曲轴轴承盖 EFI 正时传感器环 油泵齿轮与转子 摇臂球 摇臂支架 张紧轮支撑板 张紧轮皮带轮 中间轴的正时链轮与齿轮 凸轮轴的正时链轮、皮带轮及齿轮 曲轴的正时链轮、皮带轮及齿轮 气门导管 进、排气门座圈 水泵皮带轮 水泵皮带轮毂或法兰	发动机-燃料系统	燃料注射链轮 燃料喷射器零件 燃料泵偏心轮 燃料泵齿轮/转子	HVAC	空调器压缩机离合器毂 空调器压缩机旋转斜盘 锁零件（撞块/锁闩） 后视镜座 小齿轮（门窗） 座椅安全带锁 速度表齿轮 气囊五金件 座椅调节杆 座椅调节齿条 座椅倾斜机构零件 信号灯杆 转速表传感器
		发动机-起动机马达	起动机马达构架 起动机马达小齿轮 起动机马达极片 起动机马达插棒 铁心挡块	内部装置	动力转向泵凸轮环 动力转向泵转子 转向柱垫 锁紧楔块 无源节制锁紧棘爪 可倾杆 柱锁紧螺栓 动力转向泵侧板 动力转向泵叶片/滑块 转向柱齿轮 转向侧板
		平板车体	门铰链 电遥控镜齿轮 提到头灯灵敏度装置的齿轮 仪表零件 风挡刮水器驱动装置 风挡刮水器马达磁通量环	转向	
		制动系统	ABS 传感器环 制动器调节器螺母 制动器制动销主缸 制动器活塞	转向	
		排气系统	排气法兰 EGR 底板 HEGOS 毂		
		转向	转向齿条导承 转向变速杆		
悬挂	环节轴承 减震器活塞 减震器撑杆导承 支架 减震器缸盖 减震器压缩阀 McPherson 撑杆导承	自动变速器	直接离合器毂 驱动链轮 从动链轮 正向离合器毂 调速器配主与套筒 停车棘爪 停车齿轮 行星齿轮托架齿轮 行星托架外壳 行星托架垫片/管 齿环毂	自动变速器	单向离合器外环 单向离合器外凸轮 输出轴毂 压力反作用板 泵凸轮环 泵的齿轮/转子 泵转子 泵定子 泵叶片 TCC 定子离合器环 TCC 涡轮毂
分动器	离合器外毂 从动链轮				

驱动链轮 内型毂 主轴毂 行星托架齿轮 行星齿轮托架外毂		支撑毂 TCC 套筒 TCC 定子离合器凸轮 中间离合器毂 单向离合器内凸轮 单向了和气内环	手动变 速器	制轮器与导板 变速叉 同步器隔环 同步器外毂 同步器毂 变速杆
--	--	---	-----------	--

表 6.1-9a 渗铜烧结钢的化学组成（质量分数）

材料牌号	Fe	Cu	C ^①
FX-1000	82.8~92	8~14.9	0~3
FX-1005	82.5~91.7	8~14.9	0.3~0.6
FX-1008	82.2~91.4	8~14.9	0.6~0.9
FX-2000	72.7~85	15~25	0~3
FX-2005	72.4~84.7	15~25	0.3~0.6
FX-2008	72.1~84.4	15~25	0.6~0.9

① 可只根据铁相来估计化合碳；其他元素（包括为了特殊目的而添加的微量元素）总量最大为 2%。

表 6.1-19b 渗铜铁与钢的物理-力学性能

材料牌号	最小值 (A)		标准值 (B)											
	最小强度 (A) (E)		拉伸性能			弹性常数		无凹口锤式冲击能量/J	抗弯强度 /MPa	压缩屈服强度 (0.1%) /MPa	洛氏硬度		疲劳极限 (90% 存活率) /MPa	密度 /g•cm ⁻³
	屈服	极限	极限强度 /MPa	屈服强度 (0.2%) /MPa	伸长率 (25.4mm) /%	弹性模量	泊松比				宏观 (表现)	微观 (换算的)		
FX3-1000-25	170			350	220	7	160	0.28	34	910	230	HRB65	N/A	133
FX3-1005-40	280			530	340	4	160	0.28	18	1090	370	HRB82	N/A	200
FX3-1005-110HT		760		830	(D)	<0.5	160	0.28	9	1450	760	HRC38	HRC55	230
FX3-1008-50	340			600	410	3	160	0.28	14	1140	490	HRB89	N/A	230
FX3-1008-110HT		760		830	(D)	<0.5	160	0.28	9	1300	790	HRC43	HRC58	280
FX3-2000-25	170			320	260	3	145	0.24	20	990	280	HRB66	N/A	122
FX3-2005-45	310			520	410	1.5	145	0.24	11	1020	410	HRB85	N/A	140
FX3-2005-90HT		620		690	(D)	<0.5	145	0.24	9	1180	490	HRC36	HRC55	160
FX3-2008-60	410			550	480	1	145	0.24	9	1080	480	HRB90	N/A	160
FX3-2008-90HT		620		690	(D)	<0.5	145	0.24	7	1100	510	HRC36	HRC58	190

注：1.所有数据都是基于一歩溶渗。

2. (A) 后缀数字代表最小强度 (psi)；烧结态为屈服强度，热处理态为极限抗拉强度；(D) 对于热处理的材料，屈服强度和极限抗拉程度大体上相等；N/A: 不适用。

表 6.1-21 SCM 金属制品公司的铜基溶渗的性能

牌号	松装密度/g•cm ⁻³	流动性/s•(50g) ⁻¹	压制压力 /MPa	生坯密度/g•cm ⁻³	生坯强度 /MPa
----	-------------------------	---------------------------	-----------	-------------------------	-----------

IP-96	3	31	300	6.7	5.2
IP-174	3	31	300	6.7	5.2
IP-190	3	31	300	6.7	5.2
IP-195-LD/HD	3.5	45	220	6.8	3.5
IP-204	3.6	40	200	7	4.7

表 6.2-1 不锈钢中的合金元素

合金元素	形成组织	作用
铬	铁素体	使钢钝化的主要合金元素；12%
钼	铁素体	提高还原介质中的耐腐蚀性；提高存在氯离子时耐点腐蚀性；提高热强度
硅	铁素体	提高抗氧化皮形成能力；提高抗高浓度 HNO ₃ （高硅含量）能力
钛	铁素体	提高耐晶间腐蚀性（与碳和氮结合）
铌	铁素体	提高耐晶间腐蚀性（与碳和氮结合）
镍	奥氏体	和铬同为主要合金元素；扩大奥氏体相区；提高耐腐蚀性；提高耐应力腐蚀性
锰	奥氏体	提高在 Cr-Ni 钢中抑制奥氏体转化为α'-马氏体的能力
碳	奥氏体	重要的伴同元素；在奥氏体和铁素体中尽可能低；决定马氏体钢的硬化
氮	奥氏体	提高奥氏体强度（相同韧性时）；与碳相似
铜		提高奥氏体的耐腐蚀性；在镍马氏体中为沉淀硬化
硫		改善切削加工性；降低耐腐蚀性

表 6.2-2 工业用粉末冶金级不锈钢粉

化学成分（质量分数）/%							氧含量/10-6	筛分析/%	
Cr	S n	Mn	C	S	P	Fe		+100 (>150μm)	-325 (<44μm)
2	2	<0.3	<0.03	0.1~0.3	<0.03	余	1000~2000	<3	40~60
		<0.3	<0.03	<0.03	<0.03	余		1~4	30~45
		<0.3	<0.03	<0.03	<0.03	余		<3	30~45
		<0.3	<0.03	<0.03	<0.03	余		1~4	35~45
		0.1~0.5	<0.05	<0.03	<0.03	余	1500~2500	<3	30~45
		<0.3	<0.03	<0.03	<0.03	余		<3	30~45
		<0.3	<0.03	<0.03	<0.03	余		<3	30~45

表 6.2-4 标准粉末冶金不锈钢的成分

材料牌号	化学成分（质量分数）/%
------	--------------

	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	S	C	P	Mo	N	Nb
奥氏体类											
SS-303N1, N2	余量	17~19	8~13	0~2	0~1	0.15~0.3	0~0.15	0~0.2	-	0.2~0.6	-
SS-303L	余量	17~19	8~13	0~2	0~1	0.15~0.3	0~0.03	0~0.2	-	0~0.03	-
SS-304N1, N2	余量	18~20	8~12	0~2	0~1	0~0.03	0~0.08	0~0.045	-	0.2~0.6	-
SS-304L	余量	18~20	8~12	0~2	0~1	0~0.03	0~0.03	0~0.045	-	0~0.03	-
SS-316N1, N2	余量	16~18	10~14	0~2	0~1	0~0.03	0~0.08	0~0.045	2~3	0.2~0.6	-
SS-316L	余量	16~18	10~14	0~2	0~1	0~0.03	0~0.03	0~0.045	2~3	0~0.03	-
铁素体或马氏体类											
SS-409L	余量	10.5~11.75	-	0~1	0~1	0~0.03	0~0.03	0~0.04	-	0~0.03	8XC-0.8
SS-410	余量	11.5~13.5	-	0~1	0~1	0~0.03	0~0.25	0~0.04	-	0.2~0.6	-
SS-410L	余量	11.5~13.5	-	0~1	0~1	0~0.03	0~0.03	0~0.04	-	0~0.03	-
SS-430N2	余量	16~18	-	0~1	0~1	0~0.03	0~0.08	0~0.04	-	0.2~0.6	-
SS-430L	余量	16~18	-	0~1	0~1	0~0.03	0~0.03	0~0.04	-	0~0.03	-
SS-434N2	余量	16~18	-	0~1	0~1	0~0.03	0~0.08	0~0.04	0.75~1.2	0.2~0.6	-
SS-434L	余量	16~18	-	0~1	0~1	0~0.03	0~0.03	0~0.04		0~0.03	-

表 6.2-5 不同类别粉末冶金不锈钢的特性

牌号	说明	特性
303L	易切削奥氏体类	用于需要较多后续机加工的零件。具有高强度和硬度。具有一定的耐蚀性。加入硫以改善可切削性
303LSC Ultra 303L ^①	对比 303L 提高了耐蚀性	用铜和锡改性的 303L，具有 303L 的所有性能，但改善了耐蚀性。综合了耐切削性和中等耐蚀性
304L	基本奥氏体类	最经济的奥氏体类。当材料成本占总制造成本的大部分时采用。具有比 303L 更好地耐蚀性，可切削性佳。加铜和锡改性 304L（304LSC 和 Ultra 303L）耐蚀性改善
316L	标准奥氏体类	具有比 304L 更好的耐蚀性和可切削性。经细加工能够满足更苛刻用途对于耐蚀性的要求，加铜和锡改性 316L 具有比 316L 更好地耐蚀性
317L	高级奥氏体类	这是较高钼含量的奥氏体类，具有优越的耐蚀性，特别是抗裂隙腐蚀（超过 326LSC 和 Ultra 316L）
SS-100	超优奥氏体类	高合金奥氏体类，其耐蚀性超过其他所有粉末冶金不锈钢类。其耐蚀性与铸锻 316L 相当。在布什最佳烧结气氛下烧结时，与其他粉末冶金不锈钢比较，耐蚀性稍有损失
409L	可焊铁素体类	可焊不锈钢类，含有防止敏化的铌。不推荐在此类钢中添加碳。是磁性合金，具有好的韧性和还算好的耐蚀性
410L	标准铁素体/马氏体类	加入少量碳，铁素体钢可以容易地转化为马氏体钢，使其能热处理。在铁素体状态是韧性的，可机加工，而在马氏体状态是硬的，韧性降低，作耐磨用途。两种状态均为磁性，其马氏体状态是在所有粉末冶金不锈钢中耐蚀性最差
430/434L	高级铁素体类	要求一定耐蚀性的应用，但要求经济和磁性，而不宜采

		用奥氏体类时。在标准成分的碳和氮水平之内（表 6.2-26），这类钢通常不能转变为马氏体钢。其颜色似铬，耐蚀性比 410L 好。可切削性比 410L 稍好
--	--	---

① LSC 和 Ultra 是美国 QMG 和 Ametek 相应的专利牌号

表 6.2-6 标准粉末冶金不锈钢的力学性能

材料牌号	最小值		典型值										
	屈服强度 /MPa	伸长率 (25.4mm) /%	拉伸性能			弹性常数		无缺口夏比冲击功	横向断裂强度 /MPa	压缩屈服强度 (0.1%) /MPa	硬度 HRC		密度/g •cm ⁻³
			极限强度 /MPa	屈服强度 (0.2%) /MPa	伸长率 (25.4 mm) /%	弹性模数 /GPa	泊松比				宏观 (表现)	微观 (换算)	
400 系列 (铁素体和马氏体) 类													
SS-410-90HT	620	0	720		<0.5	125	0.25	3	780	640	23HRC	55 HRC	6.5
SS-410L-20	140	10	330	180	16	165	0.27	68	N/A	190	45HRB	N/A	6.9
SS-430N2-28	190	3	410	240	5	170	0.27	34	N/A	230	70 HRB	N/A	7.1
SS-430L-24	170	14	340	210	20	170	0.27	108	N/A	230	45 HRB	N/A	7.1
SS-434N2-28	190	4	410	240	8	165	0.27	20	N/A	230	68 HRB	N/A	7.0
SS-434L-24	170	10	340	210	15	165	0.27	88	N/A	230	50 HRB	N/A	7.0
300 系列奥氏体类													
SS-303N1-25	170	0	270	220	0.5	105	0.25	5	590	260	62 HRB	N/A	6.4
SS-303N2-35	240	3	380	290	5	115	0.25	26	680	320	63 HRB	N/A	6.5
SS-303N2-38	260	6	470	310	10	140	0.27	47	N/A	320	70 HRB	N/A	6.9
SS-303L-12	80	12	270	120	17.5	120	0.25	54	570	140	21 HRB	N/A	6.6
SS-303L-15	100	15	330	170	20	140	0.27	75	N/A	200	35 HRB	N/A	6.9
SS-304N1-30	210	0	300	260	0.5	105	0.25	5	770	260	61 HRB	N/A	6.4
SS-304N2-33	230	5	390	280	10	115	0.25	34	880	320	62 HRB	N/A	6.5
SS-304N2-38	260	8	480	310	13	140	0.27	75	N/A	320	68 HRB	N/A	6.9
SS-304L-13	90	15	300	120	23	120	0.25	61	N/A	150	30 HRB	N/A	6.6
SS-304L-18	120	18	390	180	26	140	0.27	108	N/A	190	45 HRB	N/A	6.9
SS-316N1-25	170	0	280	230	0.5	105	0.25	7	740	25	59 HRB	N/A	6.4
SS-316N2-33	230	5	410	270	10	115	0.25	38	860	300	62 HRB	N/A	6.5
SS-316N2-38	260	8	480	310	13	140	0.27	65	N/A	320	65 HRB	N/A	6.9
SS-316L-15	100	12	280	140	18.5	120	0.25	47	550	150	20 HRB	N/A	6.6
SS-316L-22	150	15	390	210	21	140	0.27	88	N/A	200	45 HRB	N/A	6.9

注：1.N1-氮合金化钢种，强度高，伸长率低（1149℃分解氨中烧结）；N2-氮合金化的钢种，强度高，中等伸长率（1088℃分解氨中烧结）；L-低碳钢种，强度较低，伸长率最高（1288℃部分真空中烧结，冷却时避免吸收氮）。

表 6.2-7 1230℃烧结的马氏体不锈钢的性能

工艺	410 材料		420 材料	
碳/%	0	0.15	0.15	0.3
气氛	分解氨	H2	分解氨	H2
烧结后在 305℃回火				
极限拉伸强度 /MPa	660	690	900	900
屈服强度/MPa	580	570	830	830
伸长率/%	1.1	1.2	0.5	0.8
表观硬度 HRC	30	27	30	28
颗粒硬度 HV (HVC)	606 (55)	656 (58)	678 (59)	715 (61)
热处理态极限拉伸强度/MPa		830	900	970
屈服强度/MPa		720	830	900
伸长率/%		1.5	0.5	0.8
表观硬度 HRC		30	32	33
颗粒硬度 HV (HVC)		609 (55)		628 (56)

表 6.2-8 410L 不锈钢的软磁性能和力学性能

磁学性能					碳/%	氧/%	氮/%	烧结密度 /g·cm ⁻³	烧结气氛	时间 /min	温度/℃	屈服应力/MPa	极伸 /
B _m 250e/G	B _m 1000e/G	B _m 150e/G	B _m 250e/G	B _m 1000e/G									
10900	13000	9200	9400	10500	0.0057	0.21	0.0021	7.1	真空	45	1260	205	
2800	8100	1100	2100	6300	0.0144	0.18	0.11	6.9	氢	45	1290	430	
600	5000	300	400	3800	0.0667	0.26	0.28	6.5	75%H ₂ +25%N ₂	45	1250		
700	4500			3500	0.0293	0.2703	0.4138	6.8	分解氨	45	1120		
900	5200			4200	0.0424	0.2771	0.136	6.9	分解氨	45	1200		
2350	7450			5800	0.283	0.3	0.14	7.1	分解氨	45	1290		
600	4000			2800	0.0462	0.2176	0.2475	6.8	氢	45	1120		
800	5600			4200	0.0504	0.2546	0.226	7	氢	45	1200		
5600	10200			7000	0.0094	0.225	0.0808	7.1	氢	45	12900	295	

注：1.B_m 最大磁感应强度，B_r 残余磁感应强度；
2.1G=10⁻⁴T；10e=79.5775A/m

表 6.2-9 434L 不锈钢的软磁性能和力学性能

磁学性能					碳/%	氧/%	氮/%	烧结密度 /g·cm ⁻³	烧结气氛	时间 /min	温度/°C	屈服应力/MPa	延伸率/%
B _m 250e/G	B _m 1000e/G	B _m 150e/G	B _m 250e/G	B _m 1000e/G									
10100	12000	8000	8400	9300	0.0068	0.24	0.0037	7	真空	45	1260	200	
6100	9700	3800	4400	6400	0.0369	0.2372	0.06	6.9	氢	45	1290		
2300	6300	1100	1700	4600	0.0239	0.3	0.21	6.8	75%H ₂ +25%N ₂	45	1250		
350	2200			1600	0.0294	0.3118	0.6438	6.7	分解氨	45	1120	115	
600	3400			2500	0.0353	0.3071	0.172	6.8	分解氨	45	1200		
4950	8700			5900	0.009	0.3	0.12	7	分解氨	45	1290	470	
2200	6200			4500	0.0301	0.2774	0.2619	6.7	氢	45	1120	150	
5200	8500			5800	0.0108	0.2632	0.1566	6.9	氢	45	1200	165	
6500	10400			6700	0.0156	0.2489	0.1266	7.1	氢	45	1290		

注：同表 6.2-8

表 6.2-10 两种铁素体不锈钢的磁学和力学性能

磁学和力学性能	410L	434L
150e, G 应用场的磁感应	10500	9700
残余磁感/G①	8000	7700
相对最大磁导率	1900	1600
矫顽力/Oe②	1.8	1.8
烧结密度/g·cm ⁻³	7.25	7.35
极限拉伸强度 (0.2%) /MPa	365	400
屈服强度/MPa	230	255
伸长率/%	25	28
表观硬度 HRB	54	56
残余元素 (质量分数) /%		
C	0.001	0.009
S	0.004	0.009
N	0.007	0.015
O	0.003	0.012

注：同表 6.2-8

表 6.2-11 粉末冶金不锈钢各类零件的应用市场

零件	合金
航空航天	
座位靠背托架滑板	316 L
厨房碰锁	316 L
喷气飞机燃料的加油叶轮	316 L
泡沫发生器	316 L

<p>器具</p> <p>自动洗碟机零件</p> <p>自动洗衣机零件</p> <p>垃圾处理零件</p> <p>壶手柄</p> <p>咖啡过滤器</p> <p>电工刀</p> <p>混合器</p> <p>罐头开启工具</p>	<p>304L</p> <p>304L</p> <p>410L</p> <p>316L</p> <p>316L-Si</p> <p>316L</p> <p>303L</p> <p>410L</p>
<p>汽车</p> <p>后视镜托架</p> <p>制动器零件</p> <p>座位安全带闭锁</p> <p>挡风玻璃刮水器齿轮</p> <p>排气系统法兰盘</p> <p>传感器毂</p> <p>ABS 传感器环</p> <p>刹车部件</p> <p>挡风玻璃刮水器支架</p> <p>歧管加热控制阀</p>	<p>316L, 434L</p> <p>434L</p> <p>304L</p> <p>410L</p> <p>409L, 434L</p> <p>409L, 434L</p> <p>409L, 434L</p> <p>434L</p> <p>316L</p> <p>304L</p>
<p>建筑和结构</p> <p>铅锤测量的夹具</p> <p>垫片和垫圈</p> <p>自动浇灌系统喷嘴</p> <p>喷头</p> <p>窗户的金属构件</p> <p>恒温器</p>	<p>303L</p> <p>316L</p> <p>316L</p> <p>316L</p> <p>304L, 316L</p> <p>410L</p>
<p>医疗器械</p> <p>离心推进的连接器</p> <p>牙科设备</p> <p>助听器</p> <p>麻醉药蒸发器</p>	<p>316L</p> <p>304 L</p> <p>316 L</p> <p>316 L</p>
<p>船舶</p> <p>螺旋桨止推毂</p> <p>凸轮系缆枕</p>	<p>316 L</p> <p>304 L</p>
<p>化工用品</p> <p>过滤器</p> <p>高耐腐蚀过滤器</p> <p>筒式组件</p>	<p>304L-Si, 316L</p> <p>830</p> <p>316 L-Si</p>
<p>电气和电子元件</p> <p>限位开关</p> <p>G-基座马达套管</p> <p>旋转开关</p> <p>磁性离合器</p>	<p>410 L</p> <p>303 L</p> <p>316 L</p> <p>410 L,4400A</p>

蓄电池螺母 电气试验试样夹头	830 316 L
金属构件 锁零件 带螺纹的紧固件 紧固件 快速分离杆 隔板和垫片	304 L,316 L 303 L 316 L 303 L,316 L 316 L
工业 水表和煤气表零件 液体和气体过滤器 燃料记录表 燃料流量计量器 管法兰夹钳 高分子聚合物过滤器	316 L 316 L-Si 303 L 410 L 316 L
装饰品 硬币、奖章、大奖章 表壳 表带零件	316 316 L 316 L
办公机械 非磁性卡片挡板 口述记录机开关 计算机按钮	316 L 316 L 316 L
娱乐器材 钓鱼竿导钩 钓鱼竿传动棘轮 照相机 软饮料出售机 旅行拖车的水泵	304 L,316 L 316 L 316 L 316 L 830,316 L 316 L
农业 杀菌剂喷雾设备	316 L

表 6.2-12 全致密粉末冶金不锈钢的典型力学性能（试样经高温烧结）

合金	状态	极限拉伸强度 /MPa	0.2%屈 服强度 /MPa	伸长率 (25mm) /%	硬度	冲击强 度/J	密度 /g· cm ⁻³	理论 密度/g ·cm ⁻³
Ultimet04, 34	烧结	590	250	36	80HRB	10.8 ^①	7.8	7.9
Ultimet16, 316	烧结	690	310	23	94 HRB	8.1 ^①	7.7	7.8
	固溶处理和淬 火	680	330	45	90 HRB	5.4 ^①	7.7	7.8
Ultimet40C, 440C	烧结	-	-	-	20~30 HRC	2.7 ^②	7.6	7.7
	淬火和回火	-	-	-	50~60	2.7 ^②	7.6	7.7

					HRC			
--	--	--	--	--	-----	--	--	--

① 比 V 缺口；

② 无缺口。

表 6.2-13 全致密不锈钢的典型力学性能

性能	粉末冶金材料	锻材
由 15.5mm 挤压出的 317LM 管 (气雾化粉末, 装包套、冷等静压和挤压)		
极限拉伸强度/MPa	690	690
0.2%屈服强度/MPa	325	355
面缩率/%	71	73
伸长率(25mm)	47	50
316 型(热等静压)		
极限拉伸强度/MPa	580	-
0.2%屈服强度/MPa	290	-
伸长率(25mm)	58	-

表 6.2-14 用 STAMP 法和电渣重熔制造的 422 不锈钢的性能比较(用于制造燃气涡轮的环)

工艺类别	拉伸强度伸 /MPa	屈服强度 (0.2%) 残留 变形/MPa	伸长率在 50mm 内/%	断面收缩率 /%	冲击能 ^① /J
STAMP 法 ^②	830~840	650~680	19~21	62~69	70~80
电渣重熔 ^②	840	670	19	58	75

① 示向试验方向的值。STAMP 法制造的制品在轴向试验方向的冲击能 65~70J；电渣重熔钢轴向试验方向的冲击能值为 50J。

② 轴向与切向试验方向。

表 6.2-15 用粉末冶金与普通方法制造的铁素体-奥氏体不锈钢锻件的性能比较

工艺类别与 试验方向	拉伸强度 /MPa	屈服强度 (0.2%) 残留 变形/MPa	伸长率在 50mm 内/%	断面收缩率 /%	冲击能 ^① /J
STAMP					
切向	680	510	30	62	37
径向	670	500	28	58	32
热等静压与锻造					
切向	670	490	29	62	37
径向	660	490	28	58	32
电渣重熔					
切向	630	480	26	54	32
径向	620	470	22	46	28

表 6.2-16 世界上生产粉末冶金高速钢主要公司及其产量

公司名称	国别	牌号	产量/t·a ⁻¹
------	----	----	----------------------

Crucible Materials Co	美国	CPM	约 7000
Carpenter Technology Corporation	奥地利	Micromelt PM	约 4000
Bother/Uddeholm corporation	瑞典	Vanadis/Isomatrix PM	约 4000
Erasteel Kloster AB	瑞典	ASP	约 2000
Bodycote Powdermet AB	日本	APM	约 2000
Hitachi Metals	日本	HAP	约 1000
Daido Steel	日本	DEX	约 500
Nachi Fujikoch	日本	FAX	
Kobe Steel	日本	KHA	约 2000

表 6.2-17 各种生产工艺对高速钢特性的影响

特性		气雾化热等静压工艺	水雾化烧结工艺	铸锻工艺
显微组织	碳化物尺寸	+	○	—
	均匀性	+	+	—
	冶金清洁度	+		○
力学性能	韧性横向	+	○	—
	纵向	+	+	+
	强度横向	+	○	—
	纵向	+	+	+
工艺性能	可磨削性	+	○	—
	热处理变形	+	+	—
	硬度均匀性	+	+	—
经济性	材料利用率	○	+	—
	能耗	—	+	—
	价格	—	○	+

注：+好、○中、—差

表 6.2-18 气雾化工具钢粉的标称成分组成

合金	成分									
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Co	S	Fe
M2S	1	0.3	0.3	4.15	6.4	5	1.95	-	0.12	余量
M4	1.35	0.3	0.3	4.25	5.75	4.5	4	-	-	余量
M42	1.1	-	-	3.75	1.5	9.5	1.15	8	-	余量
T15	1.55	0.3	0.3	4	12.25	-	5	5	-	余量
CPM76	1.5	0.3	0.3	3.75	10	5.25	3.1	9	-	余量
CPM10V	2.45	0.5	0.9	5.25	-	1.3	9.75	-	0.07	余量
CPM Rex25	1.8	0.3	0.35	4	12.5	6.5	5	-	0.07	余量
M3 型 2	1.27	0.3	0.3	4.2	6.4	5	3.1	-	-	余量
ASP302	1.27	0.3	0.3	4.2	6.4	5	3.1	8.5	-	余量
ASP602	2.3	0.3	0.4	4	6.5	7	6.5	10.5	-	余量

表 6.2-19 水雾化高速工具钢的成分和性能

性能	M2	M3 型 2	M42	T15
成分 (质量分数) /%				
碳	0.85	1.2	1.1	1.6
铬	4.15	4.1	3.75	4.4
钨	6.3	6	1.5	12.5
钼	3	5	9.5	-
钒	1.85	3	1.15	-
钴	-	-	8	5
铁	余	余	余	余
氧含量/ 10^{-6}	<1000	<1000	<1000	<1000
物理性能				
松装密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.2	2.1	2.3	1.8
振实密度/ $g \cdot cm^{-3}$	3.1	3	3.3	2.4
流速/ $s \cdot (50g)^{-1}$	45	40	30	50
筛分析 (泰勒) /%				
+100 目 ($<150\mu m$)	-	-	-	-
-100+150	13	13	13	13
-150+200	22	22	22	22
-200+325	30	30	30	30
-325 ($<44\mu m$)	35	35	35	35
生坯密度/ $g \cdot cm^{-3}$				
620MPa 压制	6.2	6	6	6.15
830 MPa 压制	6.6	6.4	6.3	6.55
生坯密度/ $g \cdot cm^{-3}$				
620 MPa 压制	23	24	21	43
830 MPa 压制	52	45	41	69

① 坯性能是用模壁润滑压制的压坯测定的。

表 6.2-20 几种高速钢的通常的烧结温度和组成

合金	烧结温度 ^① /°C	组成 (质量分数) /%						相对烧结性 ^②
		C	Cr	Mo	W	V	Co	
M32	1245	2270	0.85	4.2	5	6.3	1.9	
M2(高碳)	1240	2260	1	4.2	5	6.3	1.9	
M3/2 型	1255	2290	1.2	4.1	5	6	3	
M34	1260	2300	1.32	4.5	4.5	5.5	4	
M35	1225	2240	1.15	4.2	5.1	6.4	2	5
M42	1220	2230	1.1	3.8	9.5	1.5	1.2	8

T15	1265	2310	1.6	4.4		12.5	4.8	5
-----	------	------	-----	-----	--	------	-----	---

① 似的烧结温度，粉末在常压下退火和 830MPa 压力下压制。

② 1 表示最容易烧结，5 表示最难烧结，难易程度依序增加。

表 6.2-21 工业生产的 M2、M35 和 T15 烧结高速钢的典型力学性能

性能	牌号		
	M2	M32	T15
密度/g·cm ⁻³	8.05~8.2	8.05~8.2	8.15~8.3
极限拉伸强度 ^① /MPa	750~800	770~820	770~830
延伸率 ^① /%	12~14	6~9	3~6
极限拉伸强度 ^② /MPa	750~2000	770~2000	770~2000
硬度 HRC	62~65	63~66	64~67

① 充分退火。

② 决定于热处理。

表 6.2-22 ASP23 钢的奥氏体化温度

硬度 ^① HRC	温度 ^② /°C	盐浴 ^③ /min·in-1	其他炉子 ^④ /min
58	1010	15	30
60	1050	12	25
62	1090	10	20
64	1135	8	15
66	1175	6	10

① 在 560°C 下 3 次回火后，硬度值变化范围为 ±1%。

② 当使用真空炉或马沸炉时，要将淬火温度比推荐的温度提高 14°C。

③ 预热后，总得浸没时间，以 min/in 计（注 1in=25.4mm）。

④ 工具达到最高温度后的保温时间（min）。

表 6.2-23 粉末冶金高速钢标称成分

商业名称	牌号				成分 (质量分数) /%					Weq	硬度 HRC
含 3%~4%V 的耐磨损的高速钢											
ASP23,APM23 CPM M3,MicromeltM3, FAX31, DEX20,KHA32	M3	T11323	SKH53	1.3344	1.3	6.25	5	3		16.25	65~67
CPM M4,Micromelt M4, Isomatrix S690,HAPM4	M4	T11304	SKH54		1.4	5.75	5	4		15.75	65~67
含 5%~12%Co 和 2%~6.5%V 的耐热超高速钢											
CPM M35	M35		SKH55	1.3243	1	6	5	2	5	16	65~67
CPM REX54					1.5	5.75	5	4	5	15.75	66~68
ASP30,APM30,CPM REX45,Micromelt HS30 Isomatrix S790, Fax38,DEX40, HAP40,KHA30					1.3	6.25	5	3	8	16.25	66~68
CPMT15,Micromelt T15, FAX55,DEX61, HAPT15,KHA50	T15	T12015	SKH10	1.3202	1.6	12		5	5	12	66~68
CPM REX76 Micromelt HS76	M48	T11348			1.5	10	5.25	3	8.5	20.5	67~69
HAP50,DEX62					1.5	8	6	4	8	20	67~69
Isomatrix S390					1.6	11	2	5	8	15	66~68
ASP60,APM60, KHA60				1.3241	2.3	6.5	7	6.5	10.5	20.5	67~69
DEX80					2.1	14	6	5.5	12	26	68~70
HAP70					2.2	12	9	5	12	30	69~71
无钴高速钢											
CPM REX20	M62	T11362			1.3	6.25	10.5	2		27.25	66~68
CPM REX25	M61	T11361			1.8	12.5	6.5	5		25.5	67~69

注：所有粉末冶金高速钢大型材均含 4%Cr 以得到淬硬性。硅、锰、硫的最高含量一般分别为 0.5%、0.3%和 0.03%。对于要求改善可切削性的特别用途，硫含量增至 0.1%或 0.22%，并相应增加锰含量。

表 6.2-24 CPM Rex T15 钢的抗回火稳定性

状态	原始 ^①	595℃×2h	595℃× (2+2+4h)	650℃×2h	650℃× (2+2+4h)
硬度 HRC	67	65.5	64.5	61	54.5

① 1230℃淬火，550℃回火 2h×3 次。

表 6.2-25 CPM Rex T15 钢与常规 T15 钢力学性能对比

牌号	淬火温度/℃	硬度 HRC	抗弯强度/MPa
----	--------	--------	----------

CPM RexT15	1230	67	4670
T15	1230	66	2150

表 CPM Rex 25 高速钢的抗回火稳定性

状态	原始 ^①	595℃×2h	595℃× (2+2+4h)	650℃×2h	650℃× (2+2+4h)
硬度 HRC	68	66.5	65.5	62.5	55

① 1230℃淬火，550℃回火 2h×3 次。

表 6.2-27 CPM Rex25 与 CPM Rex T15、常规 T15 钢力学性能对比

钢号	淬火温度/℃	硬度 HRC	C-缺口冲击值/J	抗弯强度/MPa
CPM Rex25	1230	68	12.9	3640
	1200	66.5	17	4270
CPM Rex T15 T15	1180	66	15	4300
	1230	67	19	4650
	1230	66	5.4	2140

注：淬火盐炉加热 4min，油冷，回火 550℃3 次

表 6.2-28 CPM Rex20 钢、CPM M42 钢、M42 钢的抗回火稳定性

钢号	热处理硬度 ^① HRC	硬度 HRC			
		595℃	595℃	650℃	650℃
		2h	2+2h	2h	2+2h
CPM Rex20	67.5	66	65.5	60	57
CPM M42	67.5	66.5	65	59	55.5
M42	67.5	65	65	59	55

① 1190℃淬火，550℃×2h×3 次回火

表 6.2-28 CPM Rex20 钢、CPM M42 钢及 M42 钢力学性能对比

钢号	淬火温度/℃	硬度 HRC	抗弯强度/MPa	C-缺口冲击值/J
CPM Rex20	1190	67.5	3990	16.3
CPM M42	1190	67.5	3990	16.3
M42	1190	67.5	2550	6.8

注：淬火盐浴加热 1min，油冷，550℃回火 3 次

表 6.2-30 M2、M4 和 T15 的纵向强度比较

材料	硬度 HRC	C-缺口冲击值/J	弯曲断裂强度
普通 M2	65	18	3820
普通 M4	64	14	3590
CPM M4	65	33	5380
普通 T15	66	5	2150
CPM T15	67	19	4660

表 6.2-31 粉末冶金冷加工工具钢的成分

钢	名称 AISI	商业牌号	成分 (质量分数) /%				
			C	Cr	Mo	W	V
粉末冶金冷作工具钢							
PM 3V		CPM 3V	0.8	7.5	1		2.75
PM M4	M4	CPM M4HC	1.4	4	5.25	5.75	4
PM 8Cr4V		Vanadis 4	1.5	8	1		4
PM 12Cr4V	D2	K190 Pm	2.3	12	1		4
PM 9V		CPM9V	1.8	5.25	1.3		9
PM 10V	A11	CPM10V	2.45	5.25	1.3		9.75
PM 8Cr10V		Vanadis10	2.9	8	1.5		9.8
PM15V		CPM15V	3.5	5.25	1.3		14.5
PM 18V		CPM18V	3.9	5.25	1.3		17.5
普通生产 (铸锭) 的冷作工具钢							
A2	A2		1	5.25	1.15		0.3
D2	D2		1.55	11.5	0.8		0.9
D7	D7		2.35	12	1		4

表 6.2-32

钢	商业牌号	成分 (质量分数) /%				
		C	Cr	V	Mo	其余
粉末冶金钢						
PM 14Cr-9V	CPM420 V (9V)	2.3	14	9	1	
PM14 Cr-12V	CPM 420V (12V)	2.85	14	12	1	
PM 14Cr-15V	CPM 420V (15V)	3.25	14	14.5	1	
PM 17Cr-6V	CPM 440VM	1.9	17	6	1	
PM C17r-3V	Elmax PM	1.7	17	3	1	
PM 20Cr-4V	Isomatrix M390	1.9	20	4	1	0.6%W
PM 24Cr-9V	Supracor	3.75	24	9	3	
普通钢						
T440C		1.05	17		0.5	
D2		1.55	11.5	0.8		

表 6.2-33 优质和硫化 H13 工具钢的成分

材料	成分 (质量分数) /%						
	C	Mn	S	Si	Cr	Mo	V
NADCA PQ H13	0.4	0.35	0.005max	1	5.25	1.35	1
普通 H13-S	0.38	0.72	0.15	0.96	5.2	1.36	1
粉末冶金 H3-S	0.36	0.34	0.17	1	5.5	1.6	0.85

表 6.2-34 优质和硫化 H13 工具钢的横断夏比 V-缺口冲击试验

材料	硬度 HRC	夏比 V 凹口冲击功/J
NADCA PQ H 13	46	13.5
普通 H13-S	45	2.7
PMH13-S	45	11.5

表 6.3-1 铜基粉末的应用

应用	粉末类型
汽车和机械设备 轴承和衬套 制动闸和衬面 衬套 控制板/控制仪器 平衡锤	青铜、铜-铅、铜-铅-锡 铜、黄铜、铜-铅、铜-铅-锡 青铜 镍-银 铜-钨
化学和工业应用 化学催化剂 过滤器 火焰消除器 杀菌剂添加剂 土壤改善 阀和泵	铜 青铜 青铜 铜 铜 铜-镍
涂层与颜料 防污颜料 导电颜料和塑料 装饰性颜料 油漆 机械镀覆 喷涂 真空镀金属	铜 铜、黄铜 铜、黄铜、青铜 黄铜、青铜 铜、黄铜 铜、黄铜 铜
建筑五金构件 导电和无火花地板 装饰塑料 家庭用水过滤器	铜 铜、青铜、黄铜 黄铜

锁和钥匙 螺母 管子连接元件	黄铜、青铜 黄铜 铜
电工和电子技术 电刷 电刷座 触头 散热器 印刷线路 半岛湾接线柱座 电话零件 开关和接触器零件 白炽灯 X 射线, 微波管零件	铜 锌白铜 弥散强化铜 铜 铜 铜, 弥散强化铜 黄铜、青铜 铜、黄铜 氧化物弥散强化铜 氧化物弥散强化铜
润滑剂 管子连接的抗咬合器 铜润滑剂 塑料填充金属 自润滑含油零件	铜 铜 铜、青铜、黄铜 青铜
制造和切削加工 砂轮黏结剂 铜纤焊料 电火花加工 电化学加工 电阻焊电极	铜 铜、青铜、黄铜 铜 铜 铜、弥散强化铜
军械 穿甲弹心 引信零件 炮弹带	铜 黄铜 铜、黄铜
其他设备和应用 办公机械 硬币、轨道、纪念章 无线电子装置 指甲抛光剂 草场和园艺设备 照相设备	黄铜 铜-镍合金 铜 铜 青铜 青铜、黄铜、锌白铜

表 6.3-2 工业铜粉的性能

粉末类型	含量 (质量分数) /%			颗粒形状	表面面积
	铜	氧	酸不溶物		
电解	99.1~99.8	0.1~0.8	0.03 最大	树枝状	中等至大
氧化物还原	99.3~99.7	0.2~0.6	0.03~0.1	不规则多孔状	中等
水雾化	99.3~99.7	0.1~0.3	0.01~0.03	不规则到球	低

5	0	5				5								
---	---	---	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--

① 用模壁润滑测量的

② Camey 流动性

表表 6.3-5 典型的黄铜、青铜、锌白铜合金的物理性能

性能	黄铜①	青铜②	锌白铜①②
筛分析/%			
+100 目	2max	2max	2max
-100+200	15~35	15~35	15~35
-200+325	15~35	15~35	15~35
-325	60max	60max	60max
物理性能			
松装密度/g·cm-3	3~3.2	3.3~3.5	3~3.2
流动性/s·(50g)-1	24~26	-	-
力学性能			
于 415MPa 下的生坯	7.6	7.4	7.6
密度/g·cm-3			
于 415MPa 下的生坯	10~12	10~12	9.6~11
强度/MPa			

① 名义目数；黄铜，-60 目；青铜，-60 目；锌白铜，-100 目。

② 不含铅

③ 添加 0.5%硬脂酸锂润滑剂。

表 6.3-6 不同粒度铜粉的压制-烧结坯的性能

粒度/ μm		压制压力 /MPa	压坯密度/g· cm-3	烧结坯	
				密度	硬度
				/g·cm-3	HRH
铜	2	69	4.95	7.72	29
铜	138	5.54	7.8	38	
	275	6.39	7.95	51	
	414	6.94	8.18	61	
	44-74	69	5.38	6.58	1
		138	6.07	7.04	12
		275	6.88	7.76	31
	414	7.65	7.98	42	
铜	2	69	5.06	6.24	26
锡	44-74	138	5.75	6.24	-
		275	6.52	6.34	-
		414	7.01	6.4	33
铜和锡	44-74	69	5.9	6.12	14
		138	6.45	6.18	-
		275	7.25	6.13	-
		414	7.65	6.04	17

表 6.3-7 各种铜粉末冶金零件的标准压制压力和压缩比

粉末冶金零件	压制压力/MPa	压缩比
黄铜零件	414~689	2.4~2.6 到 1
青铜轴承	193~275	2.5~2.7 到 1
铜-石墨碳刷	345~414	2~3 到 1
纯铜	206~248	2.6~2.8 到 1

表 6.3-8 铜的扩散常数

扩散元素	体积扩散		表面扩散	
	$Dv_0/cm^2 \cdot s^{-1}$	$Qv/kJ \cdot mol^{-1}$	$Ds_0/cm^2 \cdot s^{-1}$	$Qs/kJ \cdot mol^{-1}$
铜(自扩散)	0.6~0.78	211~213	1000	163
铜中的镍	6.5×10^{-5}	125	-	-
铜中的锡	4.1×10^{-3}	130	-	-
铜中的锌	2.4×10^{-3}	125	-	-
青铜	6×10^{-6}	105	800	49

表 6.3-9 铜粉氧化物层厚度对压制-烧结体强度的影响

粉末上氧化膜的厚度/mm	烧结体的抗拉强度 ^① /MPa
粗铜粉	
0	29
40	51
80	38
120	21.5
160	15.7
200	7.8
细铜粉	
0	120
20	130
60	143
100	137
140	129
180	122
220	114

① 在 $4.4tf/cm^2$ 下压制 ($1tf/cm^2=98MPa$)；在氢保护下，于 $600^\circ C$ 烧结半小时。

表 6.3-10 铜合金与钢的典型烧结温度和烧结时间

材料	温度/ $^\circ C$	时间/min
青铜	760~870	10~20
铜	840~900	12~45
黄铜	840~900	10~45
铁、铁-石墨等	1010~1150	30~45
镍	1010~1150	30~45
不锈钢	1095~1285	30~60

表 6.6-11 烧结青铜含油轴承的应用

汽车零件 起动机 照明发电机 油泵和水泵 风挡刮水器 防护罩和窗玻璃提升器 加热器 空调器 电动天线 电动座椅调节器 家用电器 洗盘机 衣服干燥机 洗衣机 缝纫机 真空除尘器 电冰箱 食品搅拌机 农产和草坪设备 拖拉机 联合收割机	农产和草坪设备 拾棉花机 剪草机 绳锯切割机 链锯 电子消费品 电唱机 自动换盘片机 磁带录音机 商务机械 打印机 计算机 复印机 工业设备 纺织机 包装机 电扇 手提电动工具 钻床 锯床
---	---

表 6.3-13 铜基粉末冶金结构材料的性能（黄铜、青、锌白铜）

材料牌号①	标准值									
	最小 屈服 强度	极限 抗拉 强度	0.2% 屈服 强度	伸长 率 25mm 内	杨氏 弹性 模量	横向 断裂 强度	夏氏 无缺 口试 样冲 击强 度	密度	压缩 屈服 强度	表观 硬度
	MPa	MPa	MPa	%	GPa	MPa	J	/g· cm ⁻³	MPa	HRH
CZ-1000-9	62	124	65	9	52	270		7.6		65
CZ-1000-10	70	138	76	10.5	69	315		7.9		72
CZ-1000-11	75	159	83	12		360		8.1		80
CZP-1002	②									
CZP-2002-11	75	159	93	12	69	345	38	7.6	103	75
CZP-2002-12	83	207	110	14.5	83	480	76	8	110	84
CZ-3000-14	97	193	110	14	62	425	31	7.6	83	84
CZ-3000-16	110	234	131	17	69	590	51.5	8	90	92
CZP-3002-13	90	186	103	14	62	395		7.6		80
CPZ-3002-14	97	217	115	16	69	490		8		88

CNZ-1818-17	117	234	140	11	75	500	32.5	7.9	172	90
CNZP-1816										
CT-1000-139(复压)	90	152	110	4	38	310	5.4	7.2	186	82

① 后缀数字表示最小的屈服强度 Ksi 值。

② 补充的数据将列于 MPIF 以后版本的标准 35 中。

表 6.3-14 湿式和干式铜基摩擦材料的组成

国家	组成(质量分数)/%							应用
	Cu	Sn	Fe	Pb	石墨	MoS ₂	其他	
前苏联	65~80	7~9	4~7	5~10	3~8	-	2~4SiO ₂	湿, 干
	70	9	4	6	4	-	3SiO ₂ ;3 石棉	湿
	60	10	4	5	4	-	9 石棉, 8 电木粉	湿
东德	81.5	4.5	-	5	4	-	5 高铝红柱石	湿
	余量	-	-	5	12	-	8MgO;5Ti	湿, 干
美国	60~75	4~10	5~10	-	3~10	3~12	2~7SiO ₂	干
	52.5	-	-	7.5	-	-	5SiO ₂ ;15Bi	湿
	72	4.7	3.3	3.5	8.7	1.4	1.9SiO ₂ ;0.2Al ₂ O ₃	湿, 干
	72	7	3	6	6	-	3SiO ₂ ;4MoO ₃	干
	62	7	8	12	7	-	4 砂子	干
	74	3.5	-	-	16	-	2Sb;4.5SiO ₂	干
英国	余量	3~10	5~10	1~10	0.8	≤4	1.5~4SiO ₂	湿
西德	67.7	5.1	8	1.5	6.2	5	2.5SiO ₂ ;3Al ₂ O ₃	干
	余量	4~15	5~30	-	20~30	-	3~10Al ₂ O ₃	湿
瑞典	68.5	5.2	4.5	1.8	6.5	≤4	3.3SiO ₃ ;3Al ₂ O ₃	湿, 干
	68.5	8	4.5	3	6	6	4SiO ₂	湿, 干
意大利	68	5.5	7	9	6	-	4.5SiO ₂	湿, 干
奥地利	68	5	8	1.5	6.2	≤3	2.5SiO ₂ ;3Al ₂ O ₃	湿
	54.4	0.8	3.7	21.4	19	-	0.5S;0.04Mn	干

表 6.3-15 铜基电触头的组成、性能及应用

名义组成/%	制造方法 ①	密度/g•cm ⁻³		电导率 /%IACS	硬度	抗拉强度	断裂模数 /MPa	应用实例
		计算值	标准值					
碳化钨-铜								
50Cu	INF	11.39	11~11.27	42~47	90~100HRF	-	1103	油断路器的消弧触头, 电源变压器的摩擦闭合靴
40 Cu	INF	11.77	11.64	43	99 HRF	-	1241	
30 Cu	INF	12.78	12.65	30	38 HRC	-	-	
钨-铜								
75Cu-25W	PSR	10.37	9.45~10	50~79	35~60HRB	-	414	载流触头
70Cu-30W	-	10.7	10.45	76	59~66HRB	-	-	
65Cu-35W	-	11.6	1.4	72	63~69HRB	-	-	真空断路器

60Cu-40W	-	11.45	11.76	68	69~75HRB	-	-	油断路器、消弧触头 油断路器、重接 动开关、断弧触 点、抽头切换断弧 触点、接触器点、 接触器 断路器滚子、消弧
50Cu-50W	INF	12.3	11.9~11.96	45~63	60~81HRB	-	-	
44Cu-56W	INF	12.87	12.76	55	79 HRB	434	827-	
40Cu-60W	INF	13.29	12.8~12.95	42~57	75~86HRB	-	-	
35Cu-65W	INF	13.85	13.35	54	83~93HRB	-	-	
32Cu-68W	INF	14.2	13.95	50	90HRB	-	896	
30Cu-70W	INF	14.45	13.85~14.18	36~51	86~96HRB	-	1000	触点、抽头切换断 弧触点
26Cu-74W	INF	14.97	14.7	46	98HRB	621	1034	
25Cu-75W	INF	15.11	14.5	33~48	90~100HRB	-	-	真空转换开关、消 弧触点、油断路器
20Cu-80W	INF	15.84	15.2	30~40	95~105HRB	758	-	
15Cu-85W	PSR	16.45	16	20	190HV② 260 HV③	-	-	
13.4Cu-86.6W	INF	16.71	16.71	33	20HRC	621	1034	
10.4Cu-89.6W	INF	17.22	17.22	30	30HRCP	765	1138	

① PSR: 压制-烧结-复压; INF: 压制-烧结-熔渗;

② 退火;

③ 冷加工。

表 6.3-16 标准石墨-金属电刷材料的特性

牌号	名义组成	密度/g· cm ⁻³	电阻率/ Ω·m	最大电流 密度/A m ⁻²	标准电压 /V	肖氏硬度
261C	21Cu-79C	2.2	0.024	125000	<72	28
261D	35 Cu-79C	2.5	0.016	125000	<72	28
FQ	50Cu-50C	2.75	0.006	130000	<36	28
179P	65Cu-35C	3.5	0.0016	190000	<18	20
179V	75Cu-25C	4	0.0008	235000	<15	18
GHB	94 金属-6C	6	0.0003	235000	<6	6
GD	97 金属-3C	6.5	0.0001	235000	<6	5
22A-S	40Ag-60C	2.7	0.008	150000	<36	30
246	65Ag-35C	3.8	0.001	190000	<18	20
2-S	80Ag-20C	4.6	0.0008	235000	<9	23
1-S	93Ag-7C	7	0.0001	270000	<6	10

表 6.3-17 3 种弥散强化铜与无氧铜的物理性能

性能	材料			
	C15715	C15725	C15760	无氧铜
熔点/°C	1083	1083	1083	1083
密度/g·cm ⁻³	8.9	8.86	8.81	8.94
电阻率 20°C/MΩ·m	0.0186	0.0198	0.0221	0.017
电导率 (20°C) /%IACS	92	87	78	101
热导率 (20°C) /W·(m·K) ⁻¹	365	344	322	391
热膨胀系数(20~1000°C)/10-6K ⁻¹	16.6	16.6	16.6	17.7

弹性模量 (20℃) /GPa	130	130	130	115
-----------------	-----	-----	-----	-----

表 6.3-18 3 种弥散氧化物强化铜的标准室温力学性能

形状	厚度或直径/mm	状态①	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率/%	硬度 HRB
C15715 薄板材	10	AC	413	331	20	62
	1.3	CW88%	579	537	7	-
中、厚板材	0.6	CW94%	620	579	7	-
	0.15	CW98%	661	613	6	-
	直到 130	AC	365	255	26	62
	25	CW60%	476	427	10	-
棒材	16	CW75%	483	455	10	-
	29	AC	393	324	27	62
线材	19	CW55%	427	407	18	68
	7	CW94%	496	469	9	72
	1.3	CW95%	524	496	2	-
	1.3	HT650℃	400	351	10	-
	0.4	CW99.9%	606	579	1	-
圆棒材	直到 760	AC	365	255	26	-
C15712 板材	10	AC	434	345	21	72
	2.3	CW78%	586	544	8	83
中、厚板材	0.15	CW98%	675	613	6	-
	一直到 130	AC	413	296	19	68
	25	CW60%	496	441	9	-
棒材	16	CW75%	524	467	9	-
	38	AC	441	358	24	73
圆棒料	6.4	拉拔状态	551	531	14	76
	直到 760	AC	413	296	19	68
C15760 板材	1	AC	517	413	13	81
	2.5	CW75%	627	572	8	85
棒材	0.15	CW98%	737	655	6	-
	14	AC	551	517	22	80
	13	CW14%	572	544	16	83
	7	CW74%	620	599	14	86
	7	HT650℃	579	544	18	80
圆棒料	64	AC	496	475	4	80
	直到 760	AC	469	331	4	76

① AC: 固结状态; CW: 冷加工, %: 断面率; HT: 热处理 1h。

表 6.3-19 传统烧结粉末铝合金的成分 (质量分数) /%

合金代号	Cu	Mg	Si	Al
------	----	----	----	----

201AB	4.4	0.5	0.8	余量
202AB	4	-	-	余量
601 AB	0.25	1	0.6	余量
602 AB	-	0.6	0.4	余量
MD-22	2	1	0.3	余量
MD-24	4.4	0.5	0.9	余量
MD-69	0.25	1	0.6	余量
MD-76	1.6	2.5	-	余量

表 6.3-20 传统烧结粉末铝合金的性能

合金	状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	电导率/%LACS	热导率/W·(cm·K) ⁻¹	洛氏硬度 HRE
201AB	T1	209	181	3	-	-	70~75
	T4	262	214	5	32	1.245	80~85
	T6	332	327	2	35	1.338	90~95
	T61	-	-	-	38	1.505	-
202AB	T1	160	75	10	-	-	55~60HRH
	T4	194	119	8	-	-	70~75 HRH
	T6	227	147	7.3	-	-	45~50
601AB	T1	145	94	6	-	-	65~70 HRH
	T4	176	117	6	38	1.505	85~90 HRH
	T6	238	230	2	41	1.588	80~85
	T61	-	-	-	44	1.714	-
602AB	T1	131	62	9	-	-	55~60 HRH
	T4	134	65	10	44	1.714	70~75 HRH
	T6	186	172	3	47	1.839	65~70
	T61	-	-	-	49	1.881	-
MD-22	T6	-	-	-	36	-	74
MD-24	T6	-	-	-	32	-	72
MD-69	T6	-	-	-	39	-	71
MD-76	T6	-	-	-	25	-	80

表 6.3-21 先进 P/M 铝合金的成分（质量分数）%

合金代号	名义成分
7090 (MA67)	Al-8Zn-2.5Mg-1Cu-1.5Co
7091(MA87)	Al-6.5Zn-2.5Mg-1.5Cu-0.4Co
X7093(CW67)	Al-9Zn-2.5Mg-1.5Cu-0.1Ni-0.14Zr
PM61	Al-8.5Zn-2.5Mg-1.5Cu-0.6Co-0.4Zr
PM64	Al-7.2Zn-2.4Mg-2Cu-0.2Co-0.2Zr-0.1Cr
9064	Al-7.4Zn-2.4Mg-2.1Cu-0.75Co-0.3Zr-0.15Cr
BM71	Al-7.1Zn-2.5Mg-2.5Cu-0.25Co-0.2Zr-0.15Cr
IN-9021	Al-4Cu-1.5Mg-1.1C-0.8C
IN-9052	Al-4Mg-1.1C-0.5O

IN-905XL	Al-4Mg-1.3Li-1.1C-0.4O
X8019(CU78)	Al-(7.3~9.3)Fe-(3.5-4.5)Ce
CZ42	Al-7Fe-6Ce
8022(FVS0611)	Al-6.5Fe-0.6V-1.3Si
8009(FVS0812)	Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si
FVS1212	Al-11.7Fe-1.2V-2.4Si
Al-5Cr-X	Al-5Cr-2Zr(-1Mn)
Al-Fe-Mo-V	Al-8Fe-2Mo(-1V)
FMS0612	Al-6Fe-1.3Mo-1.1Si
FMS0918	Al-9Fe-2Mo-1.6Si
FMS1224	Al-12Fe-2.6Mo-2.2Si
FMS0704	Al-7Fe-1.4Mo-1.4Si-1.3Zr-0.5Ti
LG5	Al-8Fe-2Mo-2Si-1Zr-0.2Ti
AlFeCrTi	Al-6.3Fe-3.8Cr-3.3Ti
AlVFe	Al-7.8V-4Fe
AlTiFeX	Al-9.8Ti-3Fe-3Cr
Al-4Ti	Al-4Ti
Al-8Ti	Al-8.2Ti-C-0.2O-0.2Fe
Al-12Ti	Al-12.4Ti-1.2C-0.3O-0.2Fe
Al-16Ti	Al-16Ti-1.2C-0.3O-0.2Fe
AlLiBe	Al-2.5Li-1.1Bi
AlLiMgX-1	Al-3Li-1Mg-1.5Cu-0.2Zr
AlLiMgX-2	Al-3.49Li-0.92Mg-0.12Zr
644B	Al-3.2Li-1Cu-0.5Mg-0.5Zr
AlBeLi-1	Al-20.5Be-2.4Li
AlBeLi-2	Al-29.6Be-1.3Li
AlCuLiX	Al-3.4Cu-3.2Li-1.1Mg-0.6Mn
AlNiMm ^①	Al-14Ni-14.6Mm
AlNiMmX	Al-14Ni-3.3Mm-5.1Zr
AlNiYCo	Al-5Ni-8Y-2Co(摩尔分数)
AlNiZrCe	Al-8Ni-1.75Zr-0.75Ce(摩尔分数)
AlNiYZrCe	Al-8Ni-2.5Y-0.5Zr-0.5Ce(摩尔分数)
Al-20Si-X	Al-20Si-7.5Ni-3.5Cu-1Mg
Al-17Si-X	Al-25Si-5Fe-3.5Cu-1Mg
Al-25Si-X-1	Al-25Si-3.5Cu-1Mg
Al-20Si-X-2	Al-25Si-5Fe-3.5Cu-2Ce-1Mg-1Zr-0.5Mn-0.5Fe
LJ5	FMS0.714/(10~15)Al
LJ5A	FMS0.714/(5~15)Zn~30Al
LJ5B	FMS0.714/(10~15)Al/(5~10)Zn~30Al

① Mm 为稀土类金属混合物。

表 6.3-22 先进 P/M 铝合金的典型性能

合金	温度/°C	密度/g·cm ⁻³	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/MPa	断裂韧性 K _{IC} /MPa·m
----	-------	-----------------------	----------	----------	-------	----------	-----------------------------

							1/2
7090-T7E71	25	2.85	621	579	9	73.8	30.8
7091-T7E69	25	2.82	593	545	11	72.4	46.2
X7093-T7E92	25	2.93	612	580	11	78.6	49
PM61-T6510	25	2.82	779	751	9	72.4	24.2
PM61-T76510	25	2.82	669	641	12	72.4	-
PM64-T76510	25	2.82	655	627	13	72.4	31.9
PM64-T73510	25	2.82	627	13	72.4	31.9	-
BM71-T6	25	-	740	702	10	-	39.6
IN-9021	25	2.80	538	469	13	7461	44
IN-9052	25	2.66	448	379	13	71	30
IN-905XL	25	-	517	448	9	80	28.6
I/M7075-T651	25	2.80	572	503	11	71	-
A1LiBe	25	2.42	504	432	5.2	-	-
A1LiMgX-1	25	2.49	596	509	3.1	-	-
A1LiMgX-2	25	2.44	526	472	6	-	-
644B	25	2.54	521	424	7	-	-
A1BeLi-1	25	2.3	531	483	3.3	123	-
A1BeLi-2	25	2.3	536	497	2.6	142	-
A1CuLiX	25	2.52	583	571	5.1	85	-
I/M8090-T81	25	2.55	490	425	4	77	-
X8019	25	2.93	589	460	2.4	78.6	-
-	343	-	-	163	132	5.5	26
CZ42	25	2.96	-567	524	5.7	78.9	-
	316	-	176	150	6.5	-	-
8022	25	2.83	352	310	16.7	-	-
	315	-	193	172	17.3	-	31
8009	25	2.91	462	412	12.9	88	-
	315	-	261	214	9	-	-
FVS1212	25	3.02	559	531	7.2	95	-
	315	-	303	297	6.8	-	12
Al-5Cr-X	25	2.86	474	453	14	86	-
	315	-	235	215	-	-	9
AlFeMoV	25	2.92	406	323	6.7	-	-
	316	-	187	170	7.2	-	-
FMS0612	25	2.87	371	325	17.4	-	-
	300	-	195	185	9.4	-	-
FMS0918	25	2.3	458	414	15.7	-	-
-	300	-	3.02	588	508	3.6	-
FMS0714	25	2.92	621	575	6.1	-	-
	300	-	272	242	6.4	-	-
LG5	25	-	626	575	6.7	-	-
	450	-	103	-	10	-	-
AlVFe	25	3.05	585	-	4.5	84.8	-

AlFeCrTi	25	2.95	646	-	4.4	86	-
	300	-	361	-	-	-	-
AlTiFeX	25	2.95	646	-	4.4	86	-
	300	-	330	-	-	-	-
Al-4Ti	25	-	383	325	10.5	-	-
I/M2618-T61	25	2.76	440	372	10	74.4	27.6
	316	-	52	31	80	-	-
AlNiMm	25	-	909	815	0.7	104	-
AlNiMmX	25	-	1000	886	1.2	97	-
AlNiYCo	25	-	1420	-	1	-	-
AlNiZrCe	25	-	900	-	0.7	102	-
Al-20Si-X	25	-	480	-	-	107	-
Al-17Si-X	25	-	470	-	-	100	-
Al-25Si-X-1	25	-	500	-	-	94	-
Al-20Si-X-1	25	-0	430	-	0.5	-	-

表 6.3-23 阻尼铝合金的典型性能

合金	工艺	室温						250°C			
		$\rho/g \cdot cm^{-3}$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/MPa$	$\delta/\%$	E/GPa	$Q^{-1}/10^{-3}$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/MPa$	$\delta/\%$	$Q^{-1}/10^{-3}$
LJ5	RSP/M	2.96	527	463	13.4	71	6.8	300	280	7.7	20.8
LJ5A	RSP/M	3.05	586	521	11	72	15	277	248	6.7	32.4
LJ5B	RSP/M	3	555	483	13	71	8	306	278	6	29
LD7CS	I/M	2.76	440	372	10	70	2.8	245	225	11	9.6

表 6.3-24 粉末铝基复合材料常用的增强相的性能

性能	SiC _p	Al ₂ O _{3p}	Si ₃ N _{4p}	SiC _w	Al ₂ O _s	Si ₃ N _{4w}
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	3.21	3.97	3.18	3.19	3.3	3.18
直径/ μm	-	-	-	0.1~1	3~4	-
热扩散系数/ $10^{-6} \cdot K^{-1}$	4.3~5.6	7.2~8.6	3	4.8	约 9	3.8
抗拉强度/MPa	100~800	70~1000	250~1000	3000~14000	>2000	13800
弹性模量/GPa	200~480	380	304	400~700	300	379
伸长率/%	-	-	-	1.23	0.67	-
成分(质量分数)/%	-	-	-	>98%SiC	96%Al ₂ O ₃ +4%SiO ₂	-

表 6.3-25 P/M 铝基复合材料的典型性能

复合材料	状态	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	弹性模量/MPa	断裂韧性 $K_{IC}/MPa \cdot m^{1/2}$
2009/SiC/15w	-	-	-	-	-	-	-
L	T8	-	634	483	6.4	106	$K_{IC}(L-T):57$
T	T8	-	552	400	8.4	98	-
2009/SiC/20p	-	-	-	-	-	-	-
L	T8	-	593	462	5.5	109	$K_{IC}(L-T):45$

T	T8	-	572	461	5.3	109	-
2120/SiC/20p	T4	-	560	405	7	105	-
X2080/SiC/15p	T4	2.83	483	365	7.5	100	33
	T6	-	517	427	4	-	-
	T8	-	545	517	4	-	-
X2080/SiC/20p	T4	2.85	517	393	6	110	22
	T6	-	538	455	4	-	-
	T8	-	558	538	2	-	-
6013/SiC/15p	T6	-	517	434	6.3	101	-
6013/SiC/20p	T6	-	538	448	5.6	110	-
6013/SiC/25p	T6	-	565	469	4.3	121	-
6013/SiC/15w	T6	-	655	469	3.2	119	-
6013/SiC/25p	T65X	-	496	427	4.1	117	-
6X13/SiC/15p	T4	2.79	372	234	12	99	43
	T6	-	420	365	6	-	22
6X13/SiC/20p	T4	2.82	407	262	10	-107	41
	T6	-	441	386	5	-	19
6061/SiC/15p	T64	-	364	342	3.2	91	-
6061/SiC/15p	T4	-	460	405	7	98	-
6061/SiC/20p	T4	-	500	420	5	105	-
6061/SiC/25p	T4	-	515	430	4	115	-
7090/SiC/20p	T6	-	735	665	2	105	-
X7093/SiC/15p	T6	2.94	655	607	3	97	16
	T7X1	-	600	558	3	-	17
	T7X1	-	572	517	5	-	18
8009/SiC/11p	-	-	-	-	-	-	-
25°C	-	-	544	496	5.5	102	-
149°C	-	-	427	400	3.5	-	-
232°C	-	-	338	310	4.2	-	-
371°C	-	-	220	193	7	-	-
X8019/SiC/12.5p	-	-	-	-	-	-	-
24°C	-	2.99	490	414	2.8	101	10
149°C	-	-	420	372	3	-	-
232°C	-	-	360	317	3.6	-	-
316°C	-	-	241	214	7.5	-	-

表 6.3-26 BE 法在不同条件下制成的 Ti-6Al-4V 制件的拉伸和断裂韧性等性能

条件①	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	K_{IC} 或 $K_{IQ}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	密度/%	氯气 $/10^{-6}$	氧/ 10^{-6}
压制和烧结 (96%密度)	758	827	6	10	-	96	1200	-
压制和烧结 (98%密度)	827	896	12	20	-	98	1200	-
压制和烧结 (99.2%密度)	847	930	14	29	38	99.2	1200	-
压制和烧结+HIP	806	875	9	17	41	》99	1500	2400
CIP 和烧结+HIP②	827	916	13	26	-	99.4	1500	2400

CIP 和烧结+HIP	896	965	12	22	-	99.8	1500	-
压制和烧结+ $\alpha\beta$ 锻造	841	923	8	9	-	》99.4	1200	2400
压制和烧结+ $\alpha\beta$ 锻造	951	1027	9	24	49	99	1500	-
压制和烧结+ (92%密度)	827	910	10	-	-	92	1500	2400
+ α/β 30%等温锻造	841	930	30	-	-	99.7	1500	-
+ α/β 30%等温锻造	896	999	30	-	-	99.8	1500	2100
CIP 和烧结+HIP (低氯)	827	923	16	34	-	99.8	160	2100
CIP 和烧结+HIP (超低氯)	882	985	11	36	-	99.8	<10	2100
+TCP 处理	1007	1062	14	20	-	-	-	-
轧制板材, CIP 和烧结+HIP								-
工厂退火 (纵向)	903	958	10	26	72③	》99	200	-
工厂退火 (横向)	923	965	14	31	71③	》99	200	
再结晶退火 (纵向)	888	916	4	8	75③	》99	200	1600
再结晶退火 (横向)	868	937	5	9	67③	》99	200	1600
β 退火 (横向)	841	937	10	26	89③	》99	200	1600
β 退火 (横向)	875	958	7	20	92③	》99	200	1600
最小值 (MIL-T-9047)	827	896	10	25	-	-	-	-

① HIP: 热等静压; CIP: 冷等静压; TCP: 化学热处理;

② 1010℃锻造, 水冷;

③ 预裂纹冲击试验。

表 6.3-27 BE 法钛合金制件的拉伸和断裂韧性性能

条件①	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	K_{Ic} /MPa \cdot m ^{1/2}	相对密度/%	氯 10 ⁻⁶
Ti-5Al-2Cr-1Fe, 压制和烧结+HIP	980	1041	20	39	-	》99	310
Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr, 压制和烧结	951	1000	17	39	64	》99	310
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, 压制和烧结	1086	1109	2	1	31	99	150
Ti-10V-2Fe-3Al, 压制和烧结+HIP (1650℃) 和 STA (775~540℃)	1233	1268	9	-	30	99	1900
压制和烧结+HIP 和 STA (750~550℃)	1102	1158	10	-	32	99	1900
压制和烧结	854	930	9	12	51	98	-
Ti-6Al-6V-2Sn 冷等静压和热等静压	931	1035	15	35	78	100	-

① HIP: 热等静压; STA: 固溶+时效。

表 6.3-28 PA 法 Ti-6Al-4V 制件的拉伸和断裂韧性等性能

条件	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	K_{Ic} 或 K_{Q} /MPa \cdot m ^{1/2}	粉末工艺	压制温度/℃	其他
HIP	861	937	17	42	85	PREP	925	-
HIP (PSV) 和 β 退货	1020	1095	9	21	67	PSV	950	975℃退火
HIP 和 BUS 处理	965	1048	8	17	-	PREP	925	-

HIP 和 TCP 处理	931	1021	10	16	-	PREP	925	-
HIP 和 700℃退伙 (REP)	820	889	14	41	76	REP	955	-
HIP, 700℃退伙和 STA (955~480℃)	1034	1130	9	34	-	REP	955	-
HIP 和 700℃退伙 (PREP)	882	944	15	40	73	PREP	955	-
ELP: HIP	855	931	15	41	99	REP	955	1300×10 ⁻⁶ O ₂
ELP: HIP 和β退火	896	951	10	24	93	REP	955	1020℃退火
HPLT: HIP	1082	1130	8	19	-	PREP	650	315MPa
HPL, HIP 和 815℃再结晶退火	937	1031	22	38	-	PREP	650	315MPa
HIP 和 955℃轧制	958	992	12	35	-	REP	925	75%变形
HIP, 955℃轧制和β退火(纵向)	820	896	13	31	73	REP	925	75%变形
HIP, 955℃轧制和β退火(横向)	813	896	11	23	61	REP	925	75%变形
HIP, 950℃轧制和 STA (960~700℃)	924	1041	15	35	-	REP	950	65%变形
HIP, 950℃锻造和 STA (960~700℃)	1000	1062	14	35	-	REP	915	56%变形
830℃VHP	945	993	19	38	-	REP	830	-
760℃VHP	927	1014	16	38	-	REP	760	-
900℃ROC	882	904	14	50	-	PREP	900	-
900℃ROC 和 925℃RA	827	882	16	46	-	PREP	900	925℃RA
650℃ROC	1131	1179	10	23	-	PREP	600	-
600℃ROC815℃RA	965	1020	15	43	-	PREP	600	815℃RA
最小值 (MIL-T-9047)	827	896	10	25	-	-	-	-

① HIP: 热等静压; PSV: 在真空下湿磨成粉; BUS: 破碎组织; TCP: 热化学处理; REP: 旋转电极工艺; STA: 固溶处理+时效; PREP: 等离子体旋转电极工艺; ELI: 超低间隙元素; HPLT: 高压低温压坯; RA: 再结晶退火; VHP: 真空热压; ROC: 快速全向压制。

表 6.3-29 其他钛合金 PA 法制件的拉伸和断裂韧性度性能

条件①	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	K_{Ic} 或 $K_{I0}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	粉末工艺	压制温度/℃	其他
IMI829, HIP 和 STA (1060~620℃)	951	1089	18	22	-	PREP	1040	-
IMI829, ROC 和 STA (1060~620℃)	909	1034	18	20	-	PREP	-	$\alpha+\beta$ ROC
IMI685, HIP 和 STA (1050~550℃)	970	1020	11	19	-	PREP	950	-
Ti-6242, HIP 和 STA (1050~550℃)	924	1034	17	36	-	PREP	910	-
Ti-6242, HIP, 920℃锻和 705℃退火	1165	1296	11	37	-	REP	900	920℃

									锻 70%
Ti-6Al-6V-2Sn, HIP 和 760℃退火	1008	1055	18	37	59	PREP	900	-	
Ti-17, HIP 和 STA (800~635℃)	1123	1192	8	11	-	REP	915	-	
Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr, HIP 和 705℃时效	944	990	13	-	75	REP	845	(c)	
Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr, HIP 和 760℃时效	916	971	14	-	79	REP	845	(c)	
Ti-1023, HIP 和 STA (745~490℃)	1213	1310	9	13	-	PREP	775	-	
Ti-1023, HIP, 锻和 STA (750~495℃)	1286	1386	7	20	28	PREP	775	750℃ 锻 70%	
Ti-1023, HIP, 锻和 STA (750~550℃)	1065	1138	14	41	55	PREP	775	750℃ 锻 70%	
Ti-1023, ROC	965	1007	16	54	-	PREP	650	-	
Ti-1023, ROC 和 STA (750~550℃)	1296	1400	6	26	-	PREP	650	-	
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn, β HIP 和 STA (745~510℃)	1288	1378	8	18	-	PREP	760	-	
Ti-1.3Al-8V-5Fe, β 挤压和 STA (705℃)	1392	1482	8	7	-	PREP	760	-	
β 挤压和 STA (770℃)	1461	1516	8	20	-	REP	760	-	
β HIP 和 STA (745~510℃)	1315	1414	5	10	-	REP	725	-	
Ti-24Al-11Nb, 1065℃HIP 和 STA (1175℃)	510	606	2	2	-	PREP	1065	-	
925℃和 STA (1175℃)	696	765	2	2	-	PREP	925	-	
Ti-25Al-10Nb-3Mo-1V, ROC	710	854	5	6	-	PREP	1050	-	

① HIP: 热等静压; STA: 固溶处理+时效; ROC 快速全向压制; PREP: 等离子体旋转电极工艺; REP: 旋转电极工艺; GA: 气体雾化。

表 6.3-30 TiC 颗粒增强钛基复合材料的力学性能

BE 钛合金基	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	E/GPa	K_{Ic} 或 K_{Q} /MPa \cdot m ^{1/2}	氧/10 ⁻⁶
Ti-6Al-4V (最小值) ①②	828	895	10	25	114	-	2000
Ti-6Al-4V ELI (最小值) ③	759	828	10	25	114	-	1300
Ti-6Al-4V BE CHIP④	690	793	9	15	114	85	1500
Ti-6Al-6V-2Sn (最小值)	965	1034	14	23	112	75	2000
Ti-6Al-6V-2Sn CHIP④	931	1034	15	35	112	78	2800
Cerme Ti-C-10/64 CHIP④	945	1000	2	2	134	38	3000
Cerme Ti-C-10/64 CHIP⑤⑥	1069	1138	2	2	134	45	3000
Cerme Ti-C-10/662 CHIP⑤⑥	1034	1055	1	1	134	40	3000

- ① AMS-4930D;
 ② ASTM B3485 级;
 ③ ASTM B348 23 级;
 ④ 冷和热等静压;
 ⑤ 960℃挤压, 空冷;
 ⑥ 1030℃锻造, 空冷。

表 6.3-32 工业铍材的典型拉伸性能

材料		抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
坯块试验方向				
普通纯度（热压）结构级	L	370	266	2.3
	T	390	273	3.6
热学级或制动器级	L	294	196	2.7
	T	322	196	4.6
高纯（等静压）级	L	455	287	3.9
	T	455	287	4.4
高氧化物仪表级（热压）	L	476	406	1.5
	T	511	413	2.7
细晶粒度（等静压）级	L	580	407	3.7
	T	587	407	4.2
板材（厚 1~6.4mm）				
普通纯度粉		531	372	16
普通纯度铸锭		352	172	7
挤压件				
普通纯度粉		655~690	345~518	8~13
高纯粉		655~825	345~518	8~13
锻件				
普通纯度		483~600	435~600	0~4.5
线材（ Φ 0.05~0.64mm）				
高纯铸锭		966	793	3

① 0.2%残余变形；

② 50mm 时的伸长率，线材为 250mm；

③ 结构级铍为普通纯度（热压），含有 1.8%BeO，热学级或制动器级约为 0.9%。

表 6.3-33 美国不同级别商用铍材拉伸性能的最低保证值

级别	标号		力学性能			
	KBI [®]	B-W [®]	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率/%	微屈服强度 ^① /MPa
(1) 一般纯度						
1) 真空热压铍锭						
标准级别	HP-20	S-200-E	276	207	1	
结构级别	HP-21	S-245	310	241	1.5	
结构、高延伸率级	XHP-11	S-65	290	207	3	
结构、仪表级	HP-22	I-220	311	242	2	34.5
仪表级	HP-40	I-400	345			55.2
	HP-41		414	310	1	55.2
热学级 ^②	HP-10	BG-170	255	166	1.5	
光学级	HP-81	I70A	241	172	2	
高纯度	HP-8	N-50-C	242	173	1	
2) 压力加工产品						
板材 ^③	PR-20	PR-200-E	414/449	207/311		

带材 挤压材	PS-20 XT-20	SR-200-E	483 483	345 207		
(2) 高纯级别 (等 静压)						
标准级	CIP-HIPI	-	345	241	3	
高强级 ^⑤	HIP-50	-	550	414	4	55.2

① 最小屈服强度值；

② 也是高温力学性能的最低保证值；

③ 较低值 11.4~15.2mm，较高值 6.35~11.4mm；

④ 典型的力学性能值；

⑤ 卡韦基公司；

⑥ 布拉什-韦尔曼公司。

表 6.3-34 前苏联不同级铍材的代表性力学性能指标

等级	密度/g· cm-3	平行于坯料轴线			垂直于坯料轴线		
		伸长率 /%	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa
粉末锻造	1.84	-	-	-	0.8	300	-
真空热压	1.84	0.8	300	250	1.3	350	250
挤压	1.84	2	500	350	-	-	-
等静压	1.84	1.3	400	-	1.3	400	-

表 6.3-35 真空热压铍的蠕变性能

应力/MPa	温度/°C	最小蠕变速率/10 ⁻² h ⁻¹
56.36	427	0.00028
69.21		0.00056
85.68		0.0048
102.9		0.052
123.48		0.142
28.74	538	0.001
33.81		0.01
36.26		0.06
13.72	677	0.0009
15.23		0.018
18.52		0.07
21.88		0.28
4.46	732	0.00036
6.65		0.072
7.47		0.051
9.53		0.3

表 6.3-36 真空热压铍的断裂应力

温度/°C	应力/MPa			
	10h	100h	1000h	2500h

427	150.92	123.48	89.18	72.03
538	50.42	34.3	29.49	27.44
649	42.01	17.15	14.74	13.72
732	8.23	6.51	5.49	4.49
816	2.17	1.57		

表 6.3-37 核纯级和结构级铍粉的化学成分%

元素	核纯级	结构级
Be ^①	99	98~98.5
BeO ^②	0.9	1.2~2
Al ^②	0.075	0.14~0.16
B ^②	0.00002	
Cd ^②	0.0002	
Ca ^②	0.01	
C ^②	0.1	0.15
Cr ^②	0.01	
Co ^②	0.0005	
Cu ^②	0.015	
Fe ^②	0.075	0.15~0.18
Pb ^②	0.002	
Li ^②	0.0003	
Mg ^②	0.05	
Mn ^②	0.012	
Mo ^②	0.002	
Ni ^②	0.02	
N ^②	0.02	
Si ^②	0.06	0.08
Ag ^②	0.001	
其他杂质 ^②		0.04

① 最小；

② 最大。

表 6.3-38 圆盘磨及冲击研磨制粉所得压坯之比较

粉末批次	塑性及结晶取向效应			
	检测方向	伸长率/%	伸长率 I/L 比	{0002}极 密度 I/L 比
圆盘磨粉 A 批	横向	4.4	2.93 比 1	2.62 比 1
	纵向	1.5		
B 批	横向	5	3.3 比 1	2.5 比 1
	纵向	1.6		
冲击研磨粉 A 批	横向	5	1.7 比 1	1.48 比 1
	纵向	2.9		
B 批	横向	5.4	1.5 比 1	1.45 比 1

	纵向	3.6		
--	----	-----	--	--

注：1.l 及 L 分别代表横向及纵向；
2.A 及 B 系由不同熔炼炉次所得原料。

表 6.3-39 球形钎粉及冲击研磨钎粉固结坯性能

粉末固结工艺	VHP 球形粉	HIP 球形粉	HIP 球形粉 (S-65)	HIP 球形粉	VHP 冲击研 磨粉
温度/°C	1100	1000	1000	1000	
粉末粒度/μm	74	74	105~74	149~105	44
纵向晶粒度/μm	17.1	12.8	16.8	17.1	12 (典型值)
0.2%屈服强度 /MPa	200	257	249	267	207 (最小)
抗拉强度/MPa	301	352	317	299	290 (最小)
伸长率/%	2.6	2.4	1.7	0.8	3% (最小)
BeO/%		0.45	0.18	0.23	1% (最小)
Fe/%		0.09	0.093	0.156	0.8% (最小)

表 6.3-40 AlBeMet 162 钎铝合金的物理性能

性能	数据
弹性模量 (25°C) /GPa	200
弹性模量 (200°C) /GPa	195
泊松比	0.167
密度/g·cm ⁻³	2.01
线胀系数 (25~100°C) /10 ⁻⁶ K ⁻¹	16.35
热传导 25°C/W·(m·K) ⁻¹	212
比热容/J·(g·K) ⁻¹	1.5
电阻率/μΩ·cm	3.43
固相线/°C	644

表 6.3-42 粉末高温合金的成分 (质量分数)

成分 合金	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	V	B	Zr	其他	Ni
Rene'95	0.07	13	8	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	-	0.01	0.05	-	余量
Rene'88DT	0.03	16	13	4	4	2.1	3.7	0.7	-	0.015	0.03	-	余量
Astroloy	0.02	14.5	16.5	5	-	4	3.5	-	-	0.03	0.06	-	余量
MERL76	0.02	12.4	18.5	3.2	-	4.3	5	1.65	-	0.02	0.05	-	余量
IN100	0.07	12.5	18.5	3.2	-	5	4.4	-	0.8	0.02	0.06	-	余量
N18	0.02	11.5	15.7	6.5	-	4.35	4.35	-	-	0.02	0.03	Hf0.5	余量

U720	0.025	18	15	3	1.25	2.5	5	-	-	0.02	0.03	-	余量
FGH95	0.08	13	8.1	3.6	3.6	3.4	2.6	3.3	-	0.013	0.06	Ta0.09	余量
FGH96	0.03	16	13.1	4.1	4	2.3	3.7	0.8	-	0.011	0.03	Ce0.01	余量
э п 962п	0.07	13.5	9	4.3	2.8	3.8	2.6	3.5	0.35	≥ 0.015	-	Hf0.55	余量
з п 975п	0.07	8	10	2.9	8.5	6	2	2.5	-	0.022	-	Hf0.7	余量
э п 741Hп	0.04	9	15.8	3.8	5.1	5.05	1.8	2.6	-	≥ 0.015	≥ 0.015	Hf0.3; Ce0.01	余量

表 6.3-43 选择性热机械处理 AF115 双性能盘性能

温度/°C	部位	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Ψ /%
RT	盘芯	1740	1220	16.3	17.1
427	盘芯	1610	1130	18.8	18.2
650	盘芯	1520	1090	20	22.8
RT	盘缘	1650	1100	18.8	19.7
760	盘缘	1200	1090	7	9.7

表 6.3-45 Allision 公司涡轴发动机叶盘样件的性能水平

叶盘材料		连接区				PA101 (盘)			MAR-M246 (叶片)
温度/°C		20	649	-	-	20	649	760	20
$\sigma_{0.2}$ /MPa		-	-	-	-	945	897	876	791
σ_b /MPa		881.1	886.6	-	-	1473	1315	1088	840
δ /%		-	-	-	-	15.3	10.3	11.4	-
Ψ /%		-	-	-	-	14.1	760	15.3	-
持久性能	温度/°C	649	704	760	816	649	760	-	-
	σ /MPa	758	655	517	345	862	586	-	-
	寿命/h	977.2	123.8	254.8	56	98.4	59.6	-	-
	δ /%	-	-	-	-	5.3	10	-	-

表 6.3-46 Garrett 公司生产的整体叶盘性能水平

叶盘材料 (Garrett 公司)	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	750°C/690MPa 寿命/h, δ /%	815°C/518MPa 寿命/h, δ /%
Astrology (盘)	860	1147	163.6, 26.6	
MAR-M247 (叶片)	814	994		46.6, 1.5~1.7
Astrology (盘)	814	1289	191.6, 30.5	
MAR-M247 (叶片)	842	1014		110.3, 2.9

Astrology (盘)	837	1294	158.9,30.5	
MAR-M247 (叶片)	839	1017		227.7,7.4

表 6.3-47 粉-固连接整体叶盘的性能水平

材料	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\Psi/\%$	704°C/794MPa 应力持久
PA101 盘	1113	1659	13	11	
C103 叶片					56h, $\delta=3\%$
э п 741Hп 盘	≥ 930	≥ 1370	≥ 15	≥ 15	650°C/980MPa $\geq 100\text{h}$
ж С-3Д К 叶片					704°C/794MPa $\geq 100\text{h}$
连接区	≥ 930	≥ 800	≥ 5	≥ 7	704°C/794MPa $\geq 50\text{h}$

表 6.3-48 GH742 合金的拉伸性能对比

状态	实验温度/°C	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$\Psi/\%$
SD	20	898	1372	26.3	36.6
SD+HIP+HF+HT		1060	1449	23.6	41.2
IM		898	1352	19.4	22.9
SD	650	762	1193	-	-
SD+HIP+HF+HT		957	1326	-	-
SD	750	822	1050	-	-
SD+HIP+HF+HT		952	1059	-	-
技术指标	20	755	1210	13	14
	650	686	1127	-	-
	750	686	931	-	-

注：SD-喷射成形雾化沉淀积态；SD+HIP+HF+HT-喷射雾化+热等静压+锻造+热处理；IM-常规铸锻+热处理

表 6.3-49 机械合金化合金的主要化学成分（质量分数）

成分合金	Cr	W	Mo	Al	Ti	Ta	C	B	Zr	Fe	Y ₂ O ₃	Ni
MA754	20		-	0.3	0.5	-	0.05	-	-	-	0.6	余量
MA6000	15	4	2	4.5	2.5	2	0.05	0.01	0.15	1	1.1	余量
MA758	30	-	-	0.3	0.5	-	0.05	-	-	-	0.6	余量
MGH754	20	-	-	0.4	0.55	-	0.05	-	-	1.2	0.6	余量

表 6.3-50 机械合金化合金的主要力学性能（纵向）

性能合金	温度/°C	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\Psi/\%$
MA754	20	965	586	21	33

	650	600	476	25	44
	870	248	214	31	58
	1093	148	134	12	24

表 6.4-1 难熔金属物理力学性能

性质	W	Mo	Nb	Ta	Zr
原子序	74	42			
原子量	783.85	95.95			
密度/g·cm ⁻³	19.3	10.2			
晶格类型	Bcc	Bcc	Bcc	Bcc	Bcc
熔点/°C	3410±20	2620±10	2469	2996	1830±40
沸点/°C	5950±50	4800	4927	5300	3700~4400
线膨胀系数 /K ⁻¹	4.4×10 ⁻⁶	(5.8~6.2)× 10 ⁻⁶	7.1×10 ⁻⁶	6.5×10 ⁻⁵	-
比热容 /J·(Kg·K) ⁻¹	134	272.35	269.2	139	-
导热率 /W·(m·K) ⁻¹	167	147	52.3	54.4	-
电阻率/Ω·m	5.5×10 ⁻⁸	(4.5~10.2) ×10 ⁻⁷	1.522×10 ⁻⁷	1.35×10 ⁻⁷	4.4×10 ⁻⁵
弹性模量 /GPa	400	324	103	85	-

表 6.4-2 工艺参数对 W-Ni-Cu 合金力学性能的影响

合金成分（质量分 数）/%	工艺参数		密度/g· cm ⁻³	抗拉强度 /MPa	伸长率/%
	温度/°C	时间/min			
90W-6Ni-4Cu	1400	60		700	11
90W-6.66Ni-3.33Cu	1410	60		798	17.9
90W-7.5Ni-2.5Cu	1300	6	15.4	312	0.4
		60	15.9	617	0.7
		300	16.6	715	0.7
	1350	6	16.4	696	1.4
		60	16.7	755	2.3
		300	16.7	735	1.5
	1400	6	17.1	774	5.3
		60	17.15	804	6
		60	17.15	784	5.5
1450	6	17.15	784	5.5	
	60	17.17	823	8	

表 6.4-3 Ni/Fe 比对 93%W 合金性能的影响

合金成分（质量分数）/%			Ni/Fe 比	真空退火态		退火+淬火态	
W	Ni	Fe		极限强度 /MPa	延伸率 /%	极限强度 /MPa	延伸率 /%

93	2.33	4.67	0.5	脆	断	脆	断
93	3.5	3.5	1	897	18.7	916	19.6
93	4.2	2.8	1.5	918	25.3	924	27.5
93	4.67	2.33	2	927	23.8	936	30.9
93	4.9	2.1	2.3	936	29.5	940	31.8
93	5.25	1.75	3	922	29.3	934	31.4
93	5.6	1.4	4	942	27.4	958	34
93	5.83	1.17	5	943	31.8	955	33.5
93	6	1	6	936	15.8	951	35.5

表 6.4-4 常见 W-cu 系列电触头合金的性能

型号	密度/g·cm-3	硬度				电阻率 /μΩ·cm	电导率 /%IACS	热导率 /W·(m·K) ⁻¹
		HB		HV				
		软态	硬态	软态	硬态			
Cu-W30	10.6~10.8	100				2.1	80	316
Cu-W50	12~12.5	105	130	109	136	2.5~3	67~56	
Cu-W60	12.8~13	120	160	125	167	3.5	48	
Cu-W70	14~14.4	145	185	152	193	4.1	41	
Cu-W75	14.6~15	160	200	167	209	3.5~4.5	48~37	
Cu-W80	15.2~15.5	180	220	188	230	4.5~5.5	37~32	
Cu-W90	17.1	240				4.6~5.5	36~30	

表 6.4-5 常见 W-Ag 系列电触头合金的性能

型号	密度/g·cm-3	硬度				电阻率 /μΩ·cm	电导率 /%IACS	热导率 /W·(m·K) ⁻¹
		HB		HV				
		软态	硬态	软态	硬态			
Ag-W30	11.8~12.2	55	80	55	83	2.3	73	339
Ag-W40	12.5~12.8	60	90	63	94	2.6	64	
Ag-W50	13.2~13.5	75	110	78	115	2.3~3	73~56	286
Ag-W60	14~14.4	95	135	99	141	2.8~3.3	60~50	
Ag-W65	14.5~14.9	110	155	115	161	3.4	50	
Ag-W70	14.7~15.1	120	175	125	183	3.5	48	
Ag-W75	15.4~15.8	137	195	140	200	3.2~3.7	52~45	222
Ag-W80	16.1~16.5	155	195	162	203	4.5	37	

表 6.4-7 国产常用硬质合金牌号、成分及性能

类别	牌号	化学成分/%				物理性能			力学性能					相应的 ISO 牌号
		WC	TiC	TaC (NbC)	Co	密度 /g·cm-3	导热系数 /W·(m·K) ⁻¹	线胀系数 10 ⁻⁶ K ⁻¹	硬度 /HRA	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	冲击韧性 /KJ·m ⁻²	
WC+Co	YG 3	97			3	14.9~15.3	87.9		91	1200		680~690		K01

	YG 3X	95. 6		<0.5	3	15~1 5.3		4.1	91.5	1100	5400~ 5630			K01
	YG	94			6	14.6 ~15	79.6	4.5	89.5	1450	4600	630~6 40		K20
	YG 6X	93. 5		<0.5	6	14.6 ~15	79.6	4.4	91	1400	4700~ 5100		约 30	K10
	YG 8	92			8	14.5 ~14. 9	75.4	4.5	89	1500	4470	600~6 10	约 20	K30
	YG 8C	92			8	14.5 ~14. 9	75.4	4.8	88	1750	3900		约 40	K30
WC+TaC (NbC)+C o	YG 6A	91		3	6	14.9 ~15. 3			91.5	1400			约 60	K10
	YG 8N	91		1	8	14.5 ~14. 9			89.5	1500				K20 K30
WC+TiC +Co	YT 30	66	30		4	9.3~ 9.7	20.9	7	92.5	900		400~4 10		P01
	YT 15	79	15		6	11~1 1.7	33.5	6.51	91	1150	3900	520~5 30	3	P20
	YT 14	78	14		8	11.2 ~12	33.5	6.21	90.5	1200	4200			P30
	YT 5	85	5		10	12.5 ~13. 2	62.8	6.06	89.5	1400	4600	590~6 00	7	M10
WC+TiC +TaC(Nb C)+Co	Y W 1	84	6	4	6	12.6 ~13. 5			91.5	1200				M20
	Y W 2	82	6	4	8	12.4 ~13. 5			90.5	1350				

表 6.4-9 金属钨粉的规格和成分

名称	粒度 /μm	元素含量（质量分数）/%							
		O ₂	Fe	Ca	C	Mo	Ni	Si	W
超细	<1	0.2	0.03	0.005	0.01	0.2	0.005	0.01	≥99.5
细	1~3	0.15	0.03	0.005	0.01	0.2	0.005	0.01	≥99.5
中	3~6	0.1	0.03	0.005	0.01	0.2	0.005	0.01	≥99.5
中粗	8~12	0.08	0.03	0.005	0.01	0.2	0.005	0.01	≥99.5
特粗	≥15	0.08	0.03	0.005	0.01	0.2	0.005	0.01	≥99.5