

含量	0.10 ~ 0.16	0.60	0.60	10.5 ~ 12.0	1.40 ~ 1.80	1.50 ~ 2.00	0.35 ~ 0.50	0.18 ~ 0.30	0.020	0.030
复检	0.13	0.22	0.51	11.60	1.78	1.85	0.47	0.23	/	/

表2 1Cr11Ni2W2MoV钢最终力学性能要求

热处理制度			力学性能					
淬火	回火		b(MPa)	0.2(MPa)	5(%)	(%)	HRC	ak(KJ/m2)
1000 ~ 1020 油或空淬	660 ~ 690	空冷	885	735	15	55	28.0 ~ 35.0	885
	540 ~ 600	空冷	1080	885	12	50	33.5 ~ 41.5	685
	所颁QT31-WY90-13		1080	930	12	50	40.5 ~ 33.5	685

1Cr11Ni2W2MoV钢叶片的热加工工艺试验加热设备均采用RJX-45-9、RJX-75-13工业电炉。原材料装炉前应彻底清除电炉内异物，杜绝混料，按工艺要求校验控温仪表；为提高炉温均匀性，可采用炉门石棉隔热栅，有效率 87%。三、工艺试验 航空1Cr11Ni2W2MoV钢叶片热加工工艺规范的拟定，应严格按照HB5024-89《航空用钢锻件》中的技术规定执行，最终达到表2要求的力学性能。1.锻造工艺 1Cr11Ni2W2MoV钢叶片锻造工艺试验方案如表3所示。

表3 1Cr11Ni2W2MoV钢叶片锻造工艺试验

叶片号	锻件尺寸	原材料尺寸	变形程度 (锻造比)	锻造工艺号
0T21-1	24 × 52 × 138	50 × 100	1.57	F1

0T21-2		75 × 130	3.54	F2
0T22-1	26 × 75 × 175	95 × 160	1.96/1.84	F3
0T22-2		110 × 120	2.63/1.84	
0T23	24 × 52 × 115	65 × 140	2.65	F2
0T63	22 × 38 × 175	53 × 75	2.63	F1
0T64	22 × 40 × 145	53 × 65	2.50	F1

表中：F1—单个毛坯一火锻造成形。F2—一火锻造成形，再均匀切断为三件。F3—二火锻造成形，即预锻后均匀切断为三件，再加热终锻成形。在高温时，1Cr11Ni2W2MoV钢叶片的组织为奥氏体(A)及少量的δ-铁素体(F)，具有良好的热塑性，易于压力加工。为避免组织粗大和δ-F含量过高，锻造的始锻和终锻温度不要太高。停锻后，锻件应置于灰箱中缓冷，防止龟裂发生。适宜的锻造工艺规范应为：850 预热+(1140 ± 20) 始锻+(850 ~ 900) 终锻/灰箱冷。锻件的表面质量不允许有过烧裂纹和严重影响性能的其它缺陷存在；小裂纹、嵌入和成片的氧化皮必须全部清除；一般缺陷的存在均须保证锻件留有(2)/(3)的公称加工余量。在锻件的断口和酸浸试片上显示的低倍组织，不允许有白斑、白点、缩孔、气泡、翻皮、点针偏析和层状断口存在。一经发现严重质量问题，锻件应予报废。

2.热处理工艺 (1) 预备热处理 1Cr11Ni2W2MoV钢叶片预备热处理即锻后热处理，目的是消除锻造加工缺陷和应力，改善其组织，促使充分聚集的碳化物固溶，并可保证所要求的力学性能(布氏硬度要求d=3.70 ~ 4.30)。预备热处理的工艺规范是：850 预热(视装炉量)+(1000 ± 10) 正火/空冷+(740 ± 10) 回火/空冷或850 预热+(740 ± 10) 回火/空冷。(2)最终热处理 1Cr11Ni2W2MoV钢叶片最终热处理正确的工艺规范为：850 预热(视装炉量)+(1010 ± 10) 淬火/油冷+(550 ~ 570) 回火/空冷。

1)淬火1Cr11Ni2W2MoV钢淬火加热温度越高，碳化物溶解得越多，当加热至1000 时，碳化物已全部溶解，若加热温度过高，就会产生过多的δ-F，使钢的性能恶化(主要是强韧性、疲劳性能、蠕变性能的降低)。因此，淬火加热温度应以保证既达到充分奥氏体化，但又只产生少量的δ-F为原则，以(1000 ~ 1020) 最为适宜。该钢的淬硬性和淬透性好，<? 200mm的工件均可淬透，故对类似于航空发动机叶片毛坯的薄壁件，为避免过快的冷却速度造成变形和开裂缺陷，采用油冷淬火效果较好。

2)回火1Cr11Ni2W2MoV钢叶片的回火是一个十分重要的工序，将对最终力学性能产生显著影响。该钢存在二个回火脆性区((350 ~ 530) 和(600 ~ 670))是回火工艺的难点。合适的回火温度范围很窄，稍有偏差就会使钢的冲击韧性下降，所以操作时应十分谨慎。根据1Cr11Ni2W2MoV钢叶片的工作条件，选定550 ~ 570 的回火温度，可以获得最佳的综合力学性能。

四、试验结果 经过理化检验测试，1Cr11Ni2W2MoV钢叶片最终热处理后的力学性能如表4所示

表4 1Cr11Ni2W2MoV钢叶片最终热处理后力学性能(平均值)

叶片号	b (MPa)	0.2 (MPa)	5 (%)	(%)	ak (KJ/m ²)	HRC
OT21-1	1070	932	15	73	2047.6	34.0
OT21-2	1180	980	15	73	1274.0	37.0
OT22-1	1173	987	15	66	1502.3	35.3
OT22-2	1041	956	15	60	741.4	34.7
OT23	1047	948	16	71	2074.8	35.2
OT63	1237	1008	17	69	1131.0	35.0
OT64	1327	1040	15	67	1190.0	36.2

五、结果分析 由表4试验结果可知，7种型号规格的航空1Cr11Ni2W2MoV钢叶片最终热处理后的力学性能基本合格，其中OT21-1、OT21-2及OT63、OT64等4种叶片的综合力学性能最佳、强韧性最好；OT21-1、OT23叶片具有很高的冲击韧性和塑性，但抗拉强度比HB5024-89中的技术规定低；OT22-2叶片的综合力学性能相对较差，其韧性指标勉强达到要求，抗拉强度低3.6%。

1.锻造对力学性能的影响 锻造变形程度(锻造比)是影响综合力学性能的重要因素之一，适宜的锻造比应大于2，反复锻拔有利于破碎材料中的粗大和网状碳化物，可以得到较均匀的力学性能和适中的晶粒度。

2.尺寸效应对力学性能的影响 锻件原材料尺寸越大，则内部原始缺陷的几率越大，锻造后钢的组织也不如小尺寸致密，故尺寸效应越严重。

3.回火脆性对力学性能的影响 1Cr11Ni2W2MoV钢出现的回火脆性，使冲击韧性下降，可能与某种复杂硬化相的析出有关[2]。电子扫描分析证实，钢在回火脆性温度范围内回火，断裂韧性K_{1c}值呈现低谷，这恰与回火二次硬化峰相对应，二次硬化峰的出现是因为(Cr、W、Mo、V)₂C和(Cr、W、Mo、V)₂₃C₆复杂碳化物的析出所致。且在回火脆性区内析出的碳化物都是在M基体上以薄壳形式析出的；若避开回火脆性区回火，则碳化物聚集，薄壳破裂，冲击韧性上升。这就是著名的“薄壳致脆理论”。

4. -F含量对力学性能的影响 1Cr11Ni2W2MoV钢通常含有少量的 -F，含量若超过5%，横向力学性能显著下降(表5)。故应对钢的冶炼、锻造和热处理采取相应措施，来降低 -F的含量。如原材料应采取优质电渣钢热轧棒，加强化学成份的复检；锻造和淬火加热温度不宜过高，以达到充分奥氏体化为原则；回火时间一要足够，保证能使碳化物形成元素充分扩散，二要适当，回火时间太长无助于提高性能，有害无益，应控制在(2.5 ~ 3.5)h为宜。

表5 -F含量对钢的力学性能影响

-F(%)	b (MPa)	0.2 (MPa)	5 (%)	(%)	ak (KJ/m2)
<10	847	663	17.5	51.1	680
~ 15	853	673	15.0	43.7	430
~ 30	815	663	15.5	41.9	190
~ 50	745	594	15.8	29.8	170

六、结束语 在热加工工艺过程中，航空1Cr11Ni2W2MoV钢叶片的力学性能主要与锻造变形程度、尺寸效应、回火脆性和 -F组织等因素有关；认真执行HB5024-89等有关技术规定，实施正确的热加工工艺规范，是提高1Cr11Ni2W2MoV钢叶片的综合力学性能，特别是控制好批量生产时产品质量的重要保证。