

GH2132(GH132)和优质 GH2132

1 概述

GH2132 是 Fe-25Ni-15Cr 基高温合金,加入钼、钛、铝、钒及微量硼综合强化。在 650℃ 以下具有高的屈服强度和持久、蠕变强度,并且具有较好的加工塑性和满意的焊接性能。适合制造在 650℃ 以下长期工作的航空发动机高温承力部件,如涡轮盘、压气机盘、转子叶片和紧固件等。该合金可以生产各种形状的变形产品,如盘件、锻件、板、棒、丝和环形件等。

优质 GH2132 合金,是在 GH2132 合金基础上发展而来,主要是提高合金纯洁度,限制气体含量,控制低熔点元素含量,并调整热处理制度,从而使合金的热强性和长期使用性能提高。

1.1 材料牌号 GH2132(GH132)。

1.2 相近牌号 A286,UNSS66286(美国),ZbNCT25(法国),P. Q. A286(美国)。

1.3 材料的技术标准

GJB 2611—1996 《航空用高温合金冷拉棒材规范》

GJB 2612—1996 《焊接用高温合金冷拉丝材规范》

GJB 3020—1997 《航空用高温合金环坯规范》

GJB 3165—1998 《航空承力件用高温合金热轧和锻制棒材规范》

GJB 3167—1998 《冷锻用高温合金冷拉丝材规范》

GJB 3317—1998 《航空用高温合金热轧板规范》

GJB 3782—1999 《航空用高温合金锻制圆饼规范》

GB/T 14996—1994 《高温合金冷轧薄板》

Q/3B4071—1993 《YZGH2132 合金热轧棒材》

Q/6S1032—1992 《高温紧固件用 YZGH2132 合金棒材》

1.4 化学成分 GH2132 合金化学成分见表 1-1,优质 GH2132 合金化学成分见表 1-2。

表 1-1

%

C	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe	
≤0.08	13.5~16.0	24.0~27.0	1.00~1.50	1.75~2.30	余	
V	B	Mn	Al	Si	P	S
			不 大 于			
0.10~0.50	0.001~0.010	1.00~2.00	0.40	1.00	0.030	0.020

注:1 冷拉棒、圆饼和环坯标准规定 $w(\text{Ti})1.80\% \sim 2.35\%$ 。

2 热轧和冷轧板标准规定, $w(\text{B})0.003\% \sim 0.010\%$, $w(\text{Mn}) \leq 2.00\%$, $w(\text{P}) \leq 0.020\%$, $w(\text{S}) \leq 0.015\%$ 。

3 冷拉焊丝标准规定, $w(\text{Al}) \leq 0.35\%$, $w(\text{Ti})1.75\% \sim 2.35\%$, $w(\text{Si})0.40\% \sim 1.00\%$, $w(\text{P}) \leq 0.020\%$, $w(\text{S}) \leq 0.015\%$ 。

4 冷锻用丝材标准规定, $w(\text{Ti})1.75\% \sim 2.35\%$, $w(\text{Si})$ 为 $0.40\% \sim 1.00\%$, $w(\text{P}) \leq 0.025\%$, $w(\text{S}) \leq 0.020\%$ 。

5 热轧和锻制棒材标准规定 $w(\text{Cu}) \leq 0.25\%$ 。

表 1-2

%

C	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe	V	B	Mn	Al	Si	P	S
不 大 于												
≤0.08	13.50~ 16.00	24.00~ 27.00	1.00~ 1.50	1.90~ 2.35	余	0.10~ 0.50	0.003~ 0.010	0.35	0.35	0.35	0.015	0.002

铁基变形高温合金

续表 1-2

Ca	Mg	Cu	Sn	Pb	Se	Ag	Te	Tl	Bi	N	O
不 大 于											
0.005	0.005	0.30	0.0050	0.0005	0.0003	0.0005	0.00005	0.0001	0.00003	0.0100	0.0050

注:微量元素 Se、Te、Tl 在确定分析方法前,报实测数据,不作为验收依据。

1.5 热处理制度 材料标准规定的 GH2132 热处理制度见表 1-3;优质 GH2132 热处理制度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,1~2h,油冷+ $750\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,16h,空冷。

表 1-3

材料品种	热 处 理 制 度
棒材、圆饼	980~1000 $^{\circ}\text{C}$,1~2h,油冷+700~720 $^{\circ}\text{C}$,12~16h,空冷
热轧板、冷轧板	980~1000 $^{\circ}\text{C}$,空冷+700~720 $^{\circ}\text{C}$,12~16h,空冷
冷拉棒	980~1000 $^{\circ}\text{C}$,1~2h,油冷+700~720 $^{\circ}\text{C}$,16h,空冷
环件毛坯	980~990 $^{\circ}\text{C}$,1~2h,油冷+700~720 $^{\circ}\text{C}$,16h,空冷
冷镦用冷拉丝	980~1000 $^{\circ}\text{C}$,水冷或油冷+700~720 $^{\circ}\text{C}$,16h,空冷

注:冷拉棒和冷镦丝标准规定,性能检验不合格时,可于不大于 760 $^{\circ}\text{C}$ 时效 16h,合格后交货。

1.6 品种规格与供应状态 可以供应各种规格的棒材、板材、丝材、盘件和环件。棒材、圆饼和环坯不经热处理交货;热轧板和冷轧板固溶和酸洗后交货;冷拉棒材于固溶+酸洗状态交货;冷镦丝可于固溶+酸洗盘状、或固溶+酸洗直条状、或固溶直条状磨光和冷拉等几种状态交货;冷拉焊丝于冷拉状态、或固溶+酸洗、或半硬状态交货。

1.7 熔炼与铸造工艺 GH2132 合金可采用非真空感应+电渣,电弧炉+电渣和电弧炉+真空电弧以及真空感应+真空电弧等工艺熔炼。优质 GH2132 合金可采用真空感应+真空电弧工艺熔炼。

1.8 应用概况与特殊要求 在航空上主要用于在 650 $^{\circ}\text{C}$ 以下工作的发动机压气机盘、涡轮盘、承力环、机匣、轴类、紧固件和板材焊接承力件等。在国内该合金已在航空上获得较为广泛的应用。优质 GH2132 合金用作航空发动机压气机叶片及高温紧固件等。

2 物理及化学性能

2.1 热性能

2.1.1 熔化温度范围 1364~1424 $^{\circ}\text{C}$ 〔1〕。

2.1.2 热导率 见表 2-1。

表 2-1〔1〕

$\theta/^{\circ}\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}))$	14.2	15.9	17.2	18.8	20.5	22.2	23.9	25.5	27.6

2.1.3 线膨胀系数 GH2132 线膨胀系数见表 2-2;优质 GH2132 线膨胀系数见表 2-3。

表 2-2〔1〕

$\theta/^{\circ}\text{C}$	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700	20~800	20~900
$\alpha/10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	15.37	16.09	16.31	16.84	17.58	18.06	18.74	19.62	20.45

表 2-3〔2〕

$\theta/^{\circ}\text{C}$	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700	20~800	20~850
$\alpha/10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	15.7	16.0	16.5	16.8	17.3	17.5	17.9	19.1	19.7

铁基变形高温合金

2.2 密度 GH 2132: $\rho=7.93\text{g}/\text{cm}^3$ ^[1];
 优质 GH2132: $\rho=7.99\text{g}/\text{cm}^3$ ^[2]。

2.3 电性能 电阻率见表 2-4。

2.4 磁性能

2.5 化学性能

2.5.1 抗氧化性能 合金在空气介质中试验
 100~300h 后的氧化速率见表 2-5。

表 2-4^[1]

$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400
$\rho/(10^{-6}\Omega\cdot\text{m})$	0.914	0.985	1.018	1.074	1.119
$\theta/^\circ\text{C}$	500	600	700	800	900
$\rho/(10^{-6}\Omega\cdot\text{m})$	1.135	1.165	1.192	1.213	1.225

表 2-5^[1]

$\theta/^\circ\text{C}$	氧化速率/(g/(m ² ·h))			$\theta/^\circ\text{C}$	氧化速率/(g/(m ² ·h))		
	100h	200h	300h		100h	200h	300h
650	0.00417	0.00276	0.00234	850	0.11630	0.12386	0.09672
750	0.03250	0.07216	0.08322	—	—	—	—

3 力学性能

3.1 技术标准规定的性能

3.1.1 技术标准规定的性能 GH2132 合金见表 3-1; 优质 GH2132 合金见表 3-2。

表 3-1

品种	室 温 性 能						$\theta/^\circ\text{C}$	拉伸性能			持久性能		
	σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	$\alpha_{KV}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$	HBS		σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	σ/MPa	t/h	$\delta_5/\%$
	不 小 于							不 小 于					
轧棒	930	—	20	40	—	255~	550	785	16	28	588	100	—
锻棒						321	650	735	15	20	392	100	—
冷拉棒 ^①	900	590	15	20	—	248~ 341	650	—	—	—	451 (392)	23 (100)	5 (3)
热轧板 ^②	885	—	20	—	—	—	650	735	15	—	—	—	—
							550	785	16	—	—	—	—
冷轧板 ^③	885	—	20	—	—	—	650	735	15	—	392	100	实测
							550	785	16	—	588	100	实测
圆饼	930	620	20	40	290	255~321	650	735	15	20	392	100	—
环坯	930	620	20	30	290	255~321	650	735	15	—	392	100	—
冷镦 用丝 ^④	900 (930) ^③	590 —	15 (18)	20 (40)	— —	248~341 (HV260 ~360)	650	—	—	—	451 (392)	23 (100)	5 —

① 冷拉棒和冷镦用丝材, 固溶状态硬度不大于 HBS202(HV194)。

② 板材的高温拉伸和持久试验只作一个温度, 如合同中未注明时按 650℃ 进行试验。

③ 如需方要求, 可按括号内指标进行检验。

表 3-2^[2]

品 种	室 温 性 能					持 久 性 能 ^①			
	σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	HBS	$\theta/^\circ\text{C}$	σ/MPa	t/h	$t_{\text{破}}/\text{h}$
	不小于								
热轧棒 冷拉棒	1035	690	28	30	277~352	650	448	≥ 25	$> t$

① 允许用组合试样, 当持续时间大于 70h 后停止试验, 如果在 70h 前发生断裂, 缺口试样应断在光滑段。分开的光

铁基变形高温合金

滑和缺口持久试验应进行至断裂,缺口试样断裂时间大于 70h 后,可停止试验。如果在 70h 前发生断裂,缺口试样断裂时间应大于光滑试样的断裂时间,缺口半径 $r=0.2\text{mm}$ 。

3.1.2 GH2132 冷拉棒和环坯的室温力学性能的生产检验数据统计处理后的各基值见表 3-3。

表 3-3

品种	统计试样数量	$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$				σ_b/MPa				$\delta_5/\%$		$\phi/\%$		HBS	
		A	B	S	$\bar{X}$	A	B	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$
冷拉棒	702	625	665	590	716	975	1015	900	1058	15	26.6	20	51.1	248~341	280
环坯	100	650	690	620	739	1000	1035	930	1077	20	25.4	30	48.6	255~321	306

3.1.3 GH2132 合金 $d9\sim35\text{mm}$ 热轧棒室温拉伸性能的生产检验数据统计处理后的各基值见表 3-4。

表 3-4^[3]

品 种	统计试样数量	σ_b/MPa					$\delta_s/\%$		$\psi/\%$	
		S	-3σ	A	B	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$
热轧棒	284	930	955	980	1020	1071	20	27	40	52

3.1.4 GH2132 合金 $d420\sim452\text{mm}$ 盘形锻件(弦向取样)室温拉伸性能的生产检验数据统计处理后的各基值以及高温拉伸性能的设计许用值见表 3-5。

表 3-5^[3]

品种	$\theta/^\circ$	拉伸性能	基 值					子样大小 n	品种	$\theta/^\circ$	拉伸性能	基 值					子样大小 n
			S	-3σ	A	B	$\bar{X}$					S	-3σ	A	B	$\bar{X}$	
$d420\sim452\text{mm}$ 盘形锻件	室温	σ_b	930	900	930	970	1022	192	$d420\sim452\text{mm}$ 盘形锻件	550	δ_5	—	—	—	—	17	—
		$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	620	545	580	625	684	173			ψ	—	—	—	—	38	—
		$\sigma_{P0.1}$	—	515	545	590	658	—			σ_b	—	735	755	790	836	—
		δ_5	20	—	—	—	27	248			$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	—	470	500	540	619	—
		ψ	40	—	—	—	43	244			$\sigma_{P0.1}$	—	445	470	510	588	—
		σ_b	—	790	815	855	903	—			δ_5	—	—	—	—	18	—
		$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	—	470	500	540	616	—			ψ	—	—	—	—	33	—
		$\sigma_{P0.1}$	—	450	480	515	586	—			σ_b	735	680	705	735	780	—
		δ_5	—	—	—	—	20	—			$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	—	470	500	540	608	—
		ψ	—	—	—	—	38	—			$\sigma_{P0.1}$	—	445	470	510	584	—
	400	σ_b	—	775	805	835	880	—		650	δ_5	15	—	—	—	19	—
		$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	—	470	500	540	610	—			ψ	20	—	—	—	27	—
		$\sigma_{P0.1}$	—	445	470	510	580	—			σ_b	—	590	610	635	675	—
		δ_5	—	—	—	—	19	—			$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	—	415	440	475	538	—
		ψ	—	—	—	—	39	—			$\sigma_{P0.1}$	—	400	425	460	525	—
		σ_b	—	755	780	810	862	—			δ_5	—	—	—	—	16	—
	550	$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	—	470	500	540	609	—		700	ψ	—	—	—	—	20	—
		$\sigma_{P0.1}$	—	445	470	510	580	—									

3.2 室温及各种温度下的力学性能

3.2.1 硬度 见表 3-1~表 3-3。

3.2.2 拉伸性能

3.2.2.1 电弧炉+真空电弧重熔 GH2132 合金于标准热处理状态的拉伸性能见表 3-6。

表 3-6^[1,4]

$\theta/^\circ\text{C}$	σ_b/MPa			$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$			$\delta/\%$			$\phi/\%$		
	90mm 方	盘件	环件	90mm 方	盘件	环件	90mm 方	盘件	环件	90mm 方	盘件	环件
20	1033	969	1035	714	690	768	24.7	28.2	23.6	46.4	42.9	34.5
400	869	—	—	—	—	—	20.1	—	—	43.9	—	—
450	—	881	—	—	603	—	—	19.4	—	—	46.4	—
500	885	829	—	—	590	—	19.1	18.8	—	48.5	44.0	—
550	882	827	881	—	590	684	18.7	19.6	18.2	50.4	47.8	36.0
600	828	803	—	—	595	—	21.9	22.7	—	52.9	41.1	—
650	780	736	828	—	614	692	31.4	26.5	25.0	57.8	52.5	40.8
700	673	—	—	—	—	—	30.7	—	—	61.6	—	—
750	550	459	560	—	454	484	31.3	50.0	44.9	56.5	71.4	70.0
800	348	—	483	—	—	—	58.3	—	38.8	83.1	—	66.3
900	108	—	143	—	—	—	100.2	—	105.8	98.1	—	94.1
950	—	—	110	—	—	—	—	—	101.3	—	—	94.8
1000	108	—	83	—	—	—	103.8	—	96.2	98.5	—	96.3
1050	98	—	58	—	—	—	118.9	—	110.7	98.5	—	99.5
1100	—	—	47	—	—	—	—	—	131.6	—	—	97.9
1120	59	—	39	—	—	—	87.3	—	126.5	88.6	—	97.9
1140	59	—	—	—	—	—	128.4	—	—	91.0	—	—
1160	59	—	—	—	—	—	39.0	—	—	49.6	—	—
1180	20	—	—	—	—	—	8.4	—	—	11.6	—	—

注:盘件直径 $d732\text{mm}$,弦向取样;环件尺寸为 $d690\text{mm} \times d530\text{mm} \times 240\text{mm}$ 。

3.2.2.2 电弧炉+电渣和感应炉+电渣重熔 GH2132 合金,于标准热处理状态的拉伸性能见表 3-7。

表 3-7^[1,4]

$\theta/^\circ\text{C}$	σ_b/MPa			$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$		$\delta/\%$			$\phi/\%$	
	90mm 方	棒材	板材	90mm 方	棒材	90mm 方	棒材	板材	90mm 方	棒材
20	1035	892	1157	750	677	26.0	28.0	27.9	45.3	43.7
400	927	912	1040	674	—	22.3	22.4	18.4	46.8	45.7
450	902	—	—	672	—	19.3	—	—	44.3	—
500	900	—	991	652	—	22.5	—	18.9	47.8	—
550	873	853	927	640	628	21.8	22.4	20.7	44.5	50.7
600	799	—	902	640	—	18.5	—	25.2	33.0	—
650	797	765	799	691	598	21.8	36.2	32.4	34.0	51.8
700	699	—	—	650	—	12.0	—	—	21.5	—
750	574	510	574	547	—	18.5	54.6	49.0	20.8	64.8
800	402	—	368	390	—	41.4	—	53.0	62.8	—

注:90mm 方坯和 $d45\text{mm}$ 棒材采用电弧炉+电渣重熔;板材厚度 $\delta 1.5 \sim 2.0\text{mm}$,采用感应炉+电渣重熔。

3.2.2.3 优质 GH2132 合金标准热处理状态下 $d25\text{mm}$ 棒材性能见表 3-8。表 3-8^[3]

$\theta/^\circ\text{C}$	$\sigma_{P0.1}/\text{MPa}$	$\sigma_{P0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	σ_{bH}/MPa	$\alpha_{KL}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$
20	765	785	1160	25.5	49.5	1595	1000
300	749	777	1050	20	50	1464	805
450	743	751	1007	19	51	1418	780
550	718	730	961	19	52	1192	750
650	685	715	783	17	39	1262	680

注: 缺口半径 $r=0.2\text{mm}$ 。

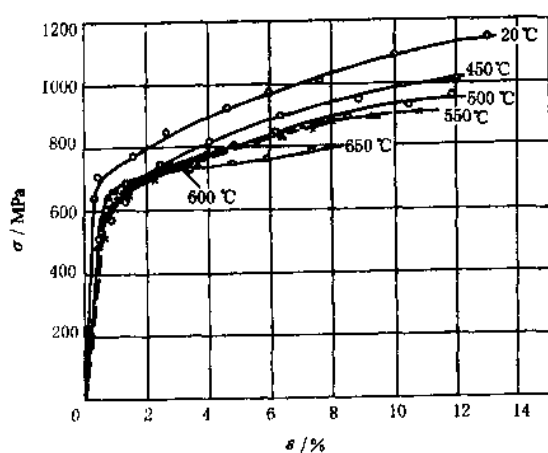
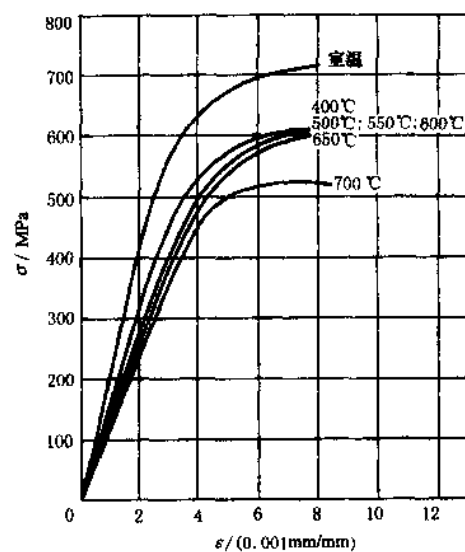
3.2.2.4 GH2132 $d732\text{mm}$ 模锻件弦向试样的真实拉伸应力-应变曲线见图 3-1, 曲线的回归方程和回归系数见表 3-9。

表 3-9^[6]

方程式	系数	20℃	450℃	500℃	550℃	600℃	650℃
$\sigma = k_t \epsilon_t^{n_t}$	n_t	0.147	0.174	0.163	0.157	0.153	0.08
	k_t	1476	1442	1328	1280	1292	962
$\sigma = k_p \epsilon_p^{n_p}$	n_p	0.163	0.159	0.140	0.140	0.132	0.057
	k_p	1588	1435	1304	1256	1245	913

注: ϵ_t 和 ϵ_p 分别为总应变和塑性应变。

3.2.2.5 GH2132 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件在不同温度下的典型拉伸应力-应变曲线见图 3-2, 不同温度的典型拉伸全应力-应变曲线见图 3-3~图 3-9。

图 3-1 $d732\text{mm}$ 盘形锻件真实拉伸应力-应变曲线^[6]图 3-2 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件不同温度典型拉伸应力-应变曲线^[3]

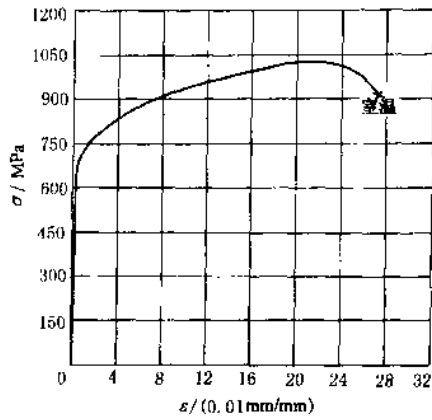


图 3-3 盘形锻件室温典型拉伸全应力-应变曲线^[3]

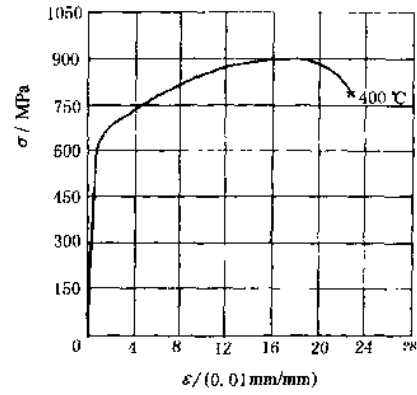


图 3-4 盘形锻件 400 °C 典型拉伸全应力-应变曲线^[3]

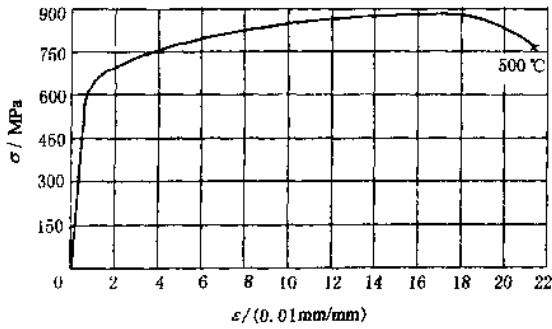


图 3-5 盘形锻件 500 °C 典型拉伸全应力-应变曲线^[3]

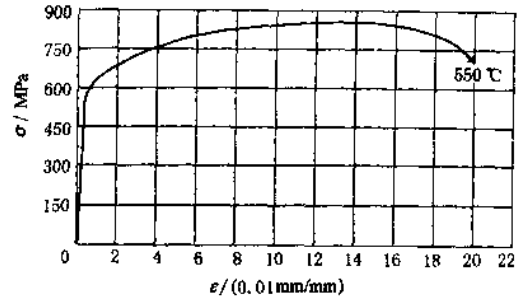


图 3-6 盘形锻件 550 °C 典型拉伸全应力-应变曲线^[3]

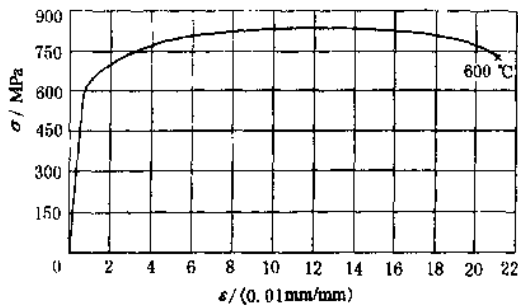


图 3-7 盘形锻件 600 °C 典型拉伸全应力-应变曲线^[3]

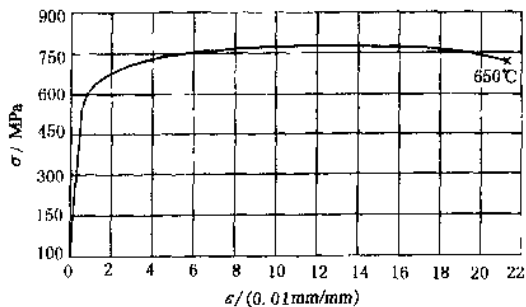


图 3-8 盘形锻件 650 °C 典型拉伸全应力-应变曲线^[3]

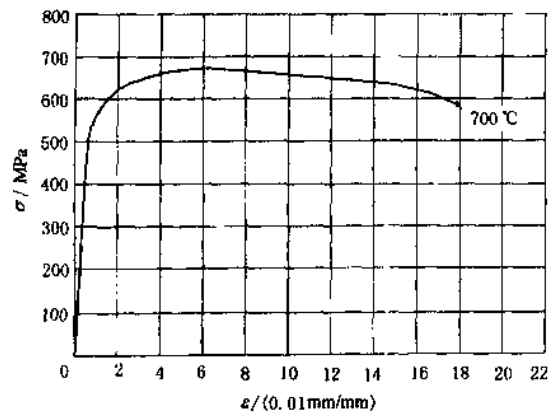


图 3-9 盘形锻件 700 °C 典型拉伸全应力-应变曲线^[3]

3.2.2.6 电弧炉+真空电弧重熔的 GH2132 90mm 方锻材,经标准热处理和长期时效后的拉伸性能见表 3-10。

表 3-10^[1]

时效制度		20℃				650℃		
$\theta/^\circ\text{C}$	t/h	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\psi/\%$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$
550	0	1090	690	26.9	51.2	775	34.8	57.1
	100	1122	751	26.7	50.2	775	39.6	62.3
	300	1141	772	27.3	45.4	796	36.8	61.5
	500	1144	749	26.0	48.5	777	28.0	62.1
	1000	1135	774	24.6	48.2	800	32.8	60.5
	1600	1132	803	25.9	44.0	781	30.8	59.3
	3000	1137	761	25.8	46.7	802	33.2	56.4
	6000	1166	829	24.5	44.9	808	33.4	62.0
	10000	1160	827	25.5	46.5	794	38.2	61.3
600	0	985	682	27.6	51.4	757	23.5	59.3
	100	1101	792	24.3	47.4	747	25.7	59.3
	300	1104	788	26.1	46.9	808	22.7	57.7
	1000	1091	792	25.2	44.9	—	—	—
	3000	1099	774	25.4	48.4	755	26.7	63.1
	6000	1080	757	24.1	44.9	771	30.2	64.2
	10000	1082	775	24.7	45.1	737	32.4	59.7
	—	—	—	—	—	—	—	—
650	0	1011	678	24.1	46.1	772	34.4	61.1
	100	1090	744	25.3	46.1	781	23.2	33.8
	200	1091	740	24.7	45.4	771	25.0	52.4
	300	1087	733	24.5	44.4	780	24.3	54.9
	500	1082	715	25.0	45.0	753	28.9	51.9
	1000	1071	712	24.4	44.6	723	27.6	49.5
	1600	1065	677	23.7	42.8	712	26.1	42.5
	3000	943	596	20.4	22.8	610	23.8	36.7
	6000	907	—	11.3	15.9	605	21.8	33.1

3.2.2.7 GH2132 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件不同温度的缺口抗拉强度的设计许用值见表 3-11。

3.2.3 压缩性能

3.2.3.1 GH2132 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件不同温度压缩屈服强度的设计许用值见表 3-12,平均压缩应力-应变曲线见图 3-10。

表 3-11^[3]

$\theta/^\circ\text{C}$		20	400	500	650
σ_{bl} 各基 值/MPa	-3σ	1195	1065	1040	1000
	A	1235	1100	1070	1020
	B	1290	1150	1120	1065
	$\bar{X}$	1360	1225	1205	1135

表 3-12^[3]

$\theta/^\circ\text{C}$		20	500	550	650	700
$\sigma_{\text{Pr}0.2}$ 各基 值/MPa	-3 σ	530	450	450	440	420
	A	560	480	480	470	450
	B	610	520	520	510	480

3.2.4 冲击性能

3.2.4.1 标准热处理状态的 GH2132 冲击性能见表 3-13 和表 3-14。

表 3-13^[1,4]

取样规格/mm			$a_{KU}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$								
			20℃	400℃	450℃	500℃	550℃	600℃	650℃	700℃	800℃
90 方坯	电弧炉+电渣		910	710	850	860	810	790	790	810	1960
	电弧炉+真空电弧		1130	940	—	940	950	890	830	860	2200
大环件	弦 向		1230	—	780	—	1050	—	1040	—	960
	径 向		980	—	850	—	770	—	930	—	870
盘 件 (d732)	轮 缘	弦向	960	—	740	770	750	720	—	—	730
		径向	920	—	—	—	—	—	640	—	—
	$\frac{1}{2}R$	弦向	880	—	—	—	770	—	650	—	—
		径向	930	—	—	—	710	—	700	—	—
	轮 心	弦向	950	—	—	—	—	—	—	—	—
		径向	900	—	—	—	530	—	510	—	—

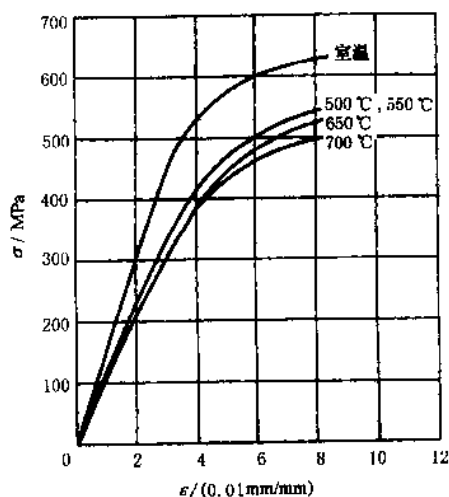
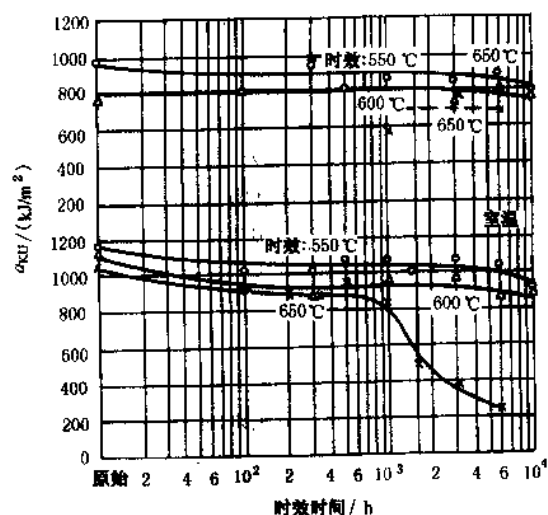
注:环件和盘件采用电弧炉+真空电弧炉重熔工艺。

表 3-14^[1,4]

$\theta/^\circ\text{C}$	900	1000	1050	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200
$a_{KU}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$	>2600	>2590	>2380	>2200	780	630	240	220	98	88

注:试样取自电弧炉+真空电弧重熔 90mm 方锻件。

3.2.4.2 GH2132 合金经标准热处理和长期时效后的冲击性能见图 3-11。

图 3-10 d420~452mm 盘形锻件不同温度的平均压缩应力-应变曲线^[3]图 3-11 长期时效后合金室温和 650℃ 冲击韧性的变化^[1]

3.2.5 扭转与剪切性能 GH2132 d420~452mm 盘形锻件不同温度的扭转性能见表 3-15。

3.3 持久和蠕变性能

3.3.1 高温持久性能

表 3-15^[3]

$\theta/^\circ\text{C}$	室温	500	550	650	700
τ_b/MPa	909	754	749	673	583
$\tau_{pb.3}/\text{MPa}$	470	414	419	422	378

3.3.1.1 电弧加真空电弧重熔 GH2132 合金,标准热处理状态的持久强度值的均值见表 3-16,均值 $\pm 2s$ 的下限值见表 3-17。

表 3-16^[6]

$\theta/^\circ\text{C}$	σ/MPa									
	10h	100h	500h	1000h	3000h	5000h	10000h	30000h	50000h	100000h
500	860	782	727	704	666	649	625	587	570	545
550	755	672	613	588	547	528	502	461	441	414
600	650	561	497	469	424	403	374	326	303	271
650	544	446	375	344	292	267	232	177	154	128
700	434	325	242	205	151	—	—	—	—	—
750	317	191	119	99	80	—	—	—	—	—

注:表中给出的持久强度值,是根据热强参数综合(L-M)曲线的回归方程确定的均值。

表 3-17^[6]

$\theta/^\circ\text{C}$	σ/MPa									
	10h	100h	500h	1000h	3000h	5000h	10000h	30000h	50000h	100000h
500	835	757	702	678	641	623	600	562	544	520
550	728	645	586	560	520	500	474	432	412	385
600	621	531	467	439	393	372	342	292	269	236
650	513	414	341	309	255	230	195	145	126	107
700	400	287	203	167	122	—	—	—	—	—
750	278	153	98	85	70	—	—	—	—	—

注:表中给出的持久强度值,是根据热强参数综合(L-M)曲线的回归方程确定的均值 $\pm 2s$ 的下限值。

3.3.1.2 电弧炉加电渣重熔 GH2132 合金 90mm 方锻材标准热处理状态的持久应力-寿命曲线见图 3-12;电弧炉加真空电弧重熔合金 90mm 方锻材的持久应力-寿命曲线见图 3-13, $\phi 732\text{mm}$ 盘件的持久应力-寿命曲线见图 3-14。

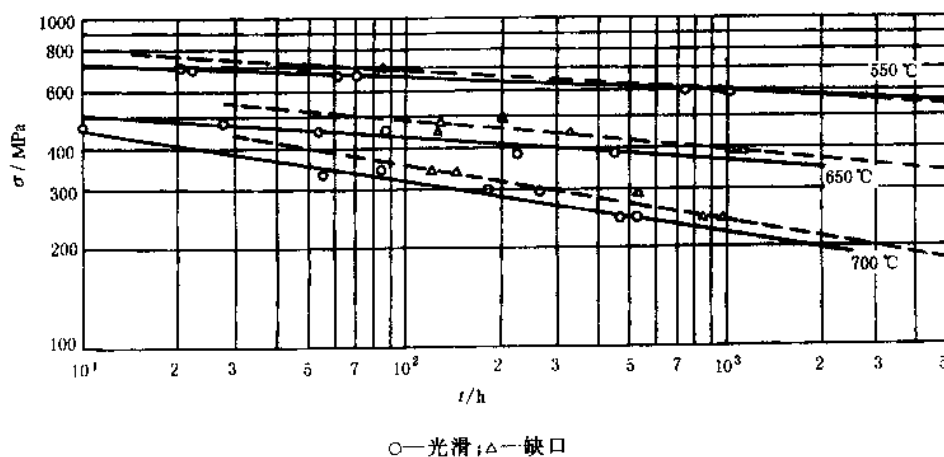


图 3-12 电弧炉加电渣重熔 GH2132 90mm 方坯的持久应力-寿命曲线^[1]

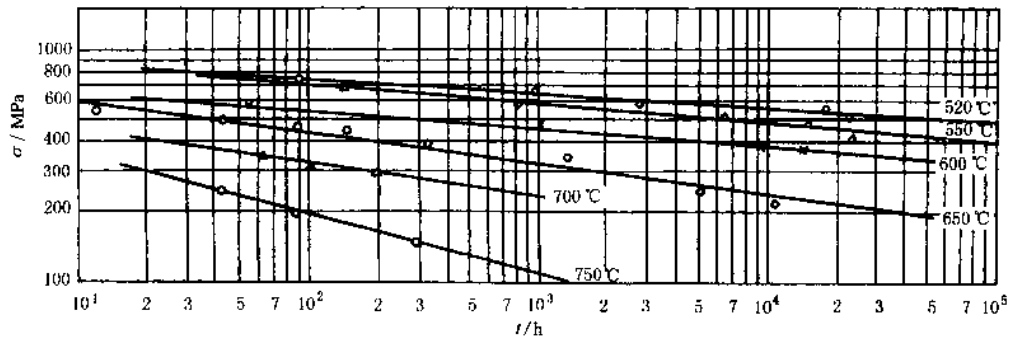


图 3-13 电弧炉加真空电弧重熔 GH2132 90mm 方坯的持久应力-寿命曲线^[1,6]

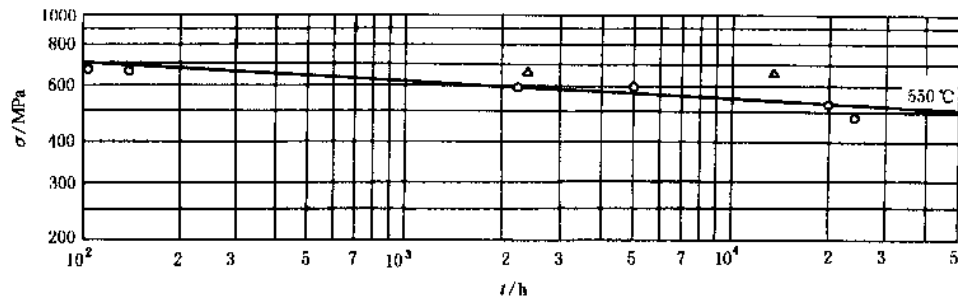
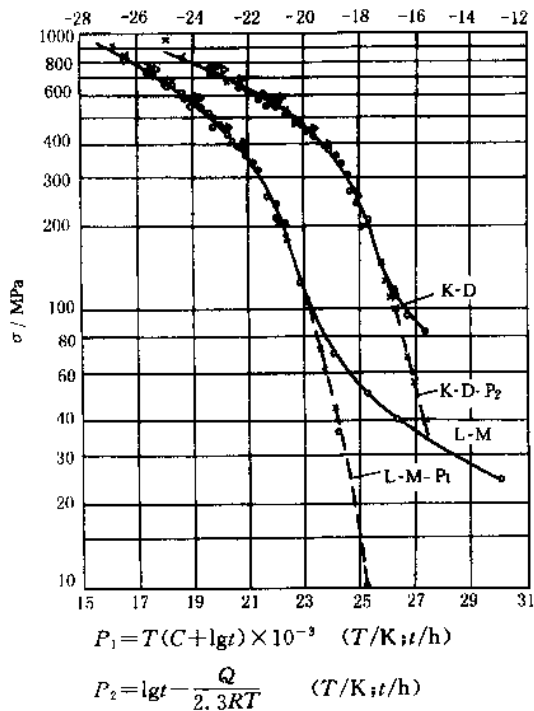


图 3-14 电弧炉加真空电弧重熔 GH2132 d732mm 盘形锻件持久应力-寿命曲线^[6]

3.3.1.3 GH2132 合金标准热处理状态的热强参数综合曲线见图 3-15。



L-M 曲线: $C=19.731966$, S. D. (标准差) $=0.1608791$,

r (相关系数) $=0.9808$,

$T(19.731966 + \lg t) = 43243.819 - 45173.797 \lg \sigma$
 $+ 34944.211(\lg \sigma)^2 - 9729.1682(\lg \sigma)^3$;

L-M- P_1 曲线: $P_1 = T(19.731966 + \lg t) \times 10^{-3}$,

S. D. $=0.01352809$, $r=0.9963$,

$\lg \sigma = 23.147008 - 3.431743 P_1 + 0.187266 P_1^2$
 $- 3.4685909 \times 10^{-3} P_1^3$;

K-D 曲线: $Q = 92212.416 \text{ cal/mol}$,

S. D. $=0.1628108$, $r=0.9803$,

$\lg t - Q/2.3RT = 26.794241 - 97.003817 \lg \sigma + 72.755717$
 $(\lg \sigma)^2 - 18.824429(\lg \sigma)^3$;

K-D- P_2 曲线: $P_2 = \lg t - 92212.416/2.3RT$,

S. D. $=0.0156571$, $r=0.9950$,

$\lg \sigma = -35.384535 - 4.92543 P_2 - 0.21912882 P_2^2$
 $- 3.2759311 \times 10^{-3} P_2^3$, $R = 1.986457 \text{ cal/mol}$

(上述方程式中: T/K ; t/h ; $\sigma/9.8 \text{ MPa}$);

×, O—90mm 方坯; ▽—d732mm 盘件

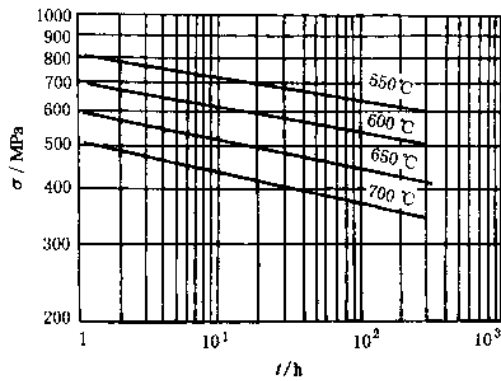
图 3-15 热强参数综合曲线 ($n=85$)^[6]

3.3.1.4 GH2132 d420~452mm 盘形锻件标准热处理状态的持久强度见表 3-18,持久应力-寿命曲线见图 3-16,热强参数综合曲线见图 3-17。

铁基变形高温合金

表 3-18^[3]

$\theta/^\circ\text{C}$	550	600	650	700	$\theta/^\circ\text{C}$	550	600	650	700
σ_{1c}/MPa	713	608	515	433	σ_{100}/MPa	632	532	445	369
σ_{30}/MPa	673	571	480	402	σ_{300}/MPa	596	499	414	342



持久方程[L-M];

$$\lg t = b_0 + b_1/T + b_2x/T + b_3x^2/T + b_4x^3/T;$$

$$\text{式中: } T = (9 \times \theta/5 + 32) + 460;$$

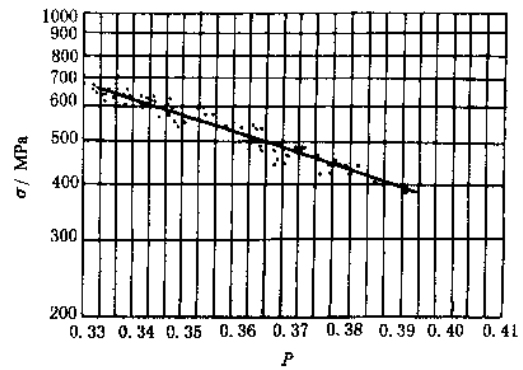
$$x = \lg \sigma; b_0 = -20.842; b_1 = 0.755 \times 10^5;$$

$$b_2 = -0.761 \times 10^4; b_3 = -521.948; b_4 = -739.617;$$

$$\text{相关偏差: } 0.018; \text{相关系数: } 0.93$$

图 3-16 $d420 \sim 452\text{mm}$ 盘形锻件

持久应力-寿命曲线^[3]



热强参数综合方程[L-M];

$$\lg \sigma = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3;$$

$$\text{式中: } P = T(\lg t + 20.82)/10^5;$$

$$T = (9 \times \theta/5 + 32) + 460; a_0 = 3.640; a_1 = -1.45;$$

$$a_2 = -2.857; a_3 = -0.573;$$

$$\text{相关偏差: } 0.018; \text{相关系数: } 0.93$$

图 3-17 $d420 \sim 452\text{mm}$ 盘形锻件

热强参数综合曲线^[3]

3.3.1.5 GH2132 合金经标准热处理和长期时效后的持久性能见表 3-19。

表 3-19^[1]

时效温度/ $^\circ\text{C}$	项 目		以下时效时间的持久性能								
			0	100h	300h	500h	1000h	1600h	3000h	6000h	10000h
550	光滑持久	t/h	275	299	231	177	266	186	267	193	135
600			314	163	338	—	228	—	202	230	207
650			>101	180	112	231	200	31	—	—	—
550		$\delta_5/\%$	29.4	20.1	11.6	16.8	15.8	20.4	25.3	19.2	15.8
600			21.1	22.1	27.3	—	25.6	—	37.3	29.8	35.5
650			—	21.2	24.1	29.6	27.7	31.8	—	—	—
550		$\psi/\%$	30.2	25.6	25.8	26.1	20.1	29.6	27.8	30.1	—
600			40.3	49.1	40.2	—	39.5	—	46.5	32.2	49.7
650			—	38.2	35.9	31.9	—	36.5	—	—	—
550	缺口持久	t/h	—	629	1199	820	—	—	551	996	—
600			128	1205	1253	—	—	—	—	—	—
650			1159	653	1029	612	427	307	—	—	—

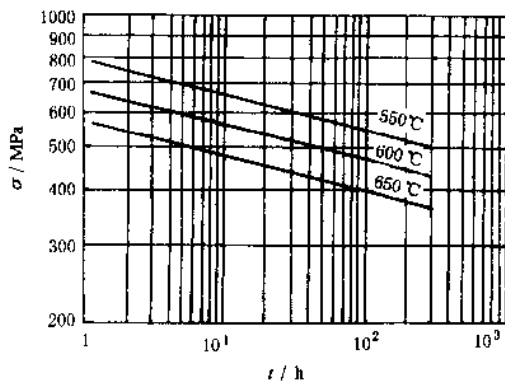
注:持久试验条件为 $\theta = 650^\circ\text{C}$, $\sigma = 392\text{MPa}$ 。

3.3.2 高温蠕变性能

3.3.2.1 GH2312 合金 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件标准热处理状态的蠕变强度见表 3-20, 不同温度和不同塑性应变的蠕变应力-寿命曲线见图 3-18~图 3-20。

表 3-20^[3]

试验时间/h	$\varepsilon_p/\%$	σ/MPa			试验时间/h	$\varepsilon_p/\%$	σ/MPa		
		550℃	600℃	650℃			550℃	600℃	650℃
10	0.1	652	555	474	30	0.5	652	555	474
	0.2	695	592	505	100	0.1	546	466	399
	0.5	711	605	515		0.2	581	496	424
30	0.1	598	510	436		0.5	594	506	433
	0.2	638	544	464					



0.1%塑性应变蠕变方程[M-S]:

$$\lg t = b_0 + b_1 T + b_2 x + b_3 x^2 + b_4 x^3;$$

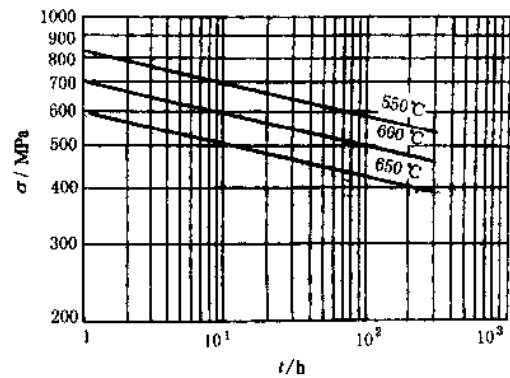
$$\text{式中: } T = (9 \times \theta / 5 + 32) + 460;$$

$$x = \lg \sigma; b_0 = 81.774; b_1 = -0.010;$$

$$b_2 = -41.522; b_3 = 9.081; b_4 = -0.943;$$

相关偏差: 0.023; 相关系数: 0.887

图 3-18 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件 0.1% 塑性应变蠕变应力-寿命曲线^[3]



0.2%塑性应变蠕变方程[M-S]:

$$\lg t = b_0 + b_1 T + b_2 x + b_3 x^2 + b_4 x^3;$$

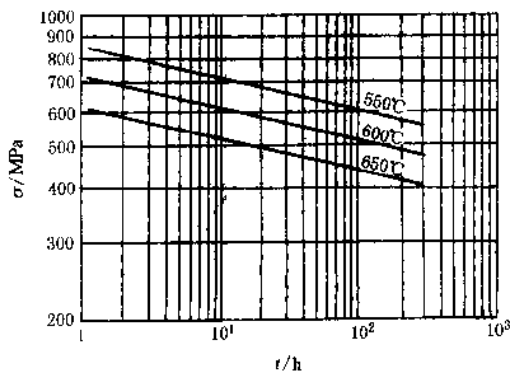
$$\text{式中: } T = (9 \times \theta / 5 + 32) + 460;$$

$$x = \lg \sigma; b_0 = 82.130; b_1 = -0.010;$$

$$b_2 = -41.522; b_3 = 9.081; b_4 = -0.943;$$

相关偏差: 0.023; 相关系数: 0.887

图 3-19 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件 0.2% 塑性应变蠕变应力-寿命曲线^[3]



0.5%塑性应变蠕变方程[M-S]:

$$\lg t = b_0 + b_1 T + b_2 x + b_3 x^2 + b_4 x^3;$$

$$\text{式中: } T = (9 \times \theta / 5 + 32) + 460;$$

$$x = \lg \sigma; b_0 = 82.252; b_1 = -0.010;$$

$$b_2 = -41.522; b_3 = 9.081; b_4 = -0.943;$$

相关偏差: 0.023; 相关系数: 0.887

图 3-20 $d420\sim 452\text{mm}$ 盘形锻件 0.5% 塑性应变蠕变应力-寿命曲线^[3]

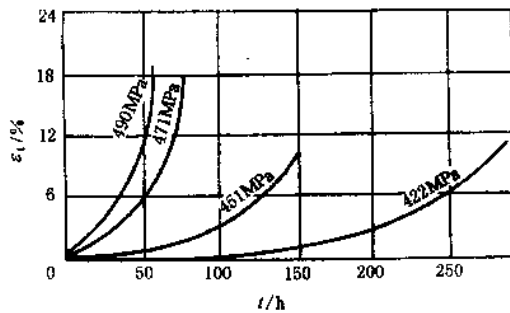
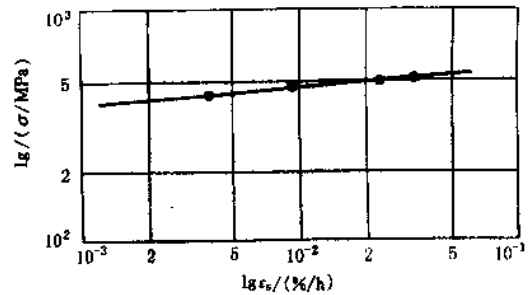
3.3.2.2 不同工艺熔炼的 GH2132 合金于标准热处理状态的蠕变性能见表 3-21。

表 3-21^[4]

熔炼工艺	$\theta/^\circ\text{C}$	σ/MPa	t/h	$\epsilon_t/\%$	$\epsilon_p/\%$	$\epsilon_s/\%$	$\dot{\epsilon}_s/(\text{mm/h})$
感应+电渣	650	358	100	0.4390	0.1980	0.2410	—
电弧炉+电渣	550	441	100	0.2734	0.0032	0.2702	~ 0
	650	284	100	0.2255	0.0445	0.1810	5.875×10^{-6}
		343	100	0.3658	0.1260	0.2398	14.750×10^{-6}
电弧炉+真空电弧	650	284	100	0.2642	0.0639	0.2003	—

3.3.2.3 GH2132 蠕变曲线见图 3-21。

3.3.2.4 GH2132 合金在 650℃ 时的稳态蠕变速率与蠕变应力的关系见图 3-22。

图 3-21 650℃ 的蠕变曲线^[1]

$$\dot{\epsilon}_s = 1.2439 \times 10^{-27} \sigma^{15.0028} (r = 0.9907)$$

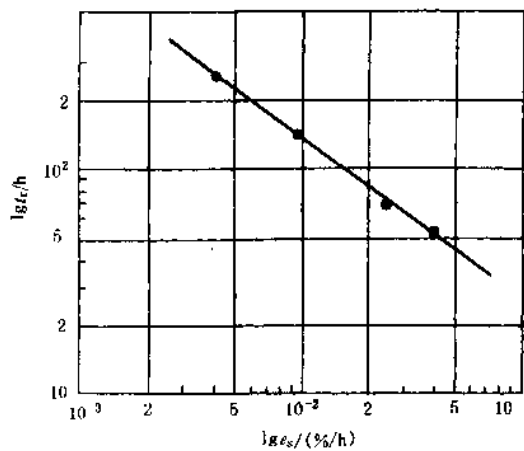
图 3-22 650℃ 蠕变时的 $\dot{\epsilon}_s$ 与 σ 的关系^[7]

3.3.3 周期持久 GH2132 合金在周期应力作用下的蠕变-疲劳复合损伤图见图 3-24, 在周期持久条件下, 所表现的蠕变-疲劳交互作用复合损伤图见图 3-25。

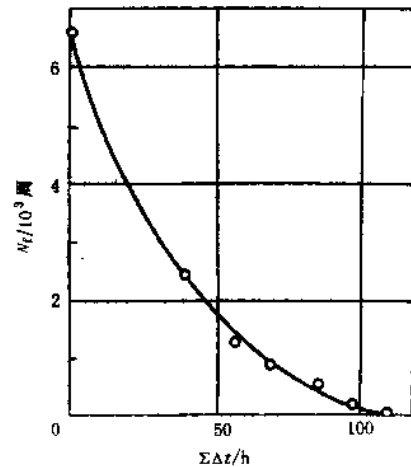
3.3.4 动态蠕变

3.3.4.1 GH2132 合金在 650℃ 下固定平均应力的动态蠕变曲线见图 3-26。

3.3.4.2 GH2132 动态蠕变条件下的交变应力幅值对稳态蠕变速率的影响见图 3-27。



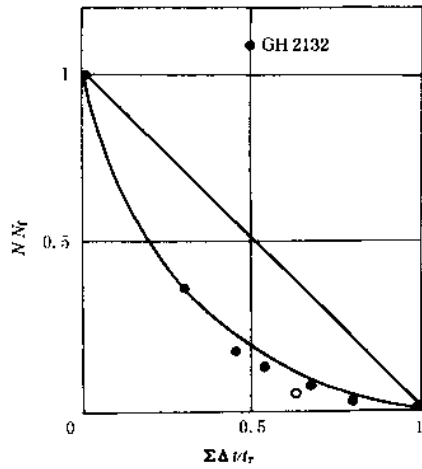
$$\dot{\epsilon}_s^{0.7478} t_r = 4.5580 (r = -0.9992)$$

图 3-23 650℃ 蠕变时的 $\dot{\epsilon}_s$ 与 t_r 的关系^[7]

$$\theta = 650^\circ\text{C}, \sigma = 451\text{MPa},$$

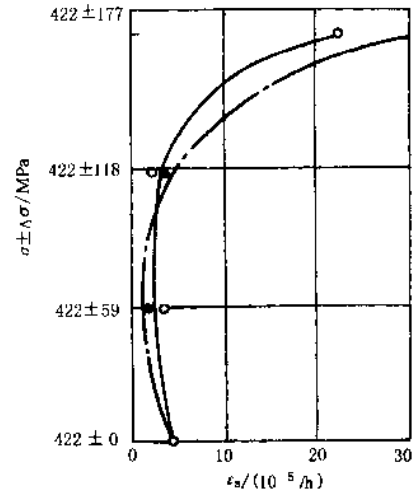
$$\text{保温时间 } \Delta t = 0, 1, 3, 5, 10, 30, \infty \text{ min}$$

图 3-24 周期应力作用下蠕变-疲劳复合损伤图^[7]



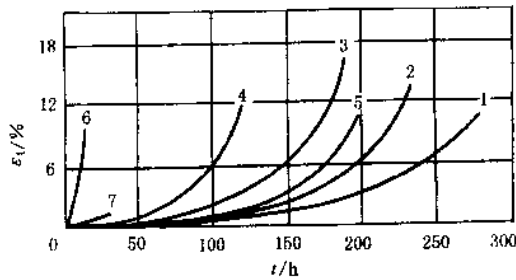
试验条件同图 3-24

图 3-25 周期持久条件下的蠕变-疲劳交互作用复合损伤图^[7]



$\theta = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\circ$ —10Hz; $\bullet$ —0.1Hz

图 3-27 交变应力幅值对稳态蠕变速率的影响^[7]



- 1— $\sigma = 422\text{MPa}$;
- 2— $\sigma + \Delta\sigma = 422\text{MPa} \pm 59\text{MPa}$, $f = 0.1\text{Hz}$;
- 3— $422\text{MPa} \pm 59\text{MPa}$, 10Hz;
- 4— $422\text{MPa} \pm 118\text{MPa}$, 0.1Hz;
- 5— $422\text{MPa} \pm 118\text{MPa}$, 10Hz;
- 6— $422\text{MPa} \pm 117\text{MPa}$, 0.1Hz;
- 7— $422\text{MPa} \pm 177\text{MPa}$, 10Hz

图 3-26 650 °C 的动态蠕变曲线^[7]

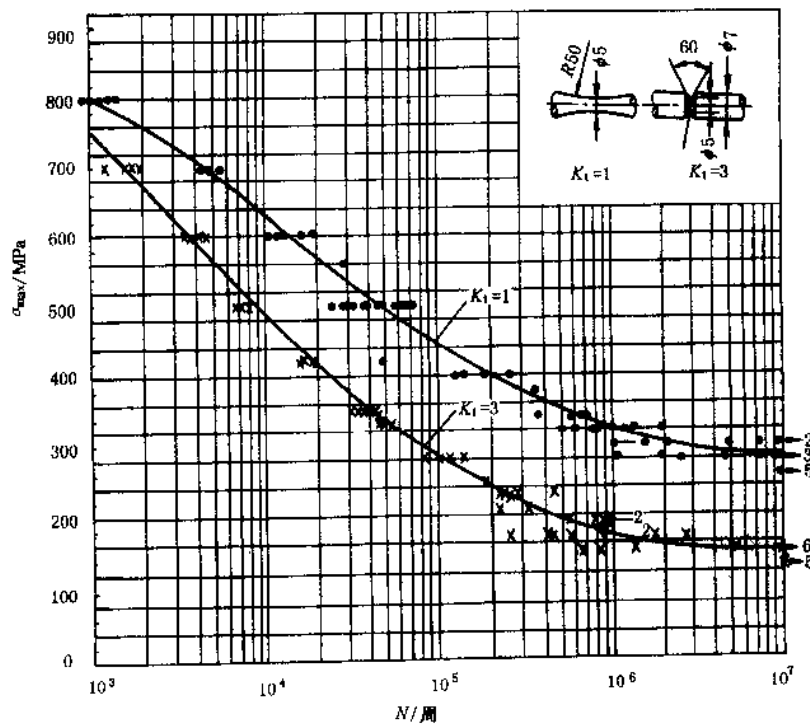


图 3-28 $d420 \sim 452\text{mm}$ 盘形锻件室温 S-N 曲线^[3]

3.4 疲劳性能

3.4.1 高周疲劳

3.4.1.1 GH2132 $\phi 420 \sim 452\text{mm}$ 盘形锻件标准热处理状态,在轴向加载($R=-1$)时的室温疲劳强度见表 3-22,室温疲劳 $S-N$ 曲线见图 3-28。

表 3-22^[3]

K_t	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$						
	5×10^3 周	10^4 周	5×10^4 周	10^5 周	5×10^5 周	10^6 周	10^7 周
1	690	630	495	445	350	320	285
3	565	490	330	285	190	175	150

3.4.1.2 不同工艺熔炼的 GH2132 合金标准热处理状态的高温疲劳强度见表 3-23。

表 3-23^[1]

熔炼工艺	取样规格/mm	$\theta/^\circ\text{C}$	σ_{-1}/MPa	$\sigma_{-1H}^{\text{①}}/\text{MPa}$	熔炼工艺	取样规格/mm	$\theta/^\circ\text{C}$	σ_{-1}/MPa	$\sigma_{-1H}^{\text{①}}/\text{MPa}$
感应炉+电渣	棒材($\phi 45$)	650	294	245	电弧炉+真空电弧	90 方锻件	550	441	206
电弧炉+电渣	90 方锻件	20	294	—			650	382	226
		550	402	167		盘件($\phi 732$)	650	343	226
		650	382	226					
		—	—	—	—	—	—	—	—

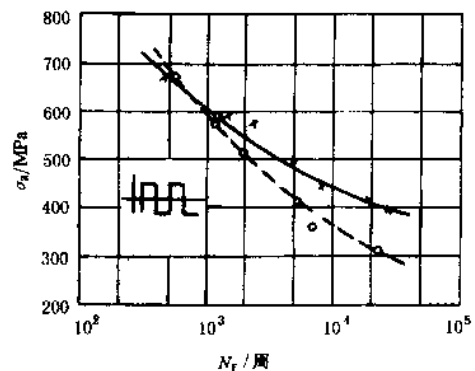
① 缺口半径 $r=0.75\text{mm}$ 。

3.4.2 低周疲劳 标准热处理状态 GH2132 的低周疲劳曲线见图 3-29。

3.4.3 特种疲劳 GH2132 板材的热疲劳性能见表 3-24。

表 3-24^[1]

熔炼工艺	状态	取样规格	$\theta/^\circ\text{C}$	$N/\text{周}$	裂纹长/mm
感应炉+电渣	标准热处理	板材($\phi 2\text{mm}$)	650 ± 20	240 560	0.185 0.203



$\theta=650^\circ\text{C}; f=1\text{Hz}; +$ —光滑; $\circ$ —缺口

图 3-29 650°C 的低周疲劳^[7]

3.4.4 疲劳-蠕变交互作用 GH2132 合金在 650°C , $\sigma_{\max}=588\text{MPa}$ 和 677MPa 时的疲劳-蠕变交互作用图分别见图 3-30 和图 3-31。

3.5 弹性性能

3.5.1 弹性模量

3.5.1.1 合金动态弹性模量见表 3-25。

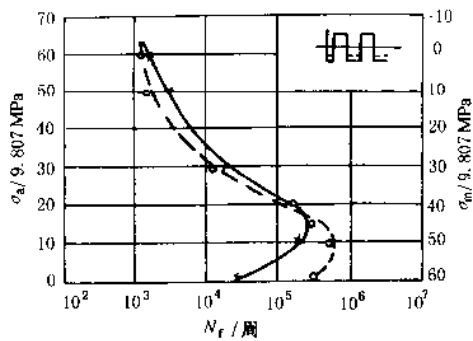
3.5.1.2 GH2132 合金盘形锻件不同温度的拉伸和压缩弹性模量见表 3-26。

3.5.2 切变模量 GH2132 盘形锻件不同温度下的切变模量见表 3-27。

3.6 断裂性能

3.6.1 断裂韧性

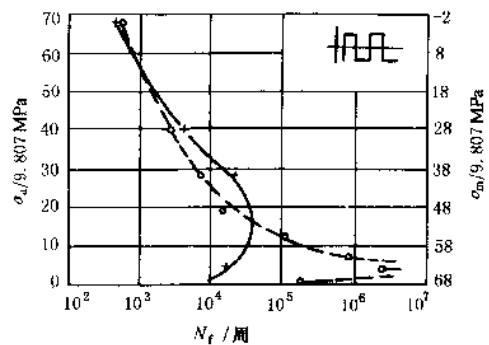
3.6.1.1 GH2132 合金于室温下的 J_R 阻力曲线见图 3-32。



$\theta = 650^\circ\text{C}; f = 1\text{Hz}; \sigma_{\max} = 588\text{MPa};$

○—缺口; +—光滑

图 3-30 疲劳-蠕变交互作用图^[7]



$\theta = 650^\circ\text{C}; f = 1\text{Hz}; \sigma_{\max} = 667\text{MPa};$

○—缺口; +—光滑

图 3-31 疲劳-蠕变交互作用图^[7]

表 3-25^[4]

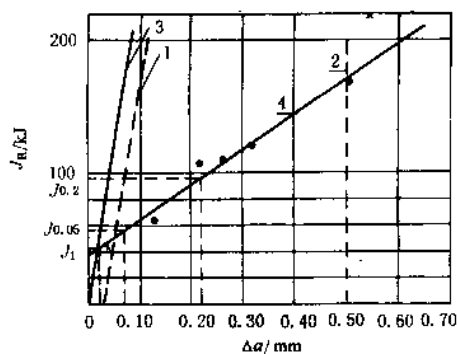
$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
E_n/GPa	198	193	186	181	173	165	157	150	139	126

表 3-26^[3]

$\theta/^\circ\text{C}$	20	400	500	550	600	650	700
E/GPa	190	152	135	134	131	124	120
E_c/GPa	193	—	150	147	—	143	142

表 3-27^[4]

$\theta/^\circ\text{C}$	20	500	550	650	700
G/GPa	72	60	59	56	53



$d = 732\text{mm}$ 盘件 $\sigma_{P0.2} = 690\text{MPa}, \sigma_b = 969\text{MPa}; J_1 = 43\text{kJ},$

$k_h = 96.7\text{MN}/\text{m}^{3/2}; J_{0.05} = 51\text{kJ}, k_{J0.05} = 105.3\text{MN}/\text{m}^{3/2};$

$J_{0.2} = 91.1\text{kJ}, k_{J0.2} = 140.7\text{MN}/\text{m}^{3/2};$

1—最小裂纹扩展曲线; 2—允许的最大裂纹扩展量;

3—钝化线 $J_R = 1.5(\sigma_{P0.2} + \sigma_b)\Delta a;$

4— $J_R = 37.65 + 267.22\Delta a, n = 5, r = 0.982$

图 3-32 合金于室温下的 J_R 阻力曲线^[6]

3.6.1.2 GH2132 合金的 δ_R 阻力曲线见图 3-33。

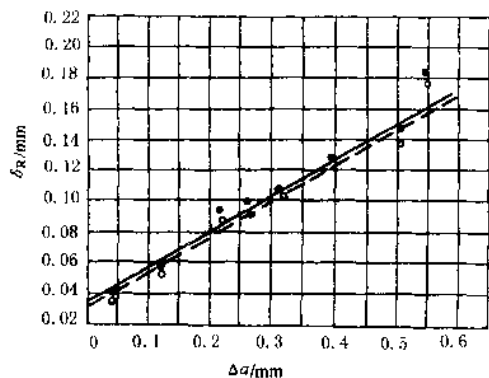
3.6.2 裂纹扩展速率

3.6.2.1 GH2132 蠕变条件下的裂纹扩展速率见图 3-34。

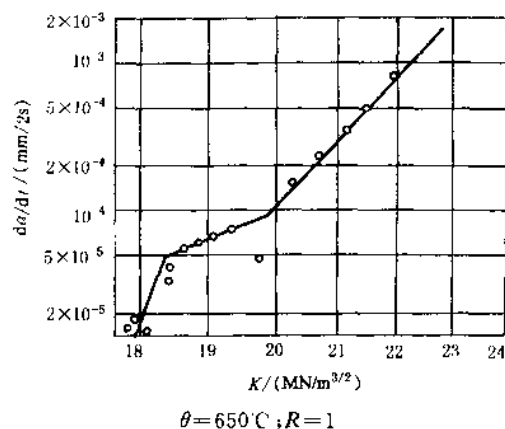
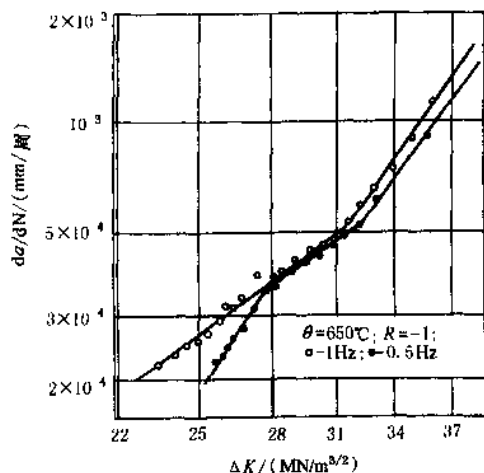
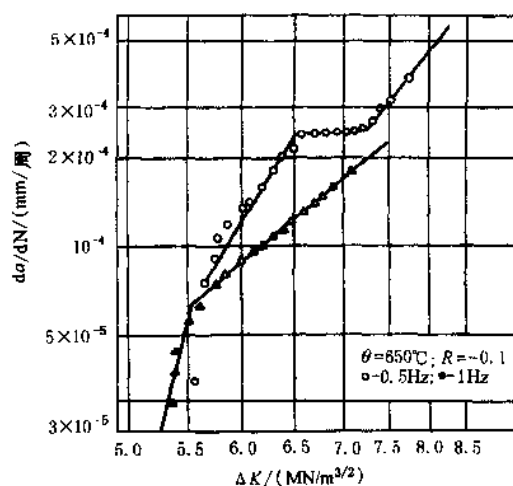
3.6.2.2 GH2132 疲劳条件下的裂纹扩展速率见图 3-35。

3.6.2.3 GH2132 蠕变-疲劳交互作用下的裂纹扩展速率见图 3-36。

铁基变形高温合金



—按 P-V 曲线计算, $\delta_R = 0.0356 + 0.2283\Delta a \pm 0.008$,
 $r = 0.981, \delta_i = 0.036, \delta_{0.05} = 0.047$;
 ---按 P-D 曲线计算, $\delta_R = 0.0309 + 0.2286\Delta a \pm 0.007$,
 $r = 0.986, n = 6, \delta_i = 0.032, \delta_{0.05} = 0.042$

 图 3-33 合金 δ_R 阻力曲线^[6]

 图 3-34 蠕变条件下的裂纹扩展速率^[7]

 图 3-35 疲劳条件下的裂纹扩展速率^[7]

 图 3-36 蠕变-疲劳交互作用下的裂纹扩展速率^[7]

4 组织结构

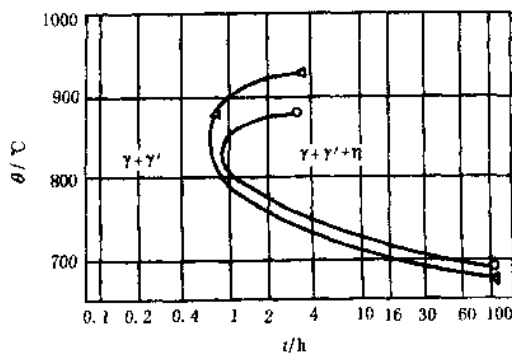
4.1 相变温度

4.2 时间-温度-组织转变曲线 GH2132 合金中 η - Ni_3Ti 相的析出动力学曲线见图 4-1。

4.3 合金组织结构 GH2132 合金在标准热处理状态下,在 γ 基体上有球状均匀弥散分布的 $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$ 型 γ' 相以及 TiN , TiC , 晶界有微量 M_3B_2 , 晶界附近可能有少量 η 相和 L 相。合金硅、硫含量较高时,会有 G 相、 Y 相在晶界析出。长期时效或使用后是否有 σ 相析出,与合金成分有关。近年来采用相分析计算方法提出了如下简化公式:

$$\Delta N_{\gamma'} = \text{Ni} - 3\text{Ti} - 3.5\text{Al} - 1.7\text{Si} - 0.9\text{Cr} - 4.7^{[1]}$$

注:元素符号表示该元素在合金中的重量百分比。当 $\Delta N_{\gamma'} > 0$ 时,无 σ 相析出。



$\Delta w(\text{Ti}): 2.24\% \sim 2.28\%$;
 $\circ - w(\text{Ti}): 2.03\% \sim 2.08\%$
 图 4-1 η 相析出曲线^[4]

γ' 相的溶解温度为 830~850℃, 开始析出温度在 650℃ 左右, 700~730℃ 析出最多。标准热处理后 γ' 相数量约占合金重量的 2%~3%, 直径约 10~20nm, 其化学组成近似 $(\text{Ni}_{0.93}\text{Fe}_{0.04}\text{Cr}_{0.03})_{2.73}(\text{Ti}_{0.83}\text{Al}_{0.17})$ 。550~650℃ 长期时效后, γ' 相数量稍微增加, 尺寸略有长大。当合金中 $w(\text{Al}) > 0.4\%$ 时, 就有可能出现胞状 γ' 相。

TiC, TiN 的数量约占合金重量的 0.25%, 基本上不参与合金热处理过程的组织转变。TiC 在 1180℃ 以上才开始溶解, TiN 则更不易溶解。

η 相形成的温度区间约在 700~900℃ 之间, 析出温度与合金 Ti 含量有关。

M_3B_2 相在 1040~1080℃ 固溶时已大量溶解, 至 1180~1210℃ 可完全溶解, M_3B_2 在 650℃ 时效已有析出。

L 相在 950~990℃ 之间固溶时溶解, 析出峰在 850℃ 左右。G 相在 982℃ 以上开始溶解, 至 1120℃ 可完全溶解, 析出峰在 850℃ 左右。 σ 相析出温度在 650~900℃ 之间, 析出峰在 750~850℃ 左右。G、 σ 和 η 相的出现对合金性能起损害作用。

5 工艺性能与要求

5.1 成形性能

5.1.1 GH2132 合金的工艺塑性图见图 5-1, 再结晶图见图 5-2。

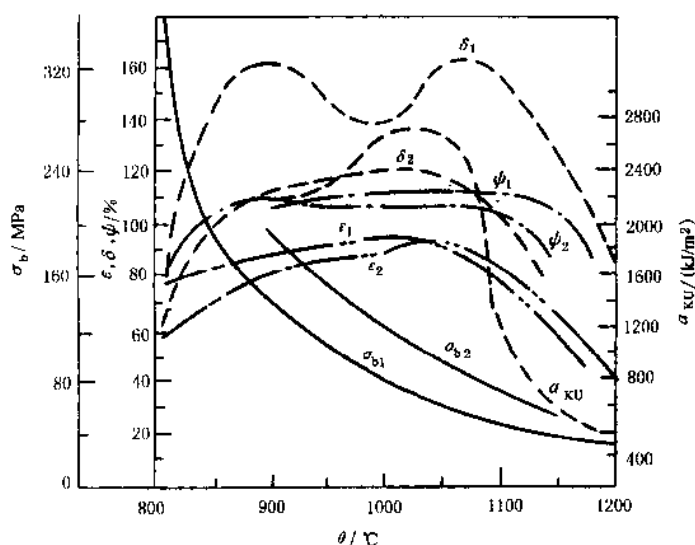


图 5-1 合金工艺塑性图^[1]

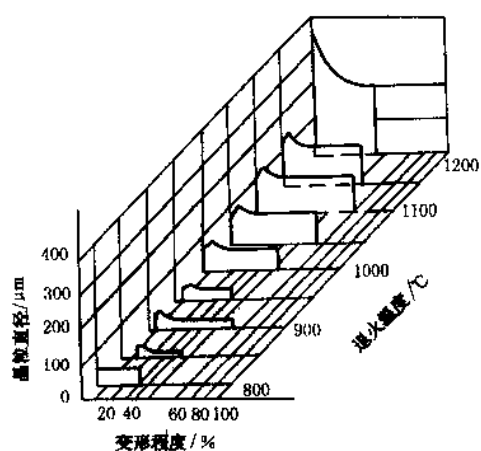


图 5-2 合金再结晶图^[1]

5.1.2 合金锻造开坯加热温度 1080~1140℃, 终锻温度高于 900℃。水压机开坯时加热温度 1110℃, 停压温度高于 950℃; 模锻开压温度为 1100℃, 停压温度高于 930℃。环件轧制加热温度 1130~1150℃, 终轧温度高于 900℃。棒材及型材轧制温度 1080~1140℃, 终轧温度高于 900℃。

5.2 焊接性能 合金具有满意的焊接性能, 可用氩弧焊、点焊、缝焊进行焊接。合金于固溶状态进行焊接, 焊后进行时效处理。

5.2.1 手工和自动钨极对接氩弧焊规范见表 5-1。推荐采用 HGH113 焊丝和较小的焊接能量输入。

5.2.2 自动钨极脉冲氩弧焊对焊规范见表 5-2。

5.2.3 缝焊规范见表 5-3。

5.2.4 焊后进行时效处理的氩弧焊对接接头的强度系数大于 90%。

铁基变形高温合金

表 5-1^[1]

焊接方法	厚度/mm	焊 丝		电流/ A	电压/ V	焊接速 度/ (m/min)	送丝速 度/ (m/min)	氩气流 量/ (L/min)	背面气 体流量/ (L/min)	钨极直 径/mm	焊嘴直 径/mm
		牌号	直径/ mm								
手工 氩弧焊	1.5+1.5	HGH2132	1.6	70~90	8~10	—	—	6~8	—	1.6	8
	2.0+2.0			90~100							
自动 氩弧焊	1.5+1.5	HGH2132	1.6	95~100	7~8	0.25~0.32	0.32	5~8	2~3	3.0	18
		HGH1140									
	2.0+2.0	HGH113		130							

表 5-2^[8]

厚度/ mm	焊 丝		电压/V	脉冲电 流/A	维弧电 流/A	脉冲 幅比	脉冲 宽比	脉冲频 率/Hz	焊接速度/ (m/min)	送丝速度/ (m/min)
	牌号	直径/mm								
0.8	不加丝	—	8.5	50	13	4	3	5	0.3	—
0.8	HSG-1	1.0	8.5~9.0	60	15	4	2	5	0.27	0.165
1.5	HSG-1	1.0	8.5~9.0	100	28	3.5	2	3	0.23	0.2
2.0	HSG-1	1.0	9~10	130	26	5	2	3	0.2	0.25

表 5-3^[9]

厚度/mm	滚盘宽/mm		电流/A	焊接时间/s	休止时间/s	焊接速度/ (m/min)	电极压力/N
	上	下					
1.5+1.5	5.5	6.0	8300~9500	0.16~0.18	0.16~0.18	0.36	7650~8335
2.0+2.0			10000~12000	0.18~0.22	0.24~0.28	0.36	8335~9805

5.3 零件热处理工艺 固溶温度 980~1000℃,根据零件截面厚度保温不同时间后进行空冷、油冷或水冷后,再在 700~720℃时效 12~16h 后空冷。优质 GH2132 合金制零件的热处理工艺为:固溶 900℃±10℃,1~2h,油冷+时效 750℃±10℃,16h,空冷。

5.4 表面处理工艺 在高温下工作的零件可采用 W-2 珐琅涂层进行有效的保护。

6 功能考核试验

7 使用建议

选用。

参 考 文 献

- 1 北京钢铁学院高温合金教研室编.GH132 合金.国防工业出版社,1980.21~23,69~68,177~191
- 2 黎明发动机公司.YZGH2132 合金热轧棒材.1993
- 3 北京航空材料研究所主编.航空发动机设用计材料数据手册:第一册.1990.467~504

- 4 手册编写组. 高温合金手册. 1992. 273~307
- 5 上钢五厂. 优质 GH2132 试验数据. 1997
- 6 上钢五厂, 北京钢铁学院. GH2132 合金长期持久强度研究. 1986
- 7 谢锡善, 徐志超, 许经峰, 朱金元. 两种铁基和镍基高温合金在复杂应力条件下的蠕变及断裂. 第五届全国高温合金年会文集. 1984. 116~175
- 8 北京航空材料研究所等编. 航空材料焊接性能手册. 国防工业出版社, 1978. 167~177

编写 刘吉祥 王迪 王 喆

审校 黄福祥

GH2150(GH150)

1 概述

GH2150 是以钨、钼等元素固溶强化和钛、铝、铌时效强化及微量碳、硼、锆、铈晶界强化的镍-铁-铬基高温合金。其特点是强度高、塑性好、膨胀系数低, 在 750℃ 以下长期使用组织稳定; 合金热加工塑性好, 并具有满意的焊接、冷成形和切削加工性能。主要产品是冷轧薄板, 也可供应棒材、环形件和锻件, 适合于制作在 700℃ 以下工作的喷气发动机板材焊接承力结构件和在 600℃ 以下长期工作的燃气轮机转子和压气机叶片。

1.1 材料牌号 GH2150(GH150)。

1.2 相近牌号 ЭП718, ВЖ105, ХН45МВТЮБР(俄罗斯)。

1.3 材料的技术标准

GJB 3020—1997 《航空用高温合金环坯规范》

HB 5499—1992 《HGH150 和 HGH533 合金冷拉焊丝》

HB 6570—1992 《GH150 合金棒材》

HB 6571—1992 《GH150 合金冷轧薄板》

HB 6572—1992 《GH150 合金圆饼、环坯和环形件》

1.4 化学成分 见表 1-1。

表 1-1

%

C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
≤0.08	14.0~16.0	45~50	2.50~3.50	4.50~6.00	0.80~1.30	1.80~2.40	余	0.90~1.40
B	Zr	Ce	Mn	Si	P	S	Cu	
不 大 于								
0.010	0.050	0.020	0.40	0.40	0.015	0.015	0.07	

注: B、Zr、Ce 按计算量加入, 报实测结果。

1.5 热处理制度 冷轧薄板采用的热处理制度为: 1040~1080℃, 空冷+750℃, 16h, 空冷; 曾采用过的热处理制度为: 1120℃±20℃, 空冷+800℃, 8~16h, 空冷。棒材和环形件检验试样的热处理制度为: 1040~1060℃, 空冷+750℃, 16~24h, 空冷。国外相似合金推荐在 1000~1080℃ 进行固溶处理, 随后在 780℃ 和 650℃ 进行两次时效处理。

1.6 品种规格与供应状态 可供应 δ0.8~4.0mm 冷轧薄板和各种规格的棒材、圆饼和环形件。