

《增材制造从业手册》

formnext
SOUTH CHINA



关于公众号 AMLetters

AMLetters直译增材快讯，初衷是为了激励自主学习，因为没有输出就没有深入思考。每篇文章相对简短，尝试用尽量通俗的语言讲清楚一两个科学问题、行业故事、材料知识、软件知识、国内外新技术。通过分享有一定价值的内容，努力成为国内增材领域工程师和在校研究人员，一同交流、成长的专业平台。



AMLetters名字的由来:

爱思唯尔 有一个关于增材制造的明星期刊叫做AM（Additive Manufacturing），影响因子很高；可能是由于全球增材制造热导致AM已然满足不了大量科研论文的发表诉求，所以2021年6月7日开设了一个叫做 **Additive Manufacturing Letters** 的快讯类子刊。这是AMLetters公众号的主编第一次碰到所关注领域从0开始的学术期刊，正好公众号也刚从0开始，所以对这份期刊就有了种莫名的感情，索性就取了AMLetters这个名字。有向偶像致敬的意思，也是勉励自己 **不要忘了本心，终生学习**。

关于这份手册的规划:

AMLetters & Formnext合作推动此事，准备用两年时间，把金属增材这块的素材完善起来，**分别以合金体系和产业链条为主干，以常用性能、参数、设备为脉络，以学术文献为绿叶，以行业案例为红花**，为增材制造从业人员打造一部方便使用的行业手册。

版本更新说明

20220503

- (1) 更正了GH3625 Fe元素含量标注错误问题
- (2) 增加新技术章节
- (3) 增加TA15粉末章节

高温合金

formnext
SOUTH CHINA



变形高温合金牌号化学成分汇总

formnext
SOUTH CHINA



铁或铁镍（镍小于50%）为主要元素的变形高温合金化学成分（质量分数）/%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH1015	GH15	≤0.08	19.00 ~ 22.00	34.00 ~ 39.00	4.80 ~ 5.80	2.50 ~ 3.20	—	—	余	1.10 ~ 1.60
GH1016a	GH16	≤0.08	19.00 ~ 22.00	32.00 ~ 36.00	5.00 ~ 6.00	2.60 ~ 3.30	—	—	余	0.90 ~ 1.40
GH1035b	GH35	0.06 ~ 0.12	20.00 ~ 23.00	35.00 ~ 40.00	2.50 ~ 3.50	—	≤0.50	0.70 ~ 1.20	余	1.20 ~ 1.70
GH 1040c	GH40	≤0.12	15.00 ~ 17.50	24.00 ~ 27.00	—	5.50 ~ 7.00	—	—	余	—
GH1131d	GH131	≤0.10	19.00 ~ 22.00	25.00 ~ 30.00	4.80 ~ 6.00	2.80 ~ 3.50	—	—	余	0.70 ~ 1.30
GH1139c	GH139	≤0.12	23.0 ~ 26.00	15.00 ~ 18.00	—	—	—	—	余	—
GH1140	GH140	0.06 ~ 0.12	20.0 ~ 23.00	35.00 ~ 40.00	1.40 ~ 1.80	2.00 ~ 2.50	0.20 ~ 0.60	0.70 ~ 1.20	余	—
GH2035A	GH35A	0.05 ~ 0.11	20.00 ~ 23.00	35.00 ~ 40.00	2.50 ~ 3.50	—	0.20 ~ 0.70	0.80 ~ 1.30	余	—
GH2036	GH36	0.34 ~ 0.40	11.50 ~ 13.50	7.00 ~ 9.00	—	1.10 ~ 1.40	—	≤0.12	余	0.25 ~ 0.50
GH2038	GH38A	≤0.10	10.00 ~ 12.50	18.00 ~ 21.00	—	—	≤0.5	2.30 ~ 2.80	余	—
GH2130	GH130	≤0.08	12.00 ~ 16.00	35.00 ~ 40.00	1.40 ~ 2.20	—	—	2.40 ~ 3.20	余	—
GH2132	GH132	≤0.08	13.50 ~ 16.00	24.00 ~ 27.00	—	1.00 ~ 1.50	≤0.40	1.75 ~ 2.35	余	—
新牌号	原牌号	Mg	V	B	Ce	Si	Mn	p	S	Cu
GH1015	GH15	—	—	≤0.010	≤0.050	≤0.60	≤1.50	0.020	0.015	0.250
GH1016	GH16	—	0.100 ~ 0.300	≤0.010	≤0.050	≤0.60	≤1.80	0.020	0.015	—
GH1035	GH35	—	—	—	≤0.050	≤0.80	≤0.70	0.030	0.020	—
GH1040	H40	—	—	—	—	0.50 ~ 1.00	1.00 ~ 2.00	0.030	0.020	0.200
GH1131	GH131	—	—	0.005	—	≤0.80	≤1.20	0.020	0.020	—
GH1139	GH139	—	—	≤0.010	—	≤1.00	5.00 ~ 7.00	0.035	0.020	—
GH1140	GH140	—	—	—	≤0.050	≤0.80	≤0.70	0.025	0.015	—
GH2035A	GH35A	≤0.01	—	0.010	0.050	≤0.80	≤0.70	0.030	0.020	—
GH2036	GH36	—	1.250 ~ 1.550	—	—	0.30 ~ 0.80	7.50 ~ 9.50	0.035	0.030	—
GH2038	GH38A	—	—	≤0.008	—	≤1.00	≤1.00	0.030	0.020	—
GH2130	GH130	—	—	0.020	0.020	≤0.60	≤0.50	0.015	0.015	—
GH2132	GH132	—	0.100 ~ 0.500	0.001 ~ 0.010	—	≤1.00	1.00 ~ 2.00	0.030	0.020	—

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

a氮含量在0.130 ~ 0.250之间。

b加钛或加铌, 但两者不得同时加入。

c氮含量在0.100 ~ 0.200之间。

d氮含量在0.150 ~ 0.300之间。

e氮含量在0.300 ~ 0.450之间。

f钼含量不大于0.050。

铁或铁镍（镍小于50%）为主要元素的变形高温合金化学成分（质量分数）/%

新牌号	牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH2135	GH135	≤0.08	14.00 ~ 16.00	33.00 ~ 36.00	—	1.70 ~ 2.20	1.70 ~ 2.20	2.00 ~ 2.80	2.10 ~ 2.50	余	—
GH2150	GH150	≤0.08	14.00 ~ 16.00	45.00 ~ 50.00	—	2.50 ~ 3.50	4.50 ~ 6.00	0.80 ~ 1.30	1.80 ~ 2.40	余	0.90 ~ 1.40
GH2302	GH302	≤0.08	12.00 ~ 16.00	38.00 ~ 42.00	—	3.50 ~ 4.50	1.50 ~ 2.50	1.80 ~ 2.30	2.30 ~ 2.80	余	—
GH2696	GH696	≤0.10	10.00 ~ 12.50	21.00 ~ 25.00	—	—	1.00 ~ 1.60	≤0.80	2.60 ~ 3.20	余	—
GH2706	GH706	≤0.06	14.50 ~ 17.50	39.00 ~ 44.00	—	—	—	≤0.40	1.50 ~ 2.00	余	2.50 ~ 3.30
GH2747	GH747	≤0.10	15.00 ~ 17.00	44.00 ~ 46.00	—	—	—	2.90 ~ 3.90	—	余	—
GH2761	GH761	0.02 ~ 0.07	12.00 ~ 14.00	42.00 ~ 45.00	—	2.80 ~ 3.30	1.40 ~ 1.90	1.40 ~ 1.85	3.20 ~ 3.65	余	—
GH2901	GH901	0.02 ~ 0.06	11.00 ~ 14.00	40.00—45.00	—	—	5.00 ~ 6.50	≤0.30	2.80 ~ 3.10	余	—
GH2903	GH903	≤0.05	—	36.00 ~ 39.00	14.00 ~ 17.00	—	—	0.70 ~ 1.15	1.35 ~ 1.75	余	2.70 ~ 3.50
GH2907	GH907	≤0.06	≤1.00	35.00 ~ 40.00	12.00 ~ 16.00	—	—	≤0.20	1.30 ~ 1.80	余	4.30 ~ 5.20
GH2909	GH909	≤0.06	≤1.00	35.00 ~ 40.00	12.00 ~ 16.00	—	—	≤0.15	1.30 ~ 1.80	余	4.30 ~ 5.20
GH2984	GH984	≤0.08	18.00 ~ 20.00	40.00 ~ 45.00	—	2.00 ~ 2.40	0.90 ~ 1.30	0.20 ~ 0.50	0.90 ~ 1.30	余	—
新牌号	原牌号	B			Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
								不大于			
GH2135	GH135	≤0.015			—	≤0.030	≤0.50	0.40	0.020	0.020	—
GH2150	GH150	≤0.010			≤0.050	≤0.020	≤0.40	0.40	0.015	0.015	0.070
GH2302	GH302	≤0.010			≤0.050	≤0.020	≤0.60	0.60	0.020	0.010	—
GH2696	GH696	≤0.020			—	—	≤0.60	0.60	0.020	0.010	—
GH2706	GH706	≤0.006			—	—	≤0.35	0.35	0.020	0.015	0.300
GH2747	GH747	—			—	≤0.030	≤1.00	1.00	0.025	0.020	—
GH2761	GH761	≤0.015			—	≤0.030	≤0.40	0.50	0.020	0.008	0.200
GH2901	GH901	0.010 ~ 0.020			—	—	≤0.40	0.50	0.020	0.008	0.200
GH2903	GH903	0.005 ~ 0.010			—	—	≤0.20	0.20	0.015	0.015	—
GH2907	GH907	≤0.012			—	—	0.07 ~ 0.35	1.00	0.015	0.015	0.500
GH2909	GH909	≤0.012			—	—	0.25 ~ 0.50	1.00	0.015	0.015	0.500
GH2984	GH984	—			—	—	≤0.50	0.50	0.010	0.010	—

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

a氮含量在0.130~0.250之间。

b加钛或加铌,但两者不得同时加入。

c氮含量在0.100~0.200之间。

d氮含量在0.150~0.300之间。

e氮含量在0.300~0.450之间。

f钼含量不大于0.050。

镍为主要元素的变形高温合金化学成分（质量分数）/%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH3007	GH5K	≤0.12	20.00 ~ 35.00	余	—	—	—	—	—	≤8.00	—
GH3030	GH30	≤0.12	19.00 ~ 22.00	余	—	—	—	≤0.15	0.15 ~ 0.35	≤0.15	—
GH3039	GH39	≤0.08	19.00 ~ 22.00	余	—	—	1.80 ~ 2.30	0.35 ~ 0.75	0.35 ~ 0.75	≤3.00	0.90 ~ 1.30
GH3044	GH44	≤0.10	23.50 ~ 26.50	余	—	13.00 ~ 16.00	≤1.50	≤0.50	0.30 ~ 0.70	≤4.00	—
GH3128	GH128	≤0.05	19.00 ~ 22.00	余	—	7.50 ~ 9.00	7.50 ~ 9.00	0.40 ~ 0.80	0.40 ~ 0.80	≤2.00	—
GH3170	GH170	≤0.06	18.00 ~ 22.00	余	15.00 ~ 22.00	17.00 ~ 21.00	—	≤0.50	—	—	—
GH3536	GH536	0.05 ~ 0.15	20.50 ~ 23.00	余	0.50 ~ 2.50	0.20 ~ 1.00	8.00 ~ 10.00	≤0.50	≤0.15	17.00 ~ 20.00	—
GH3600	GH600	≤0.15	14.00 ~ 17.00	≥72.00	—	—	—	≤0.35	≤0.50	6.00 ~ 10.00	≤1.00
新牌号	原牌号	La	B	Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu	
不大于											
GH3007	GH5K	—	—	—	—	1	0.5	0.04	0.040	0.500 ~ 2.000	
GH3030	GH30	—	—	—	—	0.80	0.70	0.030	0.020	≤0.200	
GH3039	GH39	—	—	—	—	0.80	0.40	0.020	0.012	—	
GH3044	GH44	—	—	—	—	0.80	0.50	0.013	0.013	≤0.070	
GH3128	GH128	—	≤0.005	—	≤0.060	≤0.050	0.8	0.50	0.013	0.013	—
GH3170	GH170	0.100	≤0.005	—	0.100 ~ 0.200	—	0.8	0.50	0.013	0.013	—
GH3536	GH536	—	≤0.010	—	—	—	1.00	1.00	0.025	0.015	≤0.500
GH3600	GH600	—	—	—	—	—	0.5	1.00	0.04	0.015	≤0.500

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

a氮含量在0.130 ~ 0.250之间。

b加钛或加铌，但两者不得同时加入。

c氮含量在0.100 ~ 0.200之间。

d氮含量在0.150 ~ 0.300之间。

e氮含量在0.300 ~ 0.450之间。

f钼含量不大于0.050。

镍为主要元素的变形高温合金化学成分（质量分数）/%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH3625	GH625	≤0.10	20.00 ~ 23.00	余	≤1.00	—	8.00 ~ 10.00	≤0.40	≤0.40	≤5.00	3.15 ~ 4.15
GH3652	GH652	≤0.10	26.50 ~ 28.50	余	—	—	—	2.80 ~ 3.50	—	≤1.00	—
GH4033	GH33	0.03 ~ 0.08	19.00 ~ 22.00	余	—	—	—	0.6 ~ 1.00	2.40 ~ 2.80	≤4.00	—
GH4037	GH37	0.03 ~ 0.10	13.00 ~ 16.00	余	—	5.00 ~ 7.00	2.00 ~ 4.00	1.70 ~ 2.30	1.80 ~ 2.30	≤5.00	—
GH4049	GH49	0.04 ~ 0.10	9.50 ~ 11.00	余	14.00 ~ 16.00	5.00 ~ 6.00	4.50 ~ 5.50	3.70 ~ 4.40	1.40 ~ 1.90	≤1.50	—
GH4080A	GH80A	0.04 ~ 0.10	18.00 ~ 21.00	余	≤2.00	—	—	1.00 ~ 1.80	1.80 ~ 2.70	≤1.50	—
GH14090	GH90	≤0.13	18.00 ~ 21.00	余	15.00 ~ 21.00	—	—	1.00 ~ 2.00	2.00 ~ 3.00	≤1.50	—
GH4093	GH93	≤0.13	18.00 ~ 21.00	余	15.00 ~ 21.00	—	—	1.00 ~ 2.00	2.00 ~ 3.00	≤1.00	—
GH4098	GH98	≤0.10	17.50 ~ 19.50	余	5.00 ~ 8.00	5.50 ~ 7.00	3.50 ~ 5.00	2.50 ~ 3.00	1.00 ~ 1.50	≤3.00	≤1.50
GH4099	GH99	≤0.08	17.00 ~ 20.00	余	5.00 ~ 8.00	5.00 ~ 7.00	3.50 ~ 4.50	1.70 ~ 2.40	1.00 ~ 1.50	≤2.00	—
新牌号	原牌号	Mg	V	B	Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
GH3625	GH625	—	—	—	—	—	0.50	0.50	0.015	0.015	0.070
GH3652	GH652	—	—	—	—	≤0.030	0.80	0.30	0.020	0.020	—
GH4033	GH33	—	—	≤0.010	—	≤0.020	0.65	0.40	0.015	0.007	—
GH4037	GH37	—	0.100 ~ 0.500	≤0.020	—	≤0.020	0.40	0.50	0.015	0.010	0.070
GH4049	GH49	—	0.200 ~ 0.500	≤0.025	—	≤0.020	0.50	0.50	0.010	0.010	0.070
GH4080A	GH80A	—	—	≤0.008	—	—	0.80	0.40	0.020	0.015	0.200
GH4090	GH90	—	—	≤0.020	≤0.150	—	0.80	0.40	0.020	0.015	0.200
GH4093	GH93	—	—	≤0.020	—	—	1.00	1.00	0.015	0.015	0.200
GH4098	GH98	—	—	≤0.005	—	≤0.020	0.30	0.30	0.015	0.015	0.070
GH4099	GH99	≤0.010	—	≤0.005	—	≤0.020	0.5	0.4	0.015	0.015	—

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

a氮含量在0.130~0.250之间。

b加钛或加铌,但两者不得同时加入。

c氮含量在0.100~0.200之间。

d氮含量在0.150~0.300之间。

e氮含量在0.300~0.450之间。

f钼含量不大于0.050。

镍为主要元素的变形高温合金化学成分（质量分数）/%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH4105	GH105	0.12 ~ 0.17	14.00 ~ 15.70	余	18.00 ~ 22.00	—	4.50 ~ 5.50	4.50 ~ 4.90	1.18 ~ 1.50	≤1.00	—
GH4133	GH33A	≤0.07	19.00 ~ 22.00	余	—	—	—	0.70 ~ 1.20	2.50 ~ 3.00	≤1.50	1.15 ~ 1.65
GH4133B	GH4133B	≤0.06	19.00 ~ 22.00	余	—	—	—	0.75 ~ 1.15	2.50 ~ 3.00	≤1.50	1.30 ~ 1.70
GH4141	GH141	0.06 ~ 0.12	18.00 ~ 20.00	余	10.00 ~ 12.00	—	9.00 ~ 10.50	1.40 ~ 1.80	3.00 ~ 3.50	≤5.00	—
GH4145	GH145	≤0.08	14.00 ~ 17.00	≥70.00	≤1.00	—	—	0.40 ~ 1.00	2.25 ~ 2.75	5.00 ~ 9.00	0.70 ~ 1.20
GH4163	GH163	0.04 ~ 0.08	19.00 ~ 21.00	余	19.00 ~ 21.00	—	5.60 ~ 6.10	0.30 ~ 0.60	1.90 ~ 2.40	≤0.70	—
GH4169	GH169	≤0.08	17.00 ~ 21.00	50.00 ~ 55.00	≤1.00	—	2.80 ~ 3.30	0.20 ~ 0.80	0.65 ~ 1.15	余	4.75 ~ 5.50
GH4199	GH199	≤0.10	19.00 ~ 21.00	余	—	9.00 ~ 11.00	4.00 ~ 6.00	2.10 ~ 2.60	1.10 ~ 1.60	≤4.00	—
GH4202	GH202	≤0.08	17.00 ~ 20.00	余	—	4.00 ~ 5.00	4.00 ~ 5.00	1.00 ~ 1.50	2.20 ~ 2.80	≤4.00	—
GH4220	GH220	≤0.08	9.00 ~ 12.00	余	14.00 ~ 15.50	5.00 ~ 6.50	5.00 ~ 7.00	3.90 ~ 4.80	2.20 ~ 2.90	≤3.00	—
新牌号	原牌号	Mg	V	B	Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
							不大于				
GH4105	GH105	—	—	0.003 ~ 0.010	0.070 ~ 0.150	—	0.25	0.40	0.015	0.010	0.200
GH4133	GH33A	—	—	≤0.010	—	≤0.010	0.65	0.35	0.015	0.007	0.070
GH4133B	GH4133B	0.001 ~ 0.010	—	≤0.010	0.010 ~ 0.100	≤0.010	0.65	0.35	0.015	0.007	0.070
GH4141	GH141	—	—	0.003 ~ 0.010	≤0.070	—	0.50	0.50	0.015	0.015	0.500
GH4145	GH145	—	—	—	—	—	0.50	1.00	0.015	0.010	0.500
GH4163	GH163	—	—	≤0.005	—	—	0.40	0.60	0.015	0.007	0.200
GH4169	GH169	≤0.010	—	≤0.006	—	—	0.35	0.35	0.015	0.015	0.300
GH4199	GH199	≤0.050	—	≤0.008	—	—	0.55	0.50	0.015	0.015	0.070
GH4202	GH202	—	—	≤0.010	—	≤0.010	0.60	0.50	0.015	0.010	—
GH4220	GH220	≤0.010	0.250 ~ 0.800	≤0.020	—	≤0.020	0.35	0.50	0.015	0.009	0.070

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

a氮含量在0.130 ~ 0.250之间。

b加钛或加铌, 但两者不得同时加入。

c氮含量在0.100 ~ 0.200之间。

d氮含量在0.150 ~ 0.300之间。

e氮含量在0.300 ~ 0.450之间。

f钽含量不大于0.050。

参考《GB/T 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号》

镍为主要元素的变形高温合金化学成分（质量分数）/%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	
GH4413	GH413	0.04~0.10	13.00~16.00	余	—	5.00~7.00	2.50~4.00	2.40~2.90	1.70~2.20	≤5.00		
GH4500	GH500	≤0.12	18.00~20.00	余	15.00~20.00	—	3.00~5.00	2.75~3.25	2.75~3.25	≤4.00	—	
GH4586	GH586	≤0.08	18.00~20.00	余	10.00~12.00	2.00~4.00	7.00~9.00	1.50~1.70	3.20~3.50	≤5.00	—	
GH4648	GH1648	≤0.10	32.00~35.00	余	—	4.30~5.30	2.30~3.30	0.50~1.10	0.50~1.10	≤4.00	0.50~1.10	
GH4698	GH698	≤0.08	13.00~16.00	余	—	—	2.80~3.20	1.30~1.70	2.35~2.75	≤2.00	1.80~2.20	
GH4708	GH708	0.05~0.10	17.50~20.00	余	≤0.50	5.50~7.50	4.00~6.00	1.90~2.30	1.00~1.40	≤4.00	—	
GH4710	GH710	≤0.10	16.50~19.50	余	13.50~16.00	1.00~2.00	2.50~3.50	2.00~3.00	4.50~5.50	≤1.00	—	
GH4738	GH738 (GH684)	0.03~0.10	18.00~21.00	余	12.00~15.00	—	3.50~5.00	1.20~1.60	2.75~3.25	≤2.00	—	
GH4742	GH742	0.04~0.08	13.00~15.00	余	9.00~11.00	—	4.50~5.50	2.40~2.80	2.40~2.80	≤1.00	2.40~2.80	
新牌号	原牌号	La	Mg	V	B	Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
								不大于				
GH4413	GH413	—	≤0.005	0.200~1.000	0.02	—	0.02	0.6	0.5	0.015	0.009	0.07
GH4500	GH500	—	—	—	0.003~0.008	≤0.060	—	0.75	0.75	0.015	0.015	0.1
GH4586	GH586	≤0.015	≤0.015	—	≤0.005	—	—	0.5	0.1	0.01	0.01	—
GH4648	GH648	—	—	—	≤0.008	—	≤0.030	0.4	0.5	0.015	0.01	—
GH4698	GH698	—	≤0.008	—	≤0.005	≤0.050	≤0.005	0.6	0.4	0.015	0.007	0.07
GH4708	GH708	—	—	—	≤0.008	—	≤0.030	0.4	0.5	0.015	0.015	—
GH4710	GH710	—	—	—	0.010~0.030	≤0.060	0.02	0.15	0.15	0.015	0.01	0.1
GH4738	GH738 (GH684)	—	—	—	0.003~0.010	0.020~0.080	—	0.15	0.1	0.015	0.015	0.1

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

a氮含量在0.130~0.250之间。

b加钛或加铌,但两者不得同时加入。

c氮含量在0.100~0.200之间。

d氮含量在0.150~0.300之间。

e氮含量在0.300~0.450之间。

f钨含量不大于0.050。

参考《GB/T 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号》

钴为主要元素的变形高温合金化学成分（质量分数）/%

新牌号	原.牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH5188	GH188	0.05~0.15	20.00~24.00	20.00~24.00	余	13.00~16.00	—	—	—	≤3.00	—
GH5605	GH605	0.05~0.15	19.00~21.00	9.00~11.00	余	14.00~16.00	—	—	—	≤3.00	—
GH5941	GH941	≤0.10	19.00~23.00	19.00~23.00	余	17.00~19.00	—	—	—	≤1.50	—
GH6159	GH159	≤0.04	18.00~20.00	余	34.00~38.00	—	6.00~8.00	0.10~0.30	2.50~3.25	8.00~10.00	0.25~0.75
GH6783f	GH783	≤0.03	2.50~3.50	26.00~30.00	余	—	—	5.00~6.00	≤0.40	24.00~27.00	2.50~3.50
新牌号	原牌号	La	B				Si	Mn	P	S	Cu
GH5188	GH188	0.030~0.120	≤0.015				0.20~0.50	≤1.25	0.02	0.015	0.07
GH5605	GH605	—	—				≤0.40	1.00~2.00	0.04	0.03	—
GH5941	GH941	—	—				≤0.50	≤1.50	0.02	0.015	0.5
GH6159	GH159	—	≤0.030				≤0.20	≤0.20	0.02	0.01	—
GH6783f	GH783	—	0.003~0.012				≤0.50	≤0.50	0.015	0.005	0.5

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

a氮含量在0.130~0.250之间。

b加钛或加铌,但两者不得同时加入。

c氮含量在0.100~0.200之间。

d氮含量在0.150~0.300之间。

e氮含量在0.300~0.450之间。

f钽含量不大于0.050。

金属增材制造常见高温合金牌号化学成分汇总

formnext
SOUTH CHINA



金属增材制造 (SLM) 常见高温合金牌号化学成分汇总

镍为主要元素的变形高温合金化学成分 (质量分数) /%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH3536	GH536	0.05 ~ 0.15	20.50 ~ 23.00	余	0.50 ~ 2.50	0.20 ~ 1.00	8.00 ~ 10.00	≤0.50	≤0.15	17.00 ~ 20.00	—
新牌号	原牌号	La	B		Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
			不大于								
GH3536	GH536	—	≤0.010		—	—	1.00	1.00	0.025	0.015	≤0.500

镍为主要元素的变形高温合金化学成分 (质量分数) /%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH3625	GH625	≤0.10	20.00 ~ 23.00	余	≤1.00	—	8.00 ~ 10.00	≤0.40	≤0.40	≤0.50	3.15 ~ 4.15
新牌号	原牌号	Mg	V	B	Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
							不大于				
GH3625	GH625	—	—	—	—	—	0.50	0.50	0.015	0.015	0.070

镍为主要元素的变形高温合金化学成分 (质量分数) /%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH4169	GH169	≤0.08	17.00 ~ 21.00	50.00 ~ 55.00	≤1.00	—	2.80 ~ 3.30	0.20 ~ 0.80	0.65 ~ 1.15	余	4.75 ~ 5.50
新牌号	原牌号	Mg	V	B	Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
							不大于				
GH4169	GH169	≤0.010	—	≤0.006	—	—	0.35	0.350	0.015	0.015	0.300

钴为主要元素的变形高温合金化学成分 (质量分数) /%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH5188	GH188	0.05 ~ 0.15	20.00 ~ 24.00	20.00 ~ 24.00	余	13.00 ~ 16.00	—	—	—	≤3.00	—
新牌号	原牌号	La	B		Si	Mn	P	S	Cu		
			不大于								
GH5188	GH188	0.030 ~ 0.120	≤0.015			0.20 ~ 0.50	≤1.25	0.020	0.015	0.070	

1—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的固溶强化型合金类;

2—表示铁或铁镍(镍小于50%)为主要元素的时效强化型合金类;

3—表示镍为主要元素的固溶强化型合金;

4—表示镍为主要元素的时效强化型合金;

5—表示钴为主要元素的固溶强化型合金;

6—表示钴为主要元素的时效强化型合金;

7—表示铬为主要元素的固溶强化型合金;

8—表示铬为主要元素的时效强化型合金。

金属增材制造常见高温合金介绍

formnext
SOUTH CHINA



GH3536

formnext
SOUTH CHINA

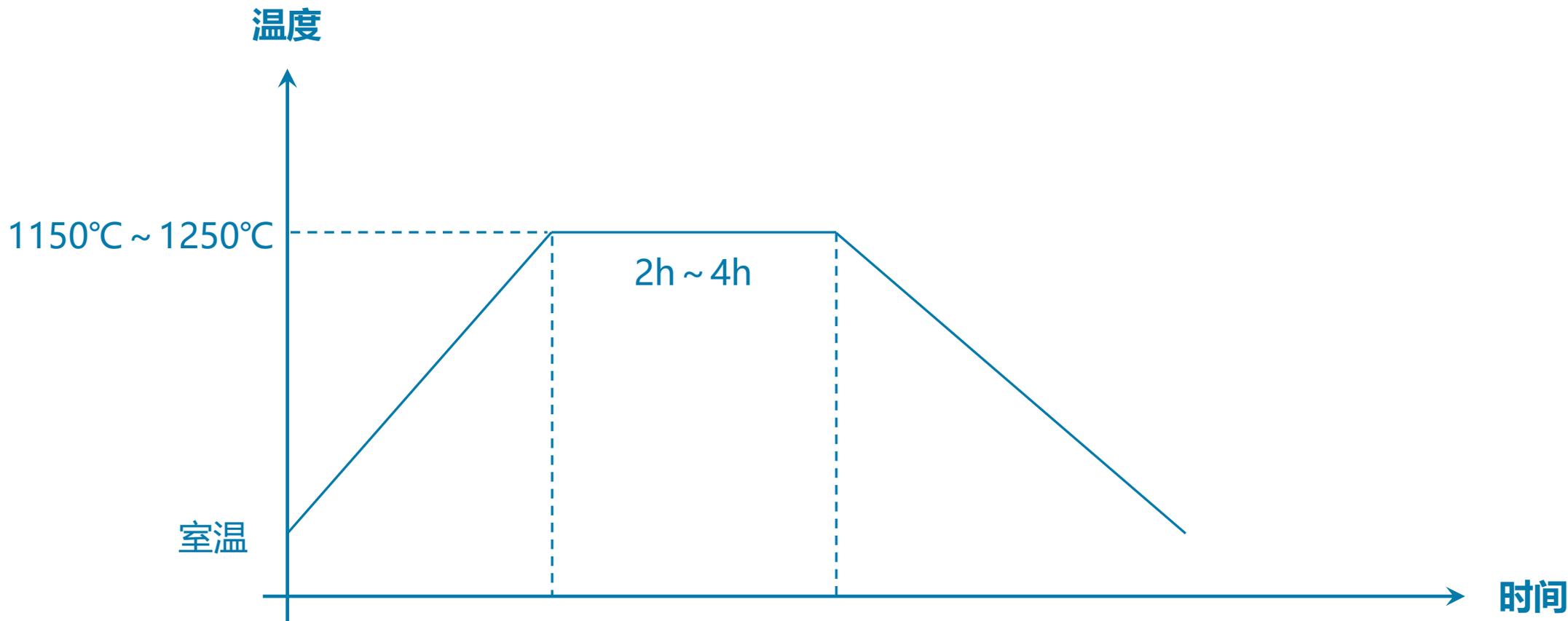


(1) 概述：GH3536是Ni-Cr-Fe基固溶强化型变形高温合金，在铸造使用时对应牌号为K4536。合金在900°C以下具有中等的持久和蠕变强度；具有良好的抗氧化和耐腐蚀性能、良好的冷热加工成形性和焊接性能。适于制造在900°C以下长期使用的航空发动机燃烧室等部件，以及工作温度可达1080°C短时使用的高温部件。主要产品有板材、带材、管材、棒材、锻件、环形件、精密铸件和增材制造复杂结构件。

(2) 应用：GH3536在国外航空发动机和民用工业中获得了极为广泛的应用，我国已用于制造航空发动机燃烧室部件、蜂窝结构、扩散器、尾喷口和其他热端部件。

(3) 特性：GH3536成品淬火工艺中的冷却速度是影响合金工艺的重要因素之一，快速冷却可以控制析出晶界脆性碳化物膜。当合金固溶温度高于1175°C时，也易在晶界形成碳化物膜。合金在长期时效后呈现一定程度的时效硬化现象，使塑性下降，高温强度也有所降低。

(4) 相近牌号：UNS NO6002、Hastelloy X(美)、NC22FeD(法)、NiCr22FeMo(德)、Nimonic PE13(英)



国标推荐 热处理制度 示意图

合金牌号	制造技术	热处理状态	热处理温度	保温时间	冷却方式	建议
GH3536	PBF-LB/M	固溶	1150°C ~ 1250°C	2h ~ 4h	空冷	建议气氛炉或真空炉

GH3625

formnext
SOUTH CHINA

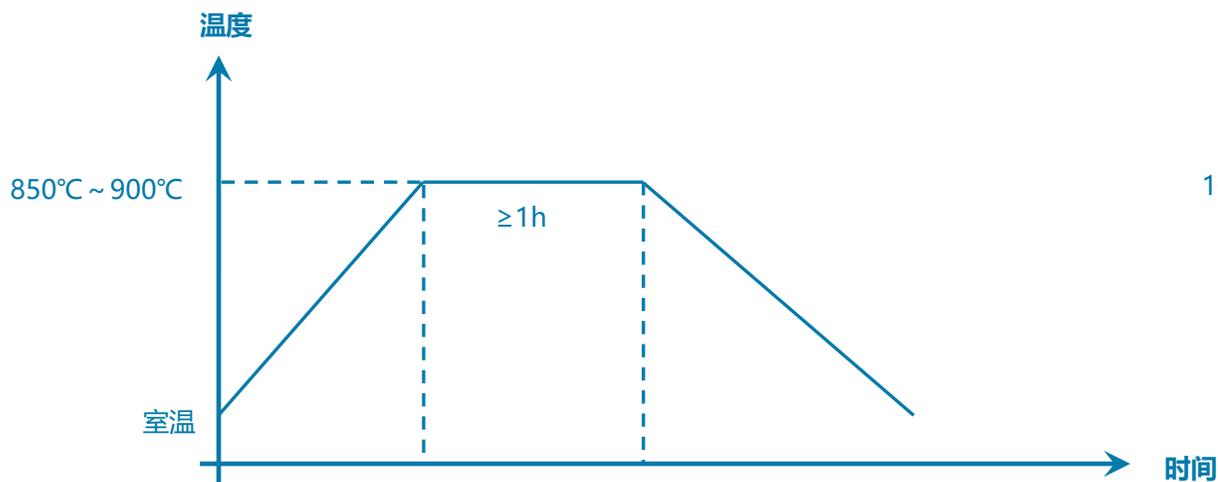


(1) 概述：GH3625是 Ni-Cr 基固溶强化型变形高温合金，以铬、钼和铌为主要固溶强化元素，最高使用温度950℃。合金从低温到980℃均具有良好的抗拉强度和抗疲劳性能，且加工和焊接工艺性能良好。合金具有优良的耐腐蚀和抗氧化性能，并且耐盐雾气氛下的应力腐蚀。广泛用于制造航空发动机零部件、宇航结构部件和化工设备。主要产品有板材、棒材、管材、丝材、带材、锻件、增材制造件。

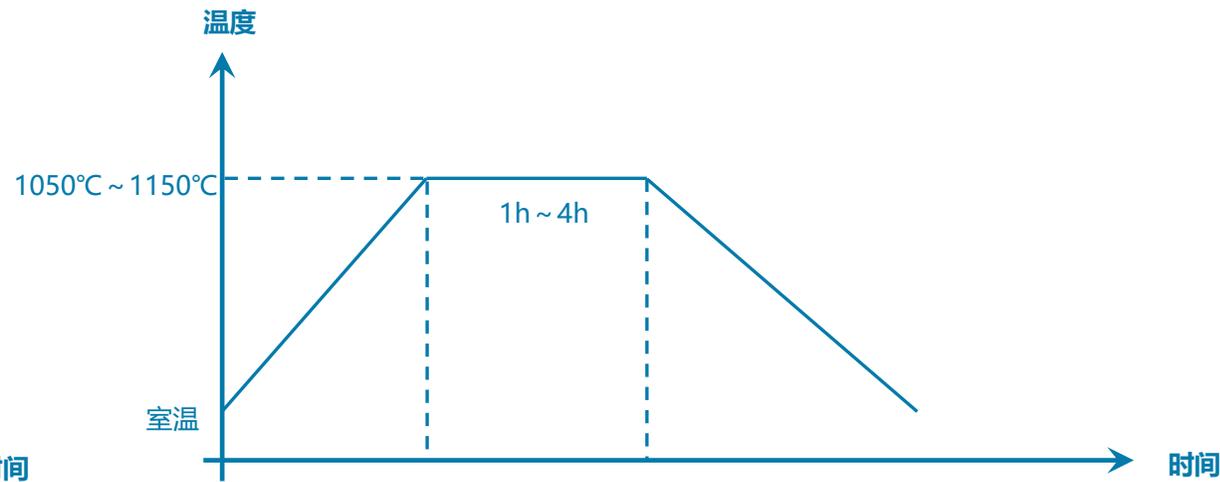
(2) 应用：GH3625已用于制造航空和航天发动机机匣、导向叶片、安装边和筒体、燃油总管等零部件。

(3) 特性：合金无论在海洋气氛还是在非海洋气氛中，腐蚀速度都很小，抗海水腐蚀能力很好。合金耐各种盐类溶液的腐蚀、有良好的耐硝酸及磷酸腐蚀的能力。对加热至沸点以下的盐酸和低浓度的硫酸腐蚀也有相当的抗力。合金在550℃ ~ 700℃长期使用后有一定的时效硬化现象，可导致合金塑性有一些下降。

(4) 相近牌号：Inconel 625、UNS N06625(美)、NC22DNb(法)



退火



固溶

国标推荐 热处理制度 示意图

合金牌号	制造技术	热处理状态	热处理温度	保温时间	冷却方式	建议
GH3625	PBF-LB/M	去应力退火	850°C ~ 900°C	≥1h	空冷	建议气氛炉或真空炉
		固溶	1050°C ~ 1150°C	1h ~ 4h	空冷	建议气氛炉或真空炉

GH4169

formnext
SOUTH CHINA



(1) 概述：GH4169是 Ni-Cr-Fe基沉淀硬化型变形高温合金，长时使用温度范围-253℃ ~ 650℃，短时使用温度可达800℃。合金在650℃以下强度较高，具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化和耐腐蚀性能，以及良好的加工性能、焊接性能和长期组织稳定性。适于制作航空、航天、核能和石化工业中的涡轮盘、环件、叶片、轴、紧固件和弹性元件、板材结构件、机匣等，主要产品有热轧和锻制棒材、冷拉棒、板材和带材、丝材、管材、环形件、锻件和增材制造件等。合金从成分上分为普通和优质两大类，优质GH4169合金的碳、铌、硫和气体含量的控制更严格，主要用于制造各类转动零件；从制作工艺分为标准、高强和直接时效三大类，其中高强和直接时效工艺用于优质GH4169合金锻件，热变形温度依次降低，锻件的平均晶粒度依次细化，强度则依次升高，可以满足航空发动机中不同转动零件的应用要求。

(2) 应用：合金已用于制作航空发动机涡轮盘、环件、机匣、轴、叶片、紧固件、弹性元件、燃气导管、密封元件和焊接结构件等；制作液氢、液氧火箭发动机中的涡轮转子等部件；制作核能工业应用的各种弹性元件和格架；制造石油和化工领域应用的多种零件。批产和使用情况良好。

(3) 特性：合金在真空自耗重熔时可采用氦气冷却工艺，可有效地减轻铌元素偏析；采用喷射成形工艺，生产环件，可降低生产成本和缩短生产周期；采用超塑成形工艺，可扩大产品的生产范围。

(4) 相近牌号：Inconel 718(美)、NC19FeNb(法)

国标推荐 热处理制度

合金牌号	制造技术	热处理状态	热处理温度	保温时间	冷却方式
GH4169	PBF-LB/M	固溶	930 °C ~ 980 °C	≥1 h	空冷
		时效	680 °C ~ 740 °C	6 h ~ 10 h	以40 °C/h ~ 60 °C/h 速率炉冷至620 °C
			580 °C ~ 640 °C	6 h ~ 10 h	空冷
	DED-Arc/M	均匀化	1070 °C ~ 1120 °C	1 h ~ 3 h	空冷
		固溶	930 °C - 980 °C	≥1 h	空冷
		时效	700 °C ~ 740 °C	6 h ~ 10 h	以40 °C/h ~ 60 °C/h 炉冷至610 °C ~ 660 °C 后炉冷或空冷

为什么选择GH4169 用于航空航天增材制造？



GH4169 追求极限永远是航空航天领域的主题

追求极限永远是航空航天领域的主题。

商业上：现在一对发动机的动力就能让一架大型喷气式客机往返于大洋彼岸。

军事上：战斗机在执行关键防御任务时非常依赖发动机的峰值性能。

发动机的燃油效率和可靠性是驱动新型发动机设计的底层逻辑，TC4（钛合金）和GH4169等高性能、高价值材料制备的复杂部件是保证底层逻辑正常运行的基础。

随着航空航天领域对发动机性能提出更高要求，新型发动机的结构改型成为世界各强国的研究热点。**基于传统加工方式的结构设计，经历了几十年的论证、实施、改进，可以说在传统加工能力范围内，已经是接近完美的方案。如果没有革命性的技术突破，改型工作很难有实质性的进展。**——这就是十年前我国航空航天人的真实处境。想象的到，这代航空航天人在第一次接触金属增材制造技术时，内心是多么的激动。

有些事情不是多少钱的问题，是可与不可的问题，**增材制造技术拓宽了传统加工方式的应用领域，解决了曾经那些“能设计出来、但加工不出来”的行业难题。**航空航天也因此成为最早应用金属增材制造技术和推动此项技术发展、成熟的最重要领域，**如今，它仍然是金属增材制造技术发展创新的最大金主。**



GH4169 高温合金让发动机的效率更高

高温合金，国外叫Super Alloy，直译超级合金。

高温合金是指以**铁、镍、钴为基**，能在600°C以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料，具有优异的高温强度，良好的抗氧化和抗热腐蚀性能，良好的疲劳性能、断裂韧性等综合性能，主要应用于航空航天领域和能源领域。

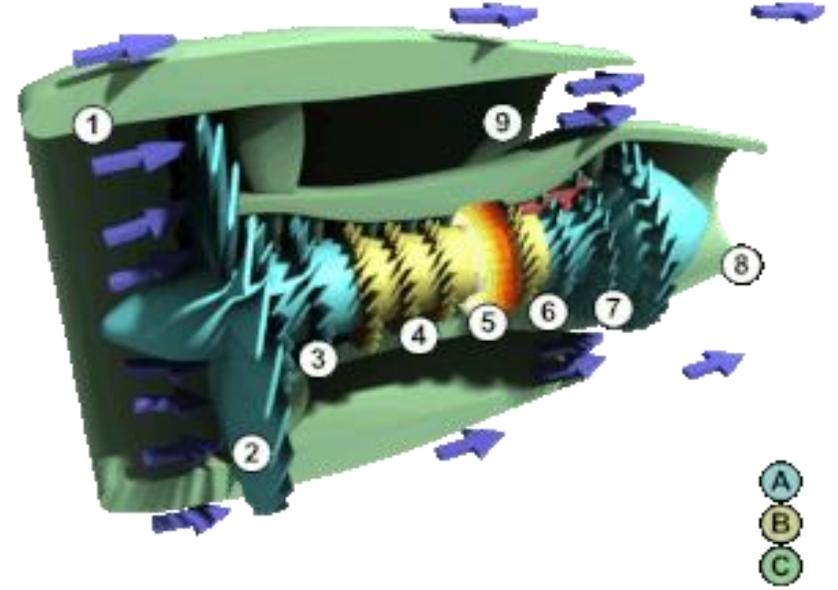
卡诺循环

卡诺定理指出热源温度越高循环热效率越高。**也就是说运行更热的发动机可以提高能源效率，从而提高燃油效率。**

为此，航空航天工程师用高温合金制造涡轮反应器的高温部件，它们可以在极端环境中承受很高的机械应力和应变，同时保持稳定、耐腐蚀和抗蠕变。

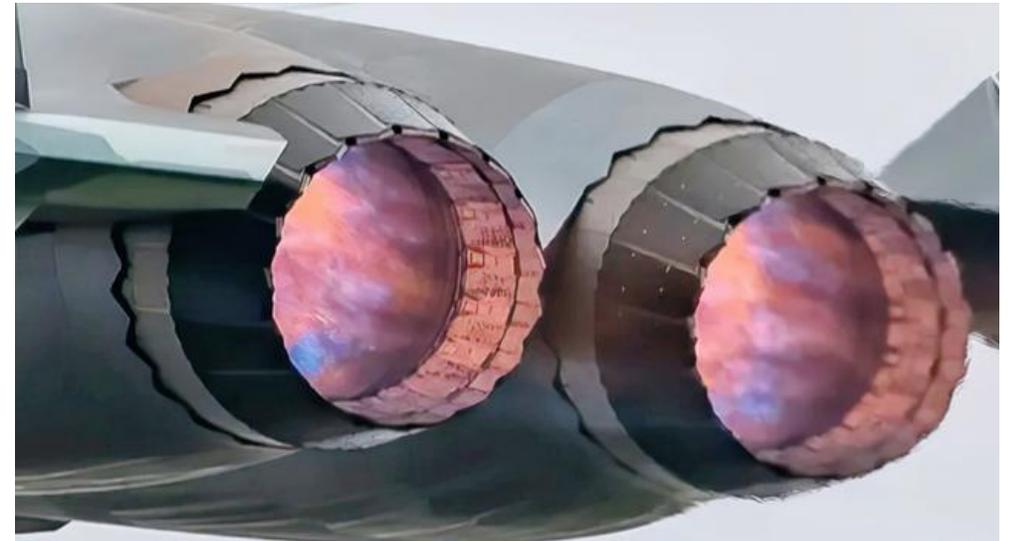
超级合金可承受极端条件

镍铁基超级合金特别适合在需要抗蠕变、腐蚀和热冲击性的高温环境中使用。通常，它们可以通过固溶强化或金属基体中金属间化合物的沉淀来硬化。



高涵道比涡扇发动机动画

A低压涡轮, B高压涡轮, C固定组件, 1机舱, 2风扇, 3低压压缩机, 4高压压缩机, 5燃烧室, 6高压涡轮, 7低压涡轮, 8核心喷嘴, 9风扇喷嘴



参考:

[1]<https://www.farinia.com/blog/why-choosing-inconel-718-aerospace-additive-manufacturing>

[2]<https://en.m.wikipedia.org/wiki/Turbofan>

GH4169 是世界上占主导地位的高温合金，约占世界吨位的一半

GH4169 是高温合金的主力、热结构航空航天应用的基石

GH4169于1965 年实现工业化应用，相对较新，但如今已广泛使用。

GH4169是世界上占主导地位的高温合金，约占世界吨位的一半，它可以在 600°C 以上永久使用，具有良好的蠕变、断裂强度、高抗疲劳性，并在高温下具有耐腐蚀性。

GH4169在飞机涡轮喷气发动机的重量占比在 **50%** 以上，是压气机高压段的圆盘、叶片、外壳、涡轮部分的部分叶片的主要材料。

GH4169不仅高温性能优异，在低温下同样具有良好的韧性（防止零件发生脆性断裂），因此还在火箭发动机和其他低温工况找到了多种应用。

GH4169的**杨氏模量**几乎是 Ti6Al4V 的两倍，与非合金可硬化碳钢 (45号钢) 相似。

不同温度下GH4169弹性性能/杨氏模量

$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	418	450	500	550	600	650	700
E/GPa	204	—	—	181	176	—	—	160	160	150	146	141
E_c/GPa	203	—	—	172	—	—	162	—	161	155	153	—
E_D/GPa	205	201	193	187	—	180	—	175	—	168	—	160
G/GPa	79	77	74	71	—	68	—	66	—	64	—	60
μ	0.30	0.30	0.30	0.30	—	0.31	—	0.32	—	0.32	—	0.33

参考《中国高温合金手册》中国标准出版社 2012版

钛合金的弹性模量较低。

TC4的杨氏模量 $E=110\text{GPa}$ 约为钢的1/2，故钛合金加工时容易产生变形。

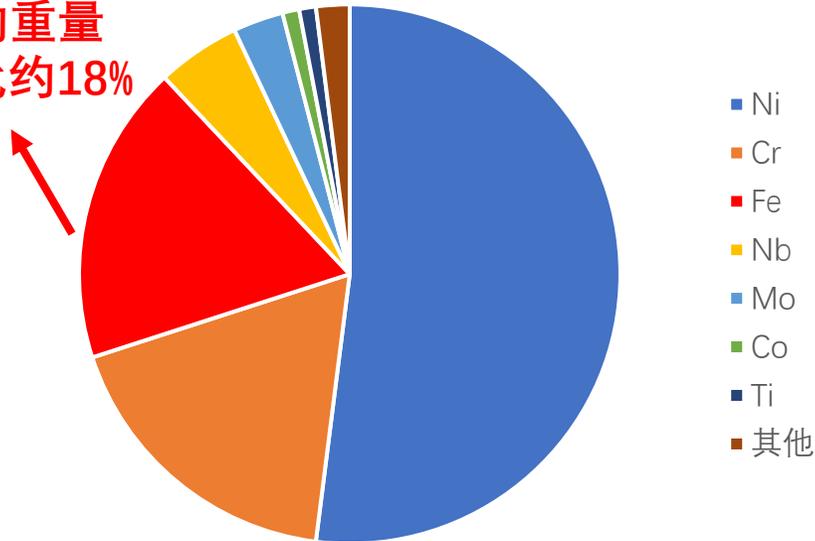
杨氏模量

- (1) 杨氏模量是描述固体材料抵抗形变能力的物理量。
- (2) 杨氏模量只与材料的化学成分有关，与其组织变化无关，与热处理状态无关。
- (3) 各种钢的弹性模量差别很小，金属合金化对其弹性模量影响也很小。
- (4) 杨氏模量的大小标志了材料的刚性，杨氏模量越大，越不容易发生形变。

GH4169 含有大量的铁，降低了材料本身的价格

GH4169化学成分质量占比 示意图

Fe的重量
占比约18%



(1) **GH4169**内含有大量的铁，降低了每公斤的价格，同时赋予了它沉淀硬化的效果。

(2) 铁在基体中的低迁移率赋予主要强化相 (γ'') 缓慢的析出动力学，从而降低对焊后开裂的敏感性。如果迁移/扩散速率高，则很容易在焊缝和热影响区形成合金元素偏析，导致容易出现裂纹。**GH4169**的焊接性能良好。

(3) 特定的合金元素赋予**GH4169**在高达 1000°C时仍然具有良好的耐腐蚀性。**镍**可用于对抗氯离子应力腐蚀开裂，并在多种酸度和碱度范围内防止许多无机和有机氧化化合物的腐蚀。**铬**赋予了抵御氧化介质和硫化物侵蚀的能力，而钼则可以提高对点蚀的抵抗力。

镍为主要元素的变形高温合金化学成分 (质量分数) /%

新牌号	原牌号	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb
GH4169	GH169	≤0.08	17.00 ~ 21.00	50.00 ~ 55.00	≤1.00	—	2.80 ~ 3.30	0.20 ~ 0.80	0.65 ~ 1.15	余	4.75 ~ 5.50
新牌号	原牌号	Mg	V	B	Zr	Ce	Si	Mn	P	S	Cu
GH4169	GH169	≤0.010	—	≤0.006	—	—	0.35	0.350	0.015	0.015	0.300

参考:

[1]<https://www.farinia.com/blog/why-choosing-inconel-718-aerospace-additive-manufacturing>

[2]参考《GB/T 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号》

GH4169 可定制力学性能

热处理释放了GH4169的潜力

通过不同的热处理可以获得不同的组织结构，进而获得不同的力学性能和硬度。

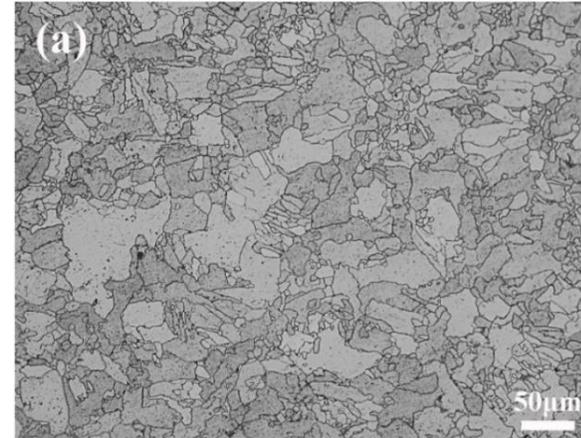
GH4169的强化原理

两种强化模式相结合

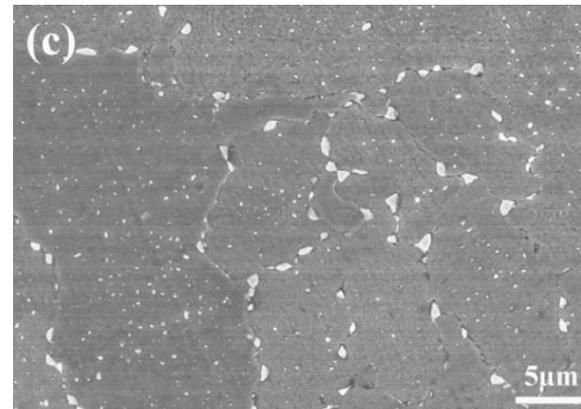
- (1) 固溶强化（铁、铬、钼和铌的原子可以替代金属基体中的镍）
- (2) 有序金属间相 γ' 和 γ'' 的沉淀硬化

GH4169必须首先升到较高温度，以确保时效成分（铝、钛和铌）溶解在基体中——所谓的固溶。之后，在较低温度下保温（所谓时效）时，会析出各种相，相的种类和多少，对合金的力学性能，尤其是蠕变寿命影响很大，而且只有当析出物达到影响位错运动的临界尺寸时，才能提高强度和硬度。总之，GH4169合金含有多种金属元素，这些金属元素在不同温度条件下的相互作用是极其复杂的，AMLetters在这里不做过多论述。下面的内容是参考文章《why-choosing-inconel-718-aerospace-additive-manufacturing》的作者总结的GH4169各种元素组合形成不同强化相的一个简单描述，有兴趣的朋友可以了解一下。

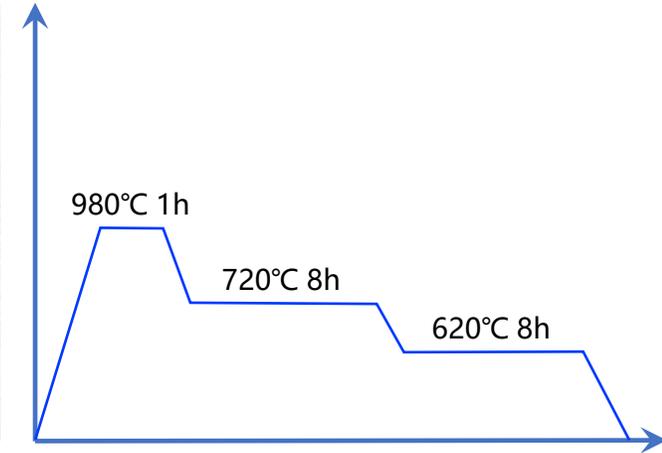
- (1) γ' 相：钛和铝通过沉淀形成金属间相 γ' -Ni₃(Ti, Al)，通过铌和钛（在室温下）或钨和钼（在高温下）的固溶体再次亚稳定和硬化。
- (2) γ'' 相：在650°C附近，铌与镍结合，形成 γ'' (Ni₃Nb)沉淀相， γ'' 的数量比 γ' 要多的多，被认为是主要的强化相。 γ'' 析出物呈圆盘状，厚度5-9 nm，平均直径约60 nm。
- (3) 碳化物：一次碳化物（由Cr和Ti等元素产生）和二次碳化物（由Cr、Co、Mo和W等元素产生）。
- (4) 其他相：如果热处理不当也有可能析出有害相，如Laves相。



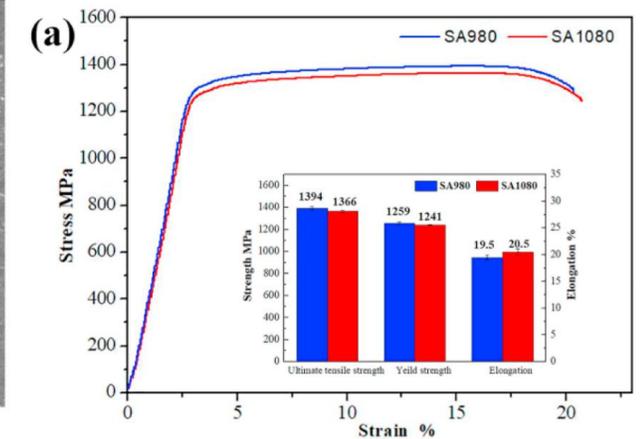
SLM打印GH4169-热处理态-光镜图



SLM打印GH4169-热处理态-电镜图



左图-左下图-下图样品的热处理制度

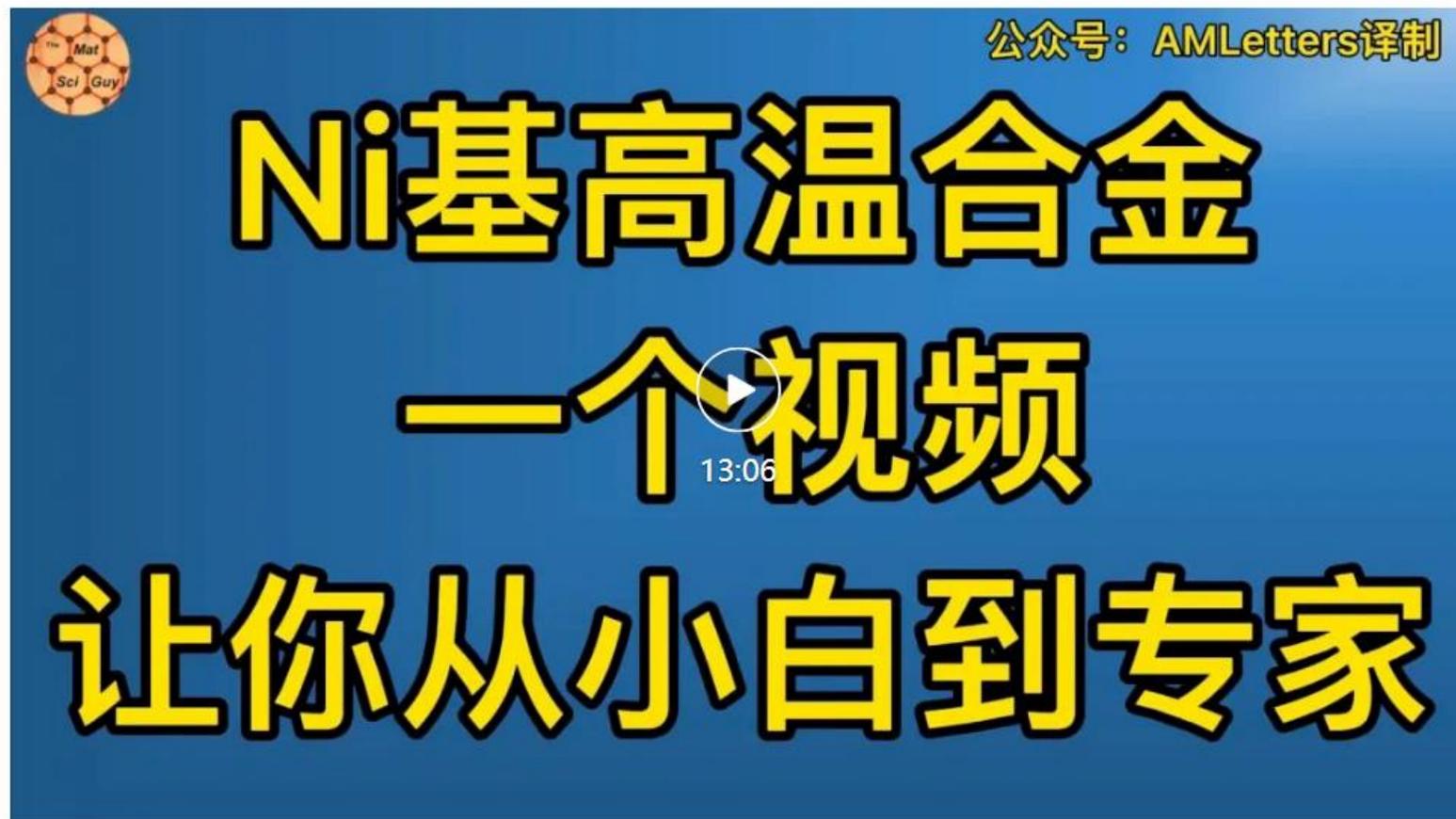


SLM打印GH4169-热处理态-室温力学性能-蓝色曲线

参考: [1]The effect of subsequent heat treatment on the evolution behavior of second phase particles and mechanical properties of the Inconel 718 superalloy manufactured by selective laser melting
天津大学材料学院-中航迈特GH4169粉末

Ni基高温合金 一个视频 让你从小白到专家

AMLetters 2022-04-07 18:30



如果你想了解镍基高温合金更多材料学信息，包括 γ 和 γ' 相到底是什么，可以去AMLetters公众号搜索这个视频。

13分钟，让你从小白到专家。

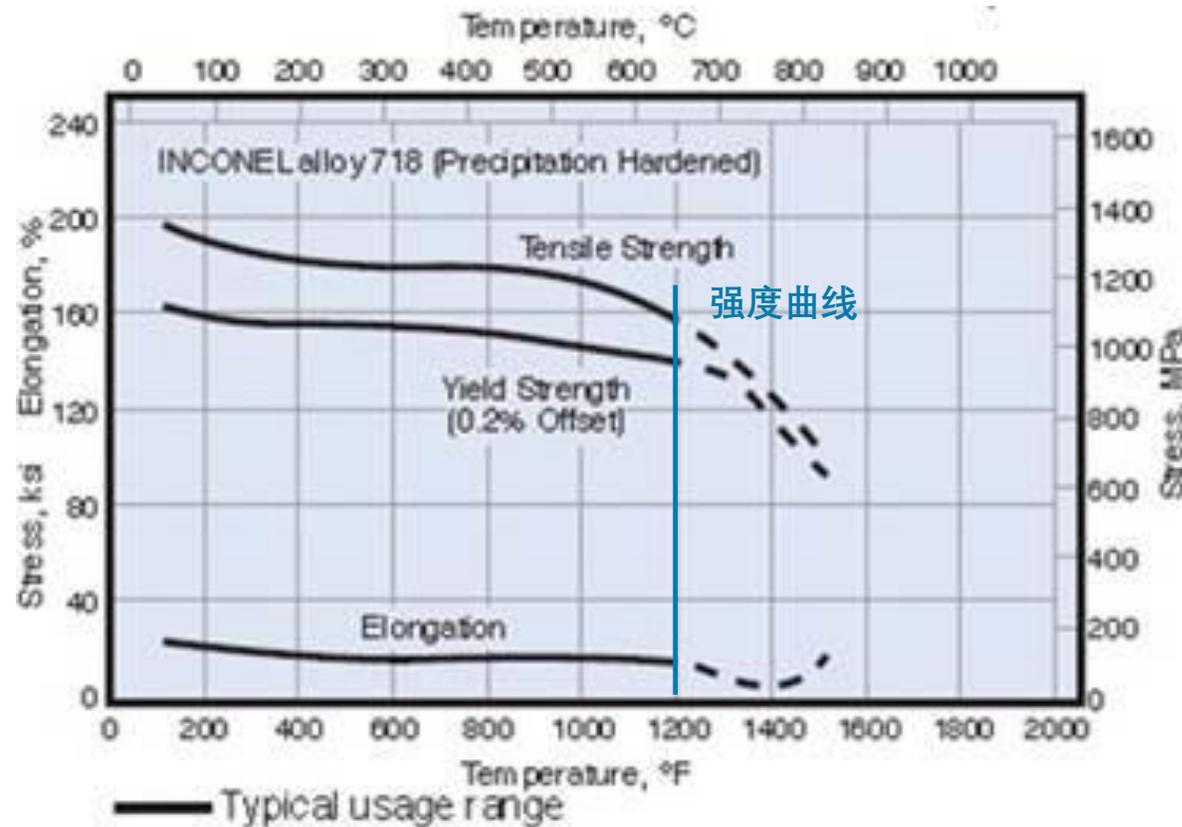
GH4169 温度局限性 650°C

每种材料都有局限性。对于GH4169来说，这个局限性是650°C。

当要求GH4169制备的零件在工况条件下具备抵抗应力和蠕变等能力时，工况温度应该被限制在 650°C 以下，因为亚稳定的 γ' 在该温度或高于该温度的长时间暴露下会迅速发生过度时效现象。

γ' 快速粗化，从共格的盘状 γ' 相转变为稳定的板状 δ 相 (Ni₃Nb)，微观结构的转变使强度迅速降低，最终因蠕变而失效，导致不可预估的事故。

待添加扫描电镜照片



在650°C以后，GH4169强度和模量急速降低

GH4169 高温合金加工4大难点

第一：加工硬化倾向大

比如GH4169未强化处理的基体硬度约为HRC37，切削以后，表面产生0.03mm左右的硬化层，硬度增加到HRC47，硬化程度高达27%。而加工硬化现象对刀具的寿命有很大的影响，通常会使刀具产生严重的边界磨损。

第二：切削力大

高温合金的强度比燃气轮机上常用的合金钢材料还要高出30%以上。一般来讲，材料随着温度的升高，强度会下降，但在600°C左右，镍基高温合金的强度仍然远高于普通的合金钢。未强化处理的高温合金的单位切削力可以达到4000N/mm²，而普通合金钢只有2500N/mm²，高温合金的切削力为普通合金钢的1.6倍。

第三：导热性差

切削高温合金时会产生大量的切削热，这些热量大部分由刀具承受，在800~1000°C时，刀具很容易产生塑性变形，粘结磨损、扩散磨损。

第四：元素冲突

镍基合金主要合金成分为Ni和Cr，另外还添加少量Mo、Ta、Nb、W等元素，但硬质合金和高速钢里面也都有Ta、Nb、W，这就导致用普通的刀具切削高温合金时容易产生扩散磨损和磨料磨损。

加工问题与航空航天应用中通常需要的复杂几何形状相结合，导致这类部件的制造通常困难且成本高昂。

参考[1]《中国高温合金手册》中国标准出版社 2012版

[2]<https://v.douyin.com/Nc84K66/>

[3] <https://baike.baidu.com/item/%E7%83%AD%E5%AF%BC%E7%8E%87/868266?fr=aladdin>

GH4169导热率

$\theta/^\circ\text{C}$	11	100	200	300	400	500
$\lambda[\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$	13.4	14.7	15.9	17.8	18.3	19.6
$\theta/^\circ\text{C}$	600	700	800	900	1000	—
$\lambda[\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$	21.2	22.8	23.6	27.6	30.4	—

热导率，又称“导热系数”。是物质导热能力的量度。符号为 λ 或 K 。是指当温度垂直向下梯度为1°C/m时，单位时间内通过单位水平截面积所传递的热量。物质的密度大，其热导率通常也较大。金属含杂质时热导率降低，合金的热导率比纯金属低。各类物质的热导率 [W/(m·K)] 的大致范围是：金属为50~415，合金为12~120，绝热材料为0.03~0.17，液体为0.17~0.7，气体为0.007~0.17，碳纳米管高达1000以上。钻石的热导率在已知矿物中最高。

标准状态下

常见材料的导热率

铜 固态 401

铝 固态 237

铁 固态 60

钢 固态 60

玻璃 固态 1.1

水 液态 0.6

**GH4169从室温到1000°C，
导热率都很低，13~30**

GH4169 铸造局限性 疏松偏析

GH4169的高机械强度和硬度限制了其加工性，即使在高温下也是如此。

在没有金属3D打印技术前，许多复杂零件往往通过熔模铸造生产。我国将高温合金分为变形高温合金与铸造高温合金两大类型，与变形高温合金GH4169对应的铸造高温合金牌号为K4169。

《中国高温合金手册》下册中对K4169的描述如下：

K4169是镍基沉淀硬化型等轴晶铸造高温合金。合金以 γ'' 为主要强化相、 γ' 相为辅助强化相。合金在很宽的中、低温度范围(-253℃ ~ 700℃)内具有较高的强度和塑性，优良的耐腐蚀和耐辐照性能，以及良好的焊接和成型性能，并具有较好的抗应变时效裂纹的性能。广泛用于航空，航天发动机、核反应堆以及石油化工领域，适用于制作650℃以下工作的发动机叶片、机匣以及其他结构件。

K4169应用概况及特性

K4169已用于制作航空发动机燃烧室前置扩压器、承力环等十几种精密铸件，航天大推力发动机泵体机匣等精密铸件，已批量生产，使用情况良好。为减轻铌元素在枝晶间的偏析，应严格控制铸造工艺和热处理等热过程。用于大型结构件时，为获得致密和均匀的显微组织，需采用热等静压处理。通过热等静压处理后，可以消除疏松，减少偏析，改善可焊性。热等静压处理后采用合适的热处理，可以提高铸件的使用性能。

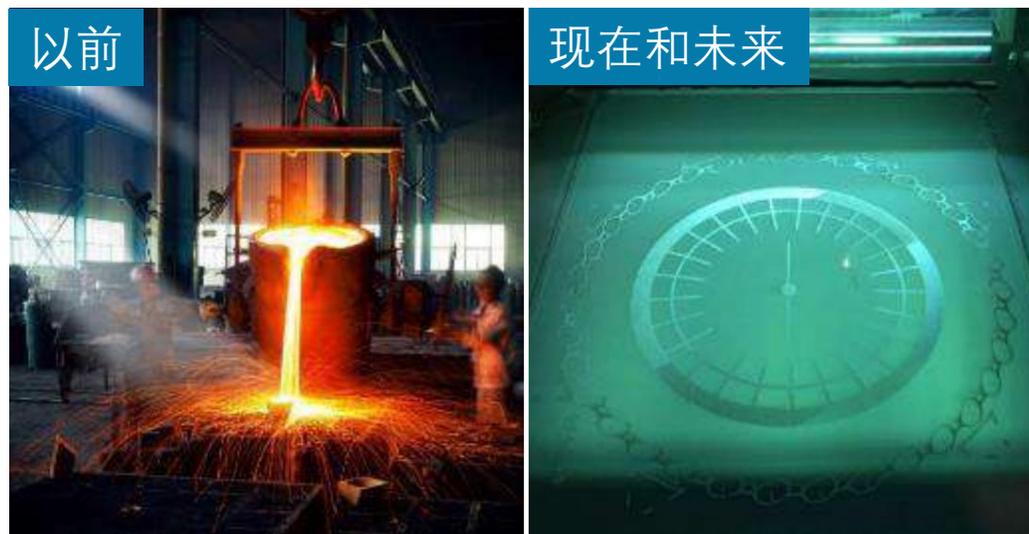
熔模铸造的缺点

(1) 缺陷多

容易形成气孔、偏析和非常粗的晶粒尺寸，这会降低功能性并需要后续加工步骤，从而增加成品部件的成本。**对于承力结构件，熔模铸造K4169需要热等静压 (HIP) 以最大限度地减少疏松和铸件偏析。**

(2) 偏析严重

熔模铸造的另一个问题是铌元素的局部偏析，在热处理过程中会产生局部硬度较高的区域。这些较硬的偏析区域会增加刀具的磨损、导致刀具崩刃，严重的甚至导致零件报废，严重增加制造成本。



通过以上论述，相信大家已经了解到传统加工方式在制备复杂高温合金零部件时存在的一些技术瓶颈，比如加工成本高昂，有些零件还必须通过铸造等手段制备，铸造工艺又不可避免的会引入一些缺陷，损害零件的高温腐蚀和抗蠕变等性能。金属增材制造SLM在不牺牲GH419优异力学性能的同时，使零部件的加工更加方便、高效，零件复杂程度也不显著增加加工成本，这正是航空航天领域大力发展金属增材制造的根本原因，它确实带来了经济效益。

汽车和石油化工等其他行业就不追求产品性能了么？也追求啊，不过考虑成本的权重更大一些。如果不考虑成本，在这些行业也有很多可以使用高温合金的应用场景。以前因为工艺和成本的原因并没有这样做，现在，随着技术成熟度的提升和设备、原料成本的下降，会有越来越多的高温合金替代传统材料的应用案例出现。

增材制造好处多多

- (1) 放飞自由度：**SLM为航空航天工程师带来了更多的设计自由度，使得他们可以突破基于传统制造工艺的设计思路；
- (2) 零件整合：**根据零件特征整合组件数量，以减少后续焊接等操作；
- (3) 点阵或拓扑轻量化：**通过引入点阵结构将零件的轻量化推向极限；
- (4) 最小化材料浪费：**传统的加工方式会导致高比例的切削废料，而通过SLM打印零件，绝大多数情况下原材料的浪费要少得多；
- (5) 快速交付：**获得所有这些优化的同时，还能更快的交付。

参考[1]<https://www.nsrp.org/wp-content/uploads/2019/10/Lessons-Learned-From-Commercial-Aviation-Certification.pdf>

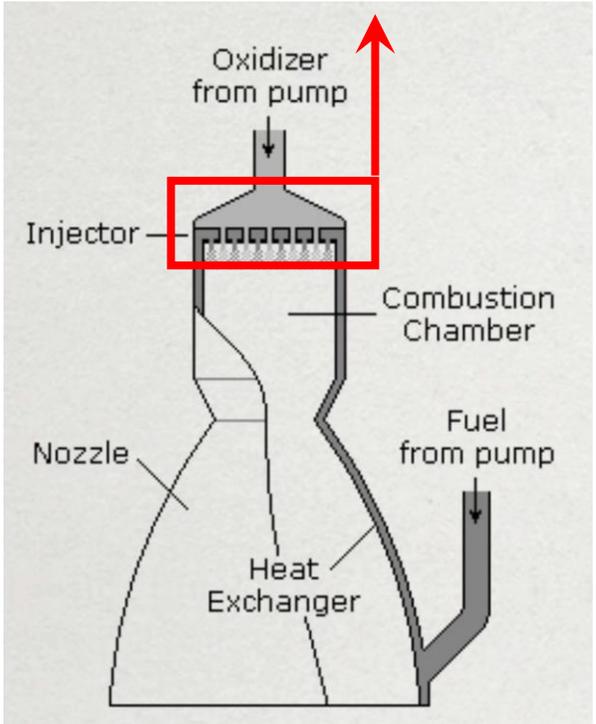
零件整合案例 GE A-CT7发动机中框组件



GE的A-CT7发动机中框组件过去使用传统加工方式制造，包含了300个单独的零件，这300个零件由几十家供应商提供，装配过程涉及几十名工程师，涉及焊接、螺栓连接等多种工艺。而使用SLM一体成形，缩短了供应链条（增加可控性）、减少焊接等装配工艺（增加可靠性）、实现了减重、还加快了生产周期。这个产品具体是高温合金还是钛合金小编未查到，但已足以说明增材制造的颠覆性。



EOS增材制造GH4169喷嘴案例



从设计和制造的角度来看，液体火箭发动机的喷油嘴是发动机要求最高的子系统之一。

喷油嘴承受极端的温度和压力梯度：在启动过程中，推进剂在几秒钟内冷却到超低温，而喷油嘴面板必须承受燃烧引起的超高温，该负荷发生在2700°C以上的温度和高达200bar的压力水平。

传统工艺制备的喷油嘴由几百个零件组成，这些高精度零件由不同材料制成，然后集成在一起。集成过程需要大量的人工参与（焊接、钻孔、检查等），不仅增加总体制造成本，而且引入更多故障风险。



1977年国外喷嘴案例

增材制造的优势

- (1) 增材制造技术可以减少集成步骤，提高效率的同时降低生产成本。
- (2) 增材制造可以根据减少组件的重量来优化喷嘴外壳的设计。
以前，喷嘴由铸件原材料加工而成，潜在的重量节省无法抵消额外的制造成本。
- (3) 增材制造技术生产的零件的材料性能也优于铸造零件。

在世界范围内，航空航天推进系统制造商正在开发增材制造工艺，**不仅用于相对简单的部件，如支架或紧固件，也用于更精密和安全相关的部件，如燃烧室的涡轮叶片或喷射器。** SpaceX和Avio已经验证了小型推力室的替代设计方案。 Airbus Defence and Space也在开发采用增材制造技术生产的推进系统组件，如液体火箭发动机的阀壳、小型推进器或喷射器。我国在次领域也有诸多应用。

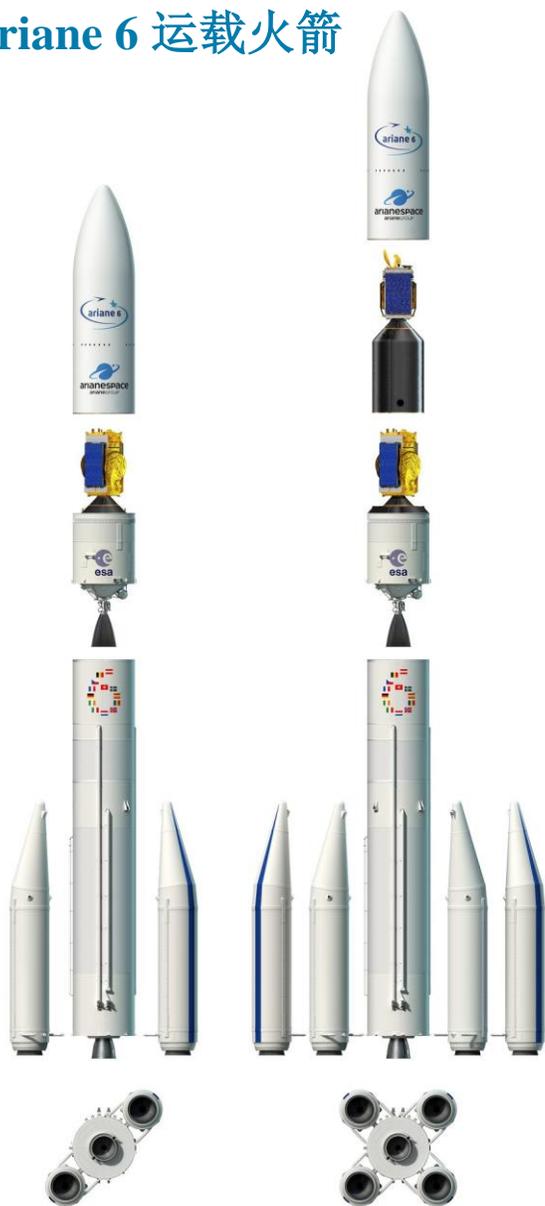
参考： [1]Development of Liquid Rocket Engine Injectors Using Additive Manufacturing

[2] <https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/aerospace-additive-manufacturing-for-ariane-injection-nozzles>

[3] <https://rarehistoricalphotos.com/machining-space-shuttle-injector-1977/>

[4] <http://www.braeunig.us/space/propuls.htm>

Ariane 6 运载火箭



Ariane 6火箭发动机喷油嘴



EOS M400-4

(1) 燃油喷嘴作为发动机的核心元件之一，作用是将燃料混合物带入燃烧室。

(2) 按照常规方法制造，该燃油喷嘴由**248个组件**组成，这些组件通过铸造、钎焊、焊接、钻孔等不同制造步骤进行生产和组装，过程复杂耗时，极易导致零件加工失败。

(3) 借助SLM技术，将喷射头包含的122个喷嘴、底板、前板、分配圆顶、氢气和氧气燃料进料管等零部件优化成了一个**集成组件**。

(4) EOS M400-4（4激光SLM设备）制造该喷射头需要**35个小时**，而传统加工则需要耗费**三个月**的时间，大幅减少了生产时间，生产成本也因此降低了50%。



1、基于增材思路设计模型



2、单个喷嘴打印验证



3、小型喷嘴实验验证



4、喷嘴底板打印成型



5、一体化方案打印成型



6、上机实验

GH5188

formnext
SOUTH CHINA



(1) 概述：GH5188是Co-Ni-Cr基固溶强化型变形高温合金，使用温度小于1100℃。合金中加入 ω (W)14%的钨进行固溶强化，使合金具有良好的综合性能；加入较高含量的铬和微量镧，使合金具有良好的高温抗氧化性能。合金具有较好的冷热加工塑性和焊接等工艺性能，适于制作980℃以下要求高强度和1100℃以下要求抗氧化的航空发动机零件。主要产品有冷轧薄板、热轧中板、棒材、锻件、丝材、增材制造件等。

(2) 应用：合金已用于制作航空发动机燃烧室火焰筒、导向叶片等高温部件，批产和使用情况良好。相近合金在国外还广泛应用于燃气涡轮及导弹的高温部件，如燃烧室、尾喷管及核能工业中的热交换器等零部件。

(3) 在合金板材加工零件的制造工艺中，任何工序（如热处理、焊接等）均应防止渗碳及铜污染，以免损害合金的力学性能和耐蚀性能。合金板材的耐腐蚀能力优于GH3536合金。

(4) 相近牌号：Haynes Alloy No.188(HA188)、UNSR 30188(美)、KCN22W(法)

合金牌号 (代号)	材料类型	工序名称	加热温度/°C	保温时间	冷却方法	HB (d, mm)
GH5188(GH188)	锻制棒材 环形件	固溶	1180 ± 10	—	以确保产品力学性能合格速率冷却	≤293
	冷轧板材 带材	固溶	1165 ~ 1230	根据截面厚度确定	快速空冷	—
	热轧板材	固溶	1170 ~ 1190	—	空冷	≤282HV

注：《GB/T 39274-2020 增材制造 金属制件热处理工艺规范》未推荐GH5188热处理工艺

钛合金

formnext
SOUTH CHINA



Titanium [ti'teɪniəm]名字的由来



某山谷河流

1791年英国人威廉在英格兰的某河流中获得了一种黑色矿砂（钛铁矿），经过一些处理后获得了氧化钛。

威廉用发现矿砂的山谷的名字为这种新物质命名——“Mechanite”。



世界名画“泰坦的陨落”

"Fall of the Titans". Oil on canvas by Jacob Jordaens, 1638.

四年后，德国人马丁**历经千辛万苦**，从金红石矿中独立分解出了氧化钛。希腊神话中泰坦巨神（Titans）也曾被天神禁锢在地壳中，**历经千辛万苦**才挣脱出来。

因此马丁为这种物质取名为Titanium。

——“科学史告诉我们，搞技术的同时还要多学习文化知识”

参考：[1]<https://en.wikipedia.org/wiki/Titans>

[2]《钛与钛合金》/[德]莱茵斯 化学工业出版社 2005.1

第一部分

钛合金牌号化学成分汇总

钛合金牌号编制方法

- (1) 牌号的第一位用大写字母“T”表示钛及钛合金；
- (2) 牌号的第二位表示合金的类型，分别用大写字母A、B和C表示，A表示工业纯钛、 α 型和近 α 型合金，B表示 β 型及近 β 型合金，C表示 α - β 型合金；
- (3) 牌号中的阿拉伯数字按注册的先后自然顺序排序；
- (4) 相同牌号的超低间隙合金在金属后加大写字母“ELI”，数字与“ELI”之间无间隔。

注：文献中常见的CP Ti为工业纯钛（Commercial Pure Titanium）的简写

工业纯钛、 α 型和近 α 型钛及钛合金牌号和化学成分

工业纯钛、α型和近α型钛及钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) /%																						
		主要成分																杂质, 不大于						
		Ti	Al	Si	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	Nd	Fe	C	N	H	O	其他元素	
																						单一	总和	
TA0	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15	0.10	0.03	0.015	0.15	0.1	0.4
TA1	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.10	0.03	0.015	0.20	0.1	0.4
TA2	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.015	0.25	0.1	0.4
TA3	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.40	0.10	0.05	0.015	0.30	0.1	0.4
TA1GELI	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.03	0.012	0.008	0.10	0.05	0.20
TA1G	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.20	0.08	0.03	0.015	0.18	0.10	0.40
TA1G-1	工业纯钛	余量	≤0.2 0	≤0.0 8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15	0.05	0.03	0.003	0.12	—	0.10
TA2GELI	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.20	0.05	0.03	0.008	0.10	0.05	0.20
TA2G	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	0.10	0.40
TA3GELI	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.05	0.04	0.008	0.18	0.05	0.20
TA3G	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.35	0.10	0.40
TA4GELI	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.05	0.05	0.008	0.25	0.05	0.20
TA4G	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.50	0.08	0.05	0.015	0.40	0.10	0.40
TA5	Ti-4Al-0.005B	余量	3.3~ 4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.04	0.015	0.15	0.10	0.40
TA6	Ti-5Al	余量	4.0~ 5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.10
TA7	Ti-5Al-2.5Sn	余量	4.0~ 6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.50	0.08	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40
TA7ELI(a)	Ti-5Al-2.5SnELI	余量	4.50 ~ 5.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.05	0.035	0.012 5	0.12	0.05	0.30

工业纯钛、α型和近α型钛及钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) %																										
		主要成分															杂质, 不大于											
		Ti	Al	Si	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	Nd	Fe	C	N	H	O	其他元素					
																					单一	总和						
TA8	Ti-0.05Pd	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04 ~ 0.08	—	—	—	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	0.10	0.40
TA8-1	Ti-0.05Pd	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04 ~ 0.08	—	—	—	0.20	0.08	0.03	0.015	0.18	0.10	0.40
TA9	Ti-0.2Pd	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.12 ~ 0.25	—	—	—	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	0.10	0.40
TA9-1	Ti-0.2Pd	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.12 ~ 0.25	—	—	—	0.20	0.08	0.03	0.015	0.18	0.10	0.40
TA10	Ti-0.3Mo-0.8Ni	余量	—	—	—	—	—	—	0.6 ~ 0.9	—	—	—	—	0.2 ~ 0.4	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	0.10	0.40
TA11	Ti-8Al-1Mo-1V	余量	7.35 ~ 8.35	—	0.75 ~ 1.25	—	—	—	—	—	—	—	—	0.75 ~ 1.25	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.12	0.10	0.30	
TA12	Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-1Nd-0.25Si	余量	4.8 ~ 6.0	0.2 ~ 0.35	—	—	—	—	—	—	1.5 ~ 2.5	—	—	0.75 ~ 1.25	—	—	—	3.7 ~ 4.7	—	0.6 ~ 1.2	0.25	0.08	0.05	0.012 5	0.15	0.10	0.40	
TA12-1	Ti-5Al-4Sn-2Zr-1Mo-1Nd-0.26Si	余量	4.5 ~ 5.5	0.2 ~ 0.35	—	—	—	—	—	—	1.5 ~ 2.5	—	—	1.0 ~ 2.0	—	—	—	3.7 ~ 4.7	—	0.6 ~ 1.2	0.25	0.08	0.04	0.012 5	0.15	0.10	0.30	
TA13	Ti-2.5Cu	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.20	0.08	0.05	0.010	0.20	0.10	0.30	
TA14	Ti-2.3Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.2Si	余量	2.0 ~ 2.5	0.10 ~ 0.50	—	—	—	—	—	—	4.0 ~ 6.0	—	—	0.8 ~ 1.2	—	—	—	10.52 ~ 11.50	—	—	0.20	0.08	0.05	0.012 5	0.20	0.10	0.30	

工业纯钛、α型和近α型钛及钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) %																						
		主要成分															杂质, 不大于							
		Ti	Al	Si	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	Nd	Fe	C	N	H	O	其他元素	
																						单一	总和	
TA15	Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr	余量	5.5 ~ 7.1	≤0.15	0.8 ~ 2.5	—	—	—	—	1.5 ~ 2.5	—	0.5 ~ 2.0	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
TA15-1	Ti-2.5Al-1Mo-1V-1.5Zr	余量	2.0 ~ 3.0	≤0.10	0.5 ~ 1.5	—	—	—	—	1.0 ~ 2.0	—	0.5 ~ 1.5	—	—	—	—	—	0.15	0.05	0.04	0.003	0.12	0.10	0.30
TA15-2	Ti-4Al-1Mo-1V-1.5Zr	余量	3.5 ~ 4.5	≤0.10	0.5 ~ 1.5	—	—	—	—	1.0 ~ 2.0	—	0.5 ~ 1.5	—	—	—	—	—	0.15	0.05	0.04	0.003	0.12	0.10	0.30
TA16	Ti-2Al-2.5Zr	余量	1.8 ~ 2.5	≤0.12	—	—	—	—	—	2.0 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.04	0.006	0.15	0.10	0.30
TA17	Ti-4Al-2V	余量	3.5 ~ 4.5	≤0.15	1.5 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
TA18	Ti-3Al-2.5V	余量	2.0 ~ 3.5	—	1.5 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.05	0.015	0.12	0.10	0.30
TA19	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si	余量	5.5 ~ 6.5	0.06 ~ 0.10	—	—	—	—	—	3.6 ~ 4.4	—	1.8 ~ 2.2	—	—	1.8 ~ 2.2	—	—	0.25	0.05	0.05	0.012 ~ 0.015	0.15	0.10	0.30
TA20	Ti-4Al-3V-1.5Zr	余量	3.5 ~ 4.5	≤0.10	2.5 ~ 3.5	—	—	—	—	1.0 ~ 2.0	—	—	—	—	—	—	—	0.15	0.05	0.04	0.003	0.12	0.10	0.30
TA21	Ti-1Al-1Mn	余量	0.4 ~ 1.5	≤0.12	—	0.5 ~ 1.3	—	—	—	≤0.30	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.012	0.15	0.10	0.30
TA22	Ti-3Al-1Mo-1Ni-1Zr	余量	2.5 ~ 3.5	≤0.15	—	—	—	0.3 ~ 1.0	—	0.8 ~ 2.0	—	0.5 ~ 1.5	—	—	—	—	—	0.20	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
TA22-1	Ti-2.5Al-1Mo-1Ni-2Zr	余量	2.0 ~ 3.0	≤0.04	—	—	—	0.3 ~ 0.8	—	0.5 ~ 1.0	—	0.2 ~ 0.8	—	—	—	—	—	0.20	0.10	0.04	0.008	0.10	0.10	0.30
TA23	Ti-2.5Al-2Zr-1Fe	余量	2.2 ~ 3.0	≤0.15	—	—	0.8 ~ 1.2	—	—	1.7 ~ 2.3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.04	0.010	0.15	0.10	0.30
TA23-1	Ti-2.5Al-2Zr-1Fe	余量	2.2 ~ 3.0	≤0.10	—	—	0.8 ~ 1.1	—	—	1.7 ~ 2.3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.04	0.008	0.10	0.10	0.30

工业纯钛、α型和近α型钛及钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) /%																						
		主要成分															杂质, 不大于							
		Ti	Al	Si	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	Nd	Fe	C	N	H	O	其他元素	
余量																						单一	总和	
TA24	Ti-3Al-2Mo-2Zr	余量	2.0 ~ 3.8	≤0.15	—	—	—	—	—	1.0 ~ 3.0	—	1.0 ~ 2.5	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
TA24-1	Ti-3Al-2Mo-3Zr	余量	1.5 ~ 2.5	≤0.04	—	—	—	—	—	1.0 ~ 3.0	—	1.0 ~ 2.0	—	—	—	—	—	0.15	0.10	0.04	0.010	0.10	0.10	0.30
TA25	Ti-3Al-2.5V-0.05Pd	余量	2.5 ~ 3.5	—	2.0 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	—	0.04 ~ 0.08	—	—	—	—	0.25	0.08	0.03	0.015	0.15	0.10	0.40
TA26	Ti-3Al-2.5V-0.10Ru	余量	2.5 ~ 3.5	—	2.0 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	0.08 ~ 0.14	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.03	0.015	0.15	0.10	0.40
TA27	Ti-0.10Ru	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08 ~ 0.14	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	0.10	0.40
TA27-1	Ti-0.10Ru	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08 ~ 0.14	—	—	—	—	—	0.20	0.08	0.03	0.015	0.18	0.10	0.40
TA28	Ti-3Al	余量	2.0 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.40
TA29	Ti-5.8Al-4Sn-4Zr-0.7Nb-1.5Ta-0.4Si-0.06C	余量	5.4 ~ 6.1	0.34 ~ 0.45	—	—	—	—	—	3.7 ~ 4.3	0.5 ~ 0.9	—	—	—	3.7 ~ 4.3	1.3 ~ 1.7	—	0.05	0.04 ~ 0.08	0.02	0.010	0.10	0.10	0.20
TA30	Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-1Mo-0.3Si	余量	4.7 ~ 6.0	0.20 ~ 0.35	—	—	—	—	—	2.4 ~ 3.5	0.7 ~ 1.3	0.7 ~ 1.3	—	—	3.0 ~ 3.8	—	—	0.15	0.10	0.04	0.012	0.15	0.10	0.30
TA31	Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo	余量	5.5 ~ 6.5	≤0.15	—	—	—	—	—	1.5 ~ 2.5	2.5 ~ 3.5	0.6 ~ 1.5	—	—	—	—	—	0.25	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30

工业纯钛、α型和近α型钛及钛合金牌号和化学成分

合金 牌号	名义化学成分	化学成分（质量分数）/%																						
		主要成分															杂质，不大于							
		Ti	Al	Si	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	Nd	Fe	C	N	H	O	其他元素	
																						单一	总和	
TA32	Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Mo-0.5Nb-0.7Ta-0.3Si	余量	5.0 ~ 6.0	0.1 ~ 0.5	—	—	—	—	—	2.5 ~ 3.5	0.2 ~ 0.7	0.3 ~ 1.5	—	—	3.0 ~ 4.0	0.2 ~ 0.7	—	0.25	0.10	0.05	0.012	0.15	0.10	0.30
TA33	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Mo-0.5Nb-1.1Ta-0.4Si-0.06C	余量	5.2 ~ 6.5	0.2 ~ 0.6	—	—	—	—	—	2.5 ~ 4.0	0.2 ~ 0.7	0.2 ~ 1.0	—	—	3.0 ~ 4.5	0.7 ~ 1.5	—	0.25	0.04 ~ 0.08	0.05	0.012	0.15	0.10	0.30
TA34	Ti-2Al-3.8Zr-1Mo	余量	1.0 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	3.0 ~ 4.5	—	0.5 ~ 1.5	—	—	—	—	—	0.25	0.05	0.035	0.008	0.10	0.10	0.25
TA35	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Nb-1Mo-0.2Si	余量	5.8 ~ 7.0	0.05 ~ 0.50	—	—	—	—	—	3.5 ~ 4.5	1.5 ~ 2.5	0.3 ~ 1.3	—	—	1.5 ~ 2.5	—	—	0.20	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
TA36	Ti-1Al-1Fe	余量	0.7 ~ 1.3	—	—	—	1.0 ~ 1.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30

- 注：
- (1) TA0、TA1、TA2、TA3是恢复了GB/T 3620.1-1994中的工业纯钛牌号，化学成分与GB/T 3620.1-1994完全等同；
 - (2) (字母为注释角标)TA7ELI牌号的杂质“Fe+O”的质量分数总和应不大于0.32%；

β 型和近 β 型钛合金牌号和化学成分

β型和近β型钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) /%																	
		主要成分											杂质, 不大于						
		Ti	Al	Si	V	Cr	Fe	Zr	Nb	Mo	Pb	Sn	Fe	C	N	H	O	其他元素	
																	单一	总和	
TB2	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	余量	2.5 ~ 3.5	—	4.7 ~ 5.7	7.5 ~ 8.5	—	—	—	4.7 ~ 5.7	—	—	0.30	0.05	0.04	0.015	0.15	0.10	0.40
TB3	Ti-3.5Al-10Mo-8V-1Fe	余量	2.7 ~ 3.7	—	7.5 ~ 8.5	—	0.8 ~ 1.2	—	—	9.5 ~ 11.0	—	—	—	0.05	0.04	0.015	0.15	0.10	0.40
TB4	Ti-4Al-7Mo-10V-2Fe-1Zr	余量	3.0 ~ 4.5	—	9.0 ~ 10.5	—	1.5 ~ 2.5	0.5 ~ 1.5	—	6.0 ~ 7.8	—	—	—	0.05	0.04	0.015	0.20	0.10	0.40
TB5	Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	余量	2.5 ~ 3.5	—	14.0 ~ 16.0	2.5 ~ 3.5	—	—	—	—	—	2.5 ~ 3.5	0.25	0.05	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
TB6	Ti-10V-2Fe-3Al	余量	2.6 ~ 3.4	—	9.0 ~ 11.0	—	1.6 ~ 2.2	—	—	—	—	—	—	0.05	0.05	0.0125	0.13	0.10	0.30
TB7	Ti-32Mo	余量	—	—	—	—	—	—	—	30.0 ~ 34.0	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40
TB8	Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.25Si	余量	2.5 ~ 3.5	0.15 ~ 0.25	—	—	—	—	2.4 ~ 3.2	14.0 ~ 16.0	—	—	0.40	0.05	0.05	0.015	0.17	0.10	0.40
TB9	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	余量	3.0 ~ 4.0	—	7.5 ~ 8.5	5.5 ~ 6.5	—	3.5 ~ 4.5	—	3.5 ~ 4.5	≤0.10	—	0.30	0.05	0.03	0.030	0.14	0.10	0.40

β型和近β型钛及钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) /%																	
		主要成分											杂质, 不大于						
		Ti	Al	Si	V	Cr	Fe	Zr	Nb	Mo	Pb	Sn	Fe	C	N	H	O	其他元素	
																	单一	总和	
TB10	Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al	余量	2.5 ~ 3.5	—	4.5 ~ 5.5	1.5 ~ 2.5	—	—	—	4.5 ~ 5.5	—	—	0.30	0.05	0.04	0.015	0.15	0.10	0.40
TB11	Ti-15Mo	余量	—	—	—	—	—	—	—	14.0 ~ 16.0	—	—	0.10	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40
TB12	Ti-25V-15Cr-0.3Si	余量	—	0.2 ~ 0.5	24.0 ~ 28.0	13.0 ~ 17.0	—	—	—	—	—	—	0.25	0.10	0.03	0.015	0.15	0.10	0.30
TB13	Ti-4Al-22V	余量	3.0 ~ 4.5	—	20.0 ~ 23.0	—	—	—	—	—	—	—	0.15	0.05	0.03	0.010	0.18	0.10	0.40
TB14(a)	Ti-45Nb	余量	—	≤0.03	—	≤0.02	—	—	42.0 ~ 47.0	—	—	—	0.03	0.04	0.03	0.0035	0.16	0.10	0.30
TB15	Ti-4Al-5V-6Cr-5Mo	余量	3.5 ~ 4.5	—	4.5 ~ 5.5	5.0 ~ 6.5	—	—	—	4.5 ~ 5.5	—	—	0.03	0.10	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
TB16	Ti-3Al-5V-6Cr-5Mo	余量	2.5 ~ 3.5	—	4.5 ~ 5.7	5.5 ~ 6.5	—	—	—	4.5 ~ 5.7	—	—	0.30	0.05	0.04	0.015	0.15	0.10	0.40
TB17	Ti-6.5Mo-2.5Cr-2V-2Nb-1Sn-1Zr-4Al	余量	3.5 ~ 5.5	≤0.15	1.0 ~ 3.0	2.0 ~ 3.5	—	0.5 ~ 2.5	1.5 ~ 3.0	5.0 ~ 7.5	—	0.5 ~ 2.5	0.15	0.08	0.05	0.015	0.13	0.10	0.40

α - β 型钛合金牌号和化学成分

α-β型钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) /%																							
		主要成分												杂质, 不大于											
		Ti	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	W	Fe	C	N	H	O	其他元素		
																						单一	总和		
TC1	Ti-2Al-1.5Mn	余量	1.0~2.5	—	—	—	0.7~2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.012	0.15	0.10	0.40	
TC2	Ti-4Al-1.5Mn	余量	3.5~5.0	—	—	—	0.8~2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.012	0.15	0.10	0.40	
TC3	Ti-5Al-4V	余量	4.5~6.0	—	3.5~4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.40	
TC4	Ti-6Al-4V	余量	5.5~6.75	—	3.5~4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40	
TC4ELI	Ti-6Al-4VELI	余量	5.5~6.5	—	3.5~4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.03	0.012	0.13	0.10	0.30	
TC6	Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si	余量	5.5~7.0	0.15~0.40	—	0.8~2.3	—	0.2~0.7	—	—	—	2.0~3.0	—	—	—	—	—	—	0.08	0.05	0.015	0.18	0.10	0.40	
TC8	Ti-6.5Al-3.5Mo-0.25Si	余量	5.8~6.8	0.20~0.35	—	—	—	—	—	—	—	2.8~3.8	—	—	—	—	—	0.40	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.40	
TC9	Ti-6.5Al-3.5Mo-2.5Sn-0.3Si	余量	5.8~6.8	0.2~0.4	—	—	—	—	—	—	—	2.8~3.8	—	—	1.8~2.8	—	—	0.40	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.40	
TC10	Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Cu-0.5Fe	余量	5.5~6.5	—	5.5~6.5	—	—	0.35~1.00	0.35~1.00	—	—	—	—	—	1.5~2.5	—	—	—	0.08	0.04	0.015	0.20	0.10	0.40	

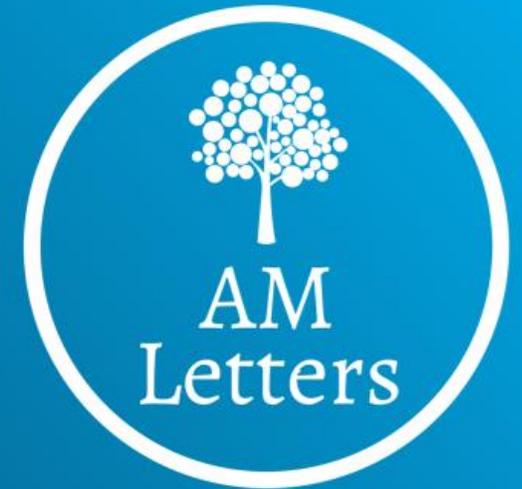
α-β型钛合金牌号和化学成分

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) /%																						
		主要成分													杂质, 不大于									
		Ti	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	W	Fe	C	N	H	O	其他元素	
																						单一	总和	
TC11	Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si	余量	5.8 ~ 7.0	0.20 ~ 0.35	—	—	—	—	—	0.8 ~ 2.0	—	2.8 ~ 3.8	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.05	0.012	0.15	0.10	0.40
TC12	Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Zr-2Sn-1Nb	余量	4.5 ~ 5.5	—	—	3.5 ~ 4.5	—	—	—	1.5 ~ 3.0	0.5 ~ 1.5	3.5 ~ 4.5	—	—	1.5 ~ 2.5	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40
TC15	Ti-5Al-2.5Fe	余量	4.5 ~ 5.5	—	—	—	—	2.0 ~ 3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08	0.05	0.013	0.20	0.10	0.40
TC16	Ti-3Al-5Mo-4.5V	余量	2.2 ~ 3.8	≤0.15	4.0 ~ 5.0	—	—	—	—	—	—	4.5 ~ 5.5	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.05	0.012 0	0.15	0.10	0.30
TC17	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	余量	4.5 ~ 5.5	—	—	3.5 ~ 4.5	—	—	—	1.5 ~ 2.5	—	3.5 ~ 4.5	—	—	1.5 ~ 2.5	—	—	0.25	0.05	0.05	0.012 5	0.08 ~ 0.13	0.10	0.30
TC18	Ti-5Al-4.75Mo-4.75V-1Cr-1Fe	余量	4.4 ~ 5.7	≤0.15	4.0 ~ 5.5	0.5 ~ 1.5	—	0.5 ~ 1.5	—	≤0.30	—	4.0 ~ 5.5	—	—	—	—	—	—	0.08	0.05	0.015	0.18	0.10	0.30
TC19	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	余量	5.5 ~ 6.5	—	—	—	—	—	—	3.5 ~ 4.5	—	5.5 ~ 6.5	—	—	1.75 ~ 2.25	—	—	0.15	0.04	0.04	0.012 5	0.15	0.10	0.40
TC20	Ti-6Al-7Nb	余量	5.5 ~ 6.5	—	—	—	—	—	—	—	6.5 ~ 7.5	—	—	—	—	≤0.5	—	0.25	0.08	0.05	0.009	0.20	0.10	0.40
TC21	Ti-6Al-2Mo-2Nb-2Zr-2Sn-1.5Cr	余量	5.2 ~ 6.8	—	—	0.9 ~ 2.0	—	—	—	1.6 ~ 2.5	1.7 ~ 2.3	2.2 ~ 3.3	—	—	1.6 ~ 2.5	—	—	0.15	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.40
TC22	Ti-6Al-4V-0.05Pd	余量	5.50 ~ 6.75	—	3.5 ~ 4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04 ~ 0.08	—	—	—	0.40	0.08	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40

参考《GB/T 3620.1-2016 钛及钛合金牌号和化学成分》

TC4

formnext
SOUTH CHINA



(1) 概述：TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金是世界上开发最早、应用最广的钛合金。产量约占全世界各种钛合金半成品总产量的一半以上，在航空航天工业中超过80%。Al通过固溶强化 α 相提高合金的室温强度和热强性能，而V既提高强度又改善塑性。V还能抑制 α_2 超结构相的形成，避免合金在长时间使用过程中出现合金脆化。

(2) 主要特点：优异的综合性能和良好的工艺特性。还具有优良的超塑性，适合于用各种压力加工方法进行成形，并采用各种方式进行焊接。TC4钛合金的主要半成品形式是棒材、锻件、薄板、厚板、型材、丝材、增材制造件等。该合金主要在退火状态下使用，也可以采用固溶时效强化，然而淬透截面不超过25~30mm，固溶时效强化不适合厚大工件。

(3) 应用广泛：TC4钛合金在航空航天中主要用于制造飞机结构中的各种梁、隔框、滑轨、起落架梁，航空发动机的风扇和压气机盘、叶片，航天火箭的壳体、压力容器以及各种类型的紧固件。用TC4钛合金代替30CrMnSiA结构钢，可以减轻零件重量约30%。TC4钛合金在民用行业中也获得了广泛应用。例如电力工业中的燃气轮机叶片，造船工业中的船舶推进器，海洋工程中的近海油田钻井平台，化学工业中的各种耐蚀泵，医学中的人工植人物，各种运动器材等。**TC4钛合金可用于制造汽车车架、曲柄轴、连杆、螺栓、进油网和悬挂弹簧等。**

(4) 相近牌号：Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4VELI、Ti-6Al-4V SP、Ti-6Al-4VELI SP(美国)；BT-6、BT-6C (俄罗斯)；IMI-318，IMI-318ELI(英国)；TiA16V4(德国)；T-A6V(法国)；SAT-64(日本)

TC4 国标推荐 热处理制度

合金牌号	制造技术	热处理状态	热处理温度	保温时间	冷却方式	要求
TC4	DED-LB/M	去应力退火	550 °C~800 °C	0.5 h~6 h	空冷、或炉冷、或炉冷至低温后空冷	
	DED-EB/M	去应力退火	550 °C~650 °C	2 h~5 h	空冷或炉冷	
		直接退火	700 °C~800 °C	2 h~5 h	空冷或炉冷	
		双重退火	900 °C~970 °C	1 h~3 h	空冷	
			700 °C~760 °C	1 h~3 h	空冷	
	DED-Arc/M	固溶	900 °C~960 °C	1 h~3 h	水淬	建议气氛炉或真空炉
		时效	500 °C~650 °C	2 h~8 h	空冷或炉冷	建议气氛炉或真空炉
	PBF-LB/M	退火	800 °C~840 °C	2 h~4 h	炉冷或空冷	
		固溶	920 °C~980 °C	≥1 h	空冷	
		时效	550 °C ~ 650 °C	2 h~6 h	空冷或水淬	

DED: 定向能量沉积(Directed Energy Deposition)

DED-Arc/M: 以电弧为能量源、以金属丝材为原材料的定向能量沉积工艺 (Directed energy deposition of metallic wires using an electric arc)

DED-EB/M: 以电子束为能量源、以金属丝材为原材料的定向能量沉积工艺 (Directed energy deposition of metallic wires using an electron beam)

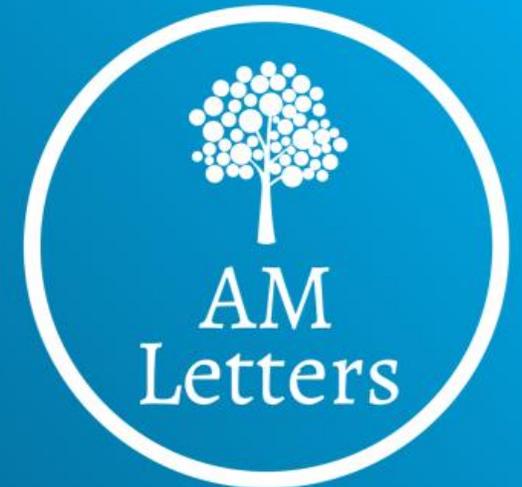
DED-LB/M: 以激光为能量源、以金属粉末为原材料的定向能量沉积工艺 (Directed energy deposition of metallic powders using a laser beam)

PBF: 粉末床熔融(Powder Bed Fusion)

PBF-LB/M: 以激光为能量源、以金属粉末为原材料的粉末床熔融工艺 (Powder bed fusion of metallic materials using a laser beam)

TA15

formnext
SOUTH CHINA



(1) 概述：TA15钛合金属于近 α 型钛合金，名义成分为Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr。该合金主要通过 α 稳定元素Al实现固溶强化，同时加入了中性元素Zr和 β 稳定元素Mo和V以改善工艺性能，因此既具有 α 型钛合金良好的热强性和可焊性，又具有接近于 $\alpha+\beta$ 型钛合金的工艺塑性。

(2) 与Ti6Al4V相比，TA15拥有更高的室温及高温强度、断裂韧性、疲劳极限、抗应力、抗腐蚀能力和焊接性能。

(3) 特点及应用：TA15可以长时间（3000小时）工作在500℃，瞬时（5分钟以内）工作温度可达800℃，在450℃工作寿命可达6000小时。凭借优异的性能，TA15合金在航空航天工业的应用异常广泛，主要用于制造飞机、导弹、运载火箭和卫星的焊接结构件、承力结构件以及大型整体部件等。

(4) 相近牌号：BT-20（俄罗斯）

合金牌号	制造技术	热处理状态	热处理温度	保温时间	冷却方式	要求
TA15	DED-LB/M	去应力退火	600 °C~850 °C	1 h~4 h	空冷、或炉冷 或炉冷至低温 后空冷	
		双重退火	860 °C~1000 °C	0.5 h~4 h	空冷或风冷	
			700 °C~800 °C	1 h~4 h	空冷、或炉冷 或炉冷至低温 后空冷	

DED: 定向能量沉积(Directed Energy Deposition)

DED-Arc/M: 以电弧为能量源、以金属丝材为原材料的定向能量沉积工艺 (Directed energy deposition of metallic wires using an electric arc)

DED-EB/M: 以电子束为能量源、以金属丝材为原材料的定向能量沉积工艺 (Directed energy deposition of metallic wires using an electron beam)

DED-LB/M: 以激光为能量源、以金属粉末为原材料的定向能量沉积工艺 (Directed energy deposition of metallic powders using a laser beam)

PBF: 粉末床熔融(Powder Bed Fusion)

PBF-LB/M: 以激光为能量源、以金属粉末为原材料的粉末床熔融工艺 (Powder bed fusion of metallic materials using a laser beam)

全面了解TA15第一期

基于《激光选区熔化成形 TA15 钛合金工艺、组织演变与力学性能研究》

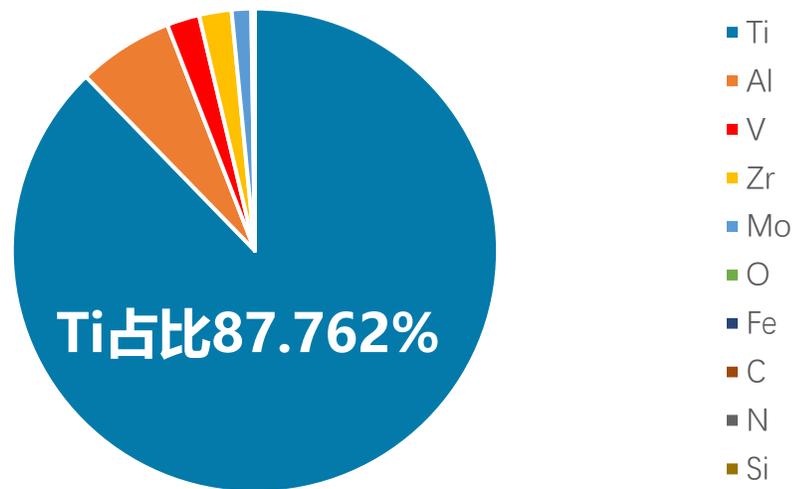
formnext
SOUTH CHINA



SLM用金属粉末关注特性

化学成分	形状	表面形貌	尺寸	松状密度	流动性
------	----	------	----	------	-----

本研究用
中航迈特TA15化学成分质量占比 示意图



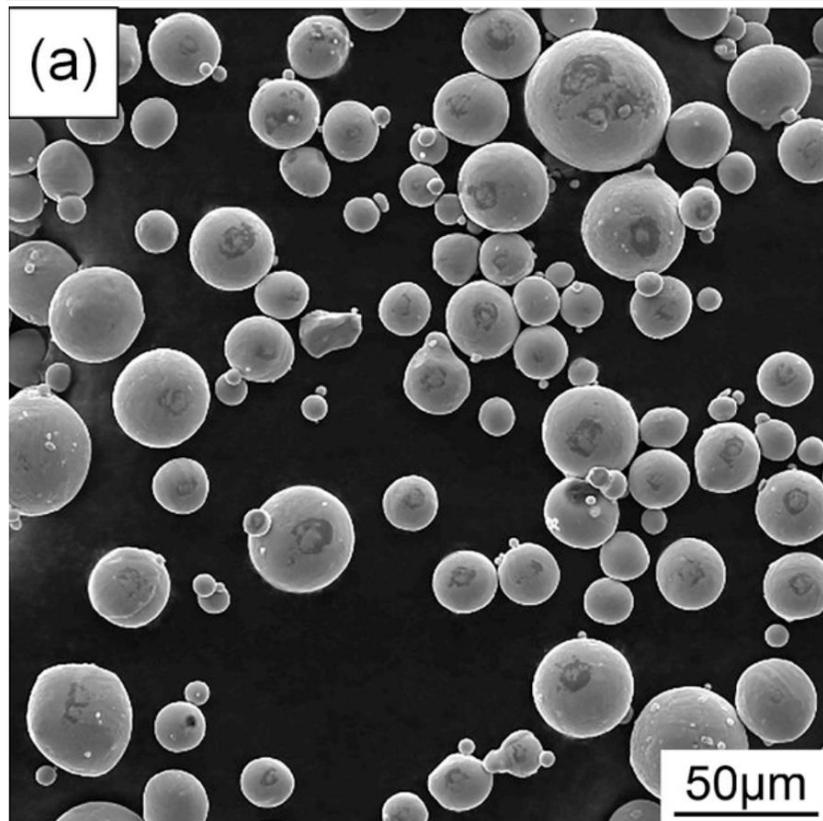
本研究用TA15与国标成分对比

合金牌号	名义化学成分	化学成分 (质量分数) /%																						
		主要成分														杂质, 不大于								
		Ti	Al	Si	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Sn	Ta	Nd	Fe	C	N	H	O	其他元素	
余量	5.5~7.1	≤0.15	0.8~2.5	—	—	—	—	1.5~2.5	—	0.5~2.0	—	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.05	0.015	0.15	单一	总和	
TA15 国标	Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr	余量	5.5~7.1	≤0.15	0.8~2.5	—	—	—	—	1.5~2.5	—	0.5~2.0	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.05	0.015	0.15	0.10	0.30
本研究用 中航迈特 EIGA工艺制备 TA15		余量	6.37	0.017	2.17					2.16		1.3						0.072	0.029	0.02		0.1		

参考[1] 《GB/T 3620.1-2016 钛及钛合金牌号和化学成分》
[2] 《激光选区熔化成形 TA15 钛合金工艺、组织演变与力学性能研究》

SLM用金属粉末关注特性

化学成分	形状	表面形貌	尺寸	松装密度	流动性
------	----	------	----	------	-----



电极感应熔炼气雾化 (EIGA) 方法制备

SLM用粉末形状要求：球形状

SLM用粉末形貌要求：尽量光滑

粉末形状对流动性和松装密度有重要影响

- **形状不规则**的粉末会显著降低粉末的流动性，导致铺粉不均匀，从而影响成形件致密度和表面质量。
- **良好的球形度**不但会提高其流动性，而且由于具有较高的配位数使得粉末拥有较高的松装密度，从而有利于成形零件的致密化。

气雾化制粉的特点

- 存在少许形状不规则的粉末颗粒以及卫星粉

实验用TA15 粉末

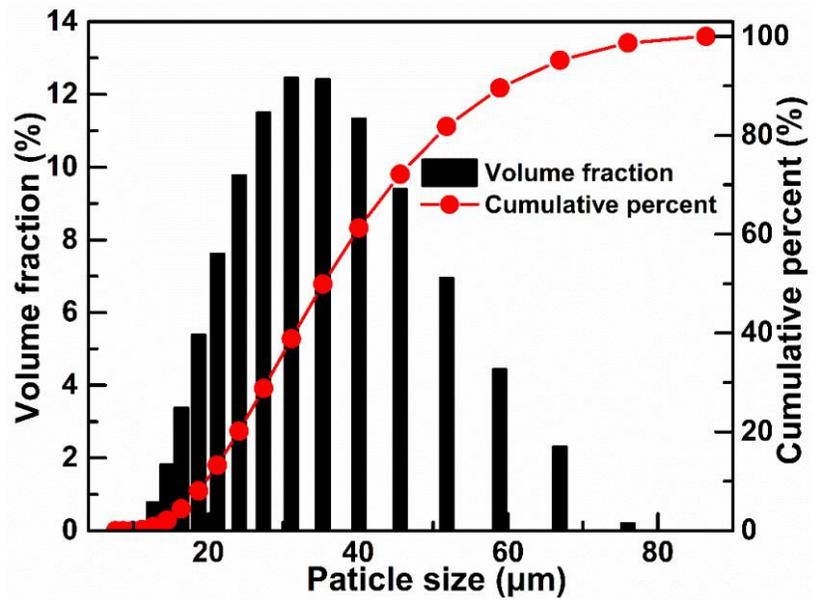
- 整体具有**良好的球形度，表面光滑**，有少量的极其细小的粉末颗粒在大粉末颗粒表面粘附的情况。

SLM用金属粉末关注特性					
化学成分	形状	表面形貌	尺寸	松状密度	流动性

SLM用粉末尺寸要求：粒径10~53μm，分布尽量集中

目前，SLM普遍采用的粉末的粒径分布为10~53μm

- **粒径过大时**，激光对其穿透能力较差，粉末不易完全熔化，容易导致成形件各层之间的结合力差、致密度低。
- **粒径过小时**，粉末的比表面积和表面能增大，容易引起团聚，从而导致流动性和铺展性下降。
- **粒径过小时**，较大的比表面积导致粉末的激光吸收率提高，粉末更容易在高激光输入能量密度中蒸发，产生对光学系统有害的粉尘。



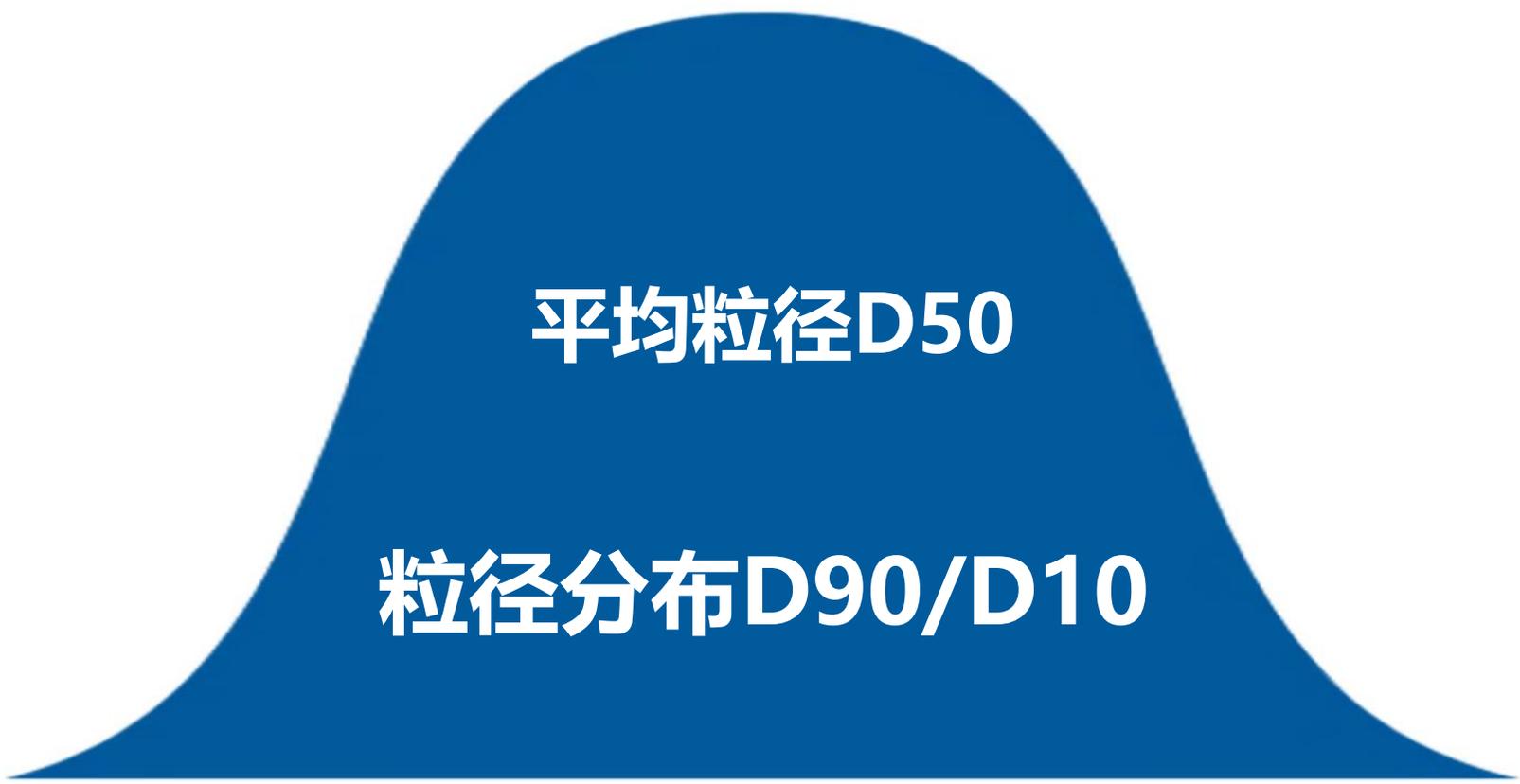
实验用TA15粒径分布测试结果
Mastersizer 2000 激光粒度仪

实验用TA15粉末粒径近似呈现正态分布

粒径尺寸范围	D(10)	D(50) 平均粒径	D(90)
11.2-76μm	20.4μm	34.3μm	55.7μm

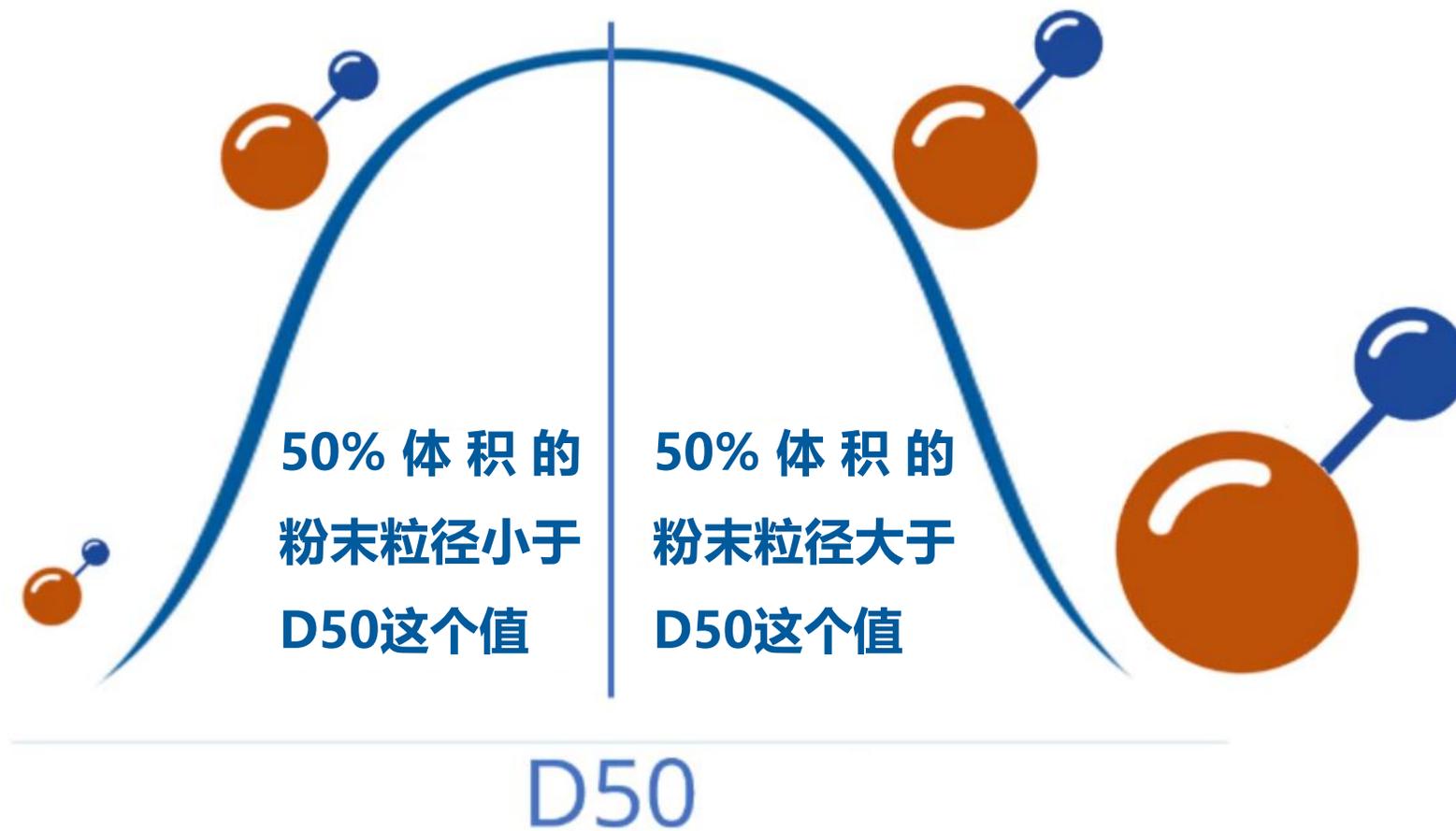
参考[1] 《激光选区熔化成形 TA15 钛合金工艺、组织演变与力学性能研究》

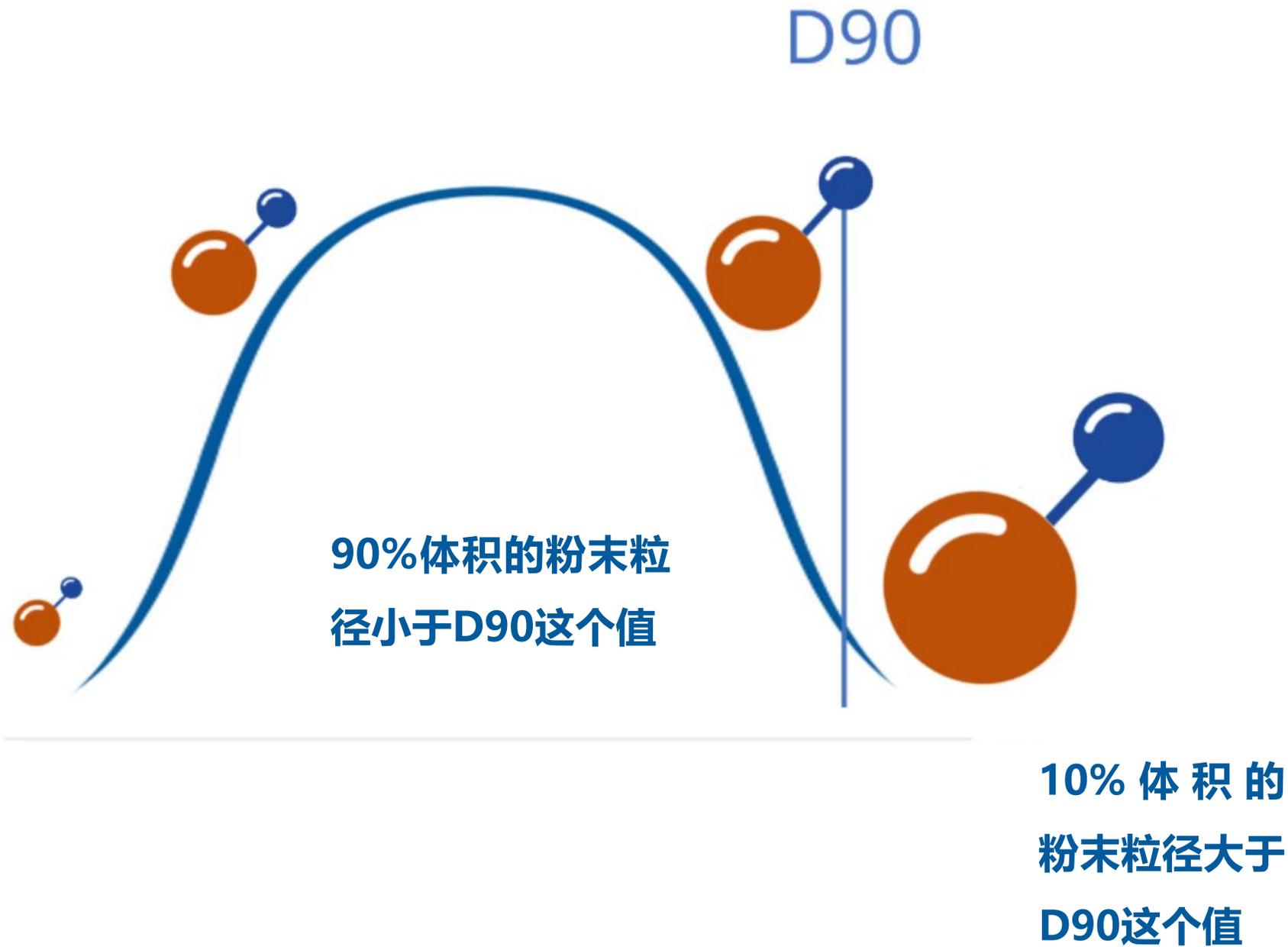
什么意思?



平均粒径D50

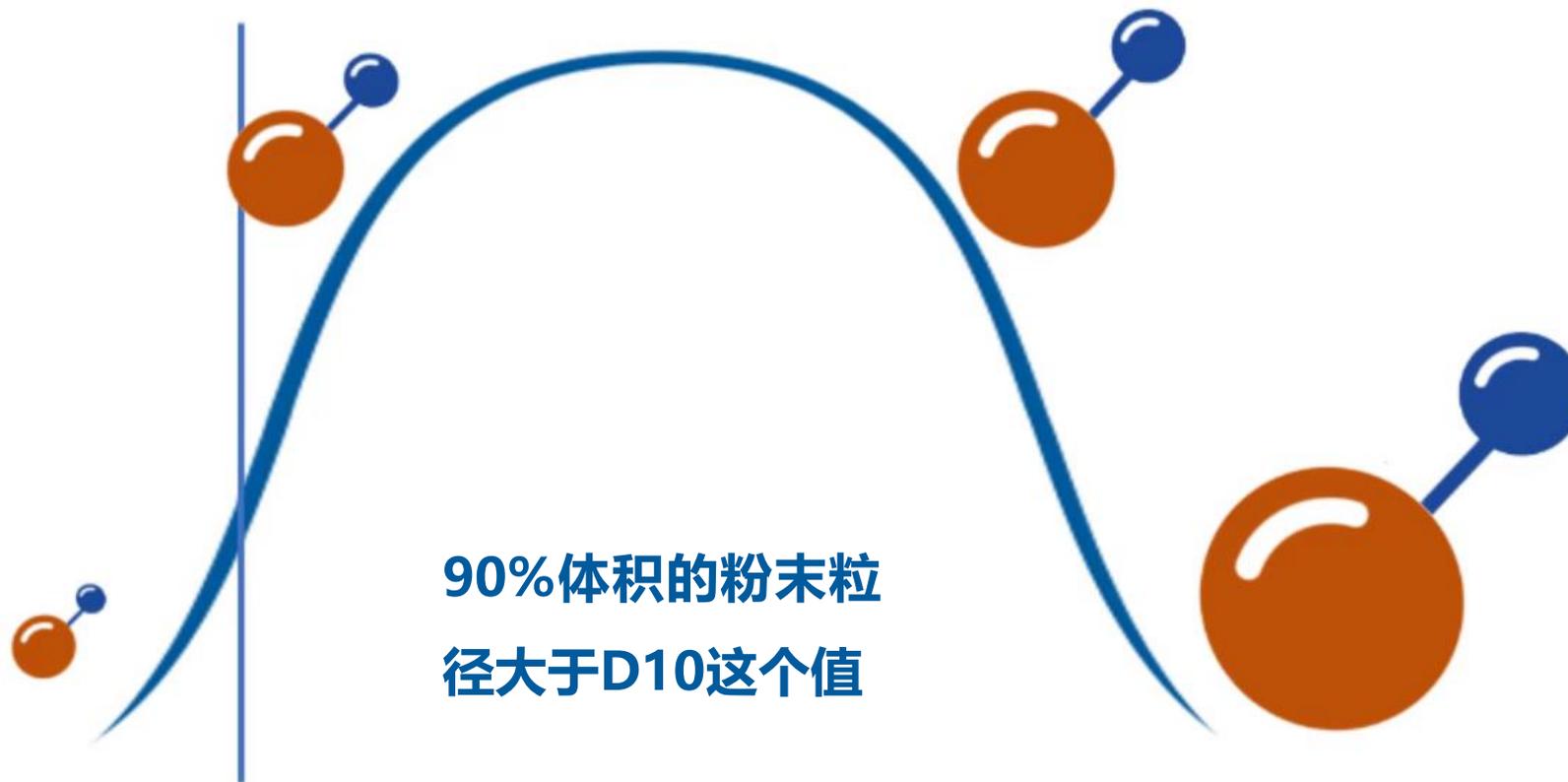
粒径分布D90/D10





D10

10% 体 积 的
粉 末 粒 径 小 于
D10 这 个 值



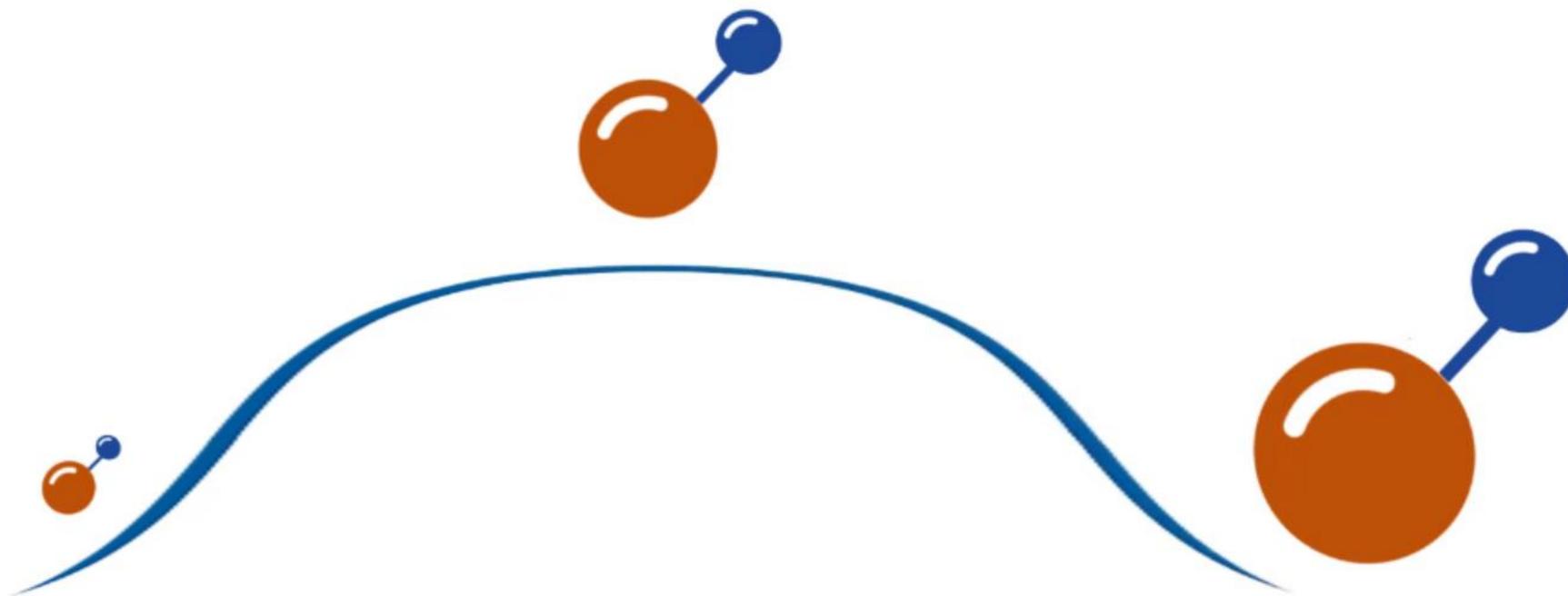
90% 体 积 的 粉 末 粒
径 大 于 D10 这 个 值

粒径分布

用 **D90** 和 **D10** 的 **比值** 来表征

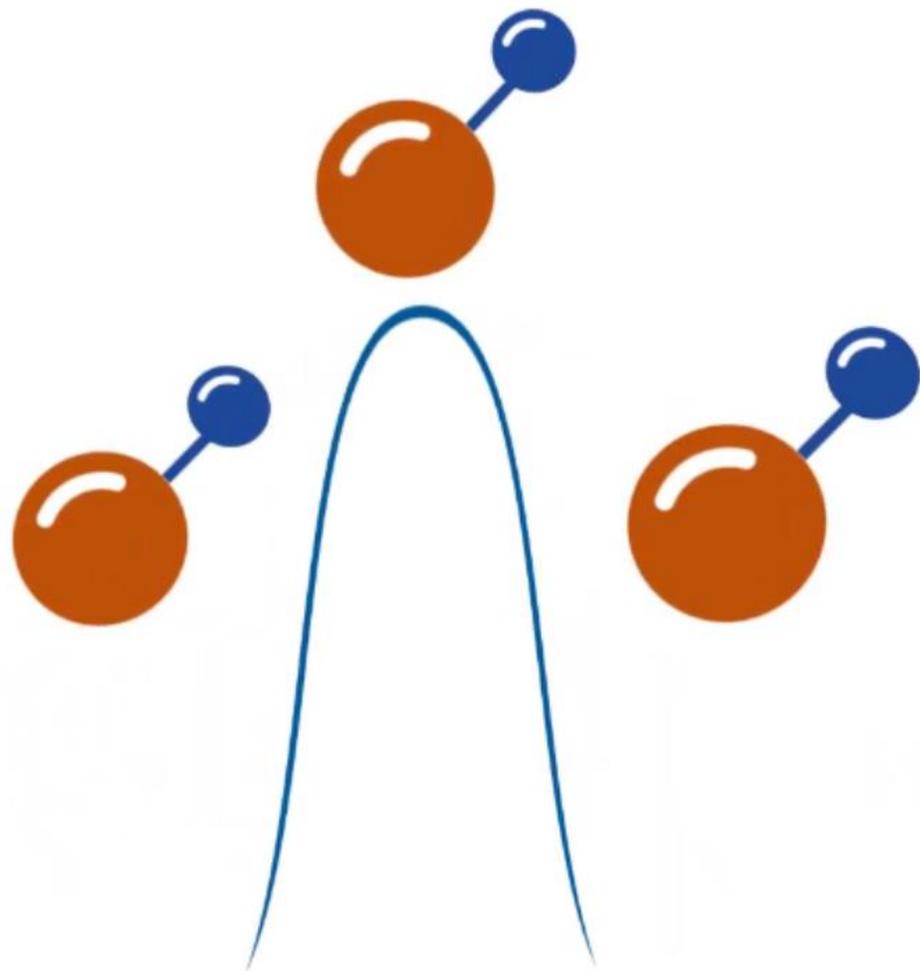
$$\frac{D90}{D10}$$





$$\frac{D90}{D10} \gg \gg 1$$

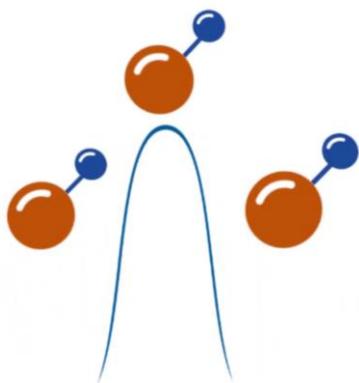
比值越大、粒径分布越大
粉末的尺寸分布**不集中**



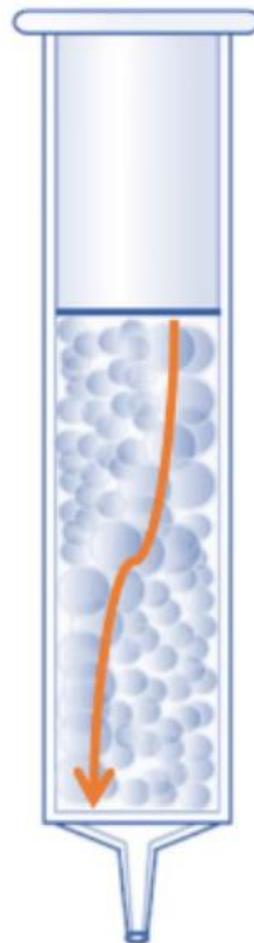
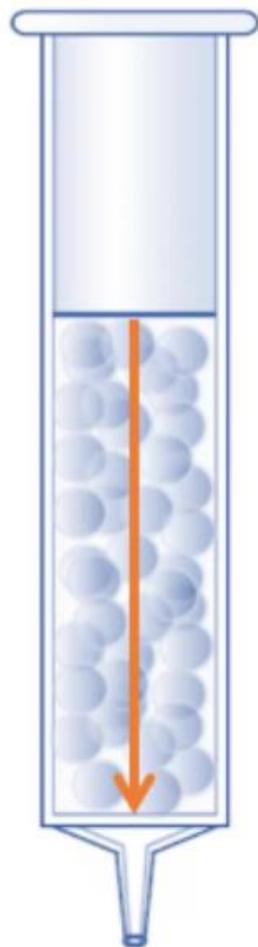
$$\frac{D90}{D10} \cong 1$$

比值越接近1、粒径分布越小
粉末的尺寸分布越集中

为什么金属增材关注粒径分布？



小的粒径分布
粒径尺寸更加集中
堆积效果更好
密度均匀



大的粒径分布
粒径尺寸不集中
堆积效果差
密度不均匀

针对SLM粉末，国标有什么要求？（参考高温合金粉末）



类别	粉末规格 μm	粒度组成	粒度分布	用途
I类	15 ~ 53	$> 53\mu\text{m}$ 不大于5%	15 μm ≤D10≤25微米 30 μm ≤D50≤45微米 50 μm ≤D90≤65微米	适用于选区激光熔融工艺
II类	45 ~ 150	≤45 μm 不大于5% > 150 μm 不大于5%	—	适用于电子束熔化工艺
III类	30 ~ 250	≤30 μm 不大于5% > 250 μm 不大于5%	—	适用于激光定向能量沉积工艺

注：需方对产品粒度有特殊要求时，由供需双方协商确定。

国标推荐 D90/D10: 2 ~ 4.33

本实验用TA15粉末粒径分布

粒径尺寸范围	D(10)	D(50) 平均粒径	D(90)	D90/D10
11.2-76 μm	20.4 μm	34.3 μm	55.7 μm	2.73

标准号：GB/T 41335-2022

发布日期：2022-03-09 实施日期：2022-10-01

SLM用金属粉末关注特性

化学成分	形状	表面形貌	尺寸	松装密度	流动性
------	----	------	----	------	-----

TA15粉末密度

测试方法：漏斗法

国家标准：GB/T 1479.1-2011

TA15粉末的松装密度：2.365 g/cm³

TA15合金的密度：4.45 g/cm³

TA15 粉末松装比：53.13%

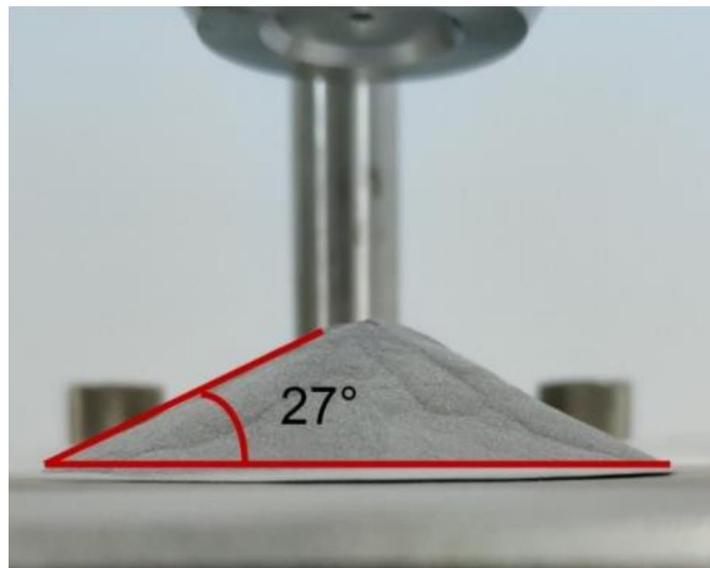
取100cm³的TA15粉末分为三份，将粉末逐份倒入孔径为2.5mm的标准漏斗中，让粉末自由流入容积为25±0.03cm³的量杯中，直到量杯完全充满并溢出，使用直尺刮平粉末，将量杯中的粉末倒出称量。测量三次得平均值为59.12g。

TA15粉末流动性

测试方法：标准漏斗法（霍尔流速计）

国家标准：GB/T 1482-2010

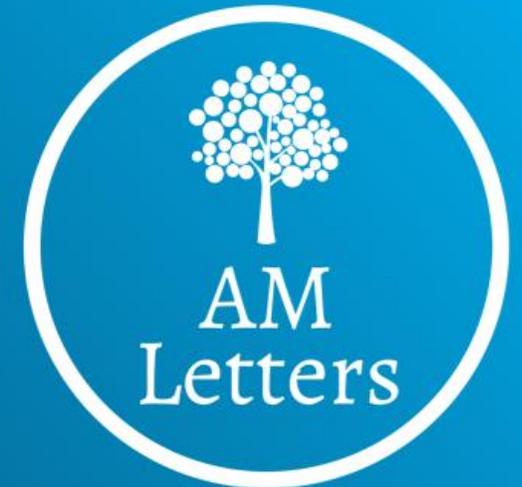
称取TA15粉末50g，放入底部小孔被暂时堵住的标准漏斗（孔径2.5mm）中，随后打开小孔使粉末落下的同时使用秒表开始计时，直至粉末全部漏出停表，测试过程如图2.3（a）所示。三次测量数据分别为40.28、40.19、42.15s，计算平均值为40.87s。



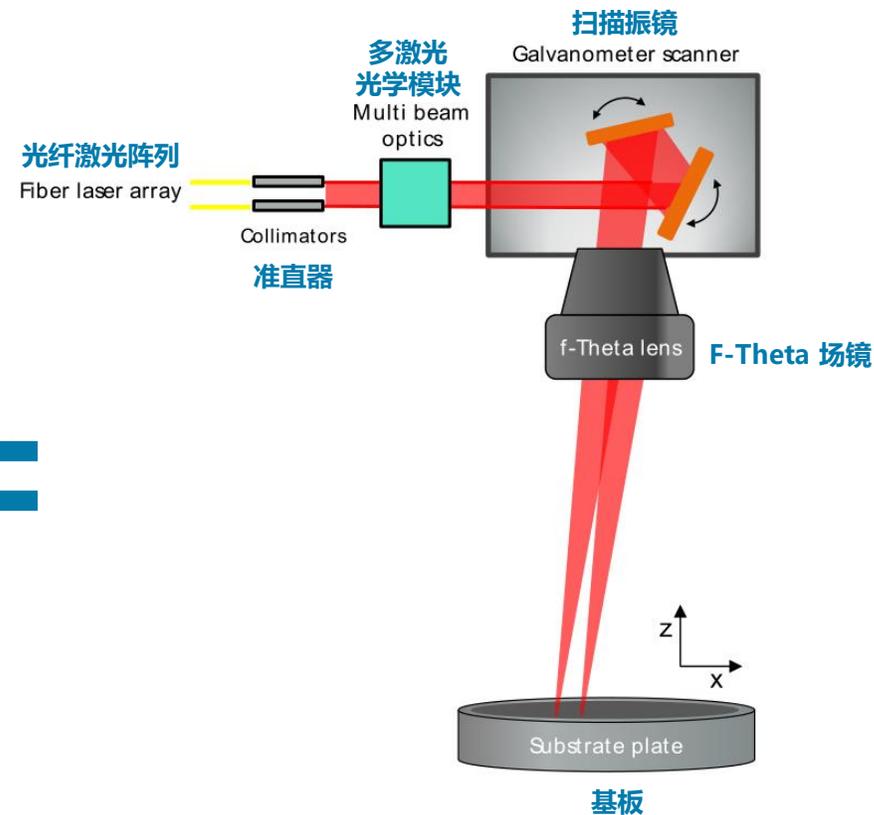
粉末自漏斗自由流下会在桌面上形成圆锥形的粉堆，其倾斜角度（安息角）可以反映出粉末的铺展性能，安息角越小说明粉末之间的摩擦力越小，流动性和铺展性也越好，一般认为安息角小于30°流动性评价为较好。经测试，TA15安息角为27°，具有比较良好的流动性以及铺展性。

新技术

formnext
SOUTH CHINA



新技术0001:两个激光器 + 一套振镜=效率提升90%

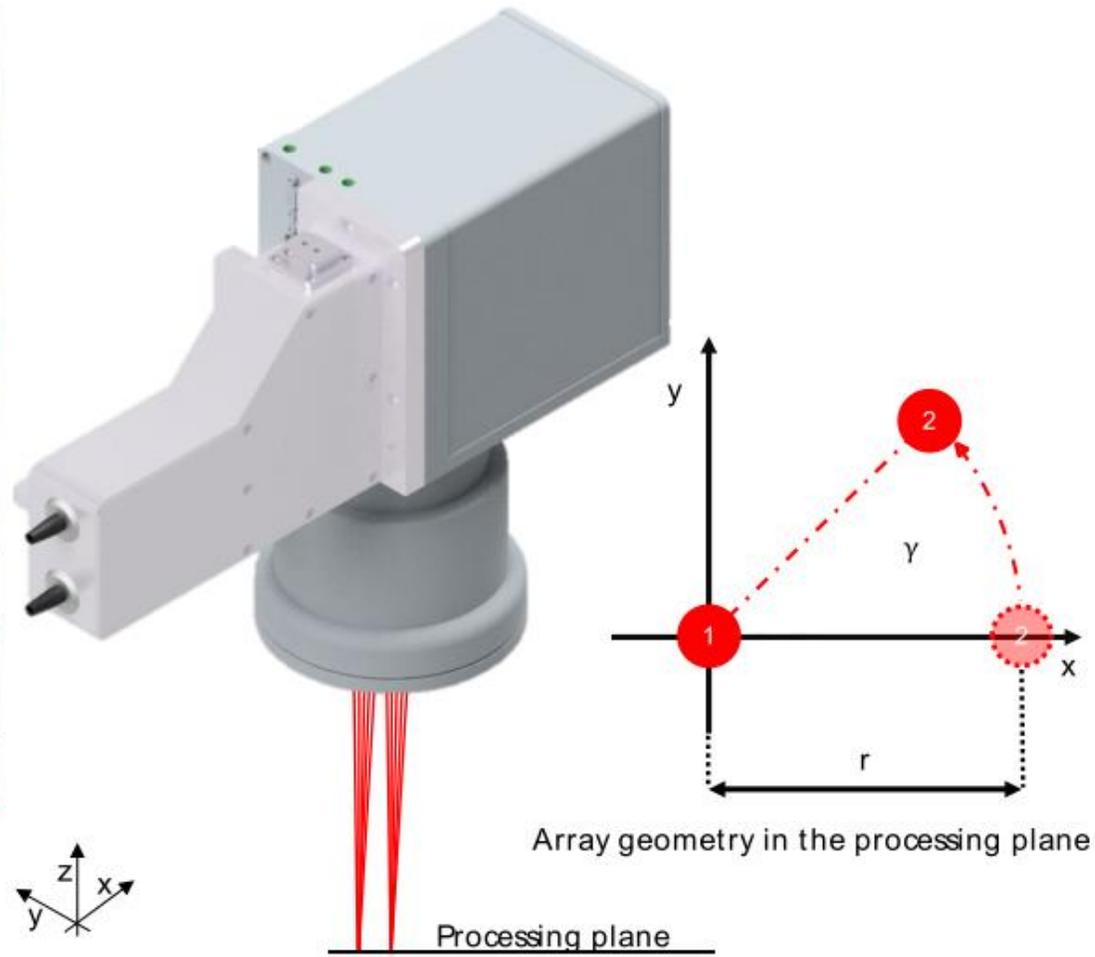
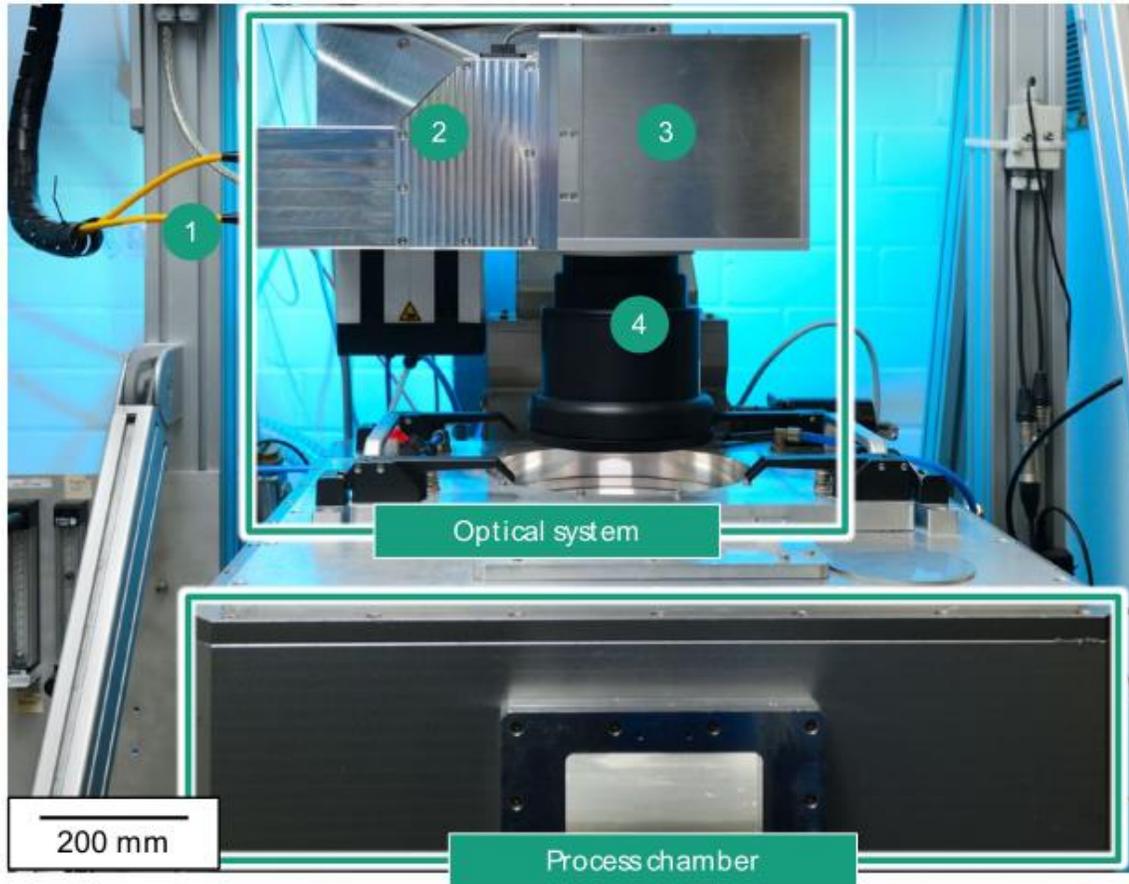


大型SLM设备问题		解决方案	现状
问题一	以吨计位的粉末处理问题	自动化的粉末循环系统	各家的技术正在逐渐趋于完善
问题二	多激光相互干涉的风场问题	飞行打印 On-The-Fly	国内： 目前只有西帝摩曾在展会展示，还未听说行业内实际应用案例
			国外： 德国Fraunhofer ILT
问题三	成形效率问题	增加激光器数量	国内： 西安铂力特：BLT-S800设备 10激光 湖南华曙高科：FS721M设备 8激光
		选用大功率激光器（对应大层厚）	国外： 德国SLM Solutions：NXG XII 600设备 12激光
		如何进一步提升效率 	目前国内选配1000W激光器已是常见的事情，但金属粉末与激光作用的机理和我们对精度的要求，限制了层厚的持续增加（层厚并不能随着激光器功率的增大而线性增大），20μm~60μm还是主流，80μm可能有尝试使用的，100μm鲜有人用。
		德国的弗劳恩霍夫激光技术研究所 (Fraunhofer ILT) 给出了一种答案	

<p>增加 激光器数量</p>	<p>国内： 西安铂力特：BLT-S800设备 10激光 湖南华曙高科：FS721M设备 8激光</p> <p>国外： 德国SLM Solutions：NXG XII 600设备 12激光</p>
<p>选用大功率激光器（对应大层厚）</p>	<p>目前国内选配1000W激光器已是常见的事情，但金属粉末与激光作用的机理和我们对精度的要求，限制了层厚的持续增加（层厚并不能随着激光器功率的增大而线性增大），20μm~60μm还是主流，80μm可能有尝试使用的，100μm鲜有人用。</p>

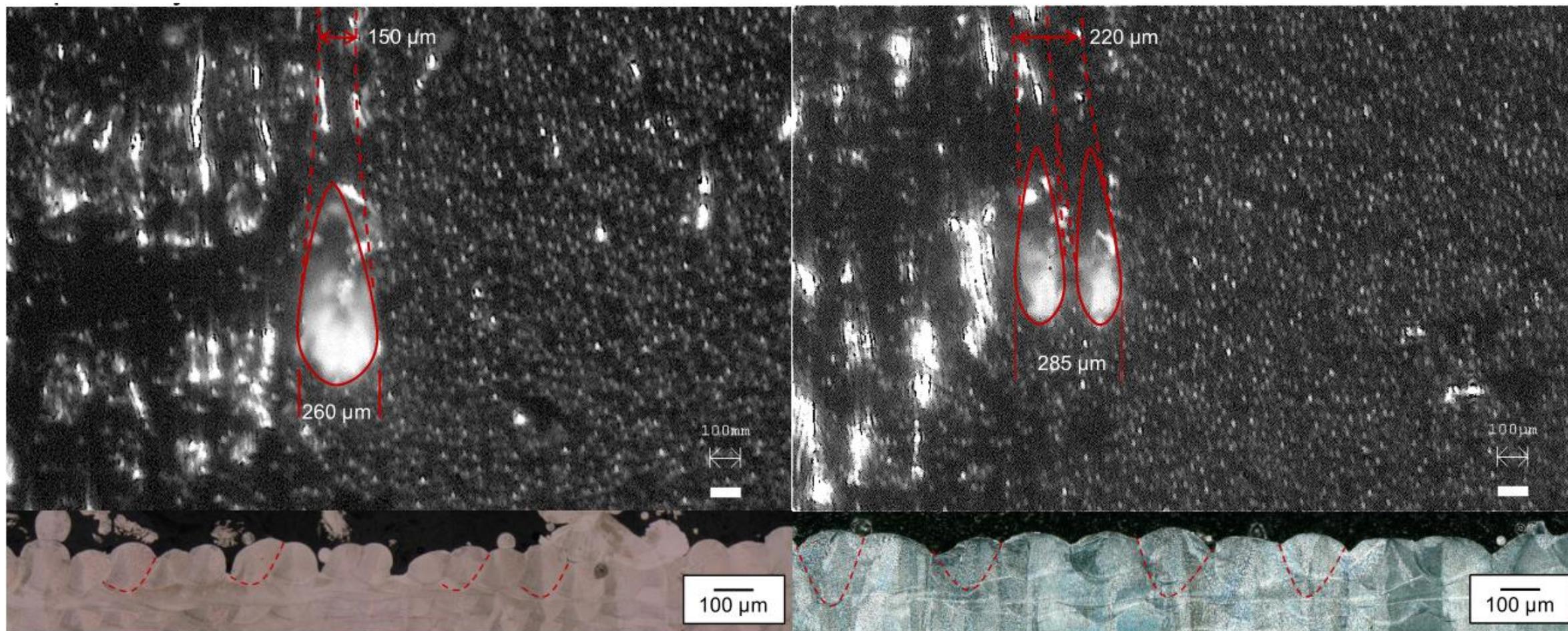
目前，所有的SLM设备都是一台激光器配一套振镜，能不能多台激光器配一台振镜呢？如果仅仅是一种设想，那咱们这种外行也没有必要去进一步探讨这种过于神秘的概念。难得的是，Fraunhofer ILT已经做了一系列实实在在的验证工作，将设想付诸实践，并成功打印了致密度99.99%的316L不锈钢。AMLetters觉得有必要跟关注AMLetters的朋友们分享一下了。

这个技术很好理解，一张图足以表达清楚，所以下面的内容仅用于展示真实性，不再做过多论述。

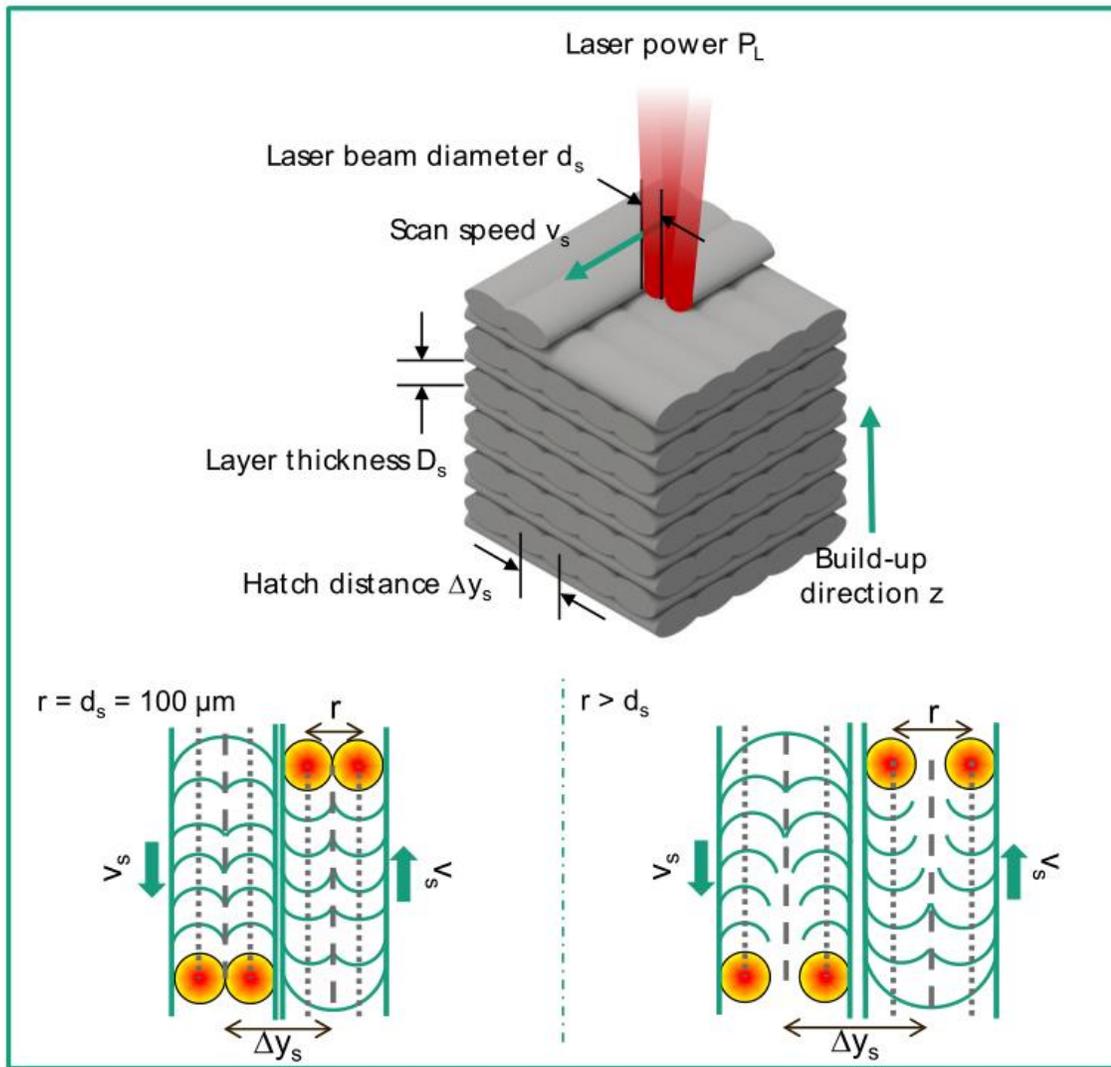


- 1 Fiber lasers and collimators ($f = 50 \text{ mm}$)
- 2 Multi-beam optics
- 3 Galvanometer scanner (intelliSCAN III 30)
- 4 f-theta lens ($f = 340 \text{ mm}$)

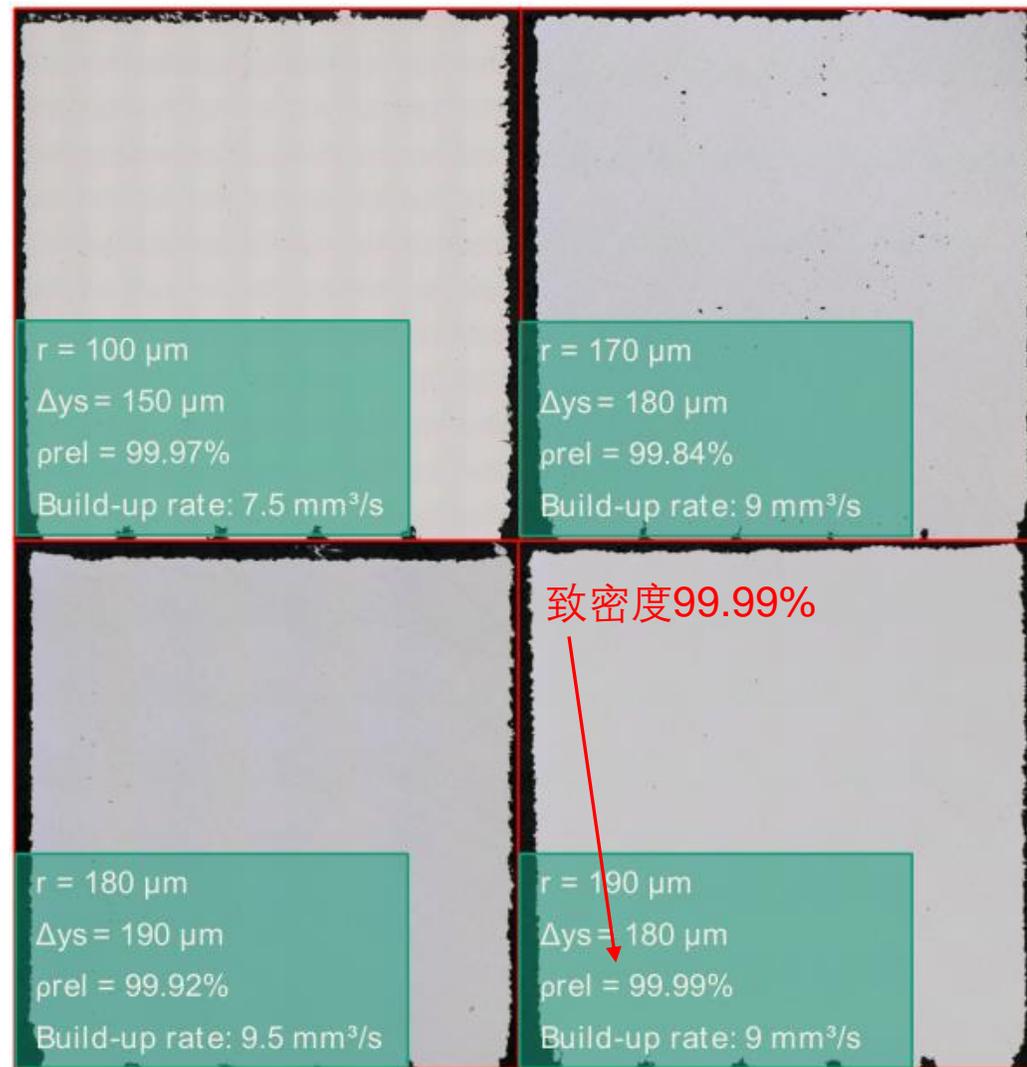
实验用设备实物图



上：成形过程高速相机拍摄照片；下：样品的横截面金相图（腐蚀）



柔性双光纤激光阵列LPBF制造样品的工艺方法



不同工艺参数成形样品金相及致密度信息