

影响奥氏体烧结不锈钢性能的工艺因素

沈时明

(北京粉末冶金研究所)

[摘要] 本文研究了原料粉末质量、压制压力、烧结工艺等对奥氏体烧结不锈钢材料收缩率、密度、极限拉伸强度、延伸率及抗腐蚀性能的影响。提出了以压制压力为588~700MPa, 500~600°C预烧半小时; 在氢气保护下于1300~1330°C烧结1~1.5小时; 于冷却水套中冷却的工艺。用这种工艺生产的制品, 可获得均匀、稳定的细晶粒奥氏体组织, 从而具有良好的综合物理机械性能和抗腐蚀性能。

一、序言

用粉末冶金方法生产的不锈钢材料, 由于其工艺特点, 总是或多或少地存在着孔隙。孔隙的存在使烧结材料的物理机械性能和抗腐蚀性能与同样成分的致密材料相比而有所差别。由于烧结材料的机械性能和抗腐蚀性能与生产该材料的原料粉质量、工艺参

数等因素有关, 必须研究各因素对性能的影响, 以便选用最佳工艺、制造出成本低、质量好的制品。

二、试验条件

本研究提供试验用的原料粉末是水雾化法生产的不锈钢粉(即FJ316粉, 下同), 其化学成分如表1所示。

表1

不锈钢粉化学成分的比较, wt%

元素	Cr	Ni	Mn	Si	S	C	P	Mo	O ₂	其它	Fe
FJ316不锈钢粉	16.0~	10.0~	—	1.0~	—	0~	—	1.0~	0.10~	余量	
	18.0	13.0		2.0	0.08			2.0	0.30		
SS-316(美国)	16.0~	10.0~	0~	0~	0~	0~	0~	2.0~	—	余量	
	18.0	14.0	2.0	10	0.03	0.05	0.45	3.0			

上述奥氏体型不锈钢, 在其三元相图中铬含量为18%的截面图上(图1)^[1]可以看到, 当镍含量为11%时, 根据平衡图, 在室温时合金处在 $\alpha + \gamma$ 区域。可是由于获得平衡组织所需的临界相变速度非常小, 只要冷却速度相当于板材在空气中的冷却速度, 就可以得到纯粹的 α 相^[1]。当烧结炉的出料端用水冷却时, 因冷却速度较快, 冷却到室温时可获得完全均匀的奥氏体组织。

提供试验用的不锈钢粉的工艺性能和物理性能如表2所示。粉末颗粒形状不规则, 如图2所示。

将上述不锈钢粉和硬脂酸锌(0.5%)在混料机中混合1小时后, 分别在双向压模中用568、676、780、891和1000MPa的压力, 压成10×10×55的抗弯试样; 再用512、623、735、833和940MPa的压力, 分别在双向压模中压成标准拉伸试样。在单向压模中, 用

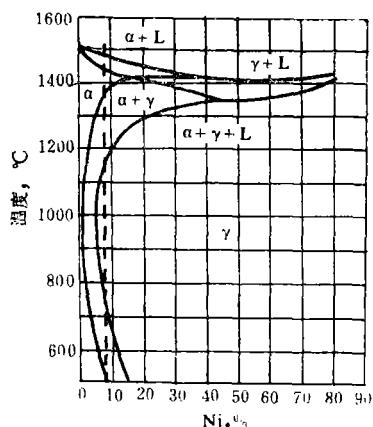


图1 Fe-Cr-Ni三元相图中当Cr含量
为18%时的截面

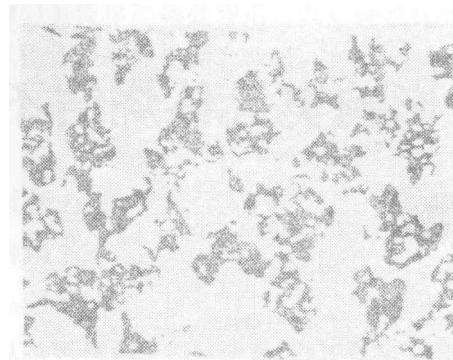


图2 水雾化FJ316不锈钢粉的颗粒形状

-100目, $\times 100$

表2

FJ316不锈钢粉的工艺性能和物理性能

工艺性能	松装密度 g/cm ³		流动性 s/50g	压缩性 g/cm ³	最小成形压力 MPa
	~2.3	~36.7			
粒度组成	目	-100+150	-150+200	-200+250	-250+300
	%	19.1	23.1	20.3	18.8
					18.7

490、588、686、784和882MPa的压力,压成 $\phi 20 \times 25$ 的圆柱体。试样在500—600℃温度下预烧半小时脱润滑油剂,然后在不同温度和不同时间下进行烧结。烧结时,试样用预烧过的氧化铝粉铺成薄层加以分隔,用经过硅胶和分子筛脱水的氢气保护。最后以连续方式在冷却水套中冷却。用这些试样测量材料的收缩率、密度、机械性能和抗蚀性能。

三、试验结果和讨论

1. 压制压力的选择及密度对性能的影响

(1) 压制压力的选择

压制压力对压坯密度的影响如图3所示。压制压力越大、压坯密度越高。当压制压力大于784MPa时,如果压力再提高,其曲线斜率变小。同时,在不同烧结温度下,烧结试样的密度均随着压制压力的提高而相应地增加。因此,对于试验用的不锈钢粉,为了获得较高的压坯密度及合理的经济性,

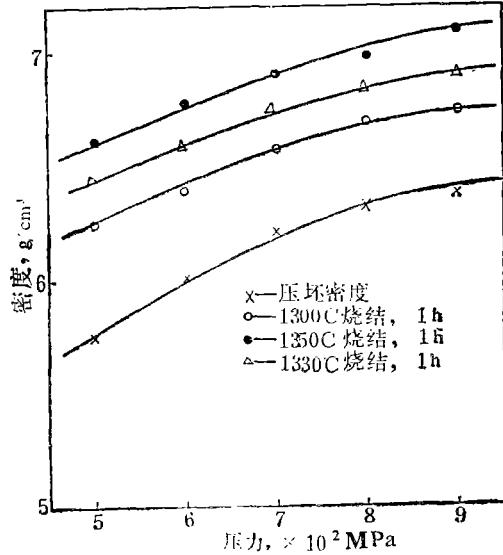


图3 压制压力和密度关系
图中每个数据点是三个圆柱试样的平均值

采用588—700MPa的压制压力为宜。

(2) 密度对性能的影响

烧结不锈钢的密度与极限拉伸强度和延伸率的关系见表3。从表3可以看出,当密

度增加时，极限拉伸强度和延伸率增加。该材料与冶炼316L不锈钢和国外相同成份的粉末冶金不锈钢的性能相比，其机械性能接近国外相同类型的烧结不锈钢材料的机械性能。如表4所示[2]。

2. 不锈钢粉的氧含量、烧结温度和时间对FJ316不锈钢性能的影响

(1) 烧结温度对收缩率的影响

对于尺寸为 $\phi 20 \times 25$ 的FJ316不锈钢圆柱形试样，在不同温度下，径向(垂直于压制方向)和轴向(平行于压制方向)的收缩率

表4

不锈钢机械性能比较

机 械 性 能	冶炼316L不锈钢			粉末冶金不锈钢		
	金 属 板	铸 造	锻 造	TRW有限 公司 研 制 的 316L >6.8 g/cm^3	FJ316不 锈 钢 >6.8 g/cm^3	SS-316 $6.4-6.8g/cm^3$
极限拉伸强度， MPa	529	480	450	441	372— 411	246—373
延伸率， %	40	30	30	—	25	12—20
						4.0

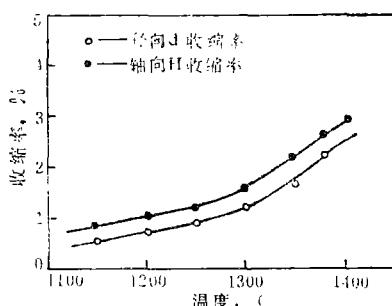


图4 烧结温度对收缩率的影响
压坯密度 $6.1-6.3g/cm^3$ ；每个数据点是
三个样品的平均值

如图4所示。从图4可以看出，径向d和轴向H的收缩率随温度的升高而增加。这是因为烧结温度升高，原子的活性大大增加，扩散速度加快，使压坯充分合金化和均匀化，气孔快速球化和收缩。当压坯变成“晶体结合体”，孔隙发生球化集中或消失，收缩率增加。试验表明，当温度在 1300°C 以下收缩率变化缓慢，而当温度在 1300°C 以上时收缩率迅速增长。在相同条件下，试样沿轴向的收缩率大

表3 FJ316不锈钢机械性能与密度的关系*

密 度 (不低于) g/cm^3	极限拉伸强度 MPa	延伸率 %	硬度 HB
5.9	166—215	5—10	65—85
6.2	196—255	8—14	70—90
6.5	245—323	12—17	75—95
6.8	294—372	15—20	80—100
7.1	343—411	18—23	85—110
7.3	392—441	20—25	90—120

*烧结温度 1330°C ，保温1.5h

于沿径向的收缩率。

(2) 不锈钢粉氧含量对收缩率的影响

不锈钢粉的氧含量对 $\phi 20 \times 25$ 圆柱试样径向d和轴向H收缩率的影响如表5所示。正如预期的那样，不锈钢粉含氧量越小，收缩率越大。因为氧含量高，包复在颗粒表面的氧化膜阻碍粉末颗粒间的原子扩散，所以影响烧结收缩率。因此，为了提高烧结材料密度，要求不锈钢粉的氧含量应尽可能低。但是，这会使不锈钢粉的生产工艺变得复杂，使原料粉价格升高。试验结果表明，不锈钢粉氧含量 $\leq 0.30\%$ 时，对于中等强度的零件，是可以满足性能要求的。

表5 不锈钢粉氧含量对烧结材料收缩率的影响*

不锈钢粉氧含量 %	烧后密度 g/cm^3	径向d收缩率 %	轴向H收缩率 %
0.40	6.50	1.2	1.5
0.32	6.71	1.5	1.8
0.23	6.85	1.7	2.1

* 烧结温度 1330°C ，保温1.5h

(3) 烧结温度对机械性能的影响

烧结温度对FJ316不锈钢的极限拉伸强度和延伸率起着极重要的作用,如图5所示。图5表明,烧结不锈钢材料的极限拉伸强度和延伸率随着烧结温度的升高而逐渐增大。当烧结温度大于1300℃时,曲线急剧变陡。而当烧结温度为1380℃时,极限拉伸强度达到450MPa,延伸率大于25%。

影响性能的诸因素中,烧结温度是关键性的因素。为了使烧结不锈钢材料获得较高的机械性能,可以选择较高的烧结温度。因为较高的温度使金属原子的扩散比较充分,颗粒间能够充分形成冶金结合,因而使强度和延伸率增加。但是,当烧结温度接近 $T_{熔}$ 时,不锈钢制品在高温下发生软化,产生歪曲和变形,制品的晶粒也将变得粗大,造成所谓过烧,出现废品。另外,从炉子维修、节约能源、经济效益等方面考虑,要求温度不要太高。对于多数结构零件,选择1300—1330℃的烧结温度,可以获得令人满意的机械性能。

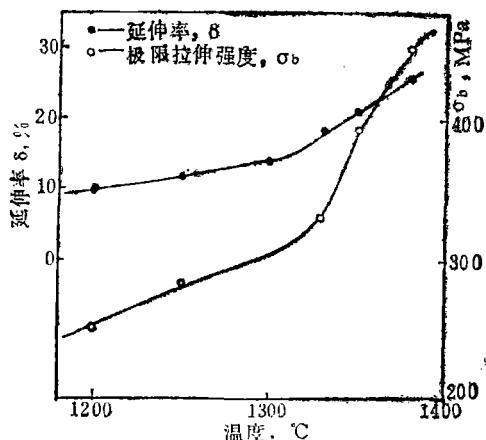


图5 机械性能与烧结温度的关系

压坯密度6.1g/cm³; 每个数据点为三个试样的平均值

(4) 烧结时间对性能的影响

将拉伸试样在1330℃温度下分别烧结30、60、90和120分钟后,测定其收缩率、延伸率和拉伸强度。见图6。

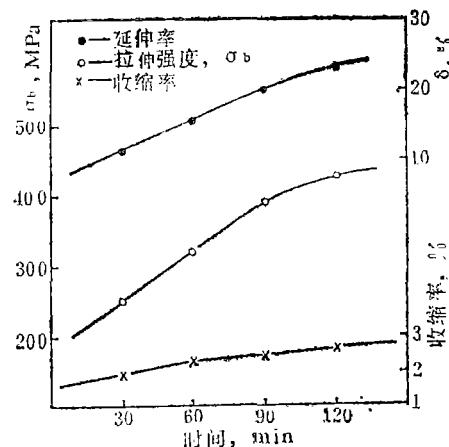


图6 机械性能与烧结时间的关系

压坯密度6.3g/cm³; 烧结温度:1330℃

从图6看出,随着烧结时间的延长,FJ316不锈钢材料性能逐渐提高。超过90分钟后,变化平缓。

烧结时间的确定,与烧结温度、制品大小、密度要求等因素有关。一般选60—90分钟比较合适。

3. 密度和碳含量对耐蚀性能的影响

(1) 密度对耐蚀性能的影响

按JB1606—75部颁标准《电工产品盐雾试验方法》对FJ316不锈钢材料进行了抗蚀性能试验。并从材料表面腐蚀率、极限拉伸强度下降率以及材料腐蚀后的增重率来评价材料的抗腐蚀性能。表6为不同密度的烧结材料对抗蚀性能的影响。从表中数据可以看出,随着密度提高,烧结材料的抗蚀性能越高。密度越低,材料受侵蚀越严重。

(2) 碳含量对耐蚀性能的影响

不锈钢粉碳含量对FJ316不锈钢烧结材料耐蚀性能的影响如表7所示。

从表7看出,碳含量越高,材料的抗腐蚀性能越差,尤其是极限拉伸强度下降明显。当碳含量为0.38%时,极限拉伸强度下降率为60%。分析其原因为:铬对碳具有很大亲和力,铬与铁、镍相比,铬是最容易形成碳化物的元素,它能生成一系列复杂而稳定的碳化物,如 Cr_4C 、 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 等。据资

表6

密度对抗蚀性能的影响*

密 度 g/cm ³	极限拉伸强度 MPa		极限拉伸强度下降率 %	表面 腐蚀率 %	增 重 率 %	备 注
	腐 蚀 前	腐 蚀 后				
6.50	282	245	12	30	0.03	有几个大面积腐蚀斑
6.97	302	281	7	14	0.005	针孔状腐蚀斑
7.25	411	401	2	8	0.0008	少量腐蚀
冶 炼 钢	50				0.0007	极少量腐蚀

* 上述数据为北京无线电研究所提供

表7

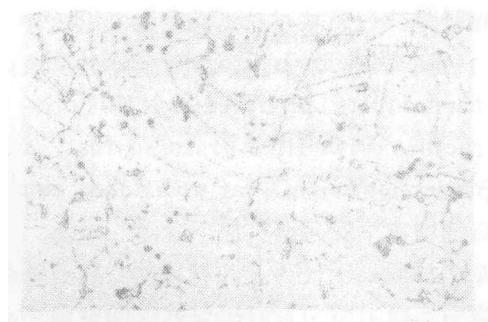
碳含量对材料抗蚀性能的影响

不锈钢粉 碳含量, %	密 度 g/cm ³	腐 蚀 前 极限拉伸强度 MPa	腐 蚀 后 极限拉伸强度 MPa	极限拉伸强度 下 降 率 %	样品腐蚀前后重量变化		增 重 率 %
					腐 蚀 前, g	腐 蚀 后, g	
0.08	6.7—7.0	302	281	7			0.03
					23.3934	23.4107	0.07
0.13	6.7—7.0	380	343	10	22.6365	22.6479	0.05
					22.9074	22.9287	0.09
0.18	6.7—7.0	414	332	20	23.3394	23.9344	0.23
					23.1217	23.2051	0.36
0.33	6.7—7.0	446	249	44	23.3306	23.3859	0.23
					23.4397	23.5186	0.33
0.38	6.7—7.0	460	184	60	23.4550	23.5344	0.33

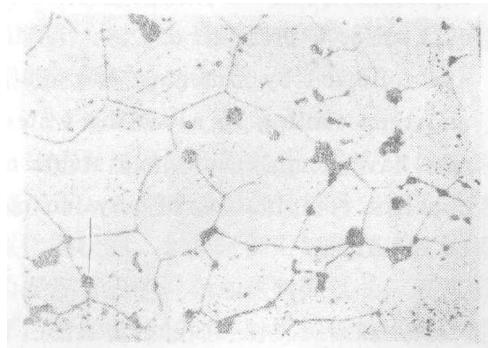
注: 极限拉伸强度值是三个试样平均值

料报导[1], 1%的碳生成碳化物需结合10—12%的铬。在低温时, 碳化铬沿着晶粒边缘析出, 加上在Fe—Cr—Ni固溶体中, 碳原子的扩散速度比铬原子扩散速度大得多, 优先扩散到晶粒边界的碳与靠近晶界的固溶体中

的铬结合, 使晶粒边界周围的固溶体中的铬浓度下降, 形成贫铬区。而铬恰好是不锈钢生成保护性膜的元素, 因此使材料抗蚀性下降。为了提高烧结不锈钢的抗蚀性, 应尽量降低粉末中的碳含量。研究结果表明, 不锈



a. 烧结态 $\times 100$



b. 腐蚀后 $\times 100$

图7 FJ316不锈钢显微组织

钢粉末的碳含量应控制在≤0.08%以内。

FJ316烧结不锈钢的烧结态和腐蚀后的显微组织见图7。从图7可以看出,其组织为均匀的奥氏体,存在着杂质和孔隙。腐蚀前后的显微组织未见明显变化。

四、结论

1. 通过研究,确定了FJ316不锈钢粉的化学成份。具有如下表所列成份的不锈钢粉

元素	Cr	Ni	Mo	Si	C	O	Fe
重量%	17—19	11—13	1.5—2.5	≤1	≤0.08	≤0.30	余

能生产具有高强度、高塑性及良好的抗腐蚀性能的结构零件。

2. 为了获得较高的压坯密度,且具有合理的经济性,采用588—700MPa的压制压力,1300—1330℃烧结1—1.5小时、氢气保护的烧结工艺,可获得均匀、稳定的奥氏体组织及较好的物理机械性能和抗蚀性能。

3. 为了保证结构零件一次压制、烧结的精度,控制材料的收缩率十分重要。在影响收缩率的诸因素中以烧结温度影响最大。在1330℃烧结,保温1.5小时工艺条件下,FJ316不锈钢粉的收缩率为2.5%左右。

参 考 文 献

- [1] H. D. 托马晓夫著,华保定等译,金属腐蚀及其保护的理论,中国工业出版社,354—397 1964。
 [2] Henry. H. Hausner等, Progress in Powder Metallurgy, vol. 30, 1974。

PROCESSING FACTORS INFLUENCING PROPERTIES OF AUSTENITE SINTERED STAINLESS STEEL

Shen Shiming

(Beijing Research Institute of Powder Metallurgy)

ABSTRACT The present paper has described the influence of powder quality, compacting pressure, sintering process, etc. on the shrinkage, density, ultimate tensile strength, elongation, corrosion resistance of sintered austenite stainless steel. The chemical compositions which can meet the requirements of the properties of structural parts were determined. The raw materials used in this research were stainless steel powders produced by water atomizing process. It is shown in experiments that the austenite stainless steel powder used in experiments compacted under a pressure of 588-700MPa, pre-sintered at 500-600℃ for 0.5 hour and followed by sintering at 1300-1330℃ for 1-1.5 hour in hydrogen atmosphere and then cooling in a cooling water jacket. The products produced by this process have homogeneous and stable austenite structure with fine grain, so that a superior combination of physico-mechanical properties with wear resistance can be obtained.