

正交试验法在研究热处理工艺中的应用

卢新炯 王勃生

提 要 为了将 D6AC 钢的强度提高到超高强度钢的水平, 并使其保持适当的塑性和韧性, 作者用正交试验法 [$L_9(3^4)$] 仅通过九次实验, 用较少的原材料, 在较短的时间内找出了临界点间热处理的较优工艺条件, 即调质 + 795℃ 淬火 + 290℃ 回火, 并对在此条件下可能达到的指标进行估算。结果表明: 预估值与实测值相当接近。

一、引 言

为了制订合理的热处理工艺以提高产品质量所作的试验, 如果安排得好, 几次或十几次就能得到明确结论; 反之, 盲目地安排试验, 即使几十次, 甚至上百次也达不到预期目的。安排试验常常需考虑许多因素, 这种多因素试验, 既要次数少、耗费低, 又要能得到正确的结论, 这就有一个方法问题。

正交试验法是利用正交表(一套规格化的表)来科学地安排多因素的试验方法。这种方法能以较少的试验次数, 取得良好的效果。

本文利用正交试验法对 D6AC 钢的临界点间热处理工艺作了探讨, 只作了九次试验(全面考察则需 27 次), 就找出了达到超高强度钢水平的较佳工艺, 并对在此工艺条件下可能达到的指标进行估算。结果表明: 预估值与实验值相差很小。由此可知, 正交试验法是科学安排多因素试验的简便易行的一种方法。

二、试 验 方 法

1. 定指标, 找因素, 选水平

以 D6AC 钢(与 45CrNiMoV 钢相近)为例

指标: 强度极限 $\sigma_b \geq 180 \text{ kgf/mm}^2$ 。

因素: 淬火温度、回火温度和预处理共三个因素。

水平: 三个水平, 即上述每个因素在试验中要比较的三个条件, 如淬火温度为

795℃、780℃、765℃；回火温度为290℃、400℃、550℃；预处理为：调质(860+600℃)，正火(930℃空冷)，淬火(860℃油淬)。于是可列出因素水平表，表中A、B、C分别表示淬火温度、回火温度和预处理。

表 1 因素水平表

因 素 \ 水 平	1	2	3
A 淬火温度℃	780	765	795
B 回火温度℃	550	400	290
C 预处理	正火	淬火	调质

2. 用正交表安排试验

一个三因素三水平的试验，如果把各因素的各种水平进行搭配，则可产生 $3^3=27$ 种不同的工艺条件，我们只选作九次试验，就能较好地反映全面试验可能出现的情况，并从中选出较好的方案。故我们选择 $L_9(3^4)$ 表安排实验。

$L_9(3^4)$ 表(见表2)的符号和数字的意义如下：

L 正交表，9表中的试验号，表示需作九次试验，括号中的4表示有四个竖列，至多可安排四个因素。括号中的3表示每一列出现的数字只有1、2、3，即每个因素能安排三个水平，故只要将A、B、C三个因素填在表中任意三列(如1、3、4列)，把各因素中的1、2、3数字换成相应的水平，就可得到 $L_9(3^4)$ 表安排的试验方案表(表3)。于是，表3中各号试验的条件就确定了。如2号试验的条件 $A_1B_2C_2$ ，表示淬火温度

表2 $L_9(3^4)$ 正交表

列 号	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

780℃，回火温度400℃，预处理为调质(860℃淬火)

表 3 试验方案表

试 验 号	淬火温度(A) (℃)	回火温度(B) (℃)	预 处 理(C) (℃)
1	1 (780)	1 (550)	1 (930正火)
2	1 (780)	2 (400)	2 (860淬火)
3	1 (780)	3 (290)	3 (860+600调质)
4	2 (765)	2 (400)	3 (860+600调质)
5	2 (765)	3 (290)	1 (930正火)
6	2 (765)	1 (550)	2 (860淬火)
7	3 (795)	3 (290)	2 (860淬火)
8	3 (795)	1 (550)	3 (860+600调质)
9	3 (795)	2 (400)	1 (930正火)

三、试验结果及分析

1. 用正交表分析一极差分析

根据表 3 排好的试验方案, 按各试验号规定的条件进行试验, 得出的强度极限 σ_b 、屈服极限 σ_s 、延伸率 δ 、断面收缩率 ψ 、冲击韧性 a_k 和洛氏硬度HRC, 各为九个数据 (见表 4), 现在利用正交表对 σ_b 的九个试验数据进行分析。先将 σ_b 的九个数据填入 $L_9(3^4)$ 表右侧数据栏内, 见表 5。

表 4 D6AC钢各种热处理规范的机械性能表

项 号 数	亚温淬火 温度A	回火温度 B	预 处 理 C	σ_b (kgf/ mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kgf/ mm ²)	δ_{10} (%)	ψ (%)	a_k kgf-cm /cm ²	HRC
1	780℃, 30分 油冷	550℃, 3小时 油冷	930℃, 2小时 空冷	128.91	113.52	7.36	41.04	6.73	39.1
2	780℃, 30分 油冷	400℃, 3小时 油冷	860℃, 30分 油冷	150.48	134.19	6.58	49.61	4.32	40.7
3	780℃, 30分 油冷	290℃, 2小时 空冷	860℃, 30分油 冷+600℃油 冷	179.93	168.26	6.01	45.14	5.88	51.3
4	765℃, 30分 油冷	400℃, 3小时 油冷	3小时 (3, 4号相同)	151.05	135.44	6.07	47.23	3.89	44.2

续表 4

项目 号数	亚温淬火 温度 A	回火温度 B	预 处 理 C	σ_b (kgf/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	δ_{10} (%)	ψ (%)	α_k kgf-m/cm ²	HRC
5	765℃, 30分 油冷	290℃, 2小时 空冷	930℃, 2小时 空冷	146.24	125.29	3.73	16.58	4.16	43.6
6	765℃, 30分 油冷	550℃, 3小时 油冷	860℃, 30分 油冷	127.14	114.10	11.60	55.49	6.85	38.5
7	795℃, 30分 油冷	290℃, 2小时 空冷	同 6 号	181.17	167.76	6.54	48.03	5.23	52.5
8	795℃, 30分 油冷	550℃, 3小时 油冷	同 3, 4 号	141.11	138.99	9.81	56.27	8.29	42.1
9	795℃, 30分 油冷	400℃, 3小时 油冷	930℃, 2小时 空冷	154.55	146.36	7.46	51.79	4.09	43.8

表 5

试 列 号 号	1 淬火温度(A) (℃)	3 回火温度(B) (℃)	4 预处理(C) (℃)	试验结果 σ_b (kgf/mm ²)
1	1 (780)	1 (550)	1 (930 正火)	128.91
2	1 (780)	2 (400)	2 (860 淬火)	150.48
3	1 (780)	3 (290)	3 (860 + 600 调质)	179.93
4	2 (765)	2 (400)	3 (860 + 600 调质)	151.05
5	2 (765)	3 (290)	1 (930 正火)	146.24
6	2 (765)	1 (550)	2 (860 淬火)	127.14
7	3 (795)	3 (290)	2 (860 淬火)	181.17
8	3 (795)	1 (550)	3 (860 + 600 调质)	141.11
9	3 (795)	2 (400)	1 (930 正火)	154.55
I (1 水平试验 结果总和)	459.32	397.16	429.70	
II (2 水平试验 结果总和)	424.43	456.08	458.79	
III (3 水平试验 结果总和)	476.83	507.34	472.09	
I/3	153.1	132.4	143.2	
II/3	141.5	152.0	153.0	
III/3	158.9	169.1	157.3	
R (极差)	17.4	36.7	14.1	

表 6 极差分析表

性能	σ_b (kgf/mm ²)			$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)			δ (%)		
项目	淬火温度 (A)	回火温度 (B)	预 处 理 (C)	淬火温度 (A)	回火温度 (B)	预 处 理 (C)	淬火温度 (A)	回火温度 (B)	预 处 理 (C)
I	450.32	397.16	429.7	415.97	366.61	385.17	19.95	28.77	18.55
II	424.43	456.08	458.79	374.83	415.99	416.05	21.40	20.11	24.72
III	479.83	507.34	472.09	453.11	481.31	442.69	23.81	16.28	21.89
I/3	153.11	132.39	143.23	138.66	122.20	128.39	6.65	9.59	6.18
II/3	141.48	152.03	152.93	124.94	138.66	138.68	7.13	6.70	8.24
III/3	158.93	169.11	157.36	151.04	153.77	147.56	7.94	5.43	7.30
R	17.45	36.72	14.13	26.1	31.57	19.17	1.29	4.16	2.06

性能	ψ (%)			σ_k ($\frac{\text{kgf} \cdot \text{M}}{\text{cm}^2}$)		
项目	淬火温度 (A)	回火温度 (B)	预 处 理 (C)	淬火温度 (A)	回火温度 (B)	预 处 理 (C)
I	185.79	152.80	109.41	16.93	27.67	14.98
II	119.30	148.63	153.13	14.90	12.30	16.40
III	156.09	109.75	148.64	17.61	15.27	18.06
I/3	45.26	50.93	36.47	5.64	7.29	4.99
II/3	39.77	48.54	51.04	4.97	4.1	5.47
III/3	52.03	36.58	49.55	5.87	5.09	6.02
R	12.26	14.35	14.57	0.9	3.19	1.03

表 5 中 I、II、III 是对应各因素 1、2、3 水平的 σ_b 试验结果的总和, 例如, 对应于回火温度 (B 因素) 的 I (397.16kgf/mm²) 是 1、6、8 号试验的 σ_b 总和, 在这三个试验 ($B_1A_1C_1$ 、 $B_1A_2C_2$ 、 $B_1A_3C_3$) 中, B_1 出现三次, A 和 C 因素的 1、2、3 水平都只出现一次。同样在 B 因素 2(3) 水平试验结果的总和 II (III) 中, 也是 B_2 (B_3) 出现三次, A 和 C 每个因素的三个水平各出现一次, 从整体上看 A 和 C 对抗拉强度总和的影响是一样的, 它们对抗拉强度的影响是相同的。因此, 比较 I、II、III 这三个总抗拉强度, 就可以看出回火温度的差别对抗拉强度的影响。为了便于说明, 取 I、II、III 的平均值 I/3, II/3, III/3, 这就是每个试样的平均抗拉强度, 可以看出 290℃ 回火的平均抗拉强度最高 (169.1kgf/mm²), 550℃ 回火的平均抗拉强度最低 (132.4kgf/mm²)。最高的与最低的相差 36.7, 即以 290℃ 和 550℃ 两种回火温度相比, 抗拉强度平均可以提高 36.7kgf/mm²。这个差值称为极差 (用 R 表示)。极差越大, 说明这个因素对指标的影响越大,

比较表 5 中的三个极差, 可知对抗拉强度来说, 回火温度影响最大, 预处理影响最小。

用同样的方法, 可以整理和分析 A 、 B 、 C 诸因素对 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 ψ 和 a_k 的影响 (见表 6)。这样, 就完成了试验数据计算的第一步。根据这些计算结果, 可以回答以下四个问题。

1. 各因素对临界点间热处理后各机械性能影响的主次

比较表 6 中各列因素极差 R 的大小可知, 对于 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$, 回火温度影响最大, 临界点间淬火温度次之, 预处理最小。

对于 δ 、 ψ 及 a_k 值, 回火温度的影响仍然最大, 因而也是影响这三种性能指标的主要因素, 预处理的变化对 δ 、 ψ 及 a_k 等性能指标的影响仅大于临界点间淬火温度的影响。

由上可知, 回火温度对 D6AC 钢的 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 ψ 和 a_k 等性能的影响最大、淬火温度对 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 的影响稍大于预处理, 而对 δ 、 ψ 和 a_k 的影响却比预处理小。

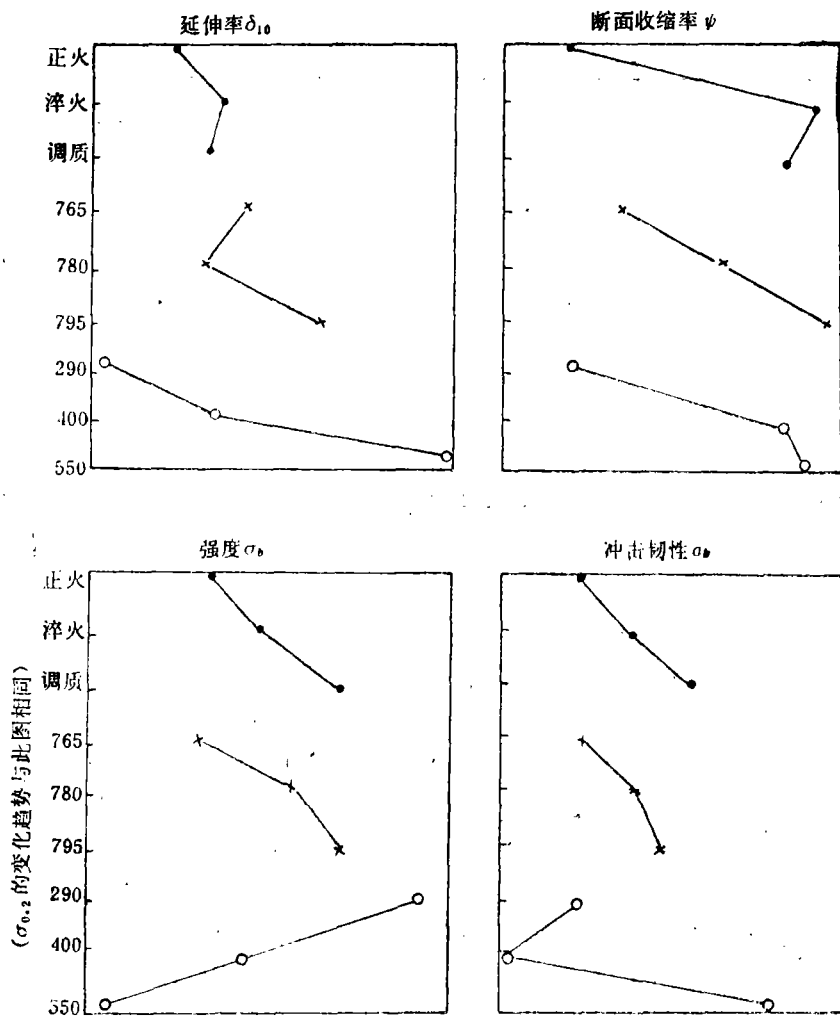


图 1 三个因素对各性能的影响曲线

2. 各因素水平变化时, 指标(性能)的变化规律

当各因素变化时, 各项机械性能的变化规律见图 1.

临界点间温度淬火后的 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 、 ψ 和 α_k 值都随淬火温度的升高而增加, 但 δ 值却不同, 在 780°C 出现了最低值, 原因有待专门研究。

随着回火温度的升高, σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 降低, δ 和 ψ 增大, α_k 以中温回火最低、高温回火最高。

预处理则以调质的 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 和 α_k 最高, 淬火次之, 正火最低; 而 δ 和 ψ 则以淬火最高, 调质次之, 正火最低。

3. 各因素应取什么水平

在本实验中, 要求 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 ψ 和 α_k 五个指标越大越好, 故应取指标大的水平。

强度最高的水平为调质 + 795°C 淬火 + 290°C 回火。

塑性最高的水平为 860°C 淬火 + 795°C 淬火 + 550°C 回火。

韧性最高的水平为调质 + 795°C 淬火 + 550°C 回火。

4. 选取综合机械性能较好的工艺

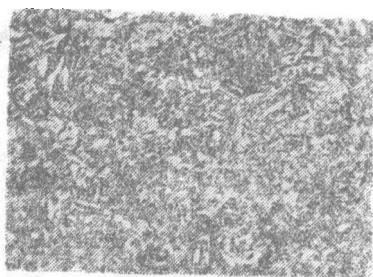
一般说来, 我们还不能把各因素的好水平简单地组合起来, 实际上还要在满足主要指标的条件下, 考虑选择较好的工艺。

由 2 的分析可知, 预处理为调质时, 强度和韧性最好, 临界点间淬火温度选取 795°C 时, 强度、塑性和韧性最好。对回火温度, 由于需要满足强度要求, 取 290°C , 故综合机械性能最好的工艺为调质 + 795°C 淬火 + 290°C 回火。

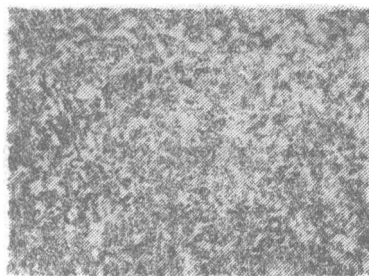
2. 显微组织分析

试样经调质 ($860 + 600^\circ\text{C}$)、淬火 (860°C) 和正火 (930°C 空冷) 等预处理后, 接着都在 795°C 淬火, 所得显微组织均为马氏体和铁素体 (照片 1、2、3)。但前二者 (调质及 795°C 淬火, 两次淬火 ($860 + 795^\circ\text{C}$)) 较后者 (正火和 795°C 淬火) 的组织细小, 其强度、塑性和韧性也较高。而试样经相同的预处理后再淬火, 则随着淬火温度的降低, 铁素体量增多, 马氏体量减少 (照片 1、4), 强度也降低。如预处理和淬火温度相同, 而回火温度不同, 则组织差别较大。高温回火组织为回火索氏体, 低温回火组织则为回火马氏体和铁素体 (照片 5、6)。前者强度较后者低, 但塑性、韧性较后者高。

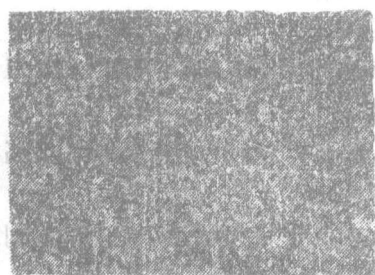
综上所述, 可知用正交表分析所得的机械性能变化与组织变化是一致的。进一步证实了正交试验法是一种很好的工具。



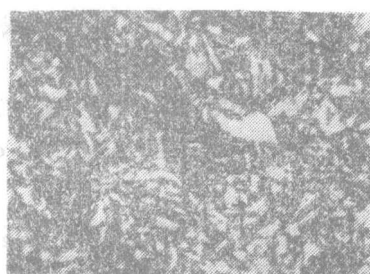
照片 1 $860 + 600$
+ 795°C 处理后的金相组织 $\times 500$



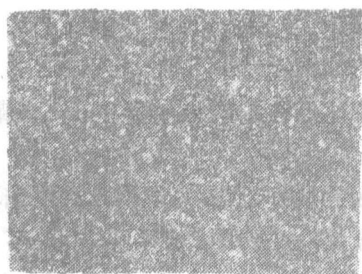
照片 2 $860 + 795^\circ\text{C}$
处理后的金相组织 $\times 500$



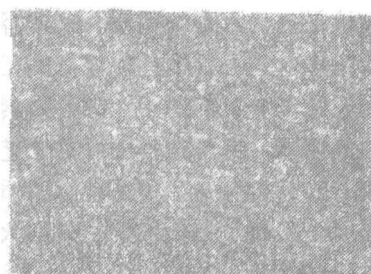
照片 8 930 + 795 °C
处理后的金相组织 × 500



照片 4 860 + 600
+ 765 °C 处理后的金相组织 × 500



照片 5 860 + 600
+ 795 + 550 °C 处理后的金相组织
× 500



照片 6 860 + 600 + 795
+ 290 °C 处理后的金相组织
× 500

四、对热处理性能的预估

由上述九次试验的结果,找出综合机械性能较好的工艺,可以用预估公式计算热处理后的性能。

性能值 = 各因素所取水平平均值之和 - (影响因素 - 1) × 总平均值

如预估调质 + 795 °C 淬火 + 290 °C 回火后的 σ_b 值,则得

$$\begin{aligned} \sigma_b = & \frac{\sum \text{淬火温度取 } 795^\circ\text{C 三次实验的 } \sigma_b}{\text{水平数}} + \frac{\sum \text{回火温度取 } 290^\circ\text{C 三次实验的 } \sigma_b}{\text{水平数}} \\ & + \frac{\sum \text{预处理取调质的三次实验的 } \sigma_b}{\text{水平数}} - \frac{\text{试验数据总和} \sum_{i=1}^9 \sigma_{bi}}{\text{总实验次数}} \times (\text{影响因素} - 1) \\ = & 183.08 \text{ kgf/mm}^2 \end{aligned}$$

同样,可预估 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 ψ 和 a_k 值。表 7 为两种实验在热处理前后的机械性能的预估值和实验值,可以看出预估值和实验值相当接近,说明估算性能的公式基本正确。

表 7 预估值和实验值的比较

性 能		σ_b (kgf/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	δ_{10} (%)	ψ (%)
调质 + 795℃ + 290℃	预 估 值	183.08	175.95	6.18	46.80
	实 验 值	186.47	170.33	6.21	46.88
正火 + 795℃ + 290℃	预 估 值	188.95	156.77	5.06	33.72
	实 验 值	169.67	155.67	5.68	33.13

五、结 论

本文利用正交试验法研究 D6AC 钢的临界点间热处理工艺, 取得了明显的效果。

1. 临界点间热处理工艺的三个因素—淬火温度、回火温度和预处理对 D6AC 钢机械性能的影响为: 回火温度对 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 ψ 和 a_k 的影响最大, 淬火温度对 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 的影响略大于预处理, 而对 δ 、 ψ 和 a_k 的影响却小于预处理。

2. 利用正交试验法, 为使 D6AC 钢达到 $\sigma_b > 180 \text{ kgf/mm}^2$ 的指标, 选取较优的热处理工艺为: 调质 + 795℃ 淬火 + 290℃ 回火。

3. 预估 D6AC 钢经临界点间热处理后的机械性能, 表明预估值与实验值相差很小。

最后应指出的是: 正交试验法不仅适用于临界点间热处理, 也适用于常规热处理及其它多因素的试验; 不仅减少了试验次数, 易于分清影响因素的主次, 且可估算出指标的数值。在当前我国四化建设中, 为了节约能源、材料和时间, 尤其需要用这种科学的方法来安排试验。

An application of Orthonormal Testing Method in the Investigation of Heat-Treatment Technology

Lu Xingang, Wang Bosheng

Abstract

In order to increase the strength of D6AC steel to the ultra-high strength steel level with adequate ductility and toughness, orthonormal testing method was used. Only nine experiments were made and the

materials expended in this method are less than that of conventional method. Moreover, in a short time the better technological condition of I.H.T(Intercritical Heat Treatment) was found out. Prior-heat treatment (Quenching and high tempering)+795°C quenching+low tempering. The values of the mechanical properties which would be attained possibly were pre-estimated under such conditions. Results show that the difference between the values of pre-estimated values and those measured in the experiment is very little.