

# 航空結構鋼的討論

## (下)

吳世澤

### 时效硬化奧氏体型不銹鋼

凡是使用W、Mo、V、或Nb及Ti或Al，或者多元素时效强化的奧氏体型不銹鋼都屬於这一类型。其优点是不需要低温处理；其缺点为沒有馬氏体的相转变發生，强度不如上述的三种鋼种。这类鋼种在500°C以下的强度不如沉淀硬化不銹鋼，但在600~700°C之間則其强度較优而有使用的价值。这类鋼的室温强度及高温强度都比普通的不銹鋼（奧氏体型的）要好得多，故选作渦輪盤之用。为因它們的室温强度达到了100公斤/公厘<sup>2</sup>左右，赶上了普通的合金結構鋼經過調質后的强度；并且它們在600~700°C，100小时的持久强度也达到了30~40公斤/公厘<sup>2</sup>，而有相当的使用价值。

也許人們希望能够得到一种淬火后为奧氏体結構的

鋼，而在进行回火处理后得到馬氏体的結構。这样就可以既得到了超高强度的鋼种，又可避免了麻煩的冷处理手續。事实証明是失败了，对鋼來說也就是只能够获得时效硬化奧氏体型不銹鋼。

因为渦輪盤的中部的使用温度不高，故此種鋼可以發揮它的高强度而达到取輕的效果。渦輪盤的邊緣的温度目前也在600~700°C的范围，故此類鋼种非常适用。

由于这类鋼种可以用Ti、Al及B进行强化，并采用真空熔煉，故其高温强度日益提高，但这对室温强度的影响則不大。由于这类鋼要求相当良好的可鍛性，故其含碳量相当低，这就大大地限制了室温强度的提高。茲将几种熟習的鋼种的化学成分表列于下面，亦可以看出其發展的概略情况：

表 4

鋼 的 牌 号	化 学 成 分, %											
	C	Cr	Ni	Mo	W	Nb	V	Ti	Al	Si	Mn	Fe
16-25-6	≤0.12	15.0~17.5	24~27	5.5~7.0						0.5~1.0	1.0~2.0	余
Discaloy-24	0.04	13.5	26.2	3.9				1.61	0.11	0.7	1.38	余
A-286	0.08	13.5~16	24~28	1.0~1.5				1.5~2.25	0.20	1.0	1.35	余
G-T-45	0.08	17	14	3		0.5		0.3		0.5	1.00	余
Rex-467	0.20	14.5	9.5	2				0.8			1.00	余
W-545		13.0	26.0	1.5				2.8				余

### 冷作硬化奧氏体型不銹鋼

用普通的18-8型不銹鋼进行冷加工，可以提高其强度到相当高的范围。茲以301及302型为例說明此一問題，此二种不銹鋼的化学成分見第五表：

表 5

鋼的型号	化 学 成 分, %			
	C	Cr	Ni	其 他
301	0.08~0.20	16.0~18.0	6.0~8.0	Mn~2.0
302	0.08~0.20	17.0~19.0	8.0~10.0	Mn~2.0

冷軋鋼材的强度的提高随加工率的提高而增加，此二种鋼經過30%冷加工及70%冷加工后的强度变化見第六表：

表 6

鋼 的 型 号	極限强度, 公斤/公厘 <sup>2</sup>		
	退火状态	30%冷加工	70%冷加工
301	80.5	115.5	192.5
302	73.5	115.5	175.0

对于冷軋鋼板，成形性是非常重要的。冷加工率愈大，其强度愈高，而成形性也愈差。一般用弯曲試驗时

所用冲头的半径与所试板材厚度的比值来表示冷轧钢板的相对成形性，即在压弯钢板时最小半径的冲头的半径与钢板厚度的比。此比值愈大，则说明成形性愈差。从下表当可了解更为清楚：

表 7

鋼的型号	冷轧程度	極限强度 公斤/ 公厘 <sup>2</sup>	相 对 成 形 性		
			試驗方向与軋延方向的角度		
			0°	45°	90°
301	3/4硬	123.2	1.0	4.3	4.0
	全硬	139.3	2.3	4.5	5.3
	超硬	158.2	4.5	4.5	6.7
302	3/4硬	122.5	0.9	0.7	1.8
	全硬	136.5	2.1	3.2	4.0
	超硬	145.6	4.0	4.0	6.0

从上表可以看出 302 的相对成形性要比 301 好一些，这是因为 302 冷轧强化的速度要慢一些。就化学成分看来，302 的奥氏体结构应该比 301 要稳定一些，在冷轧过程中出现铁素体结构，也就加快了强化的速度。

又从表上可以看出经过冷轧的材料是具有方向性的，并且冷轧率愈大，方向性亦愈显著。这是冷轧钢材的又一缺点。

冷轧不锈钢材的主要缺点就是比例界太低，这是因为存有大量的内应力的关系。提高比例界及条件屈服点的办法就是采用回火处理。回火温度提高到 500°C，对于钢材的强度的影响也不太大。不过在 500°C 回火后，不锈钢表面变色发生氧化。将此氧化皮除去之后，又破坏了冷轧材料的表面光洁度。并且在 500°C 回火后的冷轧不锈钢，发生晶间腐蚀的倾向。

据英国方面的报导，18-8 不锈钢经过 30% 的冷加工轧成的钢带，在 200°C 回火 8~64 小时以后，其极限强度为 130 公斤/平方公厘，其比例界由 22 公斤/平方公厘提高到了 41.5 公斤/平方公厘，而其 0.2% 条件屈服点亦由 90 公斤/平方公厘提高到了 108.5 公斤/平方公厘。

冷轧不锈钢的又一缺点，就是在冷轧之后必须立即回火。如果放置不回火，则常会发生自然碎裂。冷轧加工率如果太大，强度太高，则虽经低温回火亦难将应力完全除去。英国在航空方面所用的冷轧不锈钢，其 0.1% 条件屈服点规定为 61.6~75.4 公斤/平方公厘，极限强度规定为 80~108 公斤/平方公厘。强度太高了是会有自裂的危险的。由于这个限制，这就很自然地将冷轧不锈钢排出了超高强度的行列。

## 超高强度钢

超高强度钢并不是什么特殊的钢种，而是普通的合金结构钢的一部分。当其这些合金结构钢须要发挥超高强度时，就不得不在淬火以后选用较低的回火温度，一般都低于 220°C。因为超过 220°C 回火，一般合金结构钢都发生脆化的现象，冲击韧性大大地降低；这是超高强度钢必须避免的现象。

为了保证超高强度钢的高的冲击韧性，有效的办法就是控制钢的含碳量在 0.3~0.4% 的范围。世界各国的超高强度钢含碳量目前都是这样地限制着，这主要是为了韧性的问题。这些钢的强度都在 180~200 公斤/平方公厘的范围，而冲击韧性则在梅氏冲击值 5~8 公尺·公斤/平方公分的范围。对于这种钢提高强度的有效方法就是提高钢的含碳量，但这对冲击韧性又是有害的。

在超高强度钢中主要对强度有作用的合金元素就是硅，其次是铬；因为它们不仅使钢强化，并且能够使钢在较高的温度（可到 300°C）回火而不致发生脆性。很早的合金结构钢中，如 60C2，淬火后在 200°C 左右回火，其强度即可达到 250 公斤/平方公厘，在 400°C 回火以后仍具有 160 公斤/平方公厘以上的强度。又如吾人熟知的 30X1CrA 钢，因有 1% 以上的硅和铬，故亦用为超高强度钢。30X1CrA 只不过是 30X1CrA 的基础上加入 1.40~1.80% 的镍，这就提高了它的冲击韧性。

其他合金成分的合金结构钢也可用作超高强度，如美国的 4340，其成分与 40XHMA 相近似，亦用为超高强度钢。不过这类钢种若不提高其含硅量，则回火温度必须控制在 220°C 以下。低的回火温度对于超高强度钢有二不利点：其一就是需要较长的回火时间，其二就是钢的比例界和屈服点都不高。故美国的 4340 用作超高强度钢时，也将硅的含量提高到 1.50%。

超高强度还须配合足够的韧性，从热处理的观点来看，必须首先钢本身能够完全淬透，然后再经回火，才能达到。淬火时如果钢中出现非马氏体组织，那是十分有害的。故超高强度钢的淬透性也是对强度和韧性都很重要的因素，钢中的镍、铬、锰和铜主要是发挥了这个作用。

在超高强度钢中使用少量的钒、钛或铅，可以收到细化晶粒之效，也就是有提高冲击韧性的作用。钒还有提高比例界及屈服点的作用。

超高强度钢必须脱氧良好，但用铝又不宜过多。过多的铝（钢中残留铝量超过 0.02~0.03%）有可能使钢产生带状组织，这样的钢淬火后不易完全硬化，也就会影响它的强度和韧性。

由于超高强度钢一般所含的合金成分的总含量都在

4%以上,其淬硬性都很强,在空气中冷却都有自硬的作用。因此在浇注凝固的过程中,锻轧的过程中均極容易形成裂纹;这是超高强度鋼的第一个关键問題。

由于鋼的化学成分,特别是含碳量,影响鋼的强度和韧性很大;故在热处理时須特別防止鋼的脱碳或渗碳。脱了碳就会降低鋼的强度,渗了碳却又影响它的冲击韧性。

超高强度鋼应在焊接后进行热处理,因为若在焊前进行了热处理,则焊接热影响区避免不了脆化带。

超高强度鋼不允許酸洗和电鍍,因为这会引起氢脆的疵病。

超高强度鋼有时須在热处理后进行机械加工,由于热处理后的硬度已經达到了 $R_{c50}$ 左右,这就給机械加工带来不少的困难。若果再将强度提高,則对于切削硬度为 $R_{c54}\sim 56$ 的材料,将是一个更复杂的問題。

### 热工作模具鋼

超高强度鋼的極限强度虽然能够發揮到200公斤/平方公厘左右,但其使用溫度只能在 $200^{\circ}\text{C}$ 以下。若超过了 $200^{\circ}\text{C}$ ,則在使用过程中組織發生变化;不仅强度降低,而且冲击韧性在急剧下降。这对飞机結構說来,是很不妥当的。由于現代飞机的飞行速度不断提高,其內部結構由于地位狹窄,通風不良,以及由發动机部分傳来的热,都不免使其溫度提高;因此耐热的超高强度鋼就成为当前迫切需要解決的問題。

多年以前,曾經有一种用作鋁合金压鑄模的工具鋼,其强度高,韧性好,耐腐蝕,耐热震。其大致化学成分为含C0.40%, Si1.00%, Cr5.0%, Mo1.30%及V0.5%。这个鋼种近来不少的人研究它的机械性能,發現特別优良,宜于用作高溫超高强度鋼。經過热处理以后,其室溫机械性能可达180公斤/平方公厘以上,冲击值亦可达5公尺·公斤/平方公分;其 $350^{\circ}\text{C}$ 瞬时拉伸亦可达160公斤/平方公厘以上;并且延伸率( $\delta_5$ )均在10%左右,甚至到12%。这种鋼的名称現在叫作Vasco-Jet 1000,已經采用到快速飞机上去了。它的强度重量的比,在 $500^{\circ}\text{C}$ 左右,不仅比所有的鋼都高,也比現在所有的金屬材料都高。

属于这类热工具鋼的牌号甚多,如Halcomb 218, PeerlessJ, Halmo, Peerless 56等都属于这一类型;其中有的耐热性能比Vasco-Jet 1000还要好些,不过冲击韧性就略为低一些。这些鋼的主要化学成分都离不开

錳、鉻、鋁、钒及硅;适当配合就能發揮充分优良的性。但从根本上分析,不外含鉻3.00%及5.00%两种类型,其中含硅量大都是1.00%,其余錳、鋁及钒則有不同的配合和调整。

由于有了3.00~5.00%的鉻为基础,故这些鋼种均能够在較高的溫度回火,而硬度和强度均下降極少。一般在希望發揮最大的强度的时候,多用 $550^{\circ}\text{C}$ 的回火溫度;而在希望提高冲击性的时候,則可使用較高的回火溫度。

这些鋼种都是自硬鋼,淬火时冷于空气中;故各种形状复杂的部件或薄大的面板在淬火时可采用模板和夹具,以保証其形状規則。这些鋼种淬火后的变形,只能在淬火后的回火加热过程中进行校正。若在回火后进行校正,則难成功;因为在回火过程中,这些鋼种都有再硬的現象。一般这些鋼种可以处理到 $R_{c54}\sim 56$ 的硬度,故其强度亦可能达到230公斤/平方公厘以上。

現在有人要求超高强度鋼的强度發揮到250公斤/平方公厘以上,而必須耐热到 $350^{\circ}\text{C}$ 以上;要想滿足这个要求,从热工作工具鋼入手似乎是比較可能的途徑。就美国最近發表的文献看来,他們正是这样地在进行着这项研究工作。

拿这类鋼和馬氏体型不銹鋼相比,其强度要高約1/2倍,冲击韧性要好得多,抗腐蝕性大致相似。

拿这类鋼和超高强度鋼相比,其室溫强度和冲击韧性都相匹敌,而高溫性能却超过了。

拿这类鋼和沉淀硬化不銹鋼相比,其强度約高1/2倍,冲击韧性較优,但抗腐蝕性能則較差。

这类鋼退火后的硬度亦不高,延伸率亦在20%以上,軋制薄板亦不困难。

热处理以前加工性能良好,热处理后比較困难。在热处理以前进行融接焊,其手續与焊超高强度鋼相似,不过选用不同的焊条而已。

現代噴气式飞机尾部机身隔板,因为部位窄小,溫度又高,受力又大,故已选用此种材料。若用此种材料作为机身或导弹蒙皮,則須在热处理时进行表面渗鋁,或采用不銹鋼包复夹板。因为拿成本费用來說,这类鋼不仅低于钛合金,也低于沉淀硬化不銹鋼,故美国对于这类鋼种的試驗研究正在努力进行中。并且从“金屬进展”1958年發表的“宇宙飞行用金屬材料的預測”看来,其将来不少的飞机和导弹的部件都将会采用这类鋼种。

(全文續完)