

—253°C低温用钢 15锰26铝4钢资料汇编

冶金工业部金属研究所 编



上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组

一九七四年十二月



1742.79

3
2

-253°C低温用钢 15锰26铝4钢资料汇编

冶金工业部金属研究所 编

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组

一九七四年十二月

A 842000



出版说明

15Mn26Al4 钢为冶金工业部金属研究所结合我国资源研制成功的 -253°C 低温用钢。该钢种经受了 -196°C 低温爆破试验，并已在实际使用。

15Mn26Al4 钢品种配套齐全，目前已能生产薄板、中板、管材、棒材及焊丝；生产工艺过关；制造加工性能良好；适合于作为石油化学工业中 $-120\sim 253^{\circ}\text{C}$ 的低温压力容器用钢。

15Mn26Al4 钢及其配套手工焊焊芯 (Mn30Al7)、自动焊焊丝 (Mn27Al6) 的化学成分及机械性能如下：

化学成分(%)：

钢 号	C	Mn	Al	Si	S	P
15Mn26Al4	0.13~0.19	24.5~27.0	3.8~4.7	≤ 0.6	≤ 0.035	≤ 0.035
Mn30Al7	≤ 0.13	28.0~31.0	6.5~7.7	≤ 0.5	≤ 0.030	≤ 0.030
Mn27Al6	≤ 0.15	26.0~28.5	5.5~6.7	≤ 0.6	≤ 0.030	≤ 0.030

机械性能(不小于)：

钢 号	σ_b (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	δ_5 (%)	ψ (%)	$\alpha_k(-196^{\circ}\text{C})$ (kg-m/cm ²)
15Mn26Al4(热轧)	50	25	30	50	12
15Mn26Al4(固溶)	48	20	30	50	12
焊缝金属(焊态)	50	25	21	40	8

参加 15Mn26Al4 钢工作的单位有：

冶金系统——冶金部金属研究所，重庆钢厂，重庆钢铁公司，重钢五厂，抚顺钢厂，上钢五厂，上钢三厂，大连钢厂；

一机系统——杭州制氧机研究所，广州重型机器厂，开封空分设备厂，上海东风电焊条厂，上海电焊条厂；

燃化系统——大连光明研究所，燃化部第六设计院，兰化公司化工机械研究所，吉林化工公司试剂厂，江苏省燃化局，上海化工设计院。

为了进一步促进推广应用，由冶金部金属研究所汇编了本资料，供各单位在选用时参考。由于我们工作水平有限，本资料难免存在各种缺点错误，请读者批评指正。

上海冶金设计院石油化工设备设计室编

一九七四年十二月

目 录

(I) 前言	1
(II) 15Mn26Al4 低温钢性能	6
(III) Fe-Mn-Al 系部分相图	26
(IV) 15Mn26Al4 低温钢的组织稳定性	41
(V) 冷加工对 Fe-Mn 和 Fe-Mn-Al 合金组织和性能的影响	49
(VI) 15Mn26Al4 低温钢的高温塑性	54
(VII) 15Mn26Al4 低温钢试制工艺	59
(VIII) 15Mn26Al4 低温钢的焊接	91
(IX) 15Mn26Al4 低温钢容器制造性能与爆破容器制造	108
(X) 15Mn26Al4 低温钢模拟容器爆破试验	123

I 前 言

由于宇航、原子能、石油化工、电气、冶金以及食品处理等工业的发展，深冷工程已成为工业发达国家的一种必不可少的高新技术，近十几年来，发展十分迅速。

炼钢工业中的纯氧顶吹自五十年代初期问世以来，得到飞跃发展，在全世界六亿多吨钢中，有一半是采用氧气炼钢，而且还在继续增加⁽¹⁾；利用深冷的办法从空气中提取的氧，每年以千万吨计，其中有一半用在钢铁工业⁽²⁾。

金属在超低温下的超导现象，不久前还只停留在学术上的兴趣，而可控热核反应的研究对金属的超导提出了现实的应用；因此超低温的获得成为当前迫切的一项任务，从而液氢和液氮是必不可缺的。

在宇航方面，液体火箭发动机上需要高效燃料和助燃剂。一个登月球飞船，比推力每增加1%，有效载荷可增加18%⁽³⁾，液氧是最重要的氧化剂，液氢是高效燃料，这些都是在深冷条件下才能制造和贮存的。

此外，在工业中常用的液态空气、氨、二氧化碳、氮、天然气及石油气等都离不开深冷技术。

广泛的深冷技术，对材料也就提出更多的要求。国外在深冷（-180℃以下）使用的材料主要有铝合金、钛合金、不锈钢和高温合金，视所要求的温度和强度而定，用量最大的是18-8型奥氏体不锈钢，为提高材料的稳定性，防止在深冷下因相变而变脆，还采用了含镍铬更高的Cr18Ni12、Cr25Ni20等钢种。近年来美苏等又发展了一些节镍铬合金钢^(4~6)，如ЭИ711（Cr14Mn14Ni3Ti）、ЭП222（Cr21Mn7Ni5）及21-6-9（Cr21Ni6Mn9）等，其中铬镍都较高。

我国深冷用材料当前以铝合金、铜及镍铬不锈钢为主，文化大革命前后，根据我国资源情况，发展了几种Fe-Mn-Al系新钢种，除了我们要讨论的15Mn26Al4以外，还有20Mn23Al⁽⁷⁾和15Mn17Al2CuV^(8~9)。这两个钢种都经过了工业试制，试制出多种规格的板材，并进行了焊接工艺研究及配套焊条的研制工作。用这些材料制成的模拟容器，进行了低温爆破试验，为创建我国新型低温钢系统做出了贡献。

现将15Mn26Al4低温钢的发展过程及现状简述如下。

大跃进年代，在“独立自主、自力更生”的方针指引下，金属研究所曾在耐热、不锈钢等合金钢方面开展了节镍铬的研究工作。Fe-Mn-Al系合金钢就是这时开始的。

为了得到一个全奥氏体组织，在铁中可加入的元素种类是不多的，只有镍、铜、碳、氮和锰几种。镍为主要取代对象，自不必考虑，铜扩大奥氏体区的能力很弱，而且钢中含铜过高时会导致脆性，热加工困难。氮虽是强烈的形成与稳定奥氏体元素，但它在钢中的溶解度取决于钢中的铬及锰的含量，超过溶解度就会在钢锭中形成气泡，使生产成为不可能。碳对奥氏体的形成与稳定作用虽和氮相近，但加入量也不可过多，否则焊接和切削都很困难。锰是唯一可用元素，但纯Fe-Mn二元合金中的奥氏体很不稳定，容易分解或发生相变，多年来

* 冶金工业部金属研究所。

有过大量的工作^(10~12)，实际意义较小，多以研究一些相变规律为主。

为稳定 Fe-Mn 系中奥氏体组织，必须加入第三种元素。前面已谈到，碳、氮是有效的，但加入量有限，铬确实扩大了奥氏体区并起到了稳定作用⁽¹³⁾，在德国便由此发展出了 Fe-Mn-Cr 系无磁钢及低温钢⁽¹⁴⁾，其中含铬量竟达 10% 以上。铬也是我们要力求取代的元素，当然不能考虑。除此之外，在 Fe-Mn 系中铝能起到抑制相变，稳定奥氏体的作用。

文献中对 Fe-Mn-Al 系所做的工作很少，早在三十年代，有人⁽¹⁵⁾在 30%Al 及 80%Mn 的范围内作过一部分 Fe-Mn-Al 淬火状态的相图；后来，对这个相图进行了 760℃ 等温处理，指出了 β -Mn 相变的存在范围，对前者作了修正⁽¹⁶⁾。根据这些工作，也曾有过发展钢种的企图^(17~18)，但都是利用钢中铝提高抗氧化性能，成为耐热钢，含碳量也较高(1.0% 左右)，而且从来也没有达到工业化的程度。

从 1959 年开始，金属研究所对这个系统曾进行了研究⁽²⁰⁾，配制了 30 个不同成分的试验钢种，其范围是 Mn 23~40%，Al 1.2~10%，C 0.1~0.25%，此外还加入不同数量的 Mo、Si、Ti、V、W、B 等元素，通过试验和分析，找出了奥氏体区与成分的经验关系，得出了可在 630℃ 使用的锅炉耐热钢种试验成分；并指出铝具有较强地稳定高锰钢奥氏体的作用；在 22~25%Mn，2.5~4.0%Al 的范围内可以发展出无磁及低温用钢，选出了一个具有优良低温韧性和组织稳定性的低温试验钢种成分 (C 0.1%，Mn 25%，Al 4%)，表 I-1 为试验钢种主要成分，表 I-2 为这些钢种的室温机械性能，图 I-1 代表试验钢种低温冲击韧性，图 I-2 是室温及低温下硬度随变形量的变化。

从试验钢的组织来看，由于含铝量不够， A_0 、 C_2 及 C_4 都很不稳定，在变形过程中出现 $\gamma \rightarrow \varepsilon$ 及 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 相变。因而它们表现在硬化性能上(图 I-2)也比较显著，这是因为除加工硬化外，还有相变强化；就第二相本身来说 ε 相也比 γ 相的硬度高，它们分别为 HD263 及

表 I-1 几种试验钢的化学成分

编 号	化 学 成 分 (%)			编 号	化 学 成 分 (%)		
	Mn	Al	C		Mn	Al	C
A_0	25.0	0.35	0.1	A_4	24.7	4.03	0.1
A_1	25.6	1.58	0.1	C_2	19.4	1.52	0.19
A_3	23.9	3.25	0.09	C_4	18.8	1.84	0.39
AC_3	24.5	3.41	0.17				

表 I-2 几种试验钢种室温机械性能
(固溶处理温度 1100℃)

钢 号	抗 拉 性 能				冲 击 值 (kg-m/cm ²)
	σ_s (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	δ (%)	ψ (%)	
A_0	18.5	74.6	47.0	58.6	35.2
A_1	30.1	56.0	—	64.6	27.6
A_3	22.5	49.3	60.0	71.6	28.6
AC_3	31.9	55.6	49.8	65.3	36.4
A_4	25.0	53.0	54.5	77.0	41.5
C_2	24.4	62.5	66.9	68.5	25.9
C_4	29.1	69.2	67.3	70.0	28.8

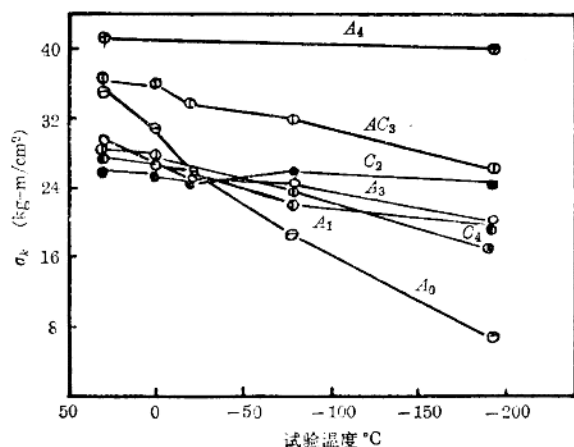


图 1-1 试验钢种低温冲击韧性

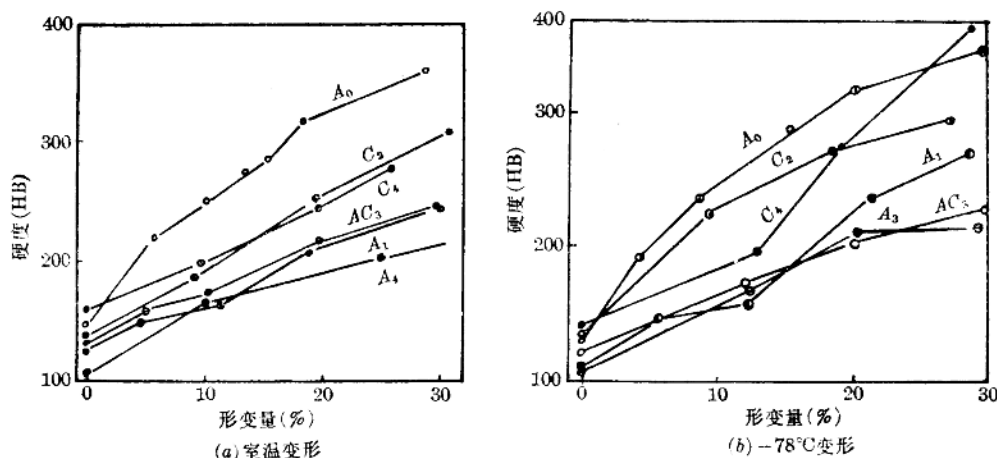


图 1-2 试验钢种硬度随变形量的变化

HD186, 这种组织稳定性更明显地表现在冲击性能随温度的变化, 如图 I-1, 当铝含量较高, 奥氏体组织十分稳定时, 冲击值几乎不随温度而变化 (如 A_4), 而 A_0 变形 10% 便产生大量 ϵ 相, 冲击值随温度的下降最为剧烈, 用碳稳定奥氏体的 C_2 在变形过程中主要是马氏体相变, 这种相变随着碳含量的提高而减少, 如 C_4 中碳含量增加了一倍后, 只有在低温受到更大变形后才出现极少量马氏体, 但从总的趋势来看, 当钢中碳含量较高时, 冲击韧性是比较低的。根据以上考虑, 确保钢的低温韧性和组织稳定性, 我们确定了下列成分范围 (%):

C	Mn	Al	Si	S	P
0.15/0.19	24.5/27.0	4.0/4.7	≤ 0.5	≤ 0.035	≤ 0.035

一个新钢种能否在工业中推广, 在性能上固然要能满足使用的要求, 在工艺上还要能顺利地经受生产的考验, 其中包括冶炼, 加工成材与制作性能。作为低温材料要具备以下条件:

- (1) 具有一定的强度 (根据使用条件不同要具有一定抗张、抗疲劳性能) 和塑性。

(2) 具有较好的韧性: 对马氏体或体心立方结构材料, 其使用温度一定在脆性转变温度以上, 并保证一定冲击值: 即要有较高抗裂纹发展能力, 不产生大区域的脆性断口, 也就是断裂韧性值(K_{Ic})要高。对奥氏体或面心立方材料来说, 虽然不存在什么脆性转变温度, 但当强度很高时, 韧性也可能上升为主要矛盾。

(3) 要具有一定抗氧化及抗介质腐蚀的能力: 许多容器是长期使用的, 因而氧化与腐蚀往往成为主要矛盾, 氧化与腐蚀除了尺寸的减薄以外, 还可能导致材料脆性的增加。

(4) 要有良好的工艺性能和制作性能, 其中包括冶炼、加工、成型、焊接、切削等。

(5) 要具有较高的组织稳定性, 因为低温钢长期在深冷条件下工作, 可能引起的组织变化是一些非扩散性的相变, 如 α -马氏体相变及 ϵ -马氏体相变, 这些都可能引起奥氏体钢的变脆。

我们在Fe-Mn-Al系合金钢的发展过程中, 为了探索低温钢的成分范围, 进行了Fe-Mn-Al相图的测定; 并着重研究了Fe-Mn-Al系合金的组织稳定性和成分的关系; 测定了15Mn26Al4低温钢的全面性能。与此同时, 对这个钢进行了工业性试制和试验, 到目前为止, 生产过15Mn26Al4低温钢的钢厂有重庆钢厂、重钢五厂、抚顺钢厂、上钢三厂及五厂、大连钢厂等。生产过的产品规格有6~30毫米热轧中板, 1.0~4.0毫米冷轧板, $\phi 57 \times 4 \sim \phi 8 \times 1.5$ 毫米各种规格冷轧冷拔管和 $\phi 20 \sim \phi 100$ 毫米棒材, 以及 $\phi 1.2 \sim \phi 4.0$ 毫米焊丝等。

除此之外, 1972年在广州重型机器厂用15Mn26Al4低温钢制成压力容器; 考验了钢的制作性能; 于1973年4月在杭州制氧机所进行了低温(-196°C)爆破试验。在此基础上, 今年将在开封空分设备厂用此钢制作3200立方米/小时制氧机的蓄冷器, 对这种钢的制作性能和工艺性能进一步考验。

在本集中包括15Mn26Al4低温钢的各种试验结果和生产的初步总结, 其中主要有:

(1) 15Mn26Al4低温钢的全面性能(不包括工艺性能)。

(2) 用电子探针方法测定了不同含碳量(0, 0.2, 0.4%), 含铝12%, 含锰40%范围内 800°C , 1000°C , 1100°C 及 1200°C 等温截面的Fe-Mn-Al相图。

(3) 研究了Fe-Mn及Fe-Mn-Al几种成分在低温($-196 \sim -253^\circ\text{C}$)下的组织稳定性, 并用X光衍射仪定量地测定了这类合金冷加工后各种相的变化及与性能的关系。

(4) 重庆钢厂在生产实践中摸索出15Mn26Al4钢存在两个塑性区, 进而在实验室得到证实。

(5) 总结了15Mn26Al4钢在重庆钢厂、上钢五厂、抚顺钢厂的冶炼工艺, 重庆钢厂、重钢五厂、抚顺钢厂及上钢三厂的热轧板及冷轧板工艺, 上钢五厂穿管及大连钢厂拔丝等生产工艺。

(6) 研究了15Mn26Al4钢各种焊接工艺和焊接性能, 并发展出相应焊条, 自动焊丝及粉剂。

(7) 广州重型机器厂总结了15Mn26Al4钢的制作成型工艺。

(8) 杭州制氧机研究所成功地进行了一 196°C 下容器爆破试验, 并对爆破情况及断口作了分析。

考 参 文 献

(1) Developments in the Iron and Steel Industry During 1972, Iron and Steel Engineer(Jan 1973), D1.

(2) Sittic, M., Cryogenics research and Applications, (1962), p. 189.

(3) Bell, T. H. Cryogenic Engineering, (Prentice-Hall Inc, 1963) Chapt, 12, p. 340.

- (4) Гудков, С. И., Механические свойства стали при низких температурах, Москва, (1967).
- (5) Schwartzberg F. R., Metal, Progress, 96, (1969), No. 1, p. 52.
- (6) Овсянников Б. М., Ульянов, Е. А., Ми ТОМ (1969), № 3, стр. 2.
- (7) 低温用钢汇编(一机部情报所编), (1972.12), 125 页。
- (8) 重庆钢厂: 无镍铬低温钢 Mn17Al2CuV 科研试制阶段总结(1972.2)。
- (9) 重庆钢研所: 无镍铬低温用钢 Mn17Al2CuV 低温钢, 第一辑(1972.12)。
- (10) Walters, F. M., Trans. ASM, 21, (1933), 830, 1016.
- (11) Gordon Parr, J., J. Iron steel Inst, 171, (1952), 137.
- (12) Schumann, H., Arch. Eisenh., 38, (1967), 647.
- (13) Химушин, Ф. Ф., Нержавеющие, Кислотоупорные и Жароупорные стали, (1945), (Москва), стр. 405.
- (14) 孔歇尔等, 工业用钢, 1959(北京), 570 页。
- (15) Koster, W., and Tonn, W., Archiv für Eisen hütt, 7, (1933~1934), 365.
- (16) Schmatz, D. J., Trans. AIME, 215, (1959), 162.
- (17) Volker, W., Archiv für Eisenrutton, 19, (1948), 49.
- (18) Dean, R., and Anderson, C., Patent No. 2, 329, 186(1943), 2, 376, 867(1945).
- (19) Канк, Г. Л., Ми ТОМ, (1969), № 2, 13.
- (20) 张彦生、师昌绪: Fe-Mn-Al 奥氏体钢——耐热钢、无磁钢和低温钢, 金属学报, 7 (1964), 285.
- (21) 张彦生、师昌绪、李有柯: Fe-Mn-Al 奥氏体耐热钢的研究, 金属学报, 8 (1965), 346.
- (22) 金属研究所内部资料, (无镍铬 Fe-Mn-Al 系无磁及极低温用钢的研究), 1960, 8。

II 15Mn26Al4 低温钢性能*

(一) 合金成分的选择

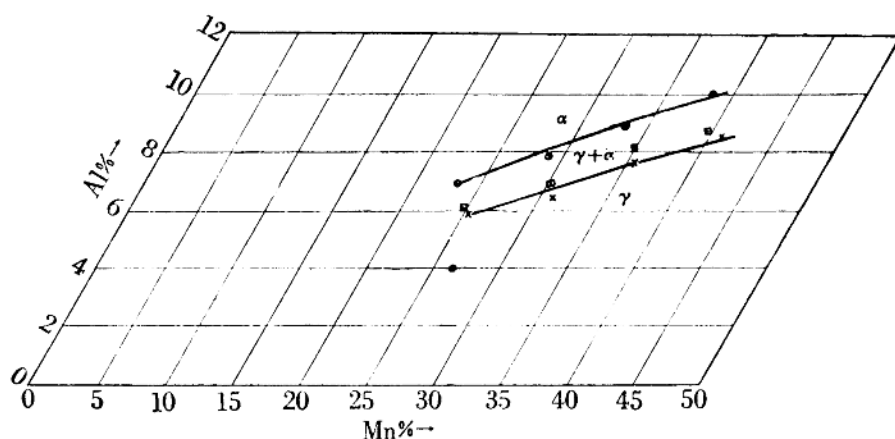
(1) 合金成分

15Mn26Al4 钢的化学成分范围列在表 II-1。

表 II-1 15Mn26Al4 钢的化学成分

含 量	C	Mn	Al	Si	S	P
%	0.13/0.19	24.5/27.0	3.8/4.7	≤0.6	≤0.035	≤0.035

图 II-1 是 0.2%C Fe-Mn-Al 系的 1100℃ 等温截面相图⁽¹⁾。由图 II-1 表明 15Mn26Al4 钢是一个稳定的奥氏体合金，Mn、C 是稳定奥氏体元素，而 Al 是抑制高 Mn 奥氏体钢低温马氏体型相变、稳定低温组织的合金元素。此合金经 1050℃ 热处理后虽然经过冷加工，也是单相奥氏体组织^(2~3)，进一步说明合金的稳定性。



图中黑点表示 15Mn26Al4 钢

图 II-1 0.2%C 1100℃ Fe-Mn-Al 相图

(2) 合金元素对组织稳定性的作用

Fe-Mn 二元合金在低温冷冻或冷变形后易产生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 、 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 两类马氏体型相变，我们用 X 光衍射方法测定了不同 Mn (15~30%)、Al (0.1、3%) 含量合金在不同状态下的组织结构、研

* 冶金工业部金属研究所。

究锰、铝对 Fe-Mn-Al 三元合金组织的影响。

试样是采用三种状态：(1) 1050℃、1 小时(水淬)；(2) 1050℃、1 小时(水淬) + 冷冻 (-196℃、30 分)；(3) 1050℃、1 小时(水淬) + 冷冻 (-196℃、30 分) + 10% 形变量冷墩后的 Fe-Mn、Fe-Mn-Al 合金。实验方法是测定 $\gamma_{(200)}$ 、 $\epsilon_{(10\bar{1}1)}$ 、 $\alpha'_{(211)}$ 特定衍射峰的相对强度，实验结果列于表 II-2 和图 II-2。图 II-2 的上中下三部分分别是(1)、(2)、(3)三种状态的组织。

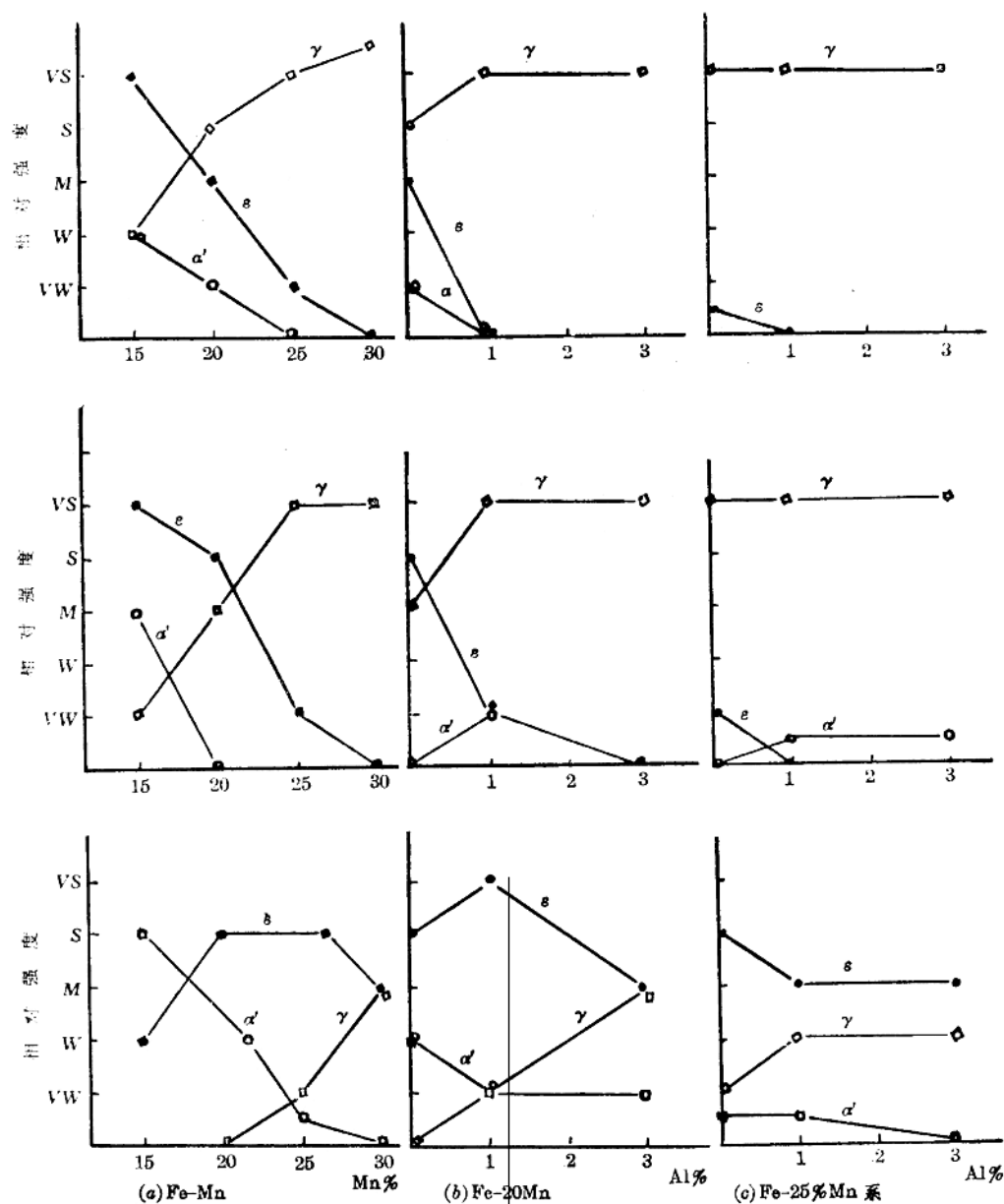


图 II-2 Mn, Al 对 Fe-Mn-Al 合金组织的影响

表 II-2 Fe-Mn、Fe-Mn-Al 合金特定衍射峰强度

类别	状 态			1050℃/1 小时水淬			1050℃/1 小时水淬+冷冻 (-196℃/30 分)			1050℃/1 小时水淬+冷冻 (-196℃/30 分)+10%ε冷墩		
	C	Mn	Al	$\gamma_{(200)}$	$\epsilon_{(101)}$	$\alpha'_{(211)}$	$\gamma_{(200)}$	$\epsilon_{(101)}$	$\alpha'_{(211)}$	$\gamma_{(200)}$	$\epsilon_{(101)}$	$\alpha'_{(211)}$
Fe-Mn	0.07	14.61	—	W	VS	W	VW	VS	M	O	W	S
	0.03	19.86	—	S	M	VW	M	S	O	O	S	W
	0.06	24.90	—	VS	VW	O	VS	VW	O	VW	S	VW
	0.08	29.48	—	VS+	O	O	VS	O	O	M	M	O
Fe-20Mn-Al	0.03	19.86	—	S	M	VW	M	S	O	O	S	W
	0.03	20.68	1.17	VS	O	O	VS	VW	VW	VW	VS	VW
	0.03	20.47	2.88	VS	O	O	VS	O	O	M	M	VW
Fe-25Mn-Al	0.06	24.90	—	VS	VW	O	VS	VW	O	VW	S	VW
	0.03	24.87	1.39	VS	O	O	VS	O	VW	W	M	VW
	0.03	25.69	3.12	VS	O	O	VS	O	VW	W	M	O

注: (1) VS、S、M、W、VW 分别表示很强、强、中、弱、很弱。

(2) 测定的是 $\gamma_{(200)}$ 、 $\epsilon_{(101)}$ 、 $\alpha'_{(211)}$ 特定衍射率。

(3) 定性地测定相对强度、没有考虑锻造和冷墩引起的择优取向。

图 II-2(a) 是 15~30%Mn 的 Fe-Mn 系的相组成, 图 II-2(b)、图 II-2(c) 分别是铝对 Fe-20%Mn、Fe-25%Mn 合金相组成的影响。由图 II-2(a) 看出, -196℃ 冷处理和冷墩变形促使 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 、 $\epsilon \rightarrow \alpha'$ 、 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 的相变, 但是随锰含量的增加, 奥氏体愈稳定, 这两类马氏体相变减缓, 但是直到锰含量增加到 30%, 奥氏体仍不能完全稳定。由图 II-2(b)、图 II-2(c) 看出, 铝也有抑制 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 、 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 这两类马氏体相变的作用, 而且铝的作用比 Mn 更为强烈。由此看出, Fe-Mn-Al 合金中要有一定的锰和铝含量, 才能得到稳定的奥氏体合金。

(3) 合金元素对机械性能的影响。

15Mn26Al4 钢是碳、锰、铝合金化的单相奥氏体合金, 只有当合金元素影响奥氏体稳定性的条件下, 才对性能有较大影响。

图 II-3~9 是碳、锰、铝、硅元素对合金机械性能的影响。图 II-3~5 分别是铝、锰、碳对室温和低温(-196℃)拉伸性能的影响; 图 II-6~8 分别是铝、锰、碳对室温和低温(-196℃) V 型缺口冲击韧性的影响; 图 II-9 是硅对室温和低温(-196℃) U 型缺口冲击韧性的影响。

试验试样的原材料及状态: 图 II-3~8 的试样是用常压感应冶炼的 20 公斤小锭, 锻成 $\phi 55 \sim \phi 60$ 电极棒, 电渣重熔成 15 公斤电渣锭, 再锻成 18×18 方坯棒, 处理制度是 1050℃、1 小时、空冷; 图 II-9 的试样是用常压感应冶炼的 25 公斤锭, 锻成 18×18 方坯棒, 处理制度是 1050℃、1 小时、水冷。试样分析成分列在表 II-3。

分析图 II-3~9 中的曲线, 合金元素对机械性能的影响可归纳为以下几点:

(1) 图 II-3、图 II-6 表明铝的影响, 当铝在 0~3.5% 范围内, 随铝含量增加, 室温 σ_s 降低, 而室温 α_k 、低温 α_k 、 ψ 和 δ 不断增加; 当铝在 3.5~4.7% 范围内, 对室温和低温性能的影响就较微小。

(2) 图 II-4、图 II-7 表明当锰的含量小于 24% 时, 随锰的降低, 低温(-196℃) δ 降低, 而锰在 21.6~29.2% 范围内, 各种性能均大致处于同一水平, 随锰含量的变化, 性能差别不

表 II-3 试样的分析成分(%)

炉 号	编 号	C	Mn	Al	Si	S	P
5		0.20	25.18	3.84	0.11	0.002	0.006
1	A1	0.18	25.65	--	0.19	0.004	0.008
2	A2	0.20	23.93	1.47	0.08	0.003	0.004
3	A3	0.20	25.31	2.27	0.07	0.003	0.005
4	A4	0.21	25.13	3.51	0.07	0.003	0.005
6	A6	0.22	25.31	4.70	0.08	0.003	0.005
7	M1	0.20	21.57	4.10	0.07	0.002	0.004
8	M2	0.22	23.60	4.06	0.05	0.006	0.004
9	M4	0.23	27.42	4.09	0.05	0.007	0.008
10	M5	0.22	29.26	4.09	0.06	0.004	0.009
11	C1	0.15	25.18	4.26	0.07	0.004	0.007
12	C3	0.27	25.25	4.52	0.08	0.003	0.008
13	C4	0.37	25.28	4.47	0.06	0.004	0.007
H ₁	S1	0.16	26.00	4.33	0.36	0.009	0.011
H ₂	S2	0.17	27.20	4.23	0.69	0.005	0.014
H ₃	S3	0.25	26.62	4.01	1.34	0.002	0.013

大。

(3) 图 II-5、图 II-8 表明碳的影响，它与锰极为相似，碳在 0.15~0.37% 范围内，随碳含量的增加，仅低温 δ 稍有增加，和室温及低温 α_k 稍有提高外，其它性能变化较小。

(4) 图 II-9 表明随着硅含量的增加，冲击韧性有轻微降低。

分析合金元素碳、锰、铝、硅对 15Mn26Al4 钢机械性能的影响，合金元素在 15Mn26Al4 钢中的作用可得出下述几点看法：

(1) 铝强烈地影响 15Mn26Al4 钢的机械性能，在铝含量为 3.5% 时几乎各项性能都出现拐点；在 0~4.7% 范围内，当铝小于 3.5% 区域内，随铝含量增加，性能不断改善，但仅当铝含量 $\geq 3.5\%$ 时，才能得到各性能都较好的综合机械性能。因此 15Mn26Al4 钢中 Al 含量必须大于 3.5%。

(2) 当铝在 4% 左右时，合金元素碳(0.15~0.37%)、锰(21.6~29.2%) 对 15Mn26Al4 钢机械性能影响不大，稳定奥氏体的元素碳、锰含量增加，只能轻微地改善钢的低温塑性和韧性，这可能与奥氏体稳定性加强有关。

(3) 合金元素铝、锰、碳含量在 15Mn26Al4 钢所要求的成分范围内，硅(<1.0%) 对钢的性能影响较小。

(4) 影响 15Mn26Al4 钢性能最强烈的合金元素是铝，铝在改善钢的性能，尤其是低温性能上起着重要作用。这是由于合金元素铝是稳定 15Mn26Al4 钢低温组织，改善加工硬化的重要元素^(2~3)。

(5) 综上所述表明，表 II-1 拟定的 15Mn26Al4 钢的成分是较为合理的。

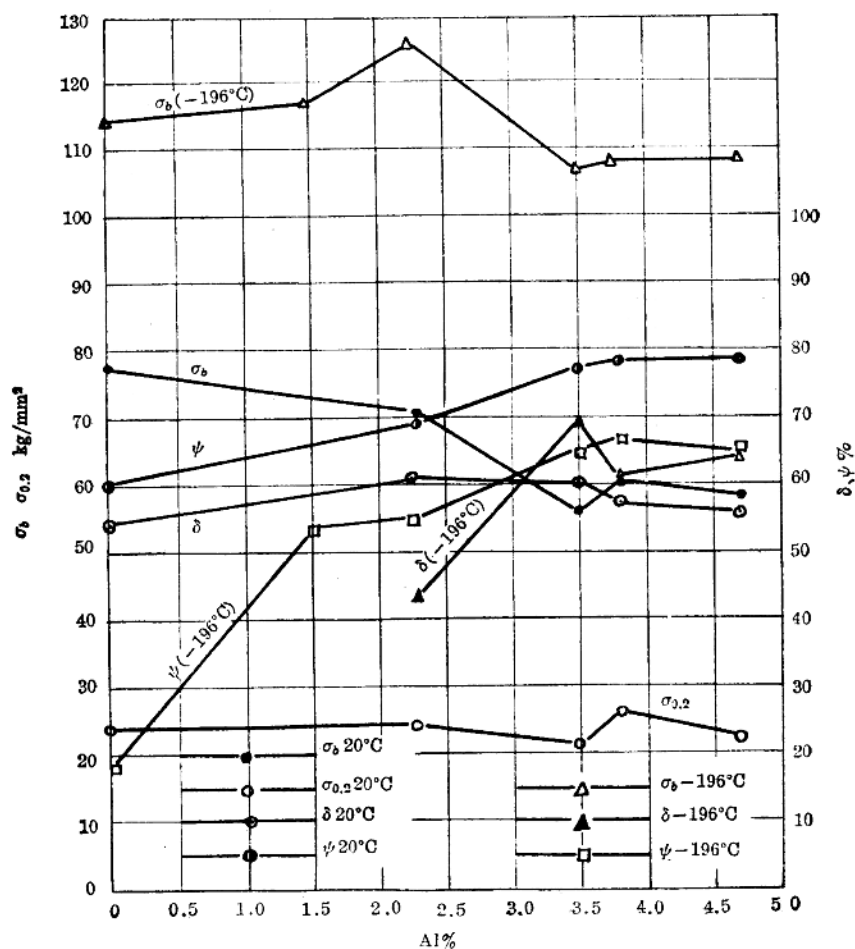


图 I-3 Al% 对拉伸性能的影响

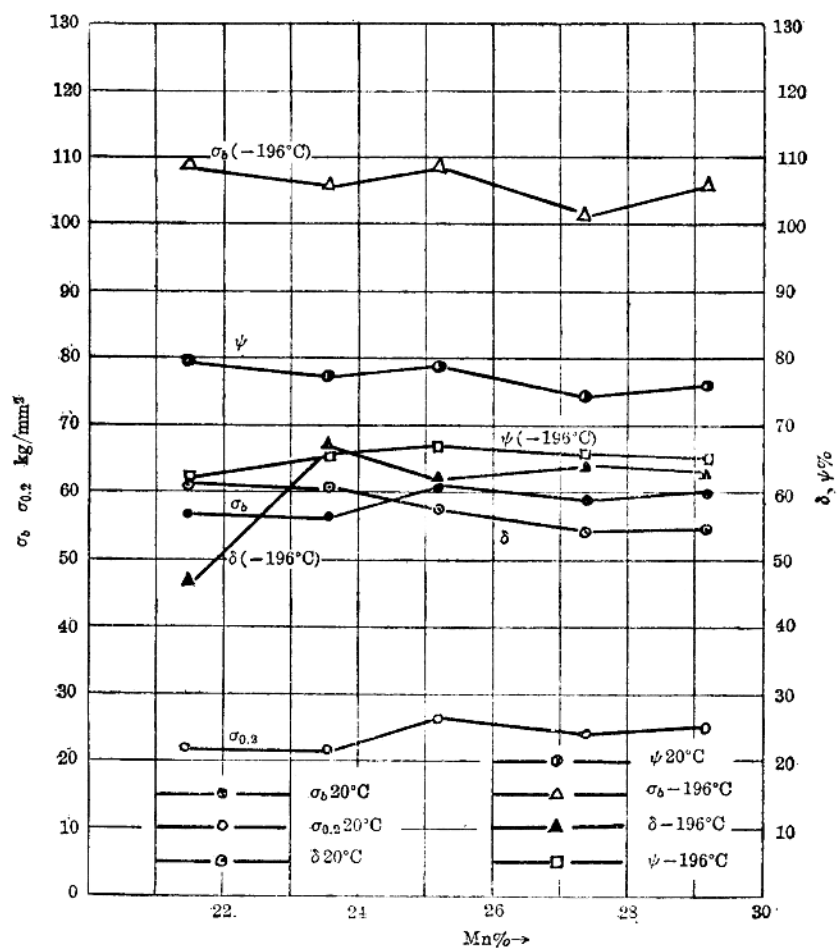


图 I-4 Mn% 对拉伸性能的影响

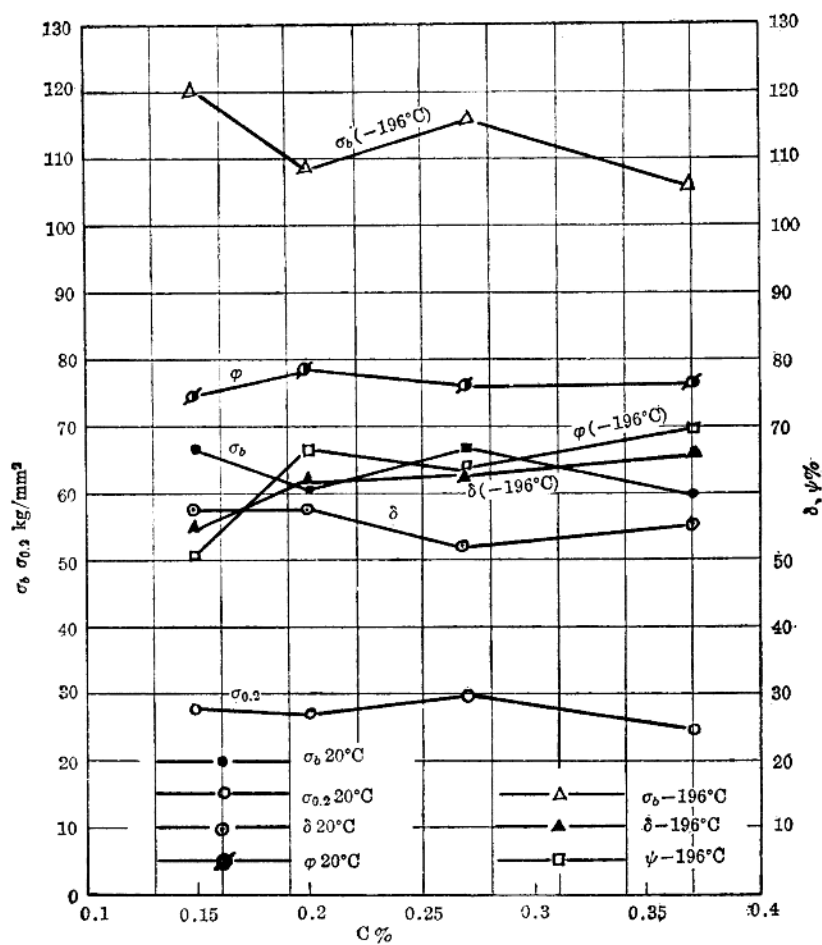


图 I-5 C% 对拉伸性能的影响

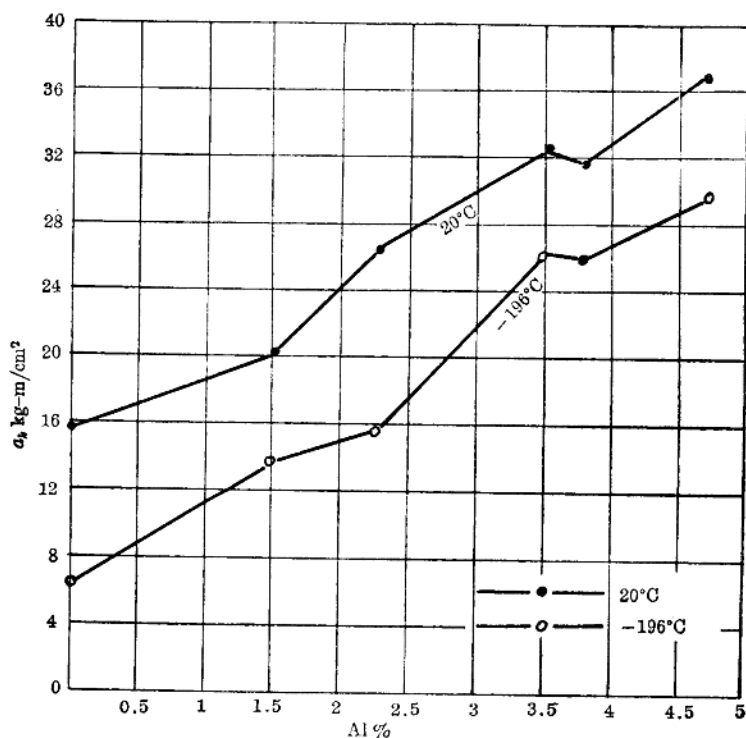


图 I-6 Al%对冲击韧性的影响

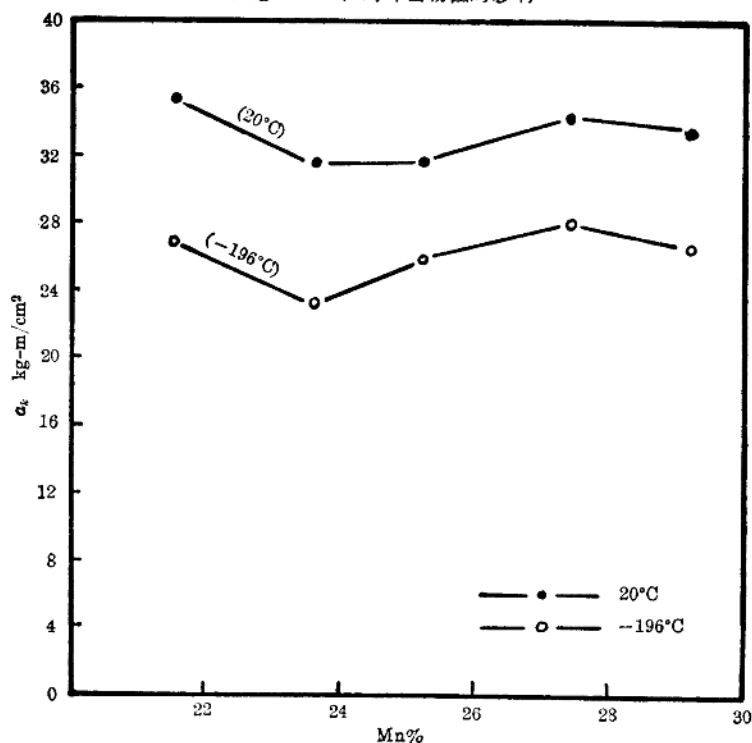


图 I-7 Mn%对冲击韧性的影响