

膨胀合金手册

《膨胀合金手册》编写组 编

冶金工业出版社

《膨胀合金手册》概括地介绍了膨胀合金的生产、使用，较系统地叙述了合金的分类、用途、化学成分、物理、机械性能，第八章介绍了膨胀系数的测量。

本手册可以供从事膨胀合金生产、使用部门的技术人员，工人，设计，工艺，管理人员参考，也可供有关大专院校师生参考。

膨 胀 合 金 手 册

《膨胀合金手册》编写组 编

(限国内发行)

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 6.9/16 字数 168 千字

1979年10月第一版 1979年10月第一次印刷

印数 00,001~12,000册

统一书号：15062·3421 定价0.72元

前 言

膨胀合金是一种具有特殊热膨胀或兼有其它性能金属材料。它是精密合金的一个重要部分，主要用来制造电真空器件、精密仪器、仪表元件、自动控制组元元件和用于大地测量方面等。它是国民经济各部门和国防建设中不可缺少的材料。

建国以来，为了适应国防和工业建设的需要，我国建立了研究和生产精密合金的基地，到1964年，我国的膨胀合金生产、研究已初具规模，品种和质量初步满足了我国电真空和精密仪器等工业的需要。经过以后这些年的努力，我国膨胀合金的牌号不断增多，品种不断扩大，质量日益提高，对我国国防和工业的建设起了积极作用。

为了适应社会主义建设的需要，根据使用和生产单位的要求，我们编写了这本《膨胀合金手册》。《手册》以标准中所列牌号为主，给出的性能数据、曲线、图表，一部分是多年来各单位科研、生产积累的数据、资料，也有一部分是引用国外的资料。《手册》基本上是按合金成分系列叙述的，《手册》中总结了合金的生产和使用工艺以及多年来国内生产、使用中常出现的一些问题。

《手册》中的“典型合金”及“典型合金性能数据”是按冶金部标准中限成分冶炼的合金，按规定方法测得性能数据。

在《手册》编写过程中，得到了许多生产、科研、院校和使用单位的大力支持，提供了大量资料、数据，我们在此表示衷心的感谢。

参加本《手册》编写工作的有：陕西钢铁研究所刘振兴，北京钢铁研究院吴金声和北京冶金试验厂刘克佩。由于我们水平所限，《手册》中难免有许多缺点和错误，恳切希望同志们批评指正。

编 者

一九七九年五月

目 录

前言

手册中常用符号、名称及单位	1
---------------------	---

第一章 概 述

第一节 金属和合金的热膨胀	3
第二节 我国膨胀合金牌号表示方法	3
第三节 膨胀合金的分类	7
第四节 膨胀合金的用途与特点	7
一、低膨胀(因瓦型)合金	7
二、定膨胀合金	7
三、高膨胀合金	7
四、其它封接金属或合金	7
第五节 膨胀合金发展史	9
第六节 膨胀合金生产工艺流程	11
第七节 金属与玻璃、陶瓷封接	13
一、对封接合金的要求	13
二、玻璃封接与陶瓷封接	13
第八节 电真空玻璃牌号命名方法	15
第九节 电真空器件用陶瓷材料命名方法	15

第二章 Fe-Ni 系膨胀合金

第一节 概述	16
第二节 相图	17
第三节 化学成分与性能的关系	19
一、线膨胀系数、居里点	19
二、导热系数、比热、电阻系数及电阻温度系数	20
第四节 合金的生产工艺要点	23
一、冶炼	23
二、加工与热处理	23

第五节 4J36合金	23
一、用途	23
二、标准	24
三、典型合金性能数据	25
四、化学成分与膨胀性能	28
五、热处理	28
六、加工性能	30
七、焊接	30
八、耐腐蚀及清洗	31
九、易切削因瓦合金	31
十、低温用因瓦合金	32
第六节 4J42、4J45、4J50、4J52、4J54合金	36
一、用途和特点	36
二、标准	36
三、典型合金性能数据	36
四、使用工艺	39
第七节 4J43合金和覆铜Fe-Ni合金丝	40
一、用途和特点	40
二、标准	41
三、典型4J43合金性能数据	42
四、覆铜Fe-Ni合金丝生产	43
五、覆铜Fe-Ni合金丝性能	43
六、覆铜Fe-Ni合金丝的代用问题	44
七、Ni41Cu9合金	45
第八节 4J58合金	46
一、用途	46
二、标准	47
三、典型合金性能数据	47
四、使用要求	48
五、合金线纹尺制造工艺	49

第三章 Fe-Ni-Co系膨胀合金

第一节 概述	50
--------	----

第二节 相图	50
一、钴的作用	51
二、相变	53
第三节 组织	57
一、组织与机械性能	57
二、组织与显微组织	57
三、组织的X-光衍射	57
第四节 4 J 32合金	59
一、概况	59
二、用途	59
三、标准	60
四、典型合金性能数据	60
五、加工	63
六、热处理	63
七、热处理对膨胀系数的影响	63
八、谐振腔制造问题	64
第五节 4 J 29合金	64
一、概况	64
二、用途	64
三、标准	65
四、典型合金性能数据	67
五、4 J 29合金生产、使用工艺	71
六、4 J 29合金中各化学元素的作用	74
七、工艺因素对性能的影响	75
八、氧化膜	76
九、4 J 29合金应用举例	78
第六节 4 J 31、4 J 33、4 J 34陶瓷封接合金	79
一、概况	79
二、高 Al_2O_3 陶瓷性能	80
三、标准	81
四、典型合金性能数据	81
五、陶瓷管生产工艺	84
第七节 4 J 30合金	86

一、概况	86
二、典型合金性能数据	86
第八节 低钴封接合金	88
一、4 J 44 合金 (与硬玻璃封接)	89
二、4 J 46 合金 (与陶瓷封接)	90

第四章 Fe-Ni-Cr 系膨胀合金

第一节 概述	93
一、概况	93
二、相组织	94
三、工艺特点	94
四、氧化膜及合金的用途	95
第二节 4 J 47、4 J 48和4 J 49合金	96
一、用途及特点	96
二、标准	96
三、4 J 49 合金的热处理	97
四、典型合金性能数据	98
第三节 4 J 6合金	101
一、用途	101
二、标准	101
三、典型合金性能数据	102
四、氧化膜	103
第四节 Ni47-Cr5-Fe 合金	105
一、化学成分	105
二、性能	105
三、用途	106
第五节 其它Fe-Ni-Cr 封接合金	106

第五章 Fe-Cr系膨胀合金

第一节 概述	108
一、相图	108
二、工艺特点	108

三、物理、机械性能	110
第二节 4J18合金	112
一、工艺特点	112
二、典型合金性能数据	113
第三节 4J28合金	116
一、用途	117
二、工艺特点	117
三、标准	117
四、典型合金性能数据	118
第四节 Cr28NiN和Cr25合金	119
一、Cr28NiN合金的化学成分和性能	120
二、Cr25合金的化学成分和性能	120

第六章 其它因瓦型低膨胀合金

第一节 不锈因瓦合金——4J9合金	122
一、相组织	122
二、热膨胀系数	126
三、耐腐蚀性	128
四、典型合金性能数据	128
第二节 高强度低膨胀合金——4J35	129
第三节 贵金属因瓦合金	131
第四节 非铁磁性因瓦合金	132

第七章 其它封接金属及合金

第一节 无磁膨胀合金	136
第二节 高导电及高导热封接合金	139
第三节 复合封接材料	140
第四节 47HJ合金	141
第五节 其它封接金属	143
一、钨(W)	143
二、钼(Mo)	145
三、钽(Ta)	146

四、铌 (Nb)	147
五、无氧铜	148
六、铁 (Fe)	150
七、铂 (Pt)	151
八、钛 (Ti)、铼 (Re)、镍 (Ni)、锆 (Zr) 和 10# 钢	152

第八章 膨胀系数测量

第一节 基本概念	158
第二节 膨胀仪	159
一、用途和精度	159
二、膨胀仪的主要部件	160
第三节 膨胀仪的种类	162
一、千分表式膨胀仪	162
二、机械杠杆式膨胀仪	163
三、光学三角架放大的膨胀仪	164
四、差动变压器膨胀仪	165
五、应变测微计膨胀仪	166
六、干涉膨胀仪	166
第四节 膨胀系数测量	169
一、光学三角架放大膨胀仪的膨胀系数测量	169
二、仪器使用注意事项	171
三、低膨胀系数测量	171
四、利用膨胀曲线测量弯曲点	172
附录 1 国产膨胀合金典型成分和性能表	174
附录 2 国产膨胀合金物理性能和机械性能表	176
附录 3 国产膨胀合金品种规格表	178
附录 4 国内外膨胀合金牌号对照表	180
附录 5 世界主要国家电真空玻璃及其新、旧牌号对照表	190
附录 6 国产电真空玻璃主要技术数据	192
附录 7 过渡玻璃主要技术数据	196
附录 8 国产电真空器件用陶瓷材料技术性能表	197
附录 9 手册中数据所用试料的状态及条件汇总表	198

手册中常用符号、名称及单位

1. 以拉丁字母为序

符 号	名 称	单 位
A	奥氏体	
A_{c_1}	马氏体过热转变温度, 上临界温度	$^{\circ}\text{C}$
A_{r_3}	马氏体过冷转变温度, 下临界温度	$^{\circ}\text{C}$
α_K	冲击韧性	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$, 公斤·米/厘米 ²
B	磁感应强度	Gs, 高斯
B_s	饱和磁感	Gs, 高斯
B_r	剩余磁感	Gs, 高斯
C	比 热	$\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$, 卡/克·度
d	比 重	g/cm^3 , 克/厘米 ³
E	弹性模量	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
F	铁 素 体	
G	切变弹性模量	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
H	磁场强度	Oe, 奥斯特
HB	布氏硬度	
H_C	矫 顽 力	Oe, 奥斯特
HRA	洛氏硬度 A 标度	
HRB	洛氏硬度 B 标度	
HRC	洛氏硬度 C 标度	
HV	维氏硬度	
$\Delta L/L$	相对伸长	mm/mm
L	长 度	mm
M	马 氏 体	
M_s	马氏体开始转变温度 $\gamma \rightarrow \alpha$	$^{\circ}\text{C}$
t	温 度	$^{\circ}\text{C}$
T_c	居里温度, 近似弯曲点	$^{\circ}\text{C}$
V	电压单位	V, 伏特
W	功率单位	W, 瓦特

2. 以希腊字母为序

符 号	名 称	单 位
α	(1) α -相 (2) 线膨胀系数	$m/m \cdot 1/^\circ C$
α_t	某温度的线膨胀系数	$m/m \cdot 1/^\circ C$
$\alpha_{t_1 \sim t_2}$	某两温度间的线膨胀系数	$m/m \cdot 1/^\circ C$
α_R	电阻温度系数	$1/^\circ C$
β	弹性模量温度系数	$1/^\circ C$
γ	γ -相	
δ	(1) δ -相 (2) 延伸率	%
λ	导热系数	$cal/cm \cdot sec \cdot ^\circ C$, 卡/厘米·秒·度
μ	磁 导 率	Gs/Oe, 高斯/奥斯特
μ_0	初始磁导率	Gs/Oe, 高斯/奥斯特
μ_m	最大磁导率	Gs/Oe, 高斯/奥斯特
ν	频 率	Hz, 赫芝
ρ	电阻系数(电阻率)	$\Omega \cdot mm^2/m$, 欧姆·毫米 ² /米
σ	(1) σ -相 (2) 应力、强度	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
σ_b	抗拉强度	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
$\sigma_{0.1}$	永久变形为 0.1% 时的屈服强度	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
$\sigma_{0.2}$	永久变形为 0.2% 时的屈服强度	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
σ_p	比例极限	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
σ_s	屈服极限	kg/mm^2 , 公斤/毫米 ²
ϕ	直 径	mm
ψ	断面收缩率	%
Ω	电阻单位	Ω , 欧姆

第一章 概 述

第一节 金属和合金的热膨胀

绝大多数的金属和合金都是受热体积膨胀，冷却体积收缩。大部分纯金属的膨胀系数(α)与其熔点成反比，高熔点金属膨胀系数小，如W、Mo、Ta、Nb等；低熔点金属膨胀系数大，如Al、Zn、Pb等(见表1-1)。化学元素周期表上Fe、Ni、Co等过渡族元素所组成的合金，由于它们的铁磁性，在居里点以下的温度范围内有反常的热膨胀；还有一些反铁磁性合金，在奈尔点以下的温度范围内也具有反常的热膨胀。从而我们就能得到膨胀系数特别低的合金材料，与某些玻璃、陶瓷等材料膨胀系数相近的合金材料，以及高膨胀合金。我们称这些具有特殊热膨胀性能的合金为膨胀合金。

第二节 我国膨胀合金牌号表示方法

根据YB658—69标准精密合金产品牌号表示方法规定，精密合金产品代号采用数字和汉语拼音字母相结合的方法表示。膨胀合金规定用“4J”表示，J是“Jing”(精)字的第一个字母。具体表示如下：

$$4J \times \times$$

$\times \times$ 是两位阿拉伯数字，表示4J类中的 $\times \times$ 号合金。但为了记忆方便，其中有一部分以合金的主要或次要成分含量作为自己的序号。

例如：“4J29”表示第29号膨胀合金，而该合金的镍含量恰好约为29%。

表1-2为我国膨胀合金牌号。

部分金属元素的熔点和膨胀系数等性能

表 1-1

金属 名称	元 素 符 号	膨 胀 系 数 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	熔 点 $^{\circ}\text{C}$	导 热 系 数 $\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$	比 重 (20°C) g/cm^3
钨	W	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 4.45	3380	0.39	19.3
钨	Os	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 5.7~6.5	~3045	—	22.5
钼	Mo	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 4.9	2625	0.34	10.2
铪	Hf	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 5.9	2225	0.22	13.2
锆	Zr	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 5.89	1852	0.14	6.5
铬	Cr	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 6.2	1903	0.16	7.19
铱	Ir	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 6.5	2443	0.14	22.4
铼	Re	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 6.6	3180	0.17	21.0
钽	Ta	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 6.6	2980	0.13	16.6
钕	Nd	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 6.7	1024	0.03	7.0
铌	Nb	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 7.1	2468	0.13	8.57
钒	V	$\alpha_{23 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 8.3	1910	0.07	6.1
钛	Ti	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 8.4	1677	0.036 (α 态)	4.5
铂	Pt	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 8.9	1769	0.16	21.4
钌	Ru	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 9.1	2400	—	12.2
铁	Fe	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 11.7	1537	0.18	7.87
钴	Co	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 12.4	1492	0.16	8.9
镍	Ni	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 13.4	1453	0.22	8.9
铜	Cu	$\alpha_{20 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 17.0	1083	0.94	8.96
银	Ag	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 19.7	960	1.00	10.5
铝	Al	$\alpha_{20 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 23.9	660	0.53	2.7
锌	Zn	$\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$ 17~39.7	419	0.27	7.1
铅	Pb	$\alpha_{0 \sim 100^{\circ}\text{C}}$ 29.3	327	0.083	11.34

我国膨胀合金牌号

表 1-2

序号	中国牌号		相应的国外牌号	特点及用途
	新代号	老代号		
1	4J5	Ni31Co5	Super-Invar ^②	低膨胀, 称“超因瓦合金”
2	4J6	Ni42Cr6	Glass Sealing 426 ^② , ASV ^③	与玻璃、陶瓷封接
3	4J9	Co54Cr9	54K 9 X ^① , 不锈钢 ^③	低膨胀, 称“不锈钢瓦合金”
4	4J10	Ni29Co18/Cu		覆 Cu 4J29
5	4J11	Ni29Co20/Cu		覆 Cu 4J34
6	4J12	Ni31Co15/Cu		覆 Cu 4J31
7	4J15	Ni15Mn7	X60NiMn147 ^⑤	高膨胀
8	4J18	Cr18TiVMo	18XMTΦ, 18XTΦ ^① , X8CrTi17 ^⑤	与软玻璃封接
9	4J19	Ni19Cr11	19HX ^①	高膨胀
10	4J20	Ni20Mn6	20HΓ ^① , NiMn206 ^⑤	高膨胀
11	4J24	3Ni24Cr2	24HX ^①	高膨胀
12	4J27	Ni27Mo6	27HM ^① , FeNiMo ^⑤	高膨胀
13	4J28	Cr28	Carpenter 27 ^② , Telcoseal V ^④ , FR-28 ^③ , X10Cr25 ^⑤ , Dilver O ^⑥	与软玻璃封接
14	4J29	Ni29Co18	29HK ^① , Kovar ^② , KV-3 ^③ , Nilo K ^④ , Vacon10 ^⑤ , Dilver P ^⑥	与硬玻璃封接
15	4J30	Ni30Co13Ca	30HKД ^①	与硬玻璃封接
16	4J31	Ni31Co15		与陶瓷封接
17	4J32	Ni32Co4Cu	32HKД, 32HK-BИ ^①	低膨胀, 称“超因瓦合金”
18	4J33	Ni33Co14		与陶瓷封接
19	4J34	Ni29Co20		与陶瓷封接
20	4J35	Ni35CoTi	35HK T ^①	高强度, 低膨胀

续表 1-2

序号	中国牌号		相 应 的 国 外 牌 号	特 点 及 用 途
	新代号	老 代 号		
21	4J36	Ni36	36H①, Invar②④, 不变钢③, Nilo 36④, Vacodil 36⑤	低膨胀, 称“因瓦合金”
22	4J42	Ni42	42H①, Glass Sealing 42②, D③, Nilo 42④, Vacodil 42⑤, N42⑥	与软玻璃封接
23	4J43	Ni43	43H①, Vacodil 43⑤	覆 Cu 的 Fe-Ni 丝芯材
24	4J44	Ni35Co9		与玻璃封接
25	4J45	Ni45	Allegheg 4750②	与软玻璃封接
26	4J46	Ni36Co5Cu5		与陶瓷封接
27	4J47	Ni47Cr	47HX①	与陶瓷封接
28	4J48	Ni47Cr3	47HsX①	与陶瓷封接
29	4J49	Ni47CrB	47HXP①	与陶瓷封接
30	4J50	Ni50	カタマズ DT③, Nilo 50④, N50⑥	定膨胀
31	4J52	Ni52	52H①, 52H-BH①	定膨胀
32	4J54	Ni54	Vacovit 540⑤, N54⑥	定膨胀
33	4J58	Ni58	58H①, N58⑥	作封线用, 称“稳定因瓦合金”
34	4J75	Mn75Ni15Cu10	75GH①	高膨胀

注: 1. 标注者为生产国家: ①苏联; ②美国; ③日本; ④英国; ⑤西德; ⑥法国;

2. 其他国家牌号详见附录 4;

3. 无国外相应牌号者, 为我国独有牌号。

第三节 膨胀合金的分类

膨胀合金按合金成分系列可分为：Fe-Ni系、Fe-Ni-Co系、Fe-Ni-Cr系、Fe-Ni-Cu系、Fe-Cr系膨胀合金和其它元素系列膨胀合金。若按合金的主要热膨胀特性和它的用途，又可将膨胀合金按表1-3方法进行分类。

这两种分类方法，各有其优点。按成分系列分，便于介绍每一系列在冶炼、加工、相组织等方面所具有的共同特点。按用途分类，便于讨论它们在使用方面的特点。

第四节 膨胀合金的用途与特点

一、低膨胀（因瓦型）合金

在常温或极低温度范围内，具有很低膨胀系数的合金称为低膨胀合金。它用来制造精密仪器、仪表中要求尺寸不变的零件，如标准量具、大地测量尺、微波谐振腔、热双金属的被动层、液态气体容器等。属于这种类型的合金主要有4J36、4J32等。

二、定膨胀合金

在某一温度范围内具有一定膨胀系数的合金称为定膨胀合金。这类合金主要用于电真空工业中，作为与玻璃、陶瓷等封接的结构材料，覆铜Fe-Ni丝的芯、热双金属的被动层和刻线尺等。属于这类合金的牌号很多，其中4J29合金是用量最大的与玻璃封接的合金。

三、高膨胀合金

在某一温度范围内，具有较高膨胀系数的合金称为高膨胀合金。这类合金主要用作热双金属片的主动层和控温敏感元件，如4J20、4J75等（详见表1-2）。因这类合金使用比较单纯，专门用于双金属制造，很少单独使用，涉及范围比较窄，故本手册中不予叙述。

四、其它封接金属或合金

近几年来电子工业对膨胀合金提出了兼有高强度、高硬度、

膨胀合金

低膨胀合金	定膨胀合金	高膨胀合金	其它封接金属或合金
Fe-Ni 系 { 4J36 { 易切削因瓦合金 Fe-Ni 系 { 低膨胀因瓦合金 { 4J32 Fe-Ni-Co 系 { 4J5 Fe-Co-Cr 系 4J9 高强度因瓦合金 4J35 贵金属因瓦合金 非铁磁因瓦合金	4J42 4J43 4J45 4J50 4J52 4J54 4J58 4J30 4J29 4J31 4J33 4J34 4J44(低Co密封) 4J46(低Co密封) 4J47 4J48 4J49 Ni47Cr5 { Ni41Cu9 { 47Hf 4J18 4J28 Cr28NiN Cr25	4J15 4J19 4J20 4J24 4J27 4J75	无磁封接合金 高导热、高导电封接合金 复合封接材料 Ni29Co18/Cu Ni29Co20/Cu Ni31Co15/Cu W Mo Ta Nb 无氧铜 铁 铂 Ti Re Ni Zr 10*

封接金属