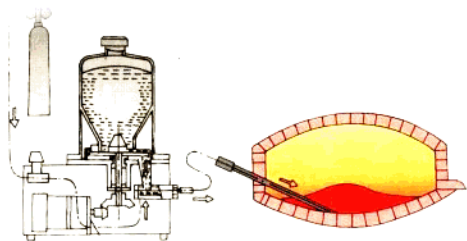


铝合金熔炼 理论与工艺

路贵民 柯东杰 等编著



NEUPRESS

东北大学出版社

前 言

铝合金的熔炼是铝合金加工过程的首道工序，也是至关重要的环节。要生产具有一定的物理、化学和机械性能的优质产品，除需先进的加工工艺外，首先必须提高铝合金熔体与铸锭的冶金质量。如严格保证合金的化学成分、减少气体和非金属夹杂、获得均一细小的等轴晶粒以及其他缺陷的消除等，这些冶金质量的控制完全取决于合金的熔炼工艺。因为熔炼工艺的不当往往产生后序加工工艺所无法消除的缺陷，直接影响到产品质量。同时，随着现代科学技术的不断进步，对材料的组织性能要求越来越苛刻，这对熔炼工艺提出了更高的要求。如果没有先进科学的熔炼工艺，就不可能生产出高质量的合金材料。

本书根据铝合金熔炼工艺的需要，首先阐述了铝合金熔炼所必要的物理化学基础知识，论述了熔炼过程的物理化学规律。在参阅国内外有关研究成果的基础上，系统阐述了铝合金的合金化、熔体净化、晶粒细化理论与工艺。讨论了合金元素的作用和杂质元素的危害，合金中的气体、非金属夹杂、晶粒组织、铸锭缺陷的形成、检测与控制。最后还编入了一些主要国家及国际标准化组织（ISO）公布的最新铝合金牌号与标准，以便相关人员查阅。本书既有理论性，又具有实践性，既可用于专业教学，也可供工程技术人员参考。

本书由东北大学路贵民博士、许光明博士、福州榕港铝业有限公司柯东杰副总经理编写。其中1，2，3，5章由路贵民编写，4章由许光明编写，6，7，8章由路贵民、柯东杰合编。全书由路贵民统稿并任主编，柯东杰任副主编。

本书在编写过程中，东北大学温景林教授、崔建忠教授及马宏声教授给予了大力支持和帮助，在此表示衷心地感谢。同时，

作者对本书所引用或查阅的有关文献资料的著作者及相关专家表示深深的谢意。

由于作者水平所限，书中疏漏与错误在所难免，恳请专家学者斧正，作者将虚心接受并不胜感激。

编者

1998.10

目 录

前 言

1 铝及铝合金	1
1.1 铝及其合金的基本性质	1
1.2 铝合金的分类及其用途	9
2 物理化学基础知识	15
2.1 活度	15
2.2 熔体中组元的活度	23
2.3 反应的自由焓变化	27
2.4 化学反应速度	33
2.5 传质动力学	35
3 铝熔炼过程物理化学	41
3.1 铝-氧反应	41
3.2 铝-水汽反应	46
3.3 铝熔体与氮的作用	48
3.4 铝熔体与二氧化碳的作用	49
3.5 铝熔体与碳氢化合物 (C_mH_n) 的作用	49
3.6 铝熔体与氢的作用	50
3.7 铝熔体与炉衬的作用	60
3.8 铝熔体与熔剂的作用	64
3.9 铝熔炼过程中的传热	66
4 铝合金的合金化	70
4.1 铝合金化的一般概念	70
4.2 变形铝合金	72
4.3 铸造铝合金	95
4.4 耐磨铝合金	105

4.5	超塑铝合金	114
4.6	稀土铝合金	121
5	铝熔体的净化	126
5.1	铝熔体中的气体与非金属夹杂	126
5.2	铝熔体品质炉前实用评价方法	134
5.3	铝熔体净化原理	145
5.4	铝熔体净化工艺	151
6	铝合金的组织细化	179
6.1	铸锭组织对其性能的影响	179
6.2	铝钛硼中间合金中的金属化合物	184
6.3	变形铝合金的组织细化理论	187
6.4	铝合金晶粒细化工艺	203
7	铝合金铸锭缺陷及其控制	221
7.1	裂纹	221
7.2	夹杂与氧化膜	249
7.3	偏析	252
7.4	组织缺陷	259
7.5	气孔	265
7.6	缩孔与疏松	271
7.7	表面缺陷	273
8	铝及铝合金牌号和化学成分	275
8.1	中国铝及铝合金牌号和化学成分	275
8.2	国际标准化组织 (ISO) 铝及铝合金牌号和化学成分	276
8.3	美国铝及铝合金牌号和化学成分	277
8.4	日本铝及铝合金牌号和化学成分	278
	主要参考文献	349

1 铝及铝合金

1.1 铝及其合金的基本性质

铝自 1825 年首次被人类发现以来,迄今已有 170 余年的历史。1886 年, Hall-Heroult 熔盐电解法炼铝的成功,意味着铝工业化的开始。一百余年来,铝工业得到迅猛发展,铝在国民经济各部门得到广泛应用。其在金属材料的产量与用量仅次于钢铁而居第二位。铝工业得到如此迅速发展,其重要原因之一是铝在地壳中具有丰富的蕴藏量,其储量占地壳总重的 7%~8%,超过了铁蕴藏量的一倍及其他所有有色金属储量之和。除此之外,铝具有其独特的优良性能。

1.1.1 密度

纯铝在室温时的密度为 2.6987 g/cm^3 , 约为铜或铁的三分之一。由于密度小而使铝在航天航空、交通运输等领域得到了广泛应用。

不同纯度的铝密度见表 1-1。

表 1-1 不同纯度铝的密度

纯 度 /%	密度/(kg/m^3)		纯 度 /%	密度/(kg/m^3)	
	退火固态 (20℃)	熔 融 态 (1000℃)		退火固态 (20℃)	熔 融 态 (1000℃)
99.25	2727	2310	99.971	2699	—
99.40	2706	2291	99.996	2698.9	—
99.75	2703	2289	99.9998	2608.08	—

1.1.2 导热性

铝的热导率高。在金属中仅次于银、金、铜居第四位,是铁的3倍,铜的55%。如果将铝的密度小这一点加以考虑,则等重量铝的导热量是铁的12倍,铜的2倍。因此,铝材是制造热交换器、发动机部件与家庭采暖设施的良好材料。铝制散热片与铜和钢制散热片比较见表1-2。铝合金的热导率见表1-3。

表 1-2 不同材质热交换器散热片的板厚与重量

[散热量为 $0.024\text{kW}\cdot\text{mm}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$]

材 料	热导率 $/(\text{kW}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	密 度 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	所需板厚 $/\text{mm}$	重量 $/(\text{kg}/\text{m}^2)$
铝1050(L3)	0.22	2700	0.11	0.297
3003(LF21)	0.20	2700	0.12	0.324
6063(LD31)	0.20	2700	0.12	0.324
铜	0.325	8900	0.075	0.667
钢	0.046	7800	0.52	4.056

表 1-3 铝合金在 $100^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 间的热导率

合 金	热导率 $/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	合 金	热导率 $/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$
L2M、Y	234	LD7CS	155~172
L5M	234	LD8DS	159~181
L5Y	230	LD9CM	199
LF21M	203	LD9CS	163~190
LF21Y4	172	LD10M	199
LF21Y2	168	LD10CS	163~190
LF21Y	163	LY1CZ	181~203
LF2M、Y	133~177	LY10CZ	163~194
LF6M	128~146	LY11M	137~185

续表 1-3

合 金	热导率 /(W/m·K)	合 金	热导率 /(W/m·K)
LF10M	124	LY11CZ	124
LF10Y2、Y	88	LY12M	181~203
LF11M	133~155	LY12CZ	124~128
LD2M	221	LY16CZ	150~168
LD2CZ	181~191	LY17CZ	150~168
LD5CS	190~199	LY6CZ	146~181
LC3CS	168~177	LC4M	168

1.1.3 热膨胀系数

铝的热膨胀系数大,为不锈钢、铜、黄铜的 1.5 倍,是一缺点。与其他金属联接、铆接、复合时,相对产生的热膨胀差以刚性变形的形式吸收。铝-硅系合金与纤维强化铝材的膨胀系数较低。

纯铝的体膨胀系数为 $68.1 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{K}$ 。线膨胀系数列于表 1-4。

表 1-4 纯铝(99.99%)线膨胀系数

温度/K	$\alpha/(\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K})$	温度/K	$\alpha/(\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K})$	温度/K	$\alpha/(\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K})$
25	0.5	200	20.2	500	26.5
50	3.5	250	22	600	28.2
75	8.1	293	23	700	30.4
100	12.0	350	24.1	800	33.5
150	17.1	400	24.9	900	37.3

1.1.4 导电性

同其导热性一样,铝导电性仅次于银、铜和金而居第四位。

电工铝的等体积电导率可达 62% IACS, 约为铜的 60%, 等重

量铝导线的导电量超过铜的 2 倍, 因此铝被广泛应用于电线电缆工业中。LD31 合金管材在输电站得到广泛应用。电缆护套多用高纯工业铝和 LF21 合金制造。铝箔大量用于制造电容器。部分铝合金电导率如表 1-5。

表 1-5 铝合金的电导率

合金及状态	% IACS	合金及状态	% IACS	合金及状态	% IACS	合金及状态	% IACS
L2M	62	LF21Y2	41	LF5M	29	LY11CZ	30
L2Y	61	LF2M	40	LF5Y	27	LY12M	50
L5M	59	LF2Y2	40	LF5Y2	27	LY12CZ	30
L5Y	57	LF11Y1、Y2	27	LD2M	55	LD10M	50
LF21M	50	LF11M	29	LD2CS	45	LD10CS	40
LF21Y	41	LF6M	26	LY11M	45	LC4CS	30

纯度为 99.990% 的铝在 20℃ 时的电阻率为: $2.6548 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$; 等体积的电导率为 64.94% IACS。

在低温时, 铝的导电性能对纯度十分敏感, 不同纯度的铝室温与低温电阻之比列于表 1-6, 99.996% 或纯度更高的铝在 1.1 ~ 1.2K 时可成为超导体。

表 1-6 纯铝室温电阻 (R_{273K}) 与低温电阻之比

Al/ %	$R_{273K}/R_{1.59K}$	$R_{273K}/R_{4.2K}$	R_{273K}/R_{14K}	R_{273K}/R_{20K}
99.965	200	200	180	170
99.98	350	350	350	300
99.99	700	650	600	450
99.992	800	780	730	540
99.996	1850	1800	1500	1000
99.9975	2200	2150	1750	1120
99.9982	3200	3150	2500	1500
99.9992	6800	6700	400	2300
99.99997	4000	35700	—	3600
99.99998	—	45000	—	—

纯铝无光电效应,在工业纯铝中晶粒大小对导电性能的影响可忽略不计。退火材料的导电性能无各向异性,冷加工材料纵向电导率比其他方向的电导率高0.5%~1%。

1.1.5 耐蚀性

铝及其合金表面,易生成一层致密、牢固的 Al_2O_3 保护膜。这层保护膜只有在卤素离子或碱离子的激烈作用下才会遭到破坏。因此,铝有很好的耐大气腐蚀和水腐蚀的能力。能抗多数酸及有机物腐蚀。通过合金选择、包覆阴极保护合金层、进行阳极氧化处理、化学处理、涂油漆、电泳涂漆、喷涂耐蚀性粉末等措施,可进一步提高铝材抗蚀性。在使用中,采用牺牲阳极、电阴极保护,缓蚀剂等措施,可延长铝结构与铝工件的使用期限。

1.1.6 反射率

铝表面对红外线、紫外线、可见光线、激光、电波等有高的反射率。因此,铝广泛用于光、热反射材料。

1.1.7 磁学性能

铝属弱磁材料,几乎不受电磁场影响,亦无磁性。因此在通讯、电子、超导材料及计算机领域是不可缺少的材料。

铝的单晶体磁化率与晶向有关。

1.1.8 力学性能

在结构设计中,材料强度受到特别重视。铝合金的基本特征之一,是其常规力学性能随合金种类与状态的不同,变化范围极宽,抗拉强度为50MPa~800MPa,屈服强度为10MPa~700MPa,伸长率为2%~50%。另外,主要结构材料的刚性大致与其密度成比例,与合金成分及状态的关系不大。铝材的正弹性模量变化范围窄。为 $(7\sim 8)\times 10^4\text{MPa}$ 。在刚性相同的情况下,铝材的厚度

应为钢材的 1.44 倍,因此,以铝代钢,铝件厚度需比钢的大 40%: 相同刚性的铝零件重量比钢件轻 50% 左右。

在反复应力作用下,材料的断裂强度比静应力下的小得多,铝及铝合金的疲劳强度较低,成为设计上的一个障碍。疲劳强度与合金的成分、组织、状态有关,也与材料内部与外部缺陷有关,在设计与制造设备和器具时应避免孔洞与应力集中。锤击、喷丸处理等能提高工件疲劳强度。腐蚀降低疲劳强度,铝在低温下的疲劳强度升高。

常用铝合金的疲劳强度见表 1-7(试验循环次数为 2×10^7)。

表 1-7 铝合金的疲劳强度/MPa

合 金	光滑试样	缺口试样	合 金	光滑试样	缺口试样
LD2CS	110	65	LY11CZ	125	90
LD5CS	130	80	LY12CZ	150	90
LD8CS	135	70	LY16CS	130	70
LD10CS	145	85	LC4CS	160	90
LY2CZ	140	85			

包铝层降低铝合金的疲劳强度,几种未包铝的与包铝的合金板材的疲劳强度如下(循环次数为 5×10^8):

合 金	未包铝板材/MPa	包铝板材/MPa
LY 12CZ	127	91
LD 10CS	127	106
LC4CS	141	91

断裂韧性是材料抵抗裂纹扩展能力的标志,通常,塑性低的材料抵抗裂纹扩展的能力也低,LY 12、LD7 等合金在这方面优于 LC4 合金。

热处理状态对合金断裂韧性有相当大的影响。LD7 合金晶粒尺寸从 $18\mu\text{m} \sim 22\mu\text{m}$ 增大到 $50\mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$ 时,强度虽有所下

降,但抵抗裂纹扩展的能力却增加 20% 以上;退火状态的 LF6 合金的抗拉强度比冷作硬化状态的低 20% ~ 50%,而前者抵抗裂纹扩展的能力却比后者的高 52%。

1.1.9 超塑性

铝合金具有良好的超塑性。典型的超塑铝合金有:铝-钙系、铝-铜系、铝-镁系、铝-锂系、铝-稀土系、铝-镁-铜-锆系、铝-镁-钽系等。其中铝-锂系与铝-镁-钽系是最具发展前途的二种超塑合金,是理想的航天航空材料。

1.1.10 其他性能

在选材时除了要综合考虑上述性能外,还要考虑高温性能、低温性能、工艺性能(成形性能、焊接性能、切削性能、铆接性能)。

常用变形铝合金的一般特性见表 1-8。

表 1-8 常用变形铝合金的一般特性

合 金	状 态	抗 蚀 性	抗应力 腐蚀开裂 性能	成 形 性能	切 削 性能	焊 接 性 能				锻 造 性能
						钎 焊	气 焊	氩弧焊	电阻焊	
L3	Y ₂	A	A	A	D	A	A	A	A	—
LS-1	M	A	A	A	E	A	A	A	B	A
	Y ₂	A	A	A	D	A	A	A	A	A
	Y	A	A	C	D	A	A	A	A	A
	Y ₂	A	A	B	D	A	A	A	A	A
LF21	M	A	A	A	E	A	A	A	B	A
	Y ₂	A	A	B	D	A	A	A	A	A
	Y	A	A	C	D	A	A	A	A	A
LF2	M	A	A	A	D	C	A	A	B	—
	Y ₂	A	A	B	C	C	A	A	A	—
	Y	A	A	C	D	C	A	A	A	—
LF3	M	A	A	A	D	D	C	A	B	—
	Y ₂	A	A	B	C	D	C	A	A	—

合 金	状态	抗蚀 性	抗应力 腐蚀开裂 性能	成 形 性能	切削 性能	焊接性能				锻造 性能
						钎焊	气焊	氩弧焊	电阻焊	
LF5-1	Y	A	A	C	C	D	C	A	A	—
	M	A	B	A	D	D	C	A	B	—
	Y	A	C	C	C	D	C	A	A	—
LD7	CS	C	A	—	C	—	—	—	—	—
LD9	CS	C	C	—	B	D	D	B	B	C
LD10	CZ	D	C	C	B	D	D	B	B	C
	CS	D	C	D	B	D	D	B	B	C
LD11	CS	C	B	—	—	D	D	B	C	—
LD30	CZ	B	B	B	C	A	A	A	A	D
	CS	B	A	C	C	A	A	A	A	—
LD31	RS	A	A	C	C	A	A	A	A	—
	CS	A	A	C	C	A	A	A	A	—
LY1	CZ	C	A	B	C	D	D	B	B	—
LY11	CZ	D	C	C	B	D	D	B	B	C
LY12	CZ	D	C	C	B	D	D	B	B	—
LC9	CZ	C	C	D	B	D	D	C	B	D

注:性能由 A 至 D 递降。

现行加工铝合金的最高使用温度为 350℃, 主要是 LY 16 合金。室温最高的是 LC 型合金, 但它们的工作温度不宜超过 150℃。纯铝、Al-Mn、Al-Mg 系合金都不耐热, 工作温度不得超过 150℃。特别是含镁量高的铝-镁系合金, 工作温度达 100℃ 时,

Al_3Mg_2 相发生沉淀, 抗蚀性急剧下降, 性能不稳定。

在高温下使用的 LY 11, LY 12 合金应采用人工时效状态。人工时效后的 LY 12 合金工件, 可在 200℃ 下长期稳定工作。

LY2 合金可在 250~300℃ 间工作。

LD7, LD8 是常用的耐热铝合金。LD7 合金工作温度可达 250℃。LD8 合金室温强度比 LD7 的高, 但耐热性则不如 LD7 合金。

常用合金的工作温度列于表 1-9。

表 1-9 常用铝合金的推荐工作温度

合 金	最高工作温度/℃	合 金	最高工作温度/℃
L1~L6	100~150①	LY4	125~250
LF21	<150	LY6	150~250
LF2~LF6	<100②	Y11CS	150
LD2	<150	LY12CS	200
LD7	200~250	LY16	250~350
LY1, LY8	100	LY17	225~250
LY2	200~300	LC4	120~130③

注: ①高于 100℃ 时, 有明显晶间腐蚀倾向; ②温度达 100℃ 时, LF6 合金迅速软化, 抗蚀性下降; ③高于 150℃ 时, 迅速软化, 在应力作用下, 软化更快。

1.2 铝合金的分类及其用途

1.2.1 工业纯铝

所谓工业纯铝, 并非化学上的纯金属铝, 只是相对工业铝合金其含铝量更高而已。严格来讲, 工业纯铝也是合金之一。因为工业纯铝中都含有一定量的铁、硅及少量其他杂质之素。按纯度不同, 一般分为高纯铝、工业高纯铝及工业纯铝。

纯铝的强度很低, 只有经过冷作硬化来提高强度, 在变形度高

达 60%~80% 的情况下也只有 15~18kg/mm²。随着铝纯度的降低,强度有所提高,而耐蚀性、导电性及塑性则有所降低。

1.2.2 铝合金

铝合金如果根据状态图来区分,如图 1-1 所示,位于 E 点之右的合金属于铸造铝合金。位于 E 点之左的合金均可用加热的方法使之变成单相组织,所以有加工变形的可能,称之为变形铝合金。

位于 II 区内的合金,它们随温度的降低,合金元素溶解度越来越小,因而有热处理强化的可能,称之为热处理可强化的变形铝合金。

成份位于 I 区内合金,不论温度如何变化,合金的组织不起变化。故称为热处理不可强化的变形铝合金。

变形铝合金按着性能和用途不同,可分为:铝(L)、防锈铝(LF)、硬铝(LY)、超硬铝(LC)、锻铝(LD)、特殊铝合金(LT)等。

按着所含主要合金元素的不同,又可分为下列合金:

铝及不可热处理强化的铝合金系:

- (1) 纯铝;
- (2) 铝-锰系;
- (3) 铝-镁系。

可热处理强化的铝合金系:

- (1) 铝-铜-镁系;
- (2) 铝-铜-锰系;
- (3) 铝-铜-镁-铁-镍系;
- (4) 铝-镁-硅系及铝-镁

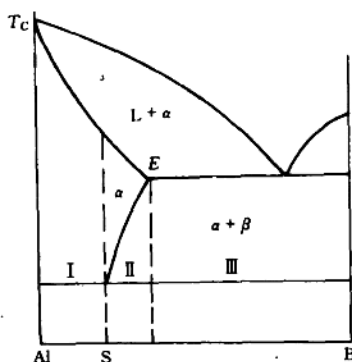


图 1-1 铝合金的分类

-硅-铜系；

(5) 铝-锌-镁系及铝-锌-镁-铜系；

(6) 铝-铜-锂系。

我国及美日等国家的铝合金牌号及标准见第 8 章。铝合金牌号不同,其性能不同,用途也不同。主要铝合金的基本特性及用途如表 1-10。

表 1-10 铝合金的基本特性与用途

系	合金牌号		基本特性	主要用途
	中国	美国		
工业纯铝	L2	1060	电导率高, 61% IACS, 有一定的强度	母线及导电线
	LG1	1080	加工性好, 表面处理性能高, 耐蚀性强。强度低, 但随着纯度的降低, 强度略有升高	标牌, 装饰件, 化工产品贮槽, 热交换器, 焊条
	L1	1070		
	L3	1050		
	L5-1	1100	除阳极氧化处理后外观稍白以外, 其他性能与 L1 等的相同	厨房用具, 热交换器, 盖, 印刷板, 建筑材料
	L5	1200		
	LG2	1090	强度比 L5-1 的稍高, 成形性能也好, 其他性能与 L5-1 的相同	厨房用具, 其他要求耐蚀性高的产品
铝铜及铝铜镁系	—	2011	切削性能高, 耐蚀性差, 强度高。要求耐蚀性时可使用铝-镁-硅系合金	轴, 光学机械零件, 螺钉
	LD10	2014	含铜量高, 耐蚀性差, 但强度高, 主要用作结构材料, 也适于加工锻件	飞机, 航天器, 齿轮, 油压零件, 轮毂衬套
	LY11	2017		
	LY12	2024		
	LY1	2217	自然时效速度缓慢	铆钉

系	合金牌号		基本特性	主要用途
	中国	美国		
铝铜及铝铜镁系	LD2	2018	锻造性能好, 高温强度高, 耐蚀性差。	汽缸盖, 活塞
	—	2218	用于锻造要求耐热性的工件	
	—	2219	强度高, 低温及高温性能好, 耐蚀性差	低温燃料箱
	—	2025	锻造性能好, 强度高, 耐蚀性差	推进器
铝锰系	—	2618	锻造性能好, 强度与耐热性高, 耐蚀性差	航空发动机油压零件
	LF21	3003	强度约比 L5-1 的高 10%, 加工性好, 耐蚀性高	厨房用品, 热交换器
	—	3004	强度比 LF21 合金的高, 深拉性能好, 耐蚀性高	饮料罐体, 电灯泡头, 屋面板, 涂漆板
	—	3005	强度约比 LF21 合金的高 20%, 耐蚀性较好	涂漆板, 建筑材料
铝硅系	—	3105	强度稍高于 LF21 合金的, 其他特性与 FL21 合金的相似	涂漆板, 建筑材料, 端盖
	LD11	4032	耐热性高, 耐磨损性能好, 热膨胀系数小	活塞, 汽缸盖
	LT1	4042	流动性好, 凝固收缩小, 硫酸液阳极氧化处理后呈天然灰色	焊条, 建筑结构外表装饰材料
铝镁系	—	5005 5050	加工性与耐蚀性好, 阳极氧化后加工性好, 往往与 LD31 合金匹配使用	建筑结构装璜、车辆、船舶内部装饰件
	LF2	5052	最典型的中等强度合金, 耐蚀性与加工性好, 有较高的疲劳强度, 抗海水腐蚀	一般用途板材, 船舶、车辆、建筑材料, 饮料罐底
	—	5652	对 5052 合金的杂质作了控制, 耐过氧化氢腐蚀, 其他性能与 5052 合金的相同	过氧化氢容器