

# 高强度变形铝合金

[苏联] И. Н. 弗利德良捷尔著 吴学译

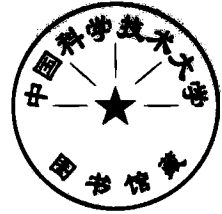
上海科学技术出版社

75.77  
165

# 高强度变形铝合金

[苏联] И. И. 弗利德良捷尔 著

吳 学 譯



上海科學技術出版社

## 內 容 提 要

本书总结了苏联和国外多年来对高强度变形铝合金的研究成果与生产经验。书中系统论述了高强度铝合金的机械性能、抗蚀性能、工艺性能和使用性能的变化规律,合金成分的选择与热处理规程的制定;还介绍了高强度铝合金半成品的生产工艺与使用特点。

本书可供从事铝合金研究和生产的工程技术人员参考,亦可供高等学校有关专业的师生阅读。

### ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

И. Н. Фридляндер

Оборонгиз

### 高强度变形铝合金

吳 学 譯

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

---

上海新华印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印张 9 28/32 插页 3 排版字数 265,000

1963年12月第1版 1963年12月第1次印刷 印数 1—2,700

统一书号 15119·1759 定价(十二) 1.45 元

15119

## 原 序

战后时期,铝在各个技术部門的应用,十分急切地提出了創制高强度铝合金的任务。

1940~1945年这一时期的主要結構铝合金,是Al-Cu-Mg系的Д16合金。最早的热处理强化的铝合金是Al-Cu-Mg系的Д1合金。Д16的出现迟于Д1二十年。Д16的强度大約超过Д1 10%,它是Al-Cu-Mg系中强度最大的一种合金。

比Д16更为优越的新的强度高合金必須在其他合金系中寻求。研究表明,最有发展前途的是Al-Zn-Mg合金和Al-Zn-Mg-Cu合金。在1924~1926年間,就已发现Al-Zn-Mg合金中某些成分的强度显著地超过了硬铝。但是,含鋅的高强度合金(Al-Zn-Mg系和Al-Zn-Mg-Cu系)在試用中却遇到了一系列十分严重的困难。新合金具有应力腐蝕的傾向和对缺口与弯曲的敏感性,承受重复載荷的持久强度低,即使用寿命短,工艺性能也較差。

为了掌握新合金,就要詳細地研究主要合金組元、一系列微量加入物和一些不可避免的杂质对合金的机械性能、工艺性能、抗蝕性能和使用性能的影响。

經過多年研究,制成了高强度铝合金B95,并已成批生产。B95的强度极限超过Д16 20%,屈服极限超过40%。这两种合金——Д16和B95,是现代飞机制造业中的主要結構材料。

1955年,在同一合金系中制成了强度更高的铆釘合金B94,并在工业生产上掌握了它。B94的强度超过当时成批生产的强度最高的铆釘合金Д16和B65 15~20%。使用这种合金,可使飞机上的铆釘数縮减約10%,并可提高其結構强度。在工业上还应用了一种新的鍛造合金B93,它具有比B95更高的橫向性能、更好

的淬透性和鑄造性。此外，还应用了强度最高的 B96 鋁合金，其强度超过 B95 10%。

这些合金不仅在航空工业中，而且在其他工业部門內，在要求材料具有高强度和低比重的結構中都得到了广泛应用。

自然，要研究与掌握新的高强度变形鋁合金，只能以国内外对輕合金所做的大量研究工作，特别是由院士 A. A. 博奇瓦尔学派和院士 Г. Г. 烏拉佐夫学派所完成的工作为基础，以我国鋁合金的生产与加工工业及其应用方面所取得的技术进步为基础。在我国，对 Al-Zn-Mg 合金和 Al-Zn-Mg-Cu 合金做了广泛研究的有：П. Я. 薩里达烏与 М. И. 札馬多林，В. Е. 沃羅維克与 С. М. 沃伦諾夫和 Ф. В. 杜良金，В. И. 米海耶娃，Д. А. 彼得罗夫及其同事。

为了对 Al-Zn-Mg-Cu 合金作进一步的研究，以便更深入地了解其性能，选定工业用鋁合金成分，以及掌握其成批生产技术，需要有人数众多的专家和研究人員积极参加。作者认为有必要提到的是：Е. И. 庫达伊采娃、В. И. 托巴特金、Р. И. 巴尔巴涅里、Ф. В. 杜良金、П. П. 毛卡洛夫、Ф. В. 茹拉夫列夫、И. Л. 高洛文、А. Г. 姆薩托夫、Е. И. 布罗娃、Э. Л. 里別尔曼、В. З. 札哈洛夫、Е. Д. 札哈洛夫、Н. М. 爱捷尔曼、И. А. 普羅斯托夫、Н. И. 札依采娃、В. И. 赫里諾娃、Н. П. 德羅諾娃、В. В. 索洛維耶娃、К. П. 雅琴舒、В. И. 馬特維耶夫、З. И. 斯塔罗斯金娜、З. А. 叶拉金娜、М. С. 阿尔捷莫娃和 С. В. 包罗沃夫。

俄罗斯联邦共和国科学技术活动家 А. Т. 杜曼諾夫，对开展高强度鋁合金的工作給予經常不断的支持，作者际此对他表示谢意。

# 目 录

## 原 序

第一章 高强度变形铝合金的工作条件及对其基本要求 .....	1
第二章 Al-Zn-Mg 合金及 Al-Zn-Mg-Cu 合金简述 .....	6
第三章 多金属系性能的变化规律与状态图类型的关系 .....	21
第四章 Al-Zn、Al-Mg 和 Al-Cu 二元合金的机械性能及热处理效果 .....	28
1. Al-Zn 合金 .....	29
2. Al-Mg 合金 .....	33
3. Al-Cu 合金 .....	35
結論 .....	37
第五章 Al-Zn-Mg 和 Al-Zn-Cu 三元合金的机械性能及热处理效果 .....	38
1. Al-Zn-Mg 合金 .....	38
2. Al-Zn-Cu 合金 .....	67
結論 .....	70
第六章 Al-Zn-Mg-Cu 四元合金的机械性能及热处理效果 .....	74
1. Al-Zn-Mg-Cu 合金的时效动力学 .....	80
2. 退火 Al-Zn-Mg-Cu 合金的性能 .....	83
3. 淬火效果 .....	86
4. 新淬火 Al-Zn-Mg-Cu 合金的性能 .....	87
5. Al-Zn-Mg-Cu 合金的时效效果 .....	90
6. 时效 Al-Zn-Mg-Cu 合金的性能 .....	96

結論 .....	105
第七章 Al-Zn-Mg-Cu 合金的抗靜应力持久强度 .....	109
1. Al-Zn、Al-Mg 和 Al-Cu 二元合金在重复载荷作用下的持久强度 .....	110
2. Al-Zn-Mg-Cu 四元合金在重复载荷作用下的持久强度 .....	116
結論 .....	129
第八章 Al-Zn-Mg-Cu 合金的抗蝕性能(应力腐蝕) .....	131
1. Al-Zn-Mg-Cu 合金成分对其抗蝕性影响的研究 .....	141
結論 .....	147
第九章 錳和鉻对 Al-Zn-Mg-Cu 合金性能的影响 .....	149
1. 錳和錳对 Al-Zn-Mg-Cu 合金时效动力学的影响 .....	157
2. 錳和鉻对 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压棒材性能和热处理效果的影响 .....	163
3. 錳和鉻对 Al-Zn-Mg-Cu 合金冷拉綫材性能的影响 .....	169
4. 錳和鉻对 Al-Zn-Mg-Cu 合金性能影响的特点 .....	171
5. 鍛造合金 B93 .....	173
結論 .....	174
第十章 鉄、硅和鎳对高强度合金性能的影响 .....	177
1. 鉄和鎳对 B95 合金时效动力学的影响 .....	177
2. 鉄和鎳对 B95 和 B94 合金挤压件、板材与綫材性能的影响 .....	179
3. 硅对高强度合金性能的影响 .....	186
4. 鉄和硅对 B95 和 B94 合金性能的共同影响 .....	187
結論 .....	188
第十一章 对高强度 Al-Zn-Mg-Cu 合金淬火、时效和退火的研究 .....	190
1. 高强度合金的淬火 .....	206
2. B95 合金在 20~300°C 时效过程中机械性能和电阻系数的变化 .....	211
3. 自然时效对 B95 合金人工时效强化的影响 .....	216
4. B95 合金的分級时效 .....	220
5. B95 合金时效中的回归 .....	229

6. B94 合金的时效	233
7. B96 合金的时效	239
8. B93 合金的时效	240
9. B94、B95 和 B96 合金的退火	241
結 論	252
<b>第十二章 高强度 Al-Zn-Mg-Cu 合金半成品的組織与性能</b>	<b>256</b>
1. B95 和 B96 合金挤压件	256
2. B95 合金鍛件和冲压件	279
3. B95 合金軋件	286
4. B94 合金铆釘絲	287
5. B93 合金鍛件和冲压件	288
<b>第十三章 高强度鋁合金制件的使用特点</b>	<b>290</b>
1. 用 B95 合金制成的結構在强度和重量上的优越性	290
2. B95 和 B94 合金的低温与高温性能	291
3. 高强度合金在振动載荷下的行为	293
4. 在靜載荷、振动載荷和重复靜載荷下缺口的影响	295
5. 工艺因素对 B95 合金抗靜应力持久强度的影响	297
6. B95 合金在輕型飞机中的使用經驗	306
7. B95 合金在重型运输机結構中的使用經驗	307
8. B94 合金铆釘的使用特点	307
結 語	308



## 第一章

### 高强度变形铝合金的工作条件及对其基本要求

为了在工业上顺利应用铝合金，应该使铝合金按照不同的工作条件满足一系列要求：具有高的抵抗静力的强度特性（高的强度极限、屈服极限和抗剪强度）和良好的塑性；此外，还应有高的弹性模量和切变模量，但要做到这一点，合金基体不經重大变化是困难的。当合金在承压结构中工作时，高的屈服极限确可显出特别大的优越性；但屈服极限与强度极限过份接近却会使半成品和零件难于矫直，因而有时又不希望两者差距过小。

合金是否具有良好的塑性，主要决定于试样的延伸率。战前和大战年代，纵向试样的平均延伸率定为12~20%。最近时期，由于转向研究高强度低塑性合金，平均延伸率降低到8~12%。同时，挤压制品的最小延伸率从10%降低到6%，板材的最小延伸率从13~15%降低到6~7%。經驗証明，虽然材料塑性降到这样低，但只要消除明显的局部断面弱化和严重的应力集中，并在零件的加工和结构的装配过程中采取一定的预防措施，这种合金结构仍然能够很好地工作。

另外，横向性能具有很大意义，特别是横向塑性，即顺制品横纹或在其宽度与厚度上切取的试样的塑性。最近几年，零件的特点是：体积迅速增大；向巨大的整体构件过渡；形状日趋复杂。结果，横向载荷增大，而零件的横向性能，特别是延伸率大大降低。由于零件形状复杂，即使是仅在纵向上承受外力的零件，也表现出横向应力。

高强度铝合金的大量使用表明，横向试样（沿零件的宽和高的方向切取）的平均延伸率最好保持在4~6%的水平，最小延伸率

不应低于3~4%，而在个别情况下，即当横向载荷仅占纵向载荷的一小部分时，最小延伸率亦不应低于2%。横向延伸率为2%的零件究竟在多大程度上是适用的，目前还不能下结论，因为没有进行足够多的试验。

要获得良好的横向性能，特别是横向塑性，不仅靠改变合金的化学成分和调整其杂质含量，还要靠改善半成品的生产工艺，特别是应用挤压坯料或锻造坯料。合金的强度愈高，制品的体积愈大和形状愈复杂，则研究半成品的生产工艺以及使用杂质含量经过准确调整的铝愈有重大的意义。

成批生产的铝合金，通常不测定其冲击韧性。实际上纵向试样的冲击韧性为1.0~3.0公斤·米/厘米<sup>2</sup>，横向试样为0.4~1.0公斤·米/厘米<sup>2</sup>。具有这种冲击韧性的材料结构，如不经受直接的冲击载荷，均可付诸使用。

高强度铝合金的一个重要特性是其抗静应力持久强度。抗静应力持久强度即试样承担低频率(每分钟8~10次循环)重复载荷时所能经受的循环次数。在技术条件上不必规定半成品都要按这种方法进行试验，但所有的新合金和重要制件都要经受这种试验。在我们的工作实践中，认为以下的试验结果即是合格的：标准的纵向缺口试样在每一循环的最大应力为试样强度极限的70%时，试样能经受1000~1200次循环。合金的强度愈大，为保证有足够高的抗静应力持久强度所需的半成品的生产工艺过程就愈要复杂化。

经受振动载荷的结构材料(螺旋桨叶、螺旋压风机零件等)，其平滑试样和缺口试样还应有高的疲劳极限。作抗静应力持久强度试验和各种振动试验时，比例的因素对材料的行为有特别大的影响。因此，仅在对构件和整个结构进行实物试验时，才有可能确切地测定合金的抗静应力持久强度和耐振强度。Я. Б. 弗利德曼指出<sup>①</sup>，钢的强度越高，对缺口的敏感性越大。这一结论也适用于高强度铝合金。

① Я. Б. Фридман, Механические свойства металлов, 2-е изд., Оборонгиз, 1952,

变形铝合金在零下温度(如 $-70^{\circ}\text{C}$ )无冷脆性倾向<sup>①</sup>,因此对它作低温试验一般没有多大意义。

如果变形铝合金要用于受热结构,那么还须试验其热强性。近几年来,铝合金的高温试验条件接近于这种结构的实际工作条件。由于飞机的使用载荷仅占破坏应力的几分之一,所以在很多情况下,即使材料长时间荷重,也不致发生显著的弱化。因此,确定材料是否适用于这种受热结构的特性指数是短时间断裂时的强度,这种断裂或者在加热到试验温度后立刻发生,或者在试验温度下保持一定时间后发生。在这段时间内,材料可以不承受载荷,或者承受不变的使用载荷,或者承受有短时间过载的使用载荷。金属的蠕变常常会成为限制性因素。有计划地进行最大限度地接近实际使用条件的试验,可以大大增加铝合金高温应用的可能性。

高强度合金还应有良好的抗蚀性,特别是抗应力腐蚀性。对这种试验现在还没有确切规定的标准。根据铝合金的多年应用实践和C. E. 巴甫洛夫作的多次试验,认为只要试样在规定的试验条件下于一个月內不致破裂,其抗蚀性即为良好。改进高强度铝合金半成品的生产工艺,可以提高材料的抗蚀性。当合金用于受压结构时,还应考虑合金在重复静载荷作用下及应力腐蚀条件下的行为,因为合金使用时会在受压区域内出现拉应力。

这样,高强度变形铝合金就应当具有高的强度特性、良好的塑性、足够的抗蚀性和抵抗重复静载荷的强度;在很多情况下还要求它具有高的疲劳极限和足够的高温强度。实现这些要求后,合金就有可能在结构中顺利地工作。此外,合金还应具有一定的工艺性能,以保证冶金工厂能生产大量廉价的半成品,机械制造厂能顺利地加工零件和装配结构,以及大量生产的半成品能有稳定的性能和质量。在合金的工艺性能中,占首要地位的是铸造性。

目前,铝合金锭仅用連續铸造法铸造。掌握連續铸造,特别是大断面锭的連續铸造,其主要困难是热裂纹的出现。此外,还可能

① С. Е. Беляев, Механические свойства авиационных материалов при низких температурах, Оборонгиз, 1940.

在鑄錠內出現局部的宏觀組織不均勻性，例如出現粗粒的金屬間化合物夾雜。合金需要進行熱態和冷態的壓力加工。高强度鋁合金的半成品在作冷矯直和冷彎曲時會出現裂紋。為了避免裂紋的出現，常常不得不使工藝過程複雜化；但是零件的彎曲和矯直都是大工序，故使其複雜化（例如加上局部預熱）極為不當。因此，高强度鋁合金具備足夠的冷塑性是有重大意義的。

根據半成品的類型或其用途的不同，還會對合金提出一些另外的要求。對鉚釘絲來說，最重要的性能是其冷態可鉚性。鉚釘合金有時作為特殊的一類分出。對鍛造合金來說，希望其熱塑性高而各向間的性能差異小。鍛造合金有時在成分上不同於其他結構鋁合金，特別是它不含可引起擠壓效應的元素。用於軋制的合金，應容易進行熱變形和冷變形。對於薄板來說，在長度和寬度上的性能差異可由於其形狀本身及足夠的冷變形性而得到消除。但對較厚的薄板和厚板來說，橫向性能（特別是“高向”試樣的性能）具有如同對鍛件一樣的意義<sup>①</sup>。看來，鍛造合金會在軋制薄板與厚板的生產中得到廣泛應用。擠壓件於結構中通常在縱向上工作，對它來說縱向性能是首要的，用加入微量加入物以引起擠壓效應現象的辦法，可以大大提高其縱向性能。因此，在這類合金中常含有如 Mn、Cr、Zr 等元素。但是，對大件型材、擠壓筋板和帶頭型材等來說，由於它們所需的最低橫向性能較高，故也可應用鍛造合金，其中不含可引起擠壓效應的加入物。

在工業上採用的變形鋁合金中（Al-Zn-Mg-Cu 系合金除外），合金 Д16 的板材和擠壓件，合金 АК8 的鍛件和沖壓件，以及合金 B65、Д16 和 Д19 的鉚釘絲，在 20°C 下具有最大的強度。應用哪一種合金，既決定於合金的強度和使用性能，也決定於其半成品和成品的生產工藝的簡易程度。如幾種合金的性質完全相同，那麼生產工藝比較簡單的合金將會得到實際應用。在研究以 Al-Zn-Mg-Cu 系為基的新合金時，必須使合金強度特性大大超過表 1-1

① “高向”試樣的縱軸垂直於軋材。

所示的各种半成品,并力求避免生产工艺的复杂化。

表 1-1 用成批生产的高强度变形铝合金 (Al-Zn-Mg-Cu 系合金除外)制成的各种半成品最低限度的性能

合 金	半成品类型	$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta, \%$	$\tau_{剪}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>
Д16	板 材	41.5~43.5	27.5~28.0	13~11	—
Д6 及 Д16	型 材	40~49	29~36	12~10	—
AK8	冲压件	44	32	10	—
В65 及 Д16	铆 钉 丝	—	—	—	25*
Д19	铆 钉 丝	—	—	—	28~27*

\* 这是铆接件的试验结果,所得的  $\tau_{剪}$  是用于结构中的铆钉的计算值。

## 第二章

### Al-Zn-Mg 合金及 Al-Zn-Mg-Cu 合金簡述

W. 桑德尔和 K. L. 麦斯納<sup>①,②</sup> 在 1923~1926 年发现, Al-Zn-Mg 合金經淬火和时效后能具有很高的强度。按照他們的看法, 这是由于形成了化合物  $MgZn_2$  的緣故。根据 W. 桑德尔和 K. L. 麦斯納的資料,  $MgZn_2$  在共晶温度下的溶解度达 28%, 在室温下降低到 4~5%。淬火后的軋制板材, 在 80~100°C 經 10 小时时效, 强度为 50~60 公斤/毫米<sup>2</sup>, 延伸率为 10% ( $MgZn_2$  含量为 9%)。1925~1928 年, 在德国曾試驗过这种合金(合金除含鋅、鎂外, 还含錳), 牌号为“結構者 8”(6.9% Zn、1.6% Mg、1.3% Mn), 但由于抗蝕性低而沒有得到应用。实际上, 用合金“結構者 8”制成的板卷, 儲存在倉庫內, 由于稍显潮湿的空氣的作用, 以及板材在淬火和卷成板卷过程中产生的应力的作用, 經過数天后即自行破裂。

近年来, 有关 Al-Zn-Mg 合金方面的研究工作在世界許多国家中都有发展, 如西德、美国、日本、英国、法国、瑞士和苏联。工作結果証明, 銅和錳会改善这类合金的抗蝕性。在西德, 由于經常試驗出銅的缺点, 于是他們就企图建立一种不含銅而能大致具有硬鋁性能的代用合金。西德的研究人員在长时期內只限于研究 Al-Zn-Mg 三元合金。

在其他国家, 力求研究出在强度方面超过硬鋁的合金; 在研究 Al-Zn-Mg 三元合金的同时, 还詳細研究了 Al-Zn-Mg-Cu 四元

① W. Sander, K. L. Meissner, Z. f. Metallkunde, v. 15, S. 180~183, 1923.

② W. Sander, K. L. Meissner, Z. f. anorganische und allgemeine Chemie, v. 154, S. 144, 1926.

合金。

1932年, L. J. 威貝爾<sup>①</sup>提出了一種含 10% Zn、2% Mg、2% Cu 及 1% Mn 的合金。前已指出, 合金“結構者 8”中加有錳。威貝爾合金中的新組元是銅。這種合金經過淬火和人工時效後, 強度極限為 60 公斤/毫米<sup>2</sup>, 屈服極限為 56 公斤/毫米<sup>2</sup>, 延伸率為 6%; 由於添加銅和錳的結果, 抵抗腐蝕破裂的性能有所改善, 但仍不完全合格。大致在同一時期, 美國提出了強度較小的鍛造合金 70S, 其中含有 10% Zn、0.4% Mg、1% Cu 和 0.8% Mn。這種合金在相當長時間內用於生產各種類型的鍛件, 這主要是因為它具有良好的熱塑性。這種合金曾被試圖用於製造熱鉚釘, 但不久就發現鉚釘頭由於腐蝕破裂而脫落。在瑞士<sup>②</sup>研究過含 8% Zn 和 1.5% Mg 的鋁合金。這種合金在熱處理狀態的強度極限為 50 公斤/毫米<sup>2</sup>, 屈服極限為 45 公斤/毫米<sup>2</sup>, 延伸率為 8~10%。

在蘇聯, П. Я. 薩里達烏及其同事<sup>③, ④</sup>曾於 1935~1936 年研究過高強度合金 ЦМ (鋅-鎂), 合金含有的鋅、鎂總量為 11%。С. Е. 巴甫洛夫和 В. А. 日加洛娃研究了這種合金的抗蝕性。研究的材料是厚 0.9 毫米的 ЦМ 合金板, 其成分(按分析)如下: 5.57% Zn, 5.41% Mg, 0.72% Mn, 0.31% Fe, 0.29% Si, 其餘為鋁。與此同時, 還研究了包復有含 15% 鋅的鋁合金的合金板抗蝕性。合金板經過在 470~480°C 下淬火, 然後在 60~70°C 下時效 36 小時, 強度極限為 52~53 公斤/毫米<sup>2</sup>, 延伸率為 14~15%。試驗表明, 一般用於應力腐蝕試驗的環形 ЦМ 合金試樣(圖 2-1), 即使在弱腐蝕介質中(蒸餾水, 空氣)也會很快破裂(圖 2-2)。只有將淬火溫度降低到 400°C, 特別是降低到 380°C, 或者在空氣中緩慢冷卻,

① E. H. Dix, Transaction of American Society for Metals, 1950, v. 42, p. 1057~1127.

② H. Hug, Schweizer Archiv, 1951, Nr. 10, S. 290.

③ П. Я. Сальдау, Изв. СФХА, 1939, т. XIX, стр. 487~497.

④ П. Я. Сальдау, М. И. Замогорин, Изв. СФХА., 1933, т. VII, стр. 31; 1938, т. XI, стр. 78.

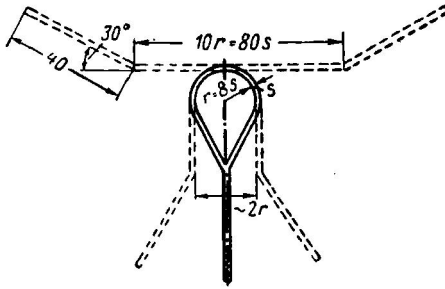


图 2-1 鋁合金应力腐蝕試驗用的环形試样图  
(С. Е. 巴甫洛夫和 К. А. 日加洛娃)

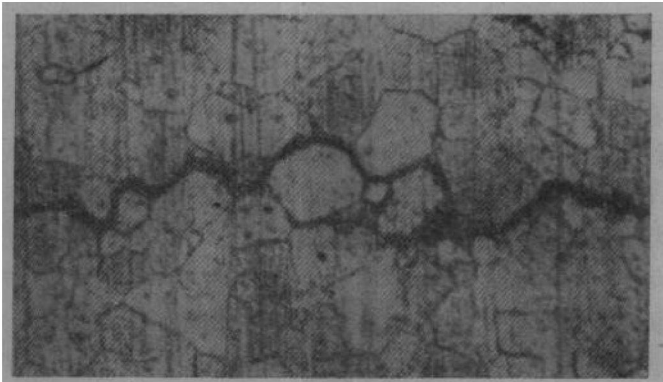


图 2-2 由于应力腐蝕(3%NaCl+0.1% $H_2O_2$ )在合金包复层中 (Al+15%Zn) 产生的裂紋。試样表面制成的磨片  $\times 200$   
(С. Е. 巴甫洛夫和 К. А. 日加洛娃)

才能显著改善抗蝕性(图 2-3)。然而,此时合金强度大大降低了。提高  $\Pi M$  合金的时效温度、延长时效時間后,合金的抗腐蝕破裂性能較之在最初时效規程(时效温度  $60^\circ C$ ) 下显著变坏(图 2-4)。 $\Pi M$  合金由于抗蝕性低而沒有得到实际应用。但是,П. Я. 薩里达烏和И. М. 札馬多林的工作,正如 В. И. 米海耶娃<sup>①</sup>对 Al-Zn-Mg

① В. И. Михеева, Химическая природа высокопрочных сплавов алюминия с магнием и цинком, Изд. АН СССР, 1947,



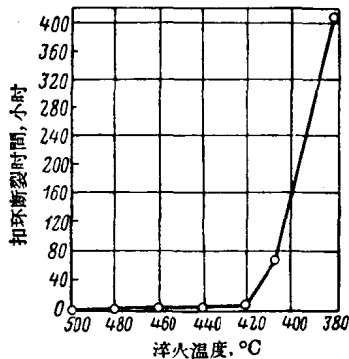


图 2-3 IIM 合金的应力腐蚀倾向与淬火温度的关系。65°C 下时效 36 小时，腐蚀介质：3%NaCl+0.1% $H_2O_2$  (C. E. 巴甫洛夫和 K. A. 日加洛娃)

系三元合金所作的研究一样，对于发展我国的高强度铝合金起了很大作用，使这类合金的研究与掌握进入了第一个重要阶段。1939年，日本曾研究了 Al-Zn-Mg-Cu 系的一种合金，即著名的被称为 ESD（超优硬铝）的合金，其成分如下：7.5% Zn、1.5% Mg、2% Cu、0.6% Mn 和 0.25% Cr。根据另一资料，ESD 合金的成分有某些不同：1.2~1.8% Mg、7~9% Zn、0.8~1.7% Cu、0.3~0.1% Mn 和 0.1~0.4% Cr<sup>①</sup>。这种合金具有很高的强度——55~56 公斤/毫米<sup>2</sup>；其中除含有锌、镁、铜、锰外，还有铬存在。Al-Zn-Mg-Cu 型合金中最先在飞机制造业中得到实际应用的大概就是这种合金。在英国，大约在 ESD 合金出现的同时，提出了 RR 77 合金。这种合金含有 5.3% Zn、2.7% Mg、0.5% Mn、0.4% Cu、0.5% 以下的 Cr 和 0.3% 以下的 Ti。稍后，在英国又研究了铜含量较高的同一类型合金 RR 88 (5.3% Zn、2.7% 以下的 Mg、1.0% Cu、0.5% Mn、1% 以下的 Cr 和 0.3% 以下的 Ti)。根据英国 1956 年的航空产品说明书<sup>②</sup>，目前 Al-Zn-

① M. Hansen, Metall, 1951, Nr. 11/12, S. 243.

② Metal Industry, Handbook and Directory, 1957, No. 46, p. 27.