

內 燃 机 全 集

H. 李斯德 主編

——第十卷——

高速內燃机的传动机构

H. 克萊姆賽 著

上海科学技术出版社

內 燃 机 全 集

И. 李 斯 德 主 編

第 十 卷

高速內燃机的傳动机构

И. 克萊姆賽 著
任 鈞 譯

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书系根据德国李斯德教授主編的內燃机全集第十卷第二版譯出。是一本关于高速內燃机傳动机构的專門著作,书中从材料、結構、剛强度、制造等方面詳尽地討論了活塞、連杆、曲軸和軸承等設計問題,作了理論上的闡述,并搜列了大量的經驗数据和有关資料。

本书可供內燃机专业的工程技術人員参考,也可作为高等学校有关专业的教学参考书。

DAS TRIEBWERK SCHNELLAUFENDER VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINEN

H. Kremser

Wien Springer-Verlag • 1949

內 燃 机 全 集

主 編 Hans List

第 十 卷

高速內燃机的傳动机构

任 鈞 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許可証出 093 号

上海市印刷六厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/16 印張 12 排版字数 233,000

1963 年 10 月第 1 版 1965 年 2 月第 2 次印刷

印数 1,801—3,800

統一书号 15119•1749 定价 (科七) 1.70 元

第一版原序

我很高兴地接受了工程博士汉斯·李斯特(Dr.-Ing. Hans List)教授的邀请,在他所主编的全集中担任高速汽油机和柴油机构造的编写工作,理由是下面这一些。

首先,我愿意将我在工作中所积累的經驗介绍给大家,特别是在从事实际工作的青年工程师們和在学习的大学生们,借以对培养德国工程技术界的新生力量有所贡献。

其次,我愿意把从大量现有的和試用証明良好的內燃机中所获得的經驗,以精簡扼要的方式推荐给設計师們,以便节约他們的工作时间。

由于本书內容較广,所以需将它分为两册。按照进行設計工作时的工作程序,本册先討論傳动机构。在本册中,发动机的构造型式(工作方式、气缸数目和排列方式)假定为已經确定。至于选择最适宜的构造型式的原則,則将在下册中結合发动机的构造加以討論。

設計发动机时,主要是依靠經驗而較少依靠計算。經典材料力学还未能充分掌握零件形状的影响,因此,除了特別简单的形状外,它不能求出零件中的实际应力,而只能求出可作比較应力平均值。因之,决定构件的尺寸,在大多数場合,具有决定性意义的乃是經驗和試驗。

經驗的运用是在于将运行中証明良好零件的尺寸轉用于新的設計中。在實踐中,多是应用零件的尺寸与发动机主要尺寸(大多是气缸直徑)的比值。这一在第八卷中根据相似关系建立的方法,經应用經典材料力学来計算出比較(名义)应力而得到补足。形状相似的构件,对于相等的断裂安全系数,可将比較应力视为相等。本书未采用計算实际情况的材料力学,因其发展得还很不充分,只可以在极其有限的情况下加以应用。

在远超出现目前工程技术水平的高速內燃机发展工作中,对于新的或新型构件的可用性,主要是通过試驗来考驗。这或是出于經濟观点,它可利用适当的設備以个别的零件在尽可能地符合于实际情况下施加負荷;或是先将这些零件在試驗机中加以試驗,然后为了防止由于材料强度性质以及工作过程不均匀而引起损坏,再作小批試驗。最后,只有在已有的經驗基础上,方能开始发动机的成批生产。

本书广泛征集了在发动机制造事业中有所創造的工程师的观点,他們担任着相当于我所担任的克罗克納-洪堡-道馳股份公司(Klöckner-Humboldt-Deutz A. G.) 高速发动机設計室主任的职位。

設計新的高速发动机是从求得发动机的扭轉振动情况开始。为了計算临界轉速,需要充分掌握傳动机构的精确情况。否則,往往在設計一台发动机时,就需要多次地作傳动

机构的选型,而后再借振動計算来校核这些选型是否合用。本书的目的是将这一費时的工作縮減到必要的程度。为此,本书将大量汽油机和柴油机傳动机构的尺寸和重量,根据构造型式和气缸数繪成图表。設計师可以获得所要制造的发动机尺寸的簡明概念,一开始就可进行傳动机构选型,并使以后不致要作多次的重复設計。

本书还概述材料的物理和机械性质,这些材料是普遍用于高速內燃机傳动机构的。

图表尽可能保持簡要的形式,以使在企业中极其忙碌的工程师能够一目了然。因之,本书只限于闡述最重要的問題,而且只列入經我自己証明对工程师們确实有用的那些原則、方法和理論。

感謝 C. 恩格利許博士(Dr. C. Englisch)协助編写活塞环的密封作用,对本书进行补充。

H. 克萊姆賽

Köln 1939 年 10 月

第二版原序

在修訂第二版时,文字及图表方面都顾及了发动机制造业中的最新发展,这一卷的内容由于加进了許多对設計师很有帮助的輔助图表及很多新型結構而充实了。

第一版的风格是可以保存的,因为就我所确知的,在工业企业的設計部門以及技术学校的設計室,对这一卷都感到很切实用。

謹向国家审定工程师 H. 柏賴吞荷佛(Dipl.-Ing. H. Prettenhofer)对本书所做的辛勤校样工作致謝。

H. 克萊姆賽

Graz 1948 年 12 月

目 录

第一版原序

第二版原序

第一篇 活塞	1
第一章 概說	1
第二章 活塞材料	2
第一节 概說	2
第二节 銅-鋁合金	4
(一) Y-合金	6
(二) Nüral 142	6
(三) EC-Y	8
(四) KS-Y	8
(五) Nüral 200	9
(六) Nüral 122	9
(七) EC 101	11
第三节 硅-鋁合金	12
(一) Alusil	13
(二) KS 245	14
(三) KS 280	15
(四) KS 1275	16
(五) Emkasil	17
(六) Emkaalsi	17
(七) Nüral 132 a	18
(八) Nüral 132 b	19
(九) Nüral 132 c	21
(十) Nüral 1761	21
(十一) EC 124	22
(十二) EC 138	24
第四节 活塞合金的热硬度	25
第三章 活塞的构造	26
第一节 高速柴油机	26
(一) 活塞重量	26

(二) 活塞长度	27
(三) 活塞銷的位置	30
(四) 第一道活塞环的位置	31
(五) 活塞环只数	33
(六) 活塞頂厚度	35
(七) 活塞环带	38
(八) 活塞裙部	38
(九) 活塞銷	38
(十) 活塞間隙	43
(十一) 活塞滑动面的表面处理	43
1. 电解氧化法	45
2. 活塞滑动面的鍍錫	45
3. 活塞滑动面的鍍鉛	45
4. 活塞滑动面的石墨化	45
第二节 高速汽車汽油机	46
(一) 活塞重量	46
(二) 活塞长度	46
(三) 活塞銷的位置	47
(四) 第一道活塞环的位置	47
(五) 活塞环只数	49
(六) 活塞頂厚度	50
(七) 活塞銷	51
(八) 活塞間隙	53
(九) 活塞尺寸概况	55
(十) 汽車发动机的活塞构型	56
1. 因瓦(Invar)活塞[納尔逊(Nelson)活塞]	56
2. 自动应温活塞	59
3. 側面切槽活塞	59
4. 光滑裙部活塞	61
第三节 活塞环	63
(一) 自張活塞环的密封作用	63
1. 气体的漏泄	63
2. 活塞密封带的压力变化	63
3. 环的張力——緊貼压力	65
4. 环的軸向高度	66
5. 环的“顫动”	66
(二) 活塞环的切口	68
(三) 刮油环	68
(四) 活塞环的緊貼压力、应力与尺寸間的关系	70
(五) 活塞环标准	70
(六) 活塞环材料	70
(七) 活塞环的加工	81
第四节 活塞銷的材料	81
第二篇 曲軸	82
第一章 概說	82
第二章 曲軸强度应力比較值的計算	83

第三章 曲軸的构造	85
第一节 高速柴油机——单列式发动机	85
(一) 气缸間距	85
(二) 連杆軸頸	86
(三) 主軸頸	87
(四) 曲柄	88
(五) 平衡重	88
(六) 曲軸端部的构造	91
第二节 高速柴油机——V型发动机	98
(一) 气缸間距	98
1. 并列式連杆.....	98
2. 叉形連杆.....	98
3. 鉸接式連杆.....	98
(二) 連杆軸頸	99
(三) 主軸頸.....	100
(四) 曲柄.....	102
(五) 曲軸端部的构造.....	102
第三节 高速汽油机——汽車发动机	103
(一) 气缸間距.....	103
(二) 連杆軸頸.....	104
(三) 主軸頸.....	106
(四) 曲柄.....	107
(五) 曲軸前端.....	109
(六) 飞輪端軸端.....	110
第四节 特种构造型式——可分式曲軸	111
(一) 凸緣連接.....	112
(二) 齿形連接.....	112
(三) 張紧連接.....	115
(四) 鉗夾連接.....	115
第四章 曲軸的材料	116
第一节 鍛造曲軸	116
第二节 鑄造曲軸	118
第三节 电阻对接焊接的曲軸	120
第三篇 連杆軸承和主軸承	123
第一章 滑油的引加和分布	123
第二章 軸承合金	128
第一节 白合金	129
第二节 鋅合金	132
(一) 鋅-鎳合金	132
(二) 鋅-銀合金	132
第三节 銅-鉛合金	134

第三章 軸承的构造	138
第一节 高速柴油机的軸承	138
第二节 汽車汽油机的軸承	144
第四篇 連杆	147
第一章 概說	147
第一节 連杆长度	148
(一) 汽車汽油机	148
(二) 高速柴油机	149
(三) 航空汽油机	149
第二章 連杆的构造	150
第一节 連杆小端	150
第二节 連杆杆身	151
(一) 爆发压力产生的压縮和挠折应力	152
(二) 杆身离心力产生的应力	153
(三) 拉伸应力	154
(四) 总应力	155
第三节 連杆大端	157
第四节 特种結構	163
(一) 斜剖分的連杆	163
(二) V 型发动机的連杆	165
1. 叉形連杆	165
2. 带铰接副連杆的主連杆	168
3. 并列式連杆	172
第五节 現有連杆的核算	174
例题 1 福特 V-8 发动机的連杆 (图 186)	174
例题 2 一台高速 V 型柴油机的叉形連杆 (图 187)	177
第六节 連杆的材料	182
参考文献	183

第一篇 活 塞

第一章 概 說

活塞的机械和热力的任务可以归纳如下:

- (1) 活塞形成燃烧室的一边界面,它借活塞环将燃烧室气密地封住;
- (2) 活塞将作用在它上面的气体压力及其本身的惯性力,通过活塞销传递给连杆;同时,将垂直于它运动方向产生的分力(导轨压力),通过它的滑动面传到气缸的导向面上;
- (3) 从气体传给活塞顶的热量,必须有绝大部分从活塞顶通过气缸壁传给冷却介质。同时,热流既不应产生过高温度,也不应由于温降而产生过大的热应力;
- (4) 活塞一般都装上刮油环,用以控制滑油对气缸导向面的激溅润滑,最重要的是防止过多的滑油润滑。

活塞作用力的情况示于图1中。气体压力 P_g 及惯性力 P_i 产生活塞力 P , 这力在活塞销的轴线上可以分解成沿着连杆方向的力 S 以及垂直于导轨的力 N 。导轨压力 N 通

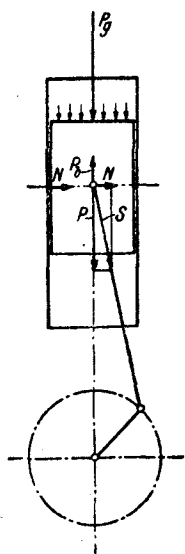


图 1

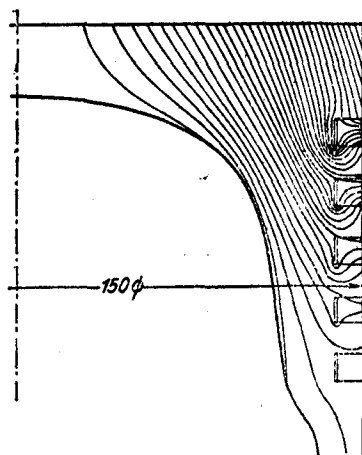


图 2 活塞中的热流(根据虎克)

过活塞滑动表面傳遞到气缸导向面上。

經過活塞的热流,由虎克(Hug)^[1]繪示于图2中。由每两根热流綫所形成的通道流过相同的热量,因此,热流綫的密度也就是热流强度的一种尺度。可以看出,热量的大部分是从活塞頂流向活塞环,并經過活塞环流向气缸壁。只有很少一部分热流是从活塞直接流向气缸壁,也更只有极小一部分,至多为散出热量的7~10%,系傳給曲軸箱內的空气。在活塞环中,第一道活塞环,有着最多的热流通道。

因此,活塞系同时处于机械負荷和热負荷之下,这些負荷对活塞的材料和它的构造提出了很高的、一部分也是互相矛盾的要求。例如,材料在高温下應該具有高的强度,然而金属的强度通常都是随着温度的升高而降低;应当具有較大的导热截面积借以散去热量,相反地,活塞的重量則應該很輕,以使慣性力处于許可的範圍內。

第二章 活 塞 材 料

第一节 概 說

在高速发动机中,为了顾及到活塞的重量以及导热能力,目前几乎只应用輕合金。因此,将只对輕合金进行較詳細的討論。对于这种材料,必須提出下列要求:

- (1) 材料应当具有非常良好的导热能力,以使沒有太大的温差即能将热量导出;
- (2) 材料应当具有优良的强度性质。首先是应具有良好的热强度,因为在活塞頂中温度可升达 350°C , 最重要的是在安装活塞环的那一部分,不要因此发生材料的軟弱現象,以防止活塞环槽被击損。具有重大的意义的是还要具有高的疲劳强度,以满足交变負荷的要求。在四冲程发动机中,交变負荷是由气体作用力和慣性力所产生的;
- (3) 材料应当只具有很小的热膨脹率,这样,冷机的活塞間隙就无需定得过大,并且也就无需采取一些减小活塞間隙的結構措施(切槽活塞等);
- (4) 材料应当能够良好地并經濟地被加工。它应当易于鑄造,亦即在开始凝固与凝固終了之間,不应当存在大的温度变化。

純金属具有最好的导热能力,而强度、硬度及耐磨性較差。合金具有較好和較合宜的强度性质,它的添加物是以固态溶液被吸收的。化学金属化合物有着高的硬度、好的滑动性能,但是非常脆弱而不能满足加工性能良好的要求。过去对良好的活塞材料所提出的要求,正如上面可以看出,是很难彼此結合的。因此,选择适用的合金,其意义就在于将所要求的各种性质,以尽可能适当的关系彼此加以綜合,并謀求協調。

輕金属材料是从銅-鋁合金的发展开始的,它早就被称为德国合金或美国合金用来制

造曲軸箱了。为了提高强度性质,以往在制造活塞时,将砂模澆鑄改为硬模澆鑄,倘使还不能满足最高負荷的要求,就采用鍛压。目前,輕金属活塞則几乎完全用硬模鑄造。用硬模澆鑄不仅可以經濟地鑄造活塞,而且还可通过硬模的冷激作用,大大地改善了强度性质。

与灰鑄鉄活塞相比,輕金属活塞具有一系列的优点:

輕金属活塞的重量較小,使发动机在允許承受的慣性力下,可有較高的轉速。

与灰鑄鉄相比的显著优越的导热性能,可使汽油机及煤气机中的爆震(見卷6)倾向大大减小,因此,可以采用較高的压缩比,由此,燃料的利用就較为有利。

在高速发动机中,首先可借輕金属活塞的良好导热性能,将傳給活塞的热量,在活塞可承受的温度下加以导出。

鋁活塞系自1921年起成批生产。以后又发现了除了銅-鋁合金之外,还有硅-鋁合金以及錳-銅-鋁合金也适合于用作活塞材料。

合金是由其組成成分在液态下混合而成。在液态下,大多数的金属是可以相互溶解的。当凝固时,大都改变了它的可溶性,此后,可以出現一系列的凝固状态。

在固体合金中,当对其显微組織进行金相研究时,可以发现它的組成成分有下列几种类别:

- (1) 純金属;
- (2) 固溶体,它是合金組成成分的固态溶体,它的存在情况如同均质物体;
- (3) 合金組成成分的化合物,它們的情况象金属一般。

当凝固时,首先是合金的个别組成成分分离析出,形成較大的初生晶体,余下的溶液,最后在形成或多或少的細小結晶混合物下同时凝固。在这剩余溶液中,即共晶体中,各組成成分系以一定的比例而存在着。

为了研究金相組織结构,可在合金的試样上加工出一精磨面,在这精磨面上,借助于腐蝕法,能使各組成成分清晰地显示出来。

可观察到的合金金相組織形态与重要性质之間的关系,对于活塞材料來說,还研究得很少,而仅仅对某些个别的性质有所肯定。利茲歇(Nitzsche)証明,对于活塞材料的抗磨性,亦即耐磨性來說,相似于軸承金属的金相組織结构是比較合宜的。在鋁-固溶体的坚韧基体中,應該布有硬而不过分大的晶体。因此,例如在硅-鋁合金中,允許共晶的硅晶体不太細致,亦即不要如同精煉的硅鋁明一般地离析出,而是大致地成为粗大的片状或針状存在。在过共晶的硅-鋁合金中,如同下面所要闡述的KS 280类似,在金相試样图中,初生晶体硅又不要过分粗大,亦即不要呈花朵图案状或是相似的形态,而呈尽可能小的多面体形状。

鋁与重金属的化合物的晶体,如 CuAl_2 、 NiAl_3 、 Cu-Ni-Al 化合物,同样地,在硅-鋁合金中不应以粗大的形态呈現。在其他的不是以硅-鋁基体組成的、其中重金属鋁化合物

系离析成負荷晶体的活塞材料,則考虑到良好的耐磨性,就要求形成尽可能均匀的共晶网状結構。

金相組織图形对活塞材料的其他重要性质,如热膨胀、导热性能的影响,还没有研究出。而某些金相組織,例如硅-鋁合金中为了力求有良好滑动性能的金相組織,对于純强度,如断裂、弯曲、疲劳强度來說,則又是不利的,因为高强度值却是需要細致的共晶硅晶体,如精煉的硅鋁明所示。由于活塞材料的强度在粗大的共晶体硅下仍是足够的,因此,在冶煉合金时,就要特別注意到应具有良好的耐磨性。

活塞由于过度的热应力而破坏和损伤,根据近代的認識,这并不只是因为硬度降低,同时也因金相組織有所轉变而引起。

第二节 銅-鋁 合 金

在銅-鋁合金的金相組織中,由图 3 可以看出,在初始析出的銅飽和的鋁固溶体軟质

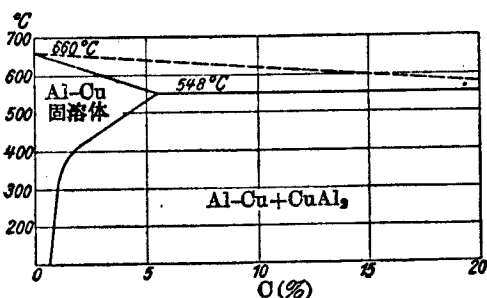


图 3 銅-鋁合金的状态图

基体中,有着銅飽和的鋁基固溶体和化学化合物 Al_2Cu 的共晶体。硬质的共晶体起着合金的負荷晶体的作用。虽然負荷晶体的导热系数小,但是合金的导热性能仍旧很好,因为常用合金中含銅量很少,对导热能力的影响也是很小的。所有的銅-鋁合金都能加以淬硬,有时当将活塞从硬模中取出时,由于冷激作用就已經淬

硬了。由于导热性能好,活塞温度就較低,因此也就能保持調质的作用。

銅-鋁合金主要是在英国和美国发展的。两国常用的銅-鋁合金种类及其組成成分見表 1。

然而,良好的导热性能及热硬性系与較大的热膨胀系数相对立的,因此,銅-鋁合金的活塞就要求有顾及到較大热膨胀的特种构造。納尔逊 (Nelson) 活塞是为人們最熟悉的銅-鋁合金活塞的构型,它是在美国发展出来的,而在欧洲大陆也应用于小客車发动机中。

銅-鋁合金的膨胀系数約 $25 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, 导热系数約 $0.30 \sim 0.33$ 仟卡/厘米·秒· $^\circ\text{C}$ 。

图 4 中示出了常用的活塞合金及其相应的导热系数和膨胀系数。

在目前,銅-鋁合金对于热負荷特別高的活塞,有着重要的意义,例如,对于航空发动机來說,热膨胀的影响較之于导热性能的影响就次要一些。

下面将闡述一些經過試驗的銅-鋁合金。

表1 含銅的鋁活塞合金

牌 号	国别	成 分								用 途
		Cu	Ni	Fe	Mg	Ti	Mn	Si	Al	
Hiduminium RR. 53	英	2.15	1.3	1.4	1.6	0.1	—	1.25	其余	航空发动机, 柴油机, 小客車及載重汽車发动机
KS-Y	德	4	2	>0.6	1.5	—	—	—	其余	固定式及汽車柴油机, 气冷及水冷航空发动机, 蒸汽机及压气机
Y-合金 L24	英			—						
Alcoa No. 142	美			0.75						
Lynite 194	美	4.6	—	0.6	0.1	—	—	—	其余	小客車发动机(罕用)
Lynite 146	美	8.5	—	1.2	0.2	—	—	—	其余	小客車及載貨汽車发动机
Bohnalite	德	10	—	>0.5	0.3	—	—	—	其余	小客車及載重汽車发动机用的标准合金
Birmalite	英									
SAE 34	美									
Birmal L8	英	11~13	—	2.0	—	—	—	—	其余	小客車发动机
Borgo	法									
Novalite G97	瑞士	13	—	0.8	0.25	—	0.6	—	其余	小客車发动机
KS 特种合金	德	15.5	0.6	0.6	0.3	—	—	0.6	其余	齐柏林航空发动机, 曼巴哈(Maybach)內燃機車柴油机

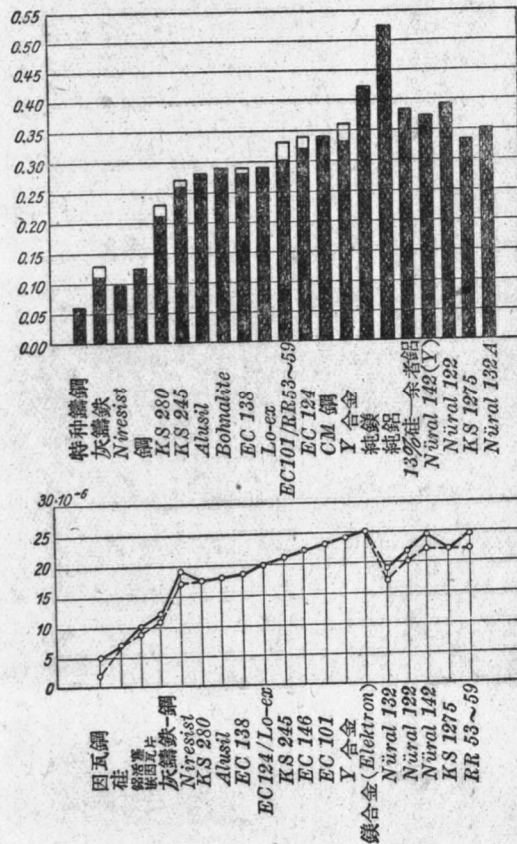


图4 活塞合金的导热系数, 仟卡/厘米·秒·°C(上图)和膨脹系数(下图)

(一) Y-合金

Y-合金是为人们所最熟悉的铜-铝合金,在英国和美国,它不仅用来制造活塞,同时也用来制造气冷式发动机的气缸头。在德国一些著名的活塞工厂也用它来铸造活塞。

这一合金的物理及技术数据如下:

比重	2.8 克/厘米 ³
熔点	640°C
浇铸温度	700~750°C
收缩率	1.3%
导热系数	0.34 仟卡/厘米·秒·°C
热膨胀系数	$23 \times 10^{-6} 1/°C$

强度数据

拉伸强度	21~28 公斤/毫米 ²
弹性模数	700000~750000 公斤/厘米 ²
伸长率	0.2~1.5%
屈服极限	约 17.5 公斤/毫米 ²
弹性极限 (0.02%)	10 公斤/毫米 ²
热硬度 100°C 时	118 公斤/毫米 ² , 布氏
200°C 时	95 公斤/毫米 ² , 布氏
300°C 时	42 公斤/毫米 ² , 布氏

(二) Nüral 142

由努伦堡 (Nürnberg) 城炼铝厂命名为 Nüral 142 的合金,是相应于 Y-合金的。它是一种包含着大的、部分趋向于树枝状结构的铝-固溶体的大网眼共晶网状物。共晶体是

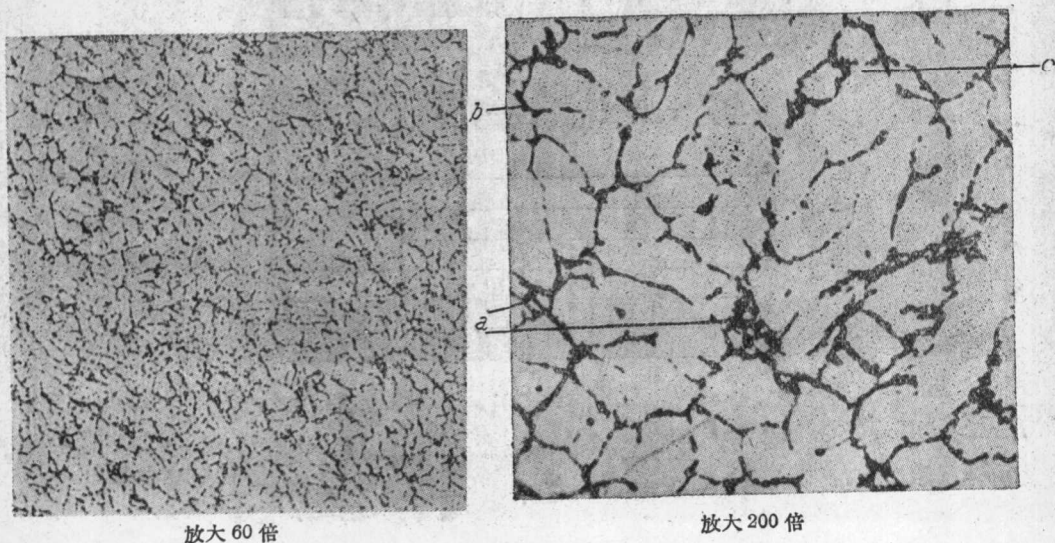


图 5 Nüral 142

由到处被 $\text{CuAl}_2(b)$ 或 $\text{NiAl}_3(c)$ 晶体切断的化合物 $\text{NiCu}_2\text{Al}_7(a)$ 组成的。由图 5~7 中可以清晰地看出它的金相组织。放大 450 倍的图 7 则尤其清晰。在这合金中, 含量并不过少的镁(1.3%)系以极微细的状态存在于铝-固溶体中。

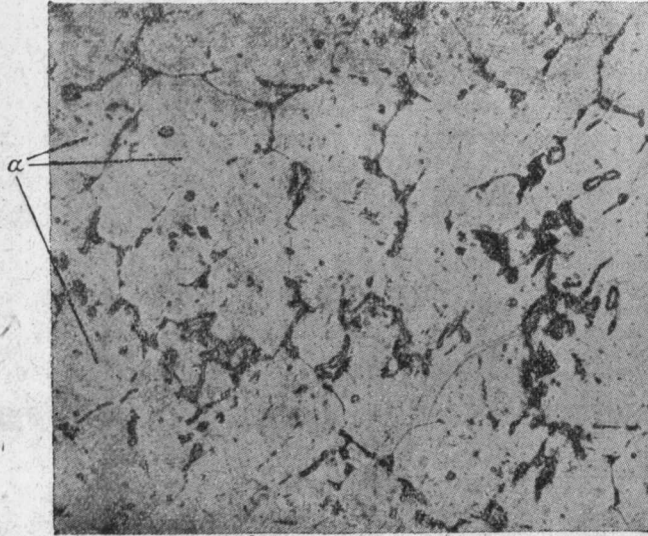


图 6 Nüral 142, 放大 150 倍

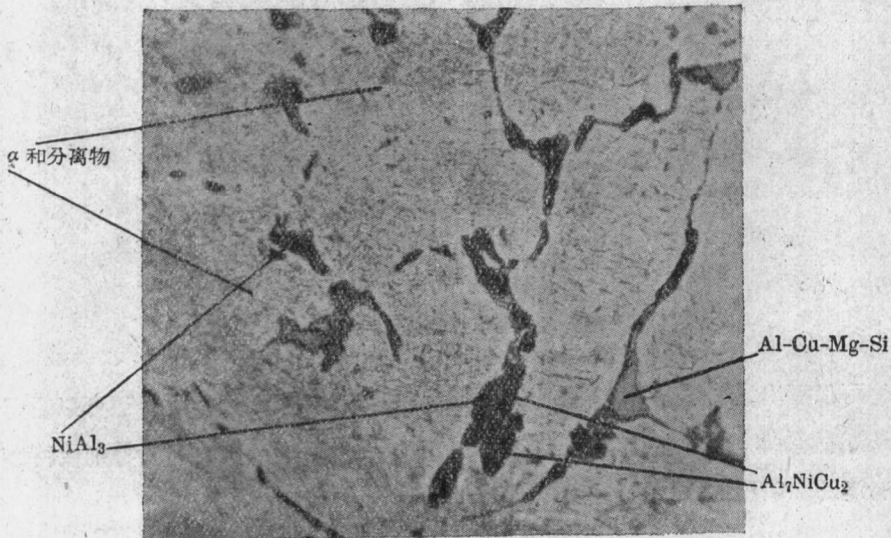


图 7 Nüral 142, 放大 450 倍

强度值与温度的关系示于图 8 中。从图中可以看出此合金在 300°C 下的良好热强度。 300°C 温度相当于高速发动机活塞顶中的温度。

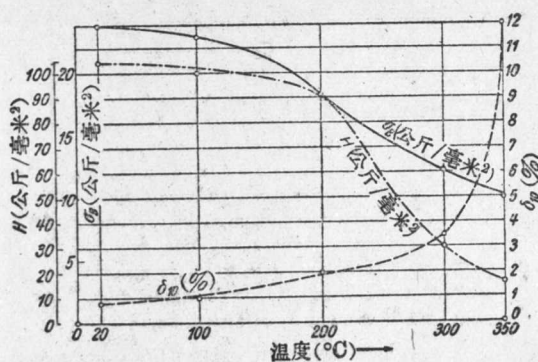


图8 Nüral 142 的热强度(淬硬过的)

(三) EC-Y

图9中所示为馬萊貿易公司(Mahle Komm.-Ges.)^①以Cu-Al-Ni为基体制成之Y-合金。这里所存在的三元共晶体是由化合物 NiCu_2Al 、 CuAl_2 及 Al-固溶体(a)組成的。

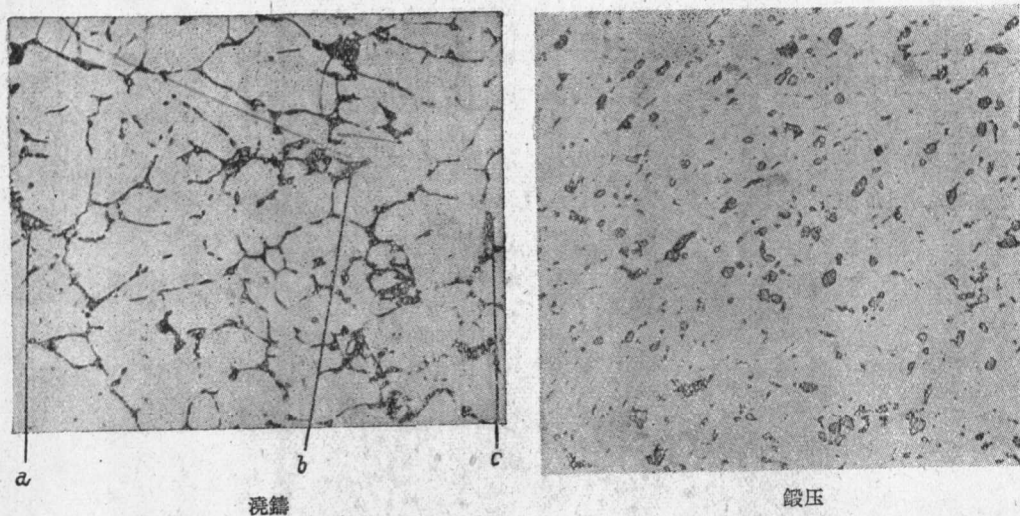


图9 合金 EC-Y, 放大150倍

很明显地可以看出, 化合物 NiAl_3 (b) 乃是二元共晶体的組成成分。此外还可以看到化合物 Mg_2Si (c) 的晶体。合金除了含有似杂质的鎂外, 还含有似杂质的硅。特別值得注意的是硬模澆鑄的和鍛压的Y-合金金相組織之間的區別。

(四) KS-Y

由奈卡尔苏城卡尔·斯密特股份有限公司(Karl Schmidt G. m. b. H., Neckarsulm)

① 原为康斯塔特城温泉“电子”鋁鋅合金股份有限公司(Elektronmetall G. m. b. H. Bad, Cannstatt)。