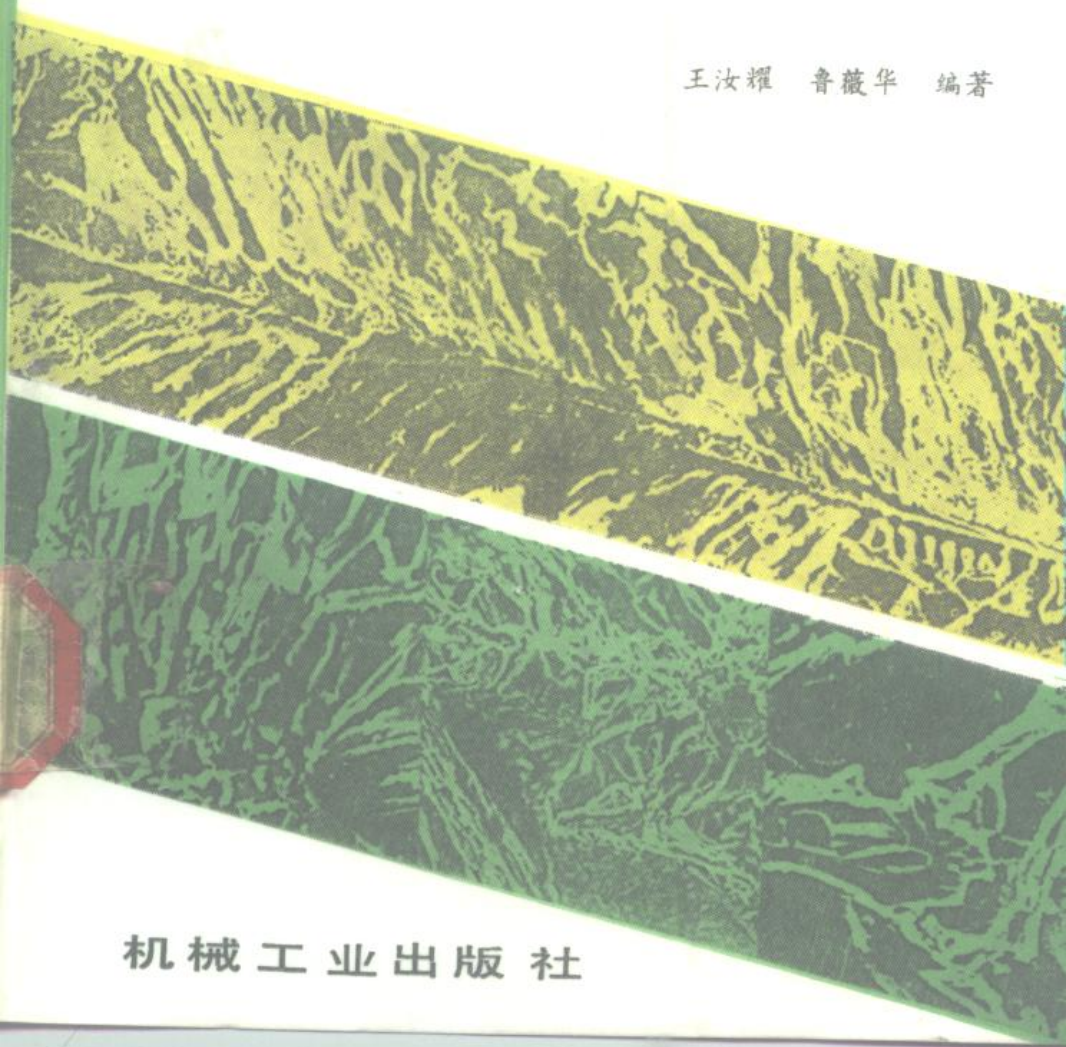


国外内燃机 铝活塞金相组织 及断口分析

王汝耀 鲁薇华 编著



机械工业出版社

014007

国外内燃机铝活塞金相组织 及断口分析

王汝耀 鲁薇华 著



机械工业出版社

014007

本书剖析了十三种国外内燃机铝活塞合金成分、金相组织和性能，着重分析硅相和铁相的形态，作者通过对比国内外活塞合金在金相组织上和性能上的差异，提出改善我国铝活塞材质的途径，并对我国当前活塞检测内容和验收规范提出不同的看法。

本书可供内燃机行业有关工厂、研究单位的工程技术人员以及大专院校师生参考。

国外内燃机铝活塞金相组织 及断口分析

王汝耀 鲁薇华 著

*

责任编辑：马九荣 责任校对：宁秀娥

封面设计：田淑文 版式设计：罗文莉

责任印制：尹德伦

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国铁道出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 3 3/4·字数 81 千字
1990 年 2 月北京第一版·1990 年 2 月北京第一次印刷

印数 001—880·定价：3.60 元

*

ISBN 7-111-01731-5/TK·73

前 言

活塞是内燃机的重要零件，其质量能否满足工况要求，直接影响内燃机的一些重要技术经济指标。近年来，我国不断引进国外先进的内燃机机型和技术，活塞承受的工作温度和压力也随之越来越大，对活塞材质的性能也提出更高的要求。例如，重量轻、低膨胀系数、高尺寸稳定性以及良好的高温机械性能等。目前铝硅系铸造合金仍属较理想的活塞材质，在国内外得到广泛应用，是制造活塞的主要材质。

1982年和1983年我国内燃机行业针对这种形势，曾先后制定了钠变铸铝活塞金相标准和性能规范 GB 3508—83和 GB 1148—82。辽宁省还制定了铝变铸铝活塞金相标准及性能规范。这些规范严格制定了硅相形态和尺寸，铁相形态、尺寸和分布的检验标准；对尺寸稳定性，室温和高温机械性能指标也作了较严格的规定，并且各项指标皆不低于国外现行规范。

本书收集到市售14个国家或公司70年代末的活塞样品，除日产公司活塞为铸铁材质外，其余皆为铝质活塞。作者观察了铝质活塞不同部位的金相组织和断口，测量了尺寸稳定性、室温和高温强度、硬度，还进行了化学成分分析。我们从近千幅金相和断口照片中选出有代表性的167幅，编成图谱，并附有化学成分和性能，以便与国产同类产品进行对比，从中找出材质和性能上的差距和追赶方向。从实测和观察结果上看，国外活塞金相组织和性能多与所公布的标准有相当大的偏差。这就启示我们应该如何借鉴国外所公布的

检测规范和要求。作者奢望本书能为提高我国内燃机活塞质量提供参考依据,能为完善我国活塞检测标准提供分析资料。

本书在编著过程中曾得到原国家机械委工程农机局朱剑秋高级工程师、郑桂高级工程师、凌庆宽高级工程师关怀和指导。洛阳工学院张静霞工程师协助拍摄了大量照片。作者谨在此对诸位同志深致谢忱。

限于作者水平和经验,本书所叙观点恐属一孔之见,错误难免,恳请读者批评指正。

作 者

1988 年 10 月

目 录

前言

第一章 说明及剖析	1
一、试验方法	1
二、硅相特征	1
三、金属间化合物	7
四、断口特征分析	12
五、性能与金相显微组织	14
第二章 金相组织及断口观察	17
一、美国 NTA 855 C型载重汽车用 Cummins 活塞	17
二、罗马尼亚 UZINA 公司轿车用活塞	28
三、苏联伏尔加汽车用活塞	35
四、英国 Wellworthy 活塞	42
五、捷克斯洛伐克塔特拉载重汽车用 MH 活塞	50
六、日本日野载重汽车用 ART 活塞	56
七、匈牙利 DCS 活塞	63
八、意大利 NOVA 活塞	68
九、联邦德国 Karl Schmidt 活塞	77
十、法国 Beiliet 载重汽车用 PDC 活塞	84
十一、联邦德国风冷 6135 军用车辆 Mahle 活塞	90
十二、日本泉公司载重汽车用活塞	96
十三、民主德国压铸及活塞厂 VEB 活塞	104
第三章 启示与建议	112
参考文献	115

第一章 说明及剖析

一、试验方法

本书共收集到联邦德国 Mahle 公司、Karl Schmidt 公司、英国 Wellworthy 公司、美国 Cummins 公司、日本泉公司和亚都金属工业公司 (ART)、意大利 NOVA 公司、法国 PDC 公司、民主德国压铸及活塞厂、捷克斯洛伐克 MH 公司、匈牙利 DCS 公司、罗马尼亚 UZINA 以及苏联伏尔加轿车等 13 种铝硅系内燃机活塞，直径多在 100~130 mm，多数用于载重汽车。用光镜观察活塞顶部、销座和裙部金相组织。上述试样经特殊制备方法处理后(简称为深腐蚀 DE)，用扫描电镜 (SEM) 观察硅相和铁相的立体形貌。各相形态划分以光镜下 100~400 倍观察结果为依据。对某些有代表性的铁相，用电子能谱仪 (ESCA) 进行相的微区化学成分分析。由活塞顶部取样 ($\phi 4 \times 25$)，根据 ISO 1966 年公布的金属材料高温拉伸测试规范进行高温抗拉张度试验。升温至 300℃，保温 0.5 h 后，以每分钟 (0.1~0.3) % 的变形速率进行加载至断裂。

二、硅相特征

目前多数国外内燃机活塞采用镶环和镶防胀片技术。本体仍以共晶铝硅铜镁镍合金 (L_0-E_x) 为主，相当于我国 ZL 109。民主德国压铸和活塞厂的产品为过共晶铝硅铜镁镍合金。日本日产载重汽车采用薄壁均质灰铸铁活塞。罗马尼

亚 UZINA 汽车活塞硅量较低，铜量较多，含镍甚少，有其特点。

金相组织大体上分为三种类型：亚共晶型、准共晶型和过共晶型。

联邦德国、日本和法国产品属于共晶成分过共晶组织，初生硅细小，数量不多，这与使用磷变质有关，本书称为准共晶型组织。英、美、苏等国的活塞属于亚共晶型组织，有枝晶初生 α -Al 相。民主德国活塞属于硅量较低（16%）的过共晶组织，它的初生硅十分粗大（约 0.04 mm），有些超过日本含 Si 23% 过共晶组织中初生硅的上限（ >0.06 mm）。国外过共晶活塞多用于风冷摩托车发动机上，载重汽车上尚不多见。

1. 共晶硅

各国活塞具有形态繁多、分布各异、尺寸变化范围甚大的硅相，与各个公司工艺规范颇有出入。

共晶硅形貌随变质工艺、化学成分和冷却速度而异。光镜下多数呈短条状，均匀、无方向性地分布在 α -Al 基体上。有些呈粒状，还有些呈细条状，甚至呈放射状分布（图 2-93）。冷却速度大时，可以在光镜下观察到孤立的等轴 Al-Si 共晶团的形貌（图 2-112）。

采用深腐蚀技术（DE），可以清楚地显示共晶硅的立体形貌（图 2-54、2-101、2-149）。Al-Si 共晶团有一个核心，这种核心容易在磷变合金中观察到。初生硅往往构成共晶团核心。形态各异的条片状共晶硅由核心向四周辐射，形成一次晶轴，再发展出二次、三次晶轴……。如此，呈扇面式向四周空间扩展。共晶团中心部分，硅相分枝多，细小、卷曲；周边部分硅相分枝少，平直、粗大。共晶团外表面构成多边

形,以六边形居多,五边形次之,如图 2-100 所示,与 Fe-C 共晶团有相似之处^[1]。这些共晶团理想状态下应为等轴十四面体。共晶团内硅相属于多晶组织,不同位相的单晶硅具有方向不同的晶面排列。日本 ART、苏联和捷克斯洛伐克 MH 活塞的共晶硅,光镜下呈颗粒状,均匀分布在共晶团内(图 2-70、2-60、2-34)。深腐蚀后,在扫描电镜下,这些颗粒状硅相在同一个共晶团内互相连结、分枝、扭曲,趋向于共晶团核心,是典型的珊瑚状组织(图 2-77)。但作者未能成功地观察到这类核心的特征。他们的晶轴也不明显。

亚共晶组织 Al-Si 合金结晶时,由于先析出粗大树枝状 α -Al 相,Al-Si 共晶团仅能沉淀在 α -Al 树枝之间,故这种共晶团不呈现等轴多面体,其外形随枝晶间隙的形状、大小而定(图 2-53)。

各国活塞不同部位金相组织变化甚大。裙部多出现方向性甚强的树枝状初生 α -Al 相(图 2-95、2-49)。顶部或者为等轴共晶组织,硅相均匀分布(图 2-131),或具有方向性不强的 α -Al 相(图 2-33)。多数活塞不能保证各部位获得均质组织。某些外国产品的硅相,无论形状或尺寸皆达不到我国 GB 3508—83 规定的指标,其中意大利 NOVA 公司的产品最为突出。

2. 初生硅相

初生硅形貌和大小视硅含量、变质工艺以及冷却速度而异。

磷变共晶合金出现少量初生硅,少数呈粒状,多数为多角块状,以四边形和六边形居多,有些呈现孪晶形貌。尺寸小的初生硅棱角钝化(图 2-131、2-134、2-141)。初生硅往往构成共晶硅的核心(如图 2-133、2-134)。初生硅数量多,

共晶团数量增加，尺寸相应减少。含 Si 16.6% 的民主德国 VEB 活塞中，初生硅相尺寸甚大(约 0.04 mm)，偏析严重，一部分呈团状，棱角钝化。另有相当一部分呈四边或六边形(图 2-155)。经深腐蚀后，用扫描电镜可以清楚看到初生硅层状组织，这是孪晶生长机制的反映，如图 2-154 所示。

3. 硅相生长特征

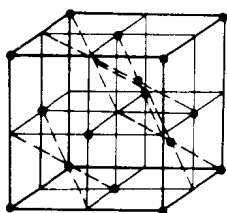


图 1-1 硅晶体结构

硅晶体属于金刚石型立方晶系(图 1-1)。 $\{111\}$ 是密排面，最稳定面，在正常生长条件下属于慢生长面，是晶体惯习面。 $\{100\}$ 是非密排面，快生长面。 $\{111\}$ 最易成为孪晶面。每个孪晶系形成孪晶凹坑，即所谓(TPRE)。硅容易沉积在孪晶凹坑沿 $\langle 112 \rangle$ 方向快速生长，

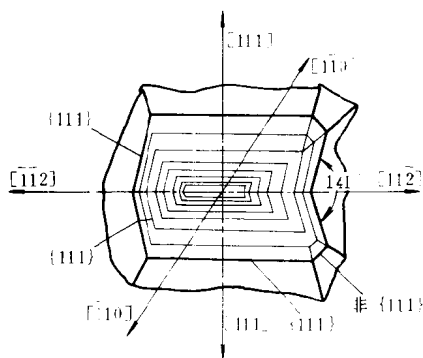


图 1-2 硅晶体孪晶生长示意图

粗线划定范围表示晶体某截面，细线表示生长台阶为孪晶面

如图 1-2 所示。生长过程中沿 $\{111\}$ 方向仍保持孪晶关系，构成台阶形貌，如图 2-154、2-126 所示。实际结晶条件下，由于温度、成分、杂质的不均匀性的影响，硅晶体内孪晶密度和生长方向将发生改变，硅相形貌也相应变化。

初生硅晶体直接从液相中析出，可以自由生长。通常认为 ALP 可以构成初生硅晶体的晶核^[2,3]，这是因为 ALP 和

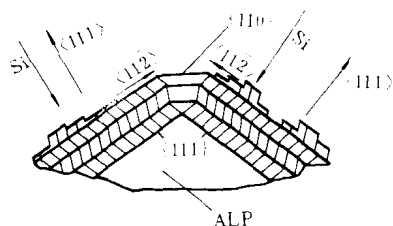


图 1-3 初生硅与AlP晶核的晶面关系示意图 (根据 [3、4] 推演)

原子从液相向硅晶体均匀扩散,可以保证初生硅沿晶核各方向均匀生长,因之,初生硅外形始终保持ALP形貌(图 2-126、2-127)^[3]。在结晶过程中,杂质、散热条件、液相流动皆会影响硅原子扩散的均匀性。因之,初生硅结晶时间越长或晶核数目越少,越难保持ALP外形。硅原子在 $\{111\}$ 面上形成的层错之间的结合力较弱,铝硅合金断裂后,可以观察到大块初生硅的解理面以及叠堆层状结构和孪晶阶梯(图 2-16 1、2-16 2、2-16 4)。

磷变共晶硅往往容易以初生硅为晶核,从初生硅角隅以孪晶方式向四周扩展生长,因之,与初生硅的生长具有类似的特征(图 2-128、2-133)。但共晶硅形态还受共晶 α -Al 的制约。

共晶硅在生长时是领先相,被 α -Al 包围,只有共晶硅尖端孪晶凹坑与液体金属接触。这种孪晶凹坑容易接受自液相扩散来的硅原子,从而促进了共晶硅沿 $\{11\bar{2}\}$ 方向发展,而硅原子通过 α -Al 固相扩散到硅晶体的速度很慢,硅晶体难以沿 $\{111\}$ 方向生长,这样就构成了条(片)状形貌。

共晶转变初期,由晶核发展出很多位向各异的共晶硅,竞相生长,互相制约,这样在共晶团中心部位出现细小、扭曲的硅条(粒)。那些生长方向平行于散热方向的共晶硅,具有优

Si 一样,都是立方晶系,晶格常数非常接近。初生硅沿ALP $\{111\}$ 表面以孪晶方式逐层生长并与晶核之间有一定的结晶学位向关系,如图 1-3 所示^[4]。初生硅大部分

外表面为 $\{111\}$ 所包围。硅

异的取向, 将迅速向液相中发展, 形成(一次)主轴而阻碍其它位向共晶硅的发展。在生长过程中, 共晶硅还不断用孪晶方式从(一次)主轴以大角度 70.5° 发展出二次轴、三次轴等。有些共晶硅出现小角度分枝、卷曲和重叠等生长方式^[5], 在共晶硅片上形成树节状结构, 使之成为条状, 如图 1-4、1-5 所示。

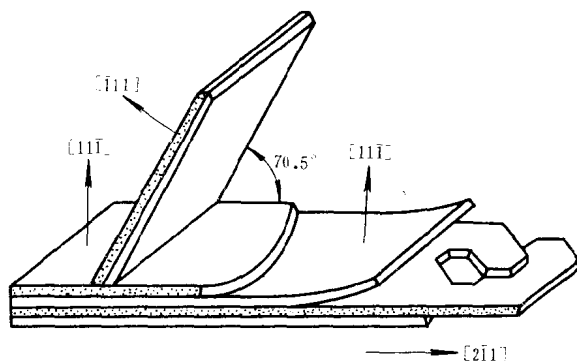


图 1-4 一个共晶硅片生长模型示意图

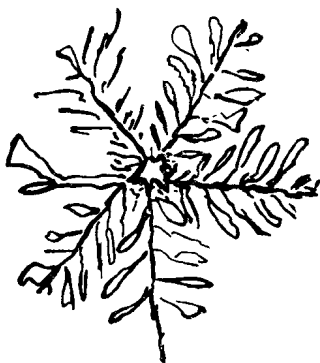


图 1-5 共晶硅形貌及生长模型示意图

钠和锑能吸附在硅的 (111) 面上^[4]。在共晶硅生长时, 吸附在孪晶凹坑面上的钠, 阻碍了硅晶体的生长, 并以钠离子层为孪晶面, 促使硅晶体产生孪晶, 不断改变硅晶体生长方向, 使硅晶体增厚, 且不形成明显的晶轴, 最终形成珊瑚状形貌, 内部则具有较高的孪晶密度。图 1-6 为钠变共晶

硅生长示意图。

富铜相的形态和组成与合金含铜量以及其它成分有关。铜量高时,出现单一的 Al_2Cu 。铜量低时,铜与其它元素形成不同组成的金属间化合物,很少形成 Al_2Cu 。

罗马尼亚 UZINA 活塞含镍低 (0.14%), 铜量高 (> 3.0%), 在初生 $\alpha\text{-Al}$ 基体上出现长条状 Al_2Cu 。

美国 Cummins 活塞含镍量稍高 (0.69%), 铜量稍低 (2.31%), 在初生 $\alpha\text{-Al}$ 基体上出现浅棕色鱼骨状 NiCuAl_6 (0.5% HF 腐蚀), 该化合物含铁量甚少 (0.2%wt)。其它各国活塞含铜量在 1.5% 左右, 光镜下可以观察到少量富铜相, 组成多为 Al、Ni、Cu。在一些复杂金属间化合物常能测量到含量不多 [(1~4)%wt] 的铜。

Al_2Cu 与 Mg_2Si 的室温硬度相差无几。但高温下, 随着时间的延续, Al_2Cu 的硬度下降较缓慢。因之, 铜比镁的热强作用大。形成 Al-Ni-Cu 相后, 可以进一步增强铜的热强作用^[6]。

3. 铁相

国外活塞中的铁相形貌各异, 例如, 点状、星块状、汉字状、鱼骨状等。作者还在英国 Wellworthy、美国 Cummins 以及罗马尼亚 UZINA 活塞个别现场中, 观察到尺寸相当大的针状铁相 (0.08 mm)。

铁相形貌变化与合金成分密切相关。后者通过改变铁相组成和结晶析出特征, 影响铁相生长过程及其形貌。在本书研究范围内, 铁量、镍量以及锰量变化范围大 [分别为 (0.26~0.68)%; (0.14~1.32)%; $\leq 0.3\%$], 是导致各国活塞铁相形态变化的主要原因。

罗马尼亚 UZINA 活塞镍量甚少 (0.14%)、锰量低 (0.05%)、铁量高达 0.68%, 出现两种类型针状铁相。少量

针状铁相组成为 Al_3Fe ，多数为 FeSiAl_5 ，属于 β 铁相。这两种高熔点铁相为斜方晶格，在液相线温度以上析出，在液相中自由生长成细长针状。随着温度下降，初生 α -Al和Al-Si共晶团在其周围析出，构成针状铁相贯穿 α -Al和Al-Si共晶团的金相组织，如图2-4所示。

在三种活塞即美国 Cummins、民主德国 VEB 和法国 PDC 中，出现鱼骨状铁相，数量多、尺寸大。三种活塞合金中的化学成分有以下特点：铁量高，接近出现针状铁相(0.7%)极限值；镍/铁不高(1.1~1.7)；锰量比其它活塞高[(0.2~0.3)%]，见表1-1。鱼骨状铁相组成以铝、铁、硅为主，锰量不等(约5%wt)，镍量很低(0.4%wt)，可写成 $\text{MnFe}_2\text{Si}_{2.5}\text{Al}_{13}$ ，与 α 铁相 $\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{Al}_{12}$ 相近。经0.5%HF腐蚀后，呈现深棕色鱼骨状形貌，四周为初生 α -Al枝晶所包围，而与Al-Si共晶团不直接接触(见图2-2)。这种 α 铁相与初生 α -Al同时在液固温度范围内析出，生长时受到 α -Al的影响^[7]。深腐蚀后，可以显示鱼骨状铁相立体形貌，酷似羽毛(图2-13)。这种铁相有一个晶核，由一侧率先生长出一次晶轴，再以一定角度向前发展出二次晶轴……，铺展成羽毛状外形，最大尺寸为0.4mm。法国 PDC 活塞含锰量较低(0.13%)，鱼骨状铁相含锰量也低，光镜下呈现浅灰色。

表 1-1

活塞种类	合金化学成分(%)			Ni/Fe	Mn/Fe	鱼骨状铁相组成
	Fe	Ni	Mn			
美国 Cummins	0.65	0.69	0.24	1.06	0.37	Al、Fe、Si、Mn、Cu(主)、Ni 少量
民主德国 VEB	0.55	0.92	0.31	1.68	0.56	Al、Si、Mn、Fe(主)、Ni 少量
法国 PDC	0.68	0.88	0.13	1.30	0.19	Al、Si、Fe(主)、Mn、Ni 少量

表 1-2

活塞种类	合金化学成分(%)			Ni/Fe	Mn/Fe	汉字状铁相组成
	Fe	Ni	Mn			
日本 ART	0.26	1.32	0.02	5.08	0.08	Al, Ni, Fe, Cu, S(少量)
日本泉公司	0.43	1.21	0.22	3.00	0.50	Al, Ni, Fe, Cu, Si, Mg (少量)
匈牙利 DCS	0.42	1.13	0.28	2.69	0.66	Al, Si, Ni, Cu, Fe, S (少量)
联邦德国 Mahle	0.36	0.89	痕	2.48	/	Al, Mg, Si, Fe, Ni, Cu (少量)
英国 Wellworthy	0.51	0.80	0.20	1.60	0.40	Al, Ni, Cu, Si, Mg, Fe (少量)
联邦德国 Karl Schmidt	0.53	0.74	0.06	1.40	0.11	Al, Mg, Si, Fe, Ni, Cu (少量)

几乎所有外国活塞皆有数量不等、尺寸各异的汉字状铁相。其中近半数活塞的汉字状铁相尺寸大, 数量多, 表 1-2 列举了这些活塞的化学成分及汉字状铁相的组成。与出现鱼骨状铁相活塞相比, 这类合金含铁量低 [(0.3~0.5) %], 锰量较低 ($\leq 0.2\%$), 镍量较高 [(0.8~1.3) %], 镍/铁适中, 大多数在 1.4~3.0。与之相对应, 汉字状铁相含镍量增加 ($> 1.0\%$ wt), 主要组成为铝、镍、硅、铁、镁, 有些含少量锰, 但各含量在相当大的范围内变动。日本 ART 和匈牙利 DCS 活塞的汉字状铁相还有少量硫。这可能是使用含硫变质剂所致。用 0.5% HF 腐蚀, 可使汉字状铁相呈现浅灰色 (图 2-132)。这种汉字状铁相在共晶转变温度范围内, 与 Al-Si 共晶团同时析出, 受到初生 α -Al 枝晶和 Al-Si 共晶团的制约, 并与共晶硅组成连续网络, 如图 2-57、2-113 所示^[7]。深腐蚀显示出封闭式炉篦状立体形貌 (图 2-56、2-58)。

在大多数活塞中可以观察到数量不多的点、块(星)、条状铁相。苏联伏尔加汽车、意大利 NOVA 和捷克斯洛伐克

MH 活塞的铁相以点、块(星)、条状铁相为主, 间或有少量其它类型铁相。与其它活塞相比, 这类活塞, 铁量甚低 [(0.25~0.40)%], 锰量不高, 镍量适中, 镍/铁较高 (2.5~3.8, 见表 1-3)。条块状铁相由铝、镍、硅、铜、铁组成, 含镍量较高 (>6.0%wt), 其它成分变化范围较大。以美国 Cummins 活塞为代表的另一种条状铁相, 含镍稍低 (<2.0%wt), 镁量甚高 (>16%wt), 可写成 $\text{FeMg}_3\text{Si}_5\text{Al}_{10}$ 。条块状铁相经 0.5%HF 腐蚀后, 皆呈浅灰色, 不因镍量不同而变更。点、块(星)状铁相主要由铝、硅、镁元素组成, 还含有少量的铁。浸蚀后呈现棕色。这类铁相在共晶转变后期析出在 Al-Si 共晶团晶界, 故而有些呈星状, 有些呈点、块状, 如图 2-34 所示。

表 1-3

活塞种类	化学元素(%)			Ni Fe	Mn Fe	铁 相	
	Fe	Ni	Mn			组 成	形 貌
日本 ART	0.26	1.32	0.02	5.08	0.08	Al, Si, Ni, Cu, Fe	浅灰色条块状
苏联伏尔加	0.25	0.94	痕	3.80	—	① Al, Ni, Cu, Si, Fe ② Al, Si, Mg, Fe (少量)	① 浅灰色条状 ② 棕色点、块(星)
意大利 NOVA	0.41	1.03	0.02	2.51	0.05	Al, Ni, Fe, Cu, Si, S	浅灰色条块状
捷克斯洛伐克 MH	0.47	1.06	0.09	2.25	0.20	Al, Si, Cu, Ni, Fe, S	浅灰色条块状

表 1-4 综合上述观察分析的结果, 表明各种形态铁相与铁、镍量的关系。锰量低时, 铁量和镍量支配着铁相形态。应该指出, 大多数外国活塞皆允许出现汉字状铁相和一定尺寸的鱼骨状铁相。因之, 允许铁量稍高, 再用镍控制铁相形