

喷射成型8009耐热铝合金 组织性能及热加工工艺研究

张荣华 马劲红 崔岩 姬爱民 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

喷射成型 8009 耐热铝合金 组织性能及热加工工艺研究

张荣华 马劲红 崔 岩 姬爱民 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 简 介

本书主要介绍了喷射成型 8009 耐热铝合金成分、组织随温度的演变规律、合金的热变形行为以及合金的后续致密化工艺,为制备出性能合格的耐热铝合金坯件提供技术支持。全书共分 7 章,主要内容包括:快速凝固耐热铝合金、快速凝固 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的制备方法、喷射成型 8009 耐热铝合金组织性能测试及热加工工艺实验、喷射成型 8009 耐热铝合金沉积态组织和性能的研究、喷射成型 8009 耐热铝合金塑性变形行为研究、喷射成型 8009 耐热铝合金挤压成型工艺研究、喷射成型 8009 耐热铝合金锻造致密化工艺研究。

本书主要供从事喷射成型研究的研究人员、技术人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

喷射成型 8009 耐热铝合金组织性能及热加工工艺
研究/张荣华等著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 8
ISBN 978-7-5024-6646-6

I. ①喷… II. ①张… III. ①耐热铝合金—研究
IV. ①TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 167643 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 王佳祺 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6646-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版, 2014 年 8 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 4.375 印张; 129 千字; 130 页

26.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010)65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

耐热铝合金具有良好的室温及高温力学性能、耐蚀性能及成本低等优点，耐热铝合金的研究开发始于 20 世纪 70 年代，经过几十年的发展，先后研究开发了 Al-Fe 基、Al-Cr 基、Al-Ni 基等系列耐热铝合金，其中以美国联合信号（Allied Signal）公司开发的 Al-Fe-V-Si 系列耐热铝合金最具有应用前景，目前已经在西方发达国家的军事领域获得应用，主要应用于制造飞机蒙皮和轮毂锻件、发动机零部件、火箭用的薄厚板和锻件、导弹的尾翼、波音飞机的着陆齿轮等。目前，在实际中获得应用的该系列耐热铝合金均是通过平流铸造/粉末冶金（PFC/PM）工艺制备的，存在着工艺流程长、成本高、氧含量不易控制等缺点。从 20 世纪 80 年代开始，国内外研究人员开始探索利用喷射成型技术制备耐热铝合金，并取得了一定的进展。本书通过对喷射成型 8009 耐热铝合金的组织演变规律及锻造成型工艺的研究，制备出具有优良综合性能的耐热铝合金材料。

利用 PFC/PM 工艺制备的 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金，在组织上的主要特征就是在合金基体上弥散分布着细小的、单一的球状 $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 耐热相。这种耐热相具有良好的高温稳定性，是材料在高温条件下保持较高强度的根本所在。在喷射成型过程

中, 由于冷却速度相对较低, 合金中除了形成球状 α - $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 耐热强化相外, 还形成了一些其他的高温不稳定的第二相。随着温度的升高, 这些高温不稳定相可能会发生聚集、长大、多边形化等, 甚至转变为有害的 θ - $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 等平衡相, 导致合金的性能下降。

喷射成型 8009 耐热铝合金坯件的相对密度只能达到 95%, 必须经过进一步的致密化加工才能获得实际应用。常用的致密化工艺包括热挤压和热锻造。利用热挤压工艺制备的合金材料, 缺陷消除彻底, 能够获得良好的力学性能, 但在实现大规格致密件方面存在着一定的难度; 锻造工艺的致密化程度虽然低于热挤压工艺, 但能弥补热挤压工艺在制备大规格致密件方面的不足, 因此受到众多研究人员的重视。

本书主要介绍了喷射成型 8009 耐热铝合金成分、组织随温度的演变规律、合金的热变形行为以及合金的后续致密化工艺, 为制备出性能合格的耐热铝合金坯件提供技术支持。

本书第 1~4 章由张荣华撰写, 第 5 章由张荣华、马劲红撰写, 第 6 章由张荣华、崔岩撰写, 第 7 章由张荣华、姬爱民撰写。

由于作者水平所限, 加之时间仓促, 书中不足之处, 恳请广大读者和专家批评指正。

作 者

2014 年 5 月于河北联合大学

目 录

1 快速凝固耐热铝合金	1
1.1 快速凝固耐热铝合金研究开发	1
1.2 快速凝固耐热铝合金的应用	3
1.3 快速凝固 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的组织结构	4
1.3.1 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金中的主要强化相	5
1.3.2 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金中的热稳定性	7
1.4 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的性能和应用	8
1.4.1 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的性能	8
1.4.2 8009(Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si) 耐热铝合金的性能	12
1.4.3 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的应用	16
参考文献	17
2 快速凝固 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的制备方法	22
2.1 粉末冶金法	22
2.1.1 快凝制粉	22
2.1.2 平流铸造	24
2.2 喷射沉积法	25
2.2.1 喷射成型过程	25
2.2.2 喷射成型法的主要优势	28
2.2.3 喷射成型技术的研究进展	30
2.3 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的加工	31
参考文献	33
3 喷射成型 8009 耐热铝合金组织性能测试及热加工工艺实验 ...	37
3.1 实验流程	37

3.2	合金坯件的制备	38
3.2.1	喷射成型设备	38
3.2.2	合金成分	39
3.2.3	喷射成型实验	39
3.3	Gleeble 热模拟实验	40
3.4	热挤压实验	40
3.5	力学性能测试	40
3.6	锻造实验	41
3.7	密度的测定	42
3.8	合金组织观察与分析	42
4	喷射成型 8009 耐热铝合金沉积态组织和性能的研究	43
4.1	沉积坯件的微观组织	44
4.1.1	沉积坯件的金相组织	44
4.1.2	沉积坯件室温的 TEM 组织	44
4.1.3	沉积坯中的微观不均匀性形成机理	50
4.2	温度对喷射沉积态合金显微组织的影响	52
4.2.1	喷射成型 8009 耐热铝合金的 DSC 曲线	52
4.2.2	喷射成型 8009 耐热铝合金经保温后的组织	52
4.2.3	沉积态合金的 X 射线分析	62
4.3	本章小结	63
	参考文献	64
5	喷射成型 8009 耐热铝合金塑性变形行为研究	65
5.1	快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金在 25~400℃ 范围内变形行为	66
5.1.1	快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金 25~400℃ 范围内力学性能随拉伸温度的变化	66
5.1.2	快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金 25~400℃ 的拉伸变形应力-应变曲线	67
5.1.3	喷射沉积 Al-Fe-V-Si 合金 25~400℃ 压缩变形应力-应变曲线	68

5.1.4 快凝 Al-Fe-V-Si 合金 25~400℃ 塑性变形微观 机制与中温脆性机理的探讨	70
5.2 喷射成型 8009 耐热铝合金在 360~480℃ 范围内塑性 变形行为	80
5.2.1 喷射成型 8009 耐热铝合金高温压缩应力-应变曲线	80
5.2.2 喷射成型 8009 耐热铝合金高温塑性变形的 Zener-Hollomon 本构关系	83
5.3 喷射成型 8009 耐热铝合金高温压缩的 TEM 组织	86
5.4 Gleeble 热模拟压缩试样的 X 射线分析	89
5.5 本章小结	90
参考文献	91
6 喷射成型 8009 耐热铝合金挤压成型工艺研究	95
6.1 热挤压工艺参数的确定	97
6.2 喷射成型圆锭挤压过程中应力、应变状态与金属流变规律	98
6.3 挤压态合金组织观察和力学性能	100
6.3.1 挤压态合金的显微组织观察	100
6.3.2 挤压态合金 X 射线分析	103
6.3.3 挤压态合金力学性能	104
6.3.4 挤压态合金拉伸断口分析	106
6.4 影响挤压制品组织性能的主要因素及其影响规律	108
6.4.1 挤压温度	108
6.4.2 加热时间与加热方式	112
6.4.3 挤压变形系数与制品截面形状	116
6.5 本章小结	118
参考文献	119
7 喷射成型 8009 耐热铝合金锻造致密化工艺研究	120
7.1 锻造工艺的选择	120
7.2 工艺参数的确定	122
7.2.1 加热温度的确定	123

7.2.2 包套的选择	123
7.3 试验结果与分析	124
7.3.1 锻件的金相组织	124
7.3.2 锻件的 TEM 组织	126
7.3.3 锻件的力学性能	126
7.3.4 锻件的断口分析	127
7.3.5 锻件的相对密度	129
7.4 本章小结	130
参考文献	130

1 快速凝固耐热铝合金

1.1 快速凝固耐热铝合金研究开发

铝合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀等优点，广泛用于军工和民用部门。航空航天及军事工业等领域的发展，对铝合金的各项性能要求越来越苛刻，不仅要有高比强度、高比硬度、强耐蚀性，还要具有更优良的高温稳定性能。但是传统的铝合金材料，如 2000 系列和 7000 系列的高强铝合金，只能在 170℃ 以下使用，在高温条件下，由于合金中的强化相发生严重粗化而导致性能下降，使得大多数常规铝合金材料丧失了应用的可能性^[1]。某些铸造铝合金耐热强度虽然可能比变形铝合金高，但其塑性加工性能差，而且耐蚀性差。目前，在航空航天、军工领域，绝大部分耐热部件是用耐热钢和钛合金制备的，这不利于减轻飞行器的重量和降低制造成本。自 20 世纪 70 年代以来，随着快速凝固粉末冶金技术的发展，研究人员开始对耐热铝合金进行广泛和深入的研究，并开发了一系列快速凝固粉末冶金耐热铝合金，如 Al-Fe、Al-Cr、Al-Ni、Al-Fe-Ce、Al-Fe-Mo-V、Al-Fe-V-Si 系等。这些铝合金的有效使用温度扩展到了 300℃ 以上（图 1-1）^[2]，因而极有希望取代传统上在 300~400℃ 耐热合金中占统治地位的钛合金，成为航空航天、军工领域结构材料的首选合金^[2]。因此，研制耐热强度高、耐腐蚀性能好，同时又有良好加工性能的铝合金，对于军工和民用（尤其是航空航天）均有重大意义。

快速凝固耐热铝合金的最初研究工作始于 20 世纪 70 年代。快速凝固耐热铝合金由于具有优良的性能，广阔的应用前景，在全球范围内一直受到广泛的重视。它们大多以 Al-Fe、Al-Cr、Al - Ni 等为基，再添加 Ce、Mo、V、W、Zr 或其他过渡族元素，以获得稳定而弥散

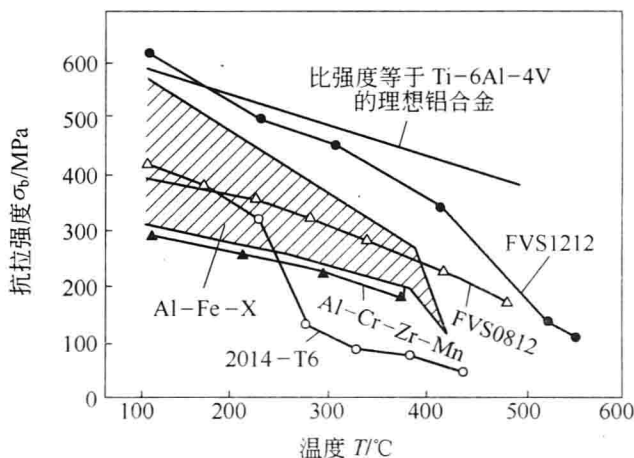


图 1-1 快速凝固耐热和常规铝合金屈服强度与温度关系曲线

分布的亚稳第二相粒子。迄今为止，研究较成熟的快速凝固耐热铝合金可以分为四大类^[3]：以 Al-Fe-Ce 和 Al-Fe-Si 合金为代表的 Al-Fe 系合金；以 Al-Cr-Zr (-Mn) 合金为代表的 Al-Cr 系合金；以 Al-Ti-Zr-V 合金为代表的析出相/基体界面能低的耐热铝合金；以 Al-Mn-Si 和 Al-Cr-Y 为代表的含高体积分数强化相颗粒的耐热铝合金。其中 Al-Fe 系研究得最为成熟。

1974 年，G. Thursfield^[4]研究了 Al-Fe 二元系及 Al-8Fe-X 三元系 (X 为 Cr、Mn、Zr 等)，制取了强度较高的材料。从此快凝 Al-Fe 基、Al-Cr 基耐热铝合金的研制工作迅速展开，并于 20 世纪 80 年代中期先后提出了 Al-Fe-Cr、Al-Fe-V-Si^[5]等系列快速凝固耐热铝合金。

美国 Alcoa 公司对 Al-Fe-Ce 三元合金研究较早。Alcoa 公司采用平流铸造法 (PFC) 制备出薄带或细线，然后将它粉碎成 250 μ m 的粉末，采用挤压或轧制方法固结成型制得型材，其中以 CU78 (Al-8Fe-3.4Ce)、CZ42 (Al-7Fe-6Ce) 和 Al-8.4Fe-7Ce 为代表^[6]。这三种合金已经投入商业化生产。此外，Pratt and Whitney 公司开发了 Al-Fe-Mo 系耐热铝合金，如 Al-8Fe-2Mo^[4]。

在上述较成熟的合金中，最为引人注目的是由美国 Allied Signal 公司采用平流铸造工艺研制开发的 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金，三种最新的 Al-Fe-V-Si 合金 FVS0812 (Al-8.5Fe-1.3Fe-1.7Si)、FVS1212

(Al-12.4%Fe-1.2%V-2.3Si) 和 FVS0611 (Al-5.5%Fe-0.5%V-1.1Si) 被认为最有工业应用前景^[7,8]。

国内对耐热铝合金的研究起步较晚,但自 20 世纪 80 年代后期以来,该领域的研究工作一直十分活跃。中南大学先后对 Al-Fe-Ce 和 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的制备工艺、组织和性能等进行了初步探讨^[9];郑州大学则侧重于对 Al-Fe-Ce 和 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的显微组织与热历史的研究^[10~12];北京有色金属研究总院利用喷射成型技术制备了 Al-Fe-V-Si 耐热铝合金,并与北京科技大学合作,在合金中添加 TiC 颗粒进行增强,提高了合金的性能^[13];中科院金属研究所结合快速凝固耐热 Al-Fe 系合金的制备,对耐热铝合金的微观组织和性能进行了分析与探讨^[14,15]。

1.2 快速凝固耐热铝合金的应用

在相当一段时间里,快速凝固耐热铝合金研究目的明确,主要针对航空航天用飞行器的耐热零部件,如飞机轮毂、火箭壳体、导弹尾翼、航空发动机叶片等。总体上,要求材料具有良好的室温、高温强度与塑性。然而,对于飞机、航空发动机的结构件,要求在 315℃,保留 10000h,室温、高温性能几乎无损失,而火箭、导弹飞行时间短、速度快,表面驻点温度达 225~425℃,对高温短时强度提出了更高的要求^[16~22]。

快速凝固耐热铝合金在美国已进入商业化应用阶段,达到工业化生产水平,已开发制造了包括薄板、挤压件以及锻件等一系列产品。研究表明,以快速凝固耐热铝合金替代钛合金在飞机和导弹上应用,可以明显地减轻飞行器重量,降低成本。以飞机发动机为例,可减轻重量 15%~25%、降低成本 30%~50%、提高运载量 15%~20%,经济效益可观^[16~23],满足了现代科技对新型材料提出的“高性能、高可靠性、低成本”的要求。

除了航空航天领域外,快速凝固耐热铝合金在其他工业领域也有广泛的应用前景。如用以制造常规铝合金无法服役的汽车发动机活塞、连杆等高温构件,其目标性能还不明朗,但可预计大致与航空发

动机的相似。

目前,快速凝固耐热铝合金的产品主要有挤压管、棒、型材、轧制薄板与厚板、大型锻件、轧环、线材以及旋压封头等产品,用来制造如飞机机翼、机身等结构件、大型轮毂、导弹壳体与尾翼、航空发动机气缸、轻质铆钉与紧固件,以及汽车的活塞、连杆等耐热零部件。图 1-2 为美国 Allied-Signal 公司研制的 PFC Al-Fe-V-Si 合金 (FVS0812) 导弹尾翼与锻环。快速凝固耐热铝合金日趋成熟,将在航空航天、交通运输等领域得到广泛的应用。

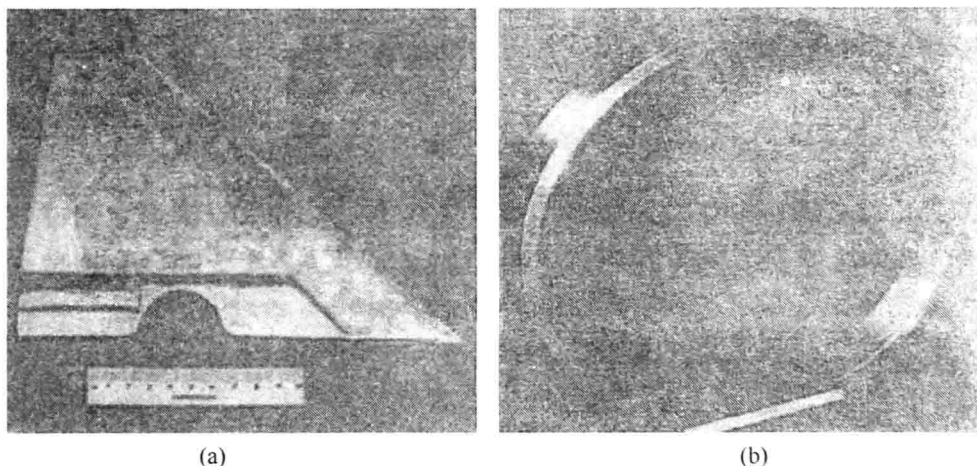


图 1-2 美国 Allied-Signal 公司研制的快速凝固
PFC Al-Fe-V-Si 合金 (FVS0812) 制品^[21]
(a) 导弹尾翼; (b) 锻环

1.3 快速凝固 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的组织结构

快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金最早是由美国 Allied-Signal 公司研究发现的。由于 Fe 和 V 在铝中的固溶度低且扩散系数小,故选择了 Al-Fe-V 合金进行研究^[24]。在研究过程中,发现其中某个炉次合金的耐热性能明显好于其他炉次,进一步分析发现,该合金中的硅含量比其他合金明显高。对合金的熔炼过程分析,在使用含 SiO₂ 的坩埚进行熔炼时, SiO₂ 被还原成 Si 进入了铝液。Si 进入铝合金后,形成了

$\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$, 而 Al-Fe-V 三元系的其他合金中却没有这种析出物^[25]。均匀析出的硅化物 $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 是一种弥散强化相, 它使合金具有很好的高低温综合性能。这样的偶然发现让 Al-Fe-V-Si 这种优异的快速凝固耐热铝合金进入了材料学家的视野。

1.3.1 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金中的主要强化相

快速凝固耐热铝合金研究的基本原理: 采用大量的在铝基体中具有极小的平衡极限固溶度和极小的固态扩散系数的过渡族元素 Tm (包括 Fe、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、W、Zr、Mo、Nb、Co 等), 有时也加入一定量的 Si 或稀土元素, 进行合金化, 通过平面流铸造, 熔体雾化、喷射沉积等快速凝固技术, 也可采用机械合金化, 实现其高合金化的目的, 尽可能地获得高度合金化的完全过饱和固溶体, 并在随后的加热、固结过程中控制过饱和固溶体的脱溶和第二相颗粒的粗化, 获得“在亚微米量级的铝基体上均匀地分布着体积分数高达 15%~40% 的纳米量级金属间化合物颗粒”的理想典型组织。这样, 合金组织具有良好的热稳定性, 且可以充分发挥弥散强化、细晶强化和固溶强化效应, 从而使材料获得高强、耐热、耐蚀等一系列优异性能^[26~34]。

快速凝固 Al-Fe-Si 系合金中含有亚稳相 $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$, 晶体具有良好的对称性, 多呈球形; 但其结构不稳, 易转化成单斜 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 和六方 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 相。然而通过加入第四组元 (如 W、Cr、Mo、Mn、Nb 等) 部分替代 Fe 原子^[35~38], 形成 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{X})_3\text{Si}$ 型化合物, 从而使硅化物结构稳定性和抗粗化能力均大大提高。以添加 V 的作用最为显著。

快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金中主要强化相为 $\text{Al}_{12}(\text{FeV})_3\text{Si}$ 硅化物, 体心立方晶格, $a = 1.260\text{nm}$, 空间群 I_{m3} , 其结构描述如图 1-3^[39] 所示。空心 (Fe+V) 正二十面体位于体心立方点阵的阵点上, 互相平行, 每个正二十面体都沿着平行于 (111) 方向的重轴与 8 个近邻相连, 连接原子形成一个略有压缩畸变的 (Fe+V) 八面体, 每个 (Fe+V) 二十面体中含有一个空心 (Al+Si) 正二十面体, 具有与 (Fe+V) 二十面体相同的取向, 它们也由三个略有畸变的 (Al+Si)

八面体所构成并相互连接。然而，8个可能的正二十面体近邻中只有5个通过这样的八面体连接，余下的（Al+Si）占据原始立方位置，从而保持其 bcc 对称性。该硅化物的化学成分会随合金的 Al/Si 比和 Fe/V 比不同而发生变化，相应地会使晶体点阵常数有所变化，相的粗化率也有所变化，但随 Fe/V 的不同， $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 的粗化率在 $8.4 \times 10^{-27} \sim 2.9 \times 10^{-29} \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内。有人认为可能存在一种与 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 构造相同的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_{3-5}\text{Si}$ ，其粗化率为 $8.4 \times 10^{-27} \text{ m}^3/\text{h}$ 。另外也有文献指出，该硅化物应为 $\text{Al}_{12-14}(\text{Fe}, \text{V})_{3-5}\text{Si}$ ，其中， $\text{Fe}/\text{V}=5 \sim 11.5$ ，立方结构，点阵常数随成分不同而不同，在 $1.2587 \sim 1.2620 \text{ nm}$ 之间^[20,39,40]。因此，在实际合金成分设计时，通常可通过 Al/Si 比和 Fe/V 比的控制，获得理想、稳定的硅化物颗粒。

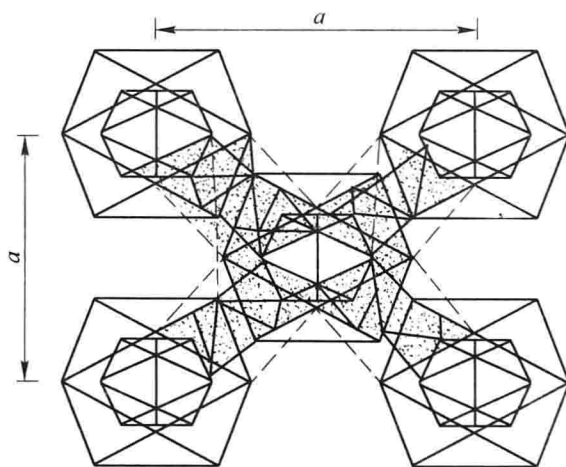


图 1-3 $\text{Al}_{12}(\text{FeV})_3\text{Si}$ 结构示意图

细线—（Al+Si）；粗线—（Fe+V）

快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金通常需含 10% ~ 15% 的过渡族元素，而欲获得组织状态良好的快速凝固初级产品，通常要求冷速较高。在快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金中 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 质点十分细小，主要是由快速凝固过饱和微胞枝晶、微共晶或二十面体准晶分解而来。因此，快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金通常需采用平面流铸造法或冷速较大的雾化法来实现其快速凝固，减少或消除由粗胞结构或粗共晶组织构成的分区组织，即在光学显微镜下，近乎完全均匀的呈光学无特征形态的“A

区”组织；在电镜下，多为微胞状/微枝晶组织，铝基体为 Fe-V-Si 固溶体，胞间区域则为任意取向的 10~30nm 的硅化物颗粒。只有这样，经合适加工才能形成含单一立方结构的细小、均匀弥散第二相 $\text{Al}_{12}(\text{FeV})_3\text{Si}$ 颗粒的理想组织的材料。但在实际生产中不可避免地会出现一些其他的热稳定性较差的耐热相。

1.3.2 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金中的热稳定性

$\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 硅化物的粗化率要比其他 Al-Fe-X 系中强化相的粗化率低 4 个数量级，这主要得益于该化合物与铝基体的相界为低界面能共格界面。这种低界面能共格界面的形成一方面归因于硅化物晶格常数接近于铝基体的三倍 ($a_0 = 0.4049\text{nm}$)；另一方面，也与其特别的晶体结构有关，连接 (Al+Si) 正二十面体的八面体链位于硅化物晶体的 $\{112\}$ 面上，大小与铝基体的八面体尺寸相当，因此，两者局部具有良好匹配，而以 5 轴对称排列，形成高度重合阵点的界面，硅化物 $\{112\}$ 面夹角与铝基体 $\{222\}$ 面夹角相等，均为 109.47° 。因此，D. I. S. Kinner 认为硅化物和铝基体存在着如下取向关系： $\{112\}$ 硅化物// $\{111\}$ 铝基体， $\langle 111 \rangle$ 硅化物// $\langle 110 \rangle$ 铝基体。但徐永波认为位于硅化物与铝基体的界面处含 50A 原子的非晶层，表现为不确切的取向关系，而晶内则有确切的取向关系： $\{110\}$ 硅化物// $\{110\}$ 铝基体， $\langle 110 \rangle$ 硅化物// $\langle 111 \rangle$ 铝基体^[41,42]。

关绍康^[43,44]等人也对快速凝固 Al-Fe 基合金的原始条带及退火组织进行了 TEM 分析。原始条带截面组织按准晶可分为三个区域：无准晶区、准晶形成区、准晶分解区。在 698K 保温 1h 发现中间区的准晶开始晶化，组织形貌类同铸态组织的准晶分解区，说明原始组织中准晶相的晶化是在凝固过程中由于结晶潜热的释放而进行的，并且准晶的晶化始于准晶相与基体界面处。J. C. Lee, S. Lee^[45]等对 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si（质量分数，%）进行热暴露实验，在 427℃ 暴露 100h 后室温拉伸性能保持基本不变，在超过 427℃ 以后，拉伸性能突然下降，脆性断口出现。在 482℃ 暴露 100h 在拉伸断口可以观察到 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 生成。脆性断口的出现是由于粗化的 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相的出现，这可能在 427℃ 以上高温时由粗大的硅化物弥散体转变而成。

众多的研究表明，快速凝固 Al-Fe-V-Si 合金以仅存在 α -Al 固体和第二相 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 硅化物，其韧性、塑性为最佳，而这种两相 ($\text{Al}+\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$) 材料的强度、耐热性通常随着硅化物体积分数提高而提高，该硅化物线膨胀系数约为 $1.16 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ，这使得其相应的合金在 300~650K 温度范围里的线膨胀系数与 4000 系高硅铝合金的相当，而且具有良好的比刚度，只是韧性和塑性则呈下降趋势。在选择制造高强、高模量、高耐热性组合的构件时，FVS0812 和 FVS1212 在保证韧性、塑性时是一种优秀的材料。

1.4 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的性能和应用

1.4.1 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的性能

Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金是一种弥散强化合金，有着良好的室温、高温综合性能，其理化特性和力学性能分别见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的理化特性^[43]

合金成分	密度 /g · cm ⁻³	线膨胀系数 /K ⁻¹	热导率/W · (cm · K) ⁻¹	电阻率 μ /Ω · cm	弥散强化相 体积分数 /%
Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si	2.92	22×10^{-6}	1.05	6.3	27
Al-6.5Fe-0.6V-1.3Si	2.83	24.6×10^{-6}	—	—	16
Al-11.7Fe-1.3V-1.7Si	3.02	21.6×10^{-6}	0.88	—	36

表 1-2 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金力学性能^[3]

合金	方向	温度 /℃	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	弹性模量 E/GPa
FVS0812 挤压材	L	24	390	437	10	88.4
	T		387	440	10	
FVS0812 轧制材	L	150	340	372	7	83.2
	T		335	372	5	
	L	204	312	341	8	73.1
	T		307	344	7	