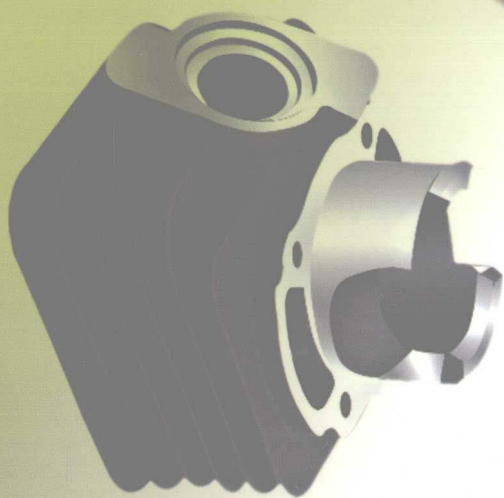


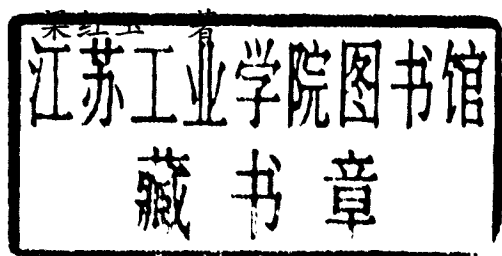
梁红玉 著



高硅铝合金材料 快速凝固技术

兵器工业出版社

高硅铝合金材料快速凝固技术



兵器工业出版社

内容简介

铝硅合金作为耐磨材料,在机械工业中得到了广泛应用,特别是含硅量在18%~26%的过共晶铝硅合金是理想的发动机轻质耐磨材料。但是,采用普通铸造工艺生产过共晶铝硅合金时,粗大的硅相严重割裂了基体的连续性,使合金的强度、韧性显著下降。

本书从雾化制粉实验装置设计、雾化工艺参数对粉末材料特性的影响规律、过共晶铝硅合金快速凝固组织演变规律、粉末材料致密化和金属流变规律、热挤压工艺参数对材料微观组织的影响等方面对高耐磨超低膨胀系数高硅铝合金材料进行了系统的分析研究,并介绍了该材料在大功率坦克发动机缸套中的应用。

图书在版编目(CIP)数据

高硅铝合金材料快速凝固技术/梁红玉著. —北京:兵器工业出版社,2008.5

ISBN 978-7-80248-016-2

I. 高… II. 梁… III. 含硅合金:铝合金-凝固-研究
IV. TG146.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第019159号

出版发行:兵器工业出版社

发行电话:010-68962596, 68962591

邮 编:100089

社 址:北京市海淀区车道沟10号

经 销:各地新华书店

印 刷:中北大学印刷厂

版 次:2008年5月第1版第1次印刷

印 数:1—1000

责任编辑:刘燕丽

封面设计:李 晖

责任校对:全 静

责任印制:赵春云

开 本:850×1168 1/32

印 张:6

字 数:159千字

定 价:29.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 快速凝固铝硅合金的性能特点及其应用前景	2
1.3 快速凝固铝硅合金块体材料制备工艺	11
1.4 合金液滴冷却凝固及粉末微观组织形成机理研究 现状	21
1.5 快速凝固高硅铝合金材料研制尚存在的问题	34
1.6 主要研究目的及内容	35
1.7 实验研究总体技术路线及方案	36
第2章 试验合金成分及雾化实验装置	39
2.1 试验合金成分及制备工艺	39
2.2 雾化实验装置设计	41
2.3 雾化实验装置性能指标	48
第3章 雾化工艺对粉体质量的影响	49
3.1 引言	49
3.2 雾化粉体质量的评定指标	49
3.3 雾化正交实验设计	50
3.4 雾化正交实验结果分析与讨论	51
3.5 雾化工艺参数对粉体质量的影响	56
3.6 雾化制粉机理初探	62
3.7 本章小结	64
第4章 过共晶 Al-Si 合金快速凝固组织演绎规律	67
4.1 引言	67

4.2	雾化场中的气体流速及温度	68
4.3	合金液滴的运动及传热	70
4.4	形核率	75
4.5	初生Si相的扩散控制生长	76
4.6	群体动力学	77
4.7	数值计算结果	78
4.8	实验验证	87
4.9	讨论	90
4.10	本章小结	91
第5章	Al-Si合金快速等轴凝固界面响应函数及组织选择	93
5.1	引言	93
5.2	共晶合金各相及组织竞争生长	94
5.3	共晶合金快速等轴凝固界面响应函数	95
5.4	Al-Si合金快速等轴凝固组织形态演化	101
5.5	本章小结	108
第6章	高硅铝合金粉末热挤压成型过程分析及工艺参数	
	对制品微观组织的影响	110
6.1	引言	110
6.2	热挤压模具及相关实验装置设计	112
6.3	实验过程	118
6.4	粉末坯料热挤压过程应力应变状态及金属流变规律	118
6.5	粉末粒度对热挤压过程及挤压缺陷的影响	122
6.6	热挤压工艺参数对挤压制品微观组织影响	129
6.7	本章小结	138
第7章	快速凝固高硅铝合金粉末挤压制品性能分析及在实际生产中的应用	140
7.1	引言	140

7.2 实验过程	141
7.3 挤压制品性能分析	143
7.4 发动机缸套有限元分析	156
7.5 本章小结	163
第8章 主要结论	165
参考文献	172
后 记	184

第1章 绪论

1.1 引言

为了大幅度提高汽车、赛车等的使用性能,对其核心部件——发动机功率密度及自重的要求越来越高。我国几代汽车技术的发展,在伴随着发动机功率成倍增长的同时,发动机的体积和质量也越来越大,由此产生了严重的结构超重问题,致使发动机的性能受到影响,成为制约汽车工业发展的关键因素之一。采用新的高性能材料制造发动机零部件、减轻发动机运动部件质量和传动阻力等是提高发动机性能的有效途径^{[1][2]}。

铝硅合金作为耐磨材料,在机械工业中得到了广泛应用。特别是含硅量在18%~26%的过共晶铝硅合金,具有密度小、热膨胀系数低、导热性好、足够的高温强度和耐磨性等特点,是理想的发动机轻质材料。但是,采用普通铸造工艺生产过共晶铝硅合金时,粗大的硅相严重割裂了基体的连续性,使合金的强度、韧性显著下降。当硅量超过14%时,即使变质处理也很难消除硅相的不利影响^[3]。

随着现代工业的发展,尤其是汽车、航空、航天工业的特殊需要,要求铝硅合金进一步提高耐磨性、耐热性,降低线收缩率及密度,在合金成分上表现为高硅含量及合金化。显然,常规的合金材料及铸造工艺远远不能满足要求。近几年研制开发的快速凝固新材料为航空、航天工业用高性能材料开辟了一条新路。

快速凝固技术是制备高性能的高硅高合金化铝合金材料的一种有效手段,是其他制备技术难以实现的一种高新技术,结合后续

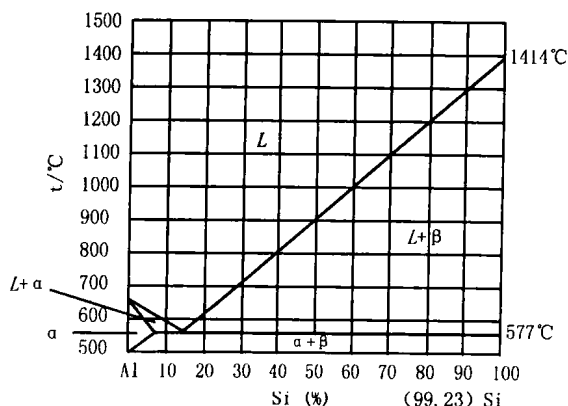
成型与加工手段,开发制造大马力发动机钢套以代替铸铁或钢制发动机缸套,可以获得较大比例的减重效果。例如:高硅铝合金缸套与铸铁或钢制缸套替换;替换每一个缸套可减重 6kg,整个发动机可减重 36~48kg,并可相应减轻发动机附座支架的结构质量以及相应底盘部分的加强筋框架及底甲板质量。此外,缸套与缸体铝合金相容性好,加工、装配、维修效率高,可以提高成品率,降低发动机总成费用;低的热膨胀系数可使配缸间隙减小,可以提高燃油爆发压力的做功指数,减小侧向压力,降低缸套与活塞环的摩擦磨损量,从而提高发动机的综合性能;高硅铝合金缸套与铸铁或钢制缸套替换,还可以降低侧向敲缸噪声,节约能源,满足环境排放的要求;同时,高硅高合金化铝合金材料导热系数高,也有利于提高升功率指数。

可以看到,国外已经成功开发出用于汽车、赛车、航天飞机等的发动机缸套专用铝合金材料。而目前,国内各种车辆、飞机所使用的大马力发动机仍使用铸铁或钢制缸套,因此,开发高耐磨超低膨胀系数铝硅合金缸套材料对提高我国汽车及航空航天工业的技术水平,增强国际竞争力具有积极的意义。

1.2 快速凝固铝硅合金的性能特点及其应用前景

1.2.1 铝硅合金性能特点及应用

铝硅二元合金具有简单的共晶型相图,如图 1-1 所示。室温下只有 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\beta(\text{Si})$ 两种相。 $\alpha(\text{Al})$ 的性能和纯铝相似,而 $\beta(\text{Si})$ 的性能和纯硅相似。从图中可看到硅在 α 固溶体中溶解度随温度升高而增加,室温下仅溶 0.05%Si,而在 577℃时可溶解 1.65%Si,超过该限度时,硅以 β 相存在, β 相中只能溶解极少量的铝,因此,可近似看作纯硅相。Al-Si 系合金中,成分为 Al-12.5%Si 的合金,在 577℃(850K)时发生共晶反应,形成 $\alpha+\beta$ 二元共晶相。

图 1-1 铝硅二元合金共晶型相图^[4]

以Si为主要合金元素的Al-Si合金是最重要的铸造合金。铝硅合金中的硅相有很高的熔化潜热(为1.65kJ/g而铝仅为0.395kJ/g)^[5]。并且,铝硅合金具有定温下进行的共晶反应,从而使铝硅合金具有很好的流动性;硅的线膨胀系数小(约为铝的3/10),高硅含量的铝硅合金线收缩率也随之降低,热裂倾向相应减少;硅晶体有很高的硬度,在软的铝基体上分布着许多硅晶体硬质点,从而赋予该合金优异的耐磨性能。随着含硅量的增加,合金密度的减小,有助于减小部件不平衡质量的动力作用水平。正因为这样,含硅量达13%~26%的过共晶铝硅合金具有热稳定性高、耐磨性好、线膨胀系数低等优点,是理想的耐磨材料。

铝合金活塞材料,最初主要是Al-Cu-Ni-Mg系及Al-Cu-Si系合金。这两类合金由于热膨胀系数大、密度大、体积不稳定、铸造性能差等原因,逐渐被淘汰。后来,人们开发出含12%Si以下的铸造工艺性能优良的亚共晶Al-Si系合金。随着工业技术的发展,人们又找到了改善硅形态,大幅度提高合金性能的变质技术,因而20世纪30年代以来,共晶系的Al-Si合金用于活塞,得到了迅猛的发

展。近20年来,随着发动机功能的日益强化,具有密度小、热膨胀系数低、导热性好、又有足够的高温强度和耐磨性的过共晶 Al-Si 合金,特别是含硅量在 18%~26% 的铝硅合金逐步成为了重要的活塞材料,并已经广泛用于生产^[3]。比如德国的 KS282,其含硅量为 24%~26%;法国的 AS-25UNG,其含硅量为 23.5%~27%;还有美国用于制造汽车活塞及空调压缩机摩擦副零件的 A390,其含硅量为 16%~18%^[6]。我国也研制了相应的过共晶铝硅合金 ZL131, 76-1 等,但种类较少,尚处于进一步开发、研制和推广阶段^[7,8,9]。

1.2.2 快速凝固铝硅合金的性能特点

通常对快速凝固的理解是指通过高的冷却速度或大的过冷度,获得凝固前的较大的推移速度(大于 1cm/s)。实现液态金属的快速凝固主要有两种方法,即传统的熔体急冷法和深过冷技术。其中,急冷法是通过使结晶潜热迅速散失达到快速冷却;而深过冷技术是通过消除异质晶核获得的过冷度,从热力学角度,提高其结晶生长驱动力。急冷和深过冷改变了熔体凝固过程中的晶体形核和传热、传质规律,使金属在液固相变过程中远远偏离平衡状态,因而初生相的形核和生长会随着冷却速度及过冷度的不同而发生相应的改变。

从工程意义上讲,快速凝固技术为亚稳态材料的制备创造了条件,如成分亚稳的过饱和固溶体;结构亚稳的非晶、准晶;形态亚稳的微晶纳米晶和弥散相等^{[7]~[9]}。因而快速凝固技术是一种研制新型合金材料的技术,应用这一技术不仅可以改善现有牌号合金的微观组织结构,还可以研制在常规铸造生产条件下无法得到的,具有优异性能的新型合金,这一技术正在许多部门的实际生产中得到广泛应用^[10]。

快速凝固技术问世于20世纪60年代。Dixon^[11]首先利用粉末

冶金法制备含45%Si的铝合金,其初晶Si细小均匀。70年代,又对含Si从25%~45%的二元或三元铝合金进行研究^[12],制取了高耐磨快速凝固高硅铝合金。80年代,特别是日本,对快速凝固高硅铝合金进行了广泛的研究^{[13]~[16]},并首次将其应用于生产。到了90年代,对快速凝固高硅铝合金的研究进入鼎盛时期,除日本外,荷兰、法国、挪威、美国等国家相继展开了这一领域中的研究工作。

近年来国内在这方面也进行了广泛的研究,主要集中在中南工业大学、哈尔滨工业大学及沈阳金属研究所等科研院校。基本上处于基础研究阶段,研究的内容涉及合金成分设计、制备工艺、组织变化及性能等各个方面^[17]。

采用快速凝固技术制备铝合金,主要目的是扩大铝的固溶度,形成亚稳相^[18]。而对于Al-Si系合金,采用快速凝固技术,提高了冷却速度,不仅有效地扩大了硅在 α 相中的固溶度,而且,抑制了初生硅相的形核和生长。这样,即使硅含量高达45%以上,合金组织仍十分细小,无大块状初生硅相的出现。正因这样,采用快速凝固技术制备的高硅含量的Al-Si系合金可显著地改善合金的耐磨性和热膨胀性,同时合金的抗拉强度也得到很大提高。例如,采用快速凝固技术制备的含硅20%的Al-Si系合金中,初生硅尺寸仅 $1\sim 8\mu\text{m}$,当加入一定量的Cu、Mg、Fe等合金元素后,合金可得到明显的弥散强化和沉淀强化。该合金在常温条件下其抗拉强度可达500 MPa以上,150℃时的抗拉强度在400 MPa以上,延伸率仍保持在1%左右,密度为 2.8g/cm^3 。因而,它成为了理想的发动机轻质材料^[19]。适当降低Al-Si系合金中硅含量(约含12%Si),同时加入Fe、Mn、V、Ni等合金元素,或直接采用Al-x(x指Fe、Mn、V、Ni等)系快速凝固合金,均可获得较高的抗拉强度,并具有良好的耐疲劳性能的合金材料,而这类材料正是承受动载荷结构件的理想替代材料。例如,Al-12%Si-7%Ni-5%Mn-0.6%Mg-0.45%Zr快速凝固合金,粉末挤压态在150℃和250℃的抗拉强度,分别保持室

温时的80%和50%；而250℃时的弹性模量仅从常温时的95GPa降到70GPa，延伸率由3%增加到13%；一百万次疲劳试验后，其常温时的疲劳强度为170MPa，而150℃时其疲劳强度仍保持在150MPa。该合金还具有较高的断裂韧性。除此之外，快速凝固Al-12%Si-5%Fe、Al-20%Si-5%Fe-2%Ni等合金的疲劳强度也比铸造铝合金(Al-12%Si-1%Cu-1%Mg-2%Ni)高，这也是近年来粉末冶金材料研究工作的一大进展^{[3][18][30]}。

部分快速凝固铝合金的化学成分及性能见表1-1所示。此外，快速凝固铝合金中，虽然含有大量的硅和其他合金元素，但可加工性仍然很好，与同种成分的铸造合金相比，刀具磨损量显著减小，其原因是快速凝固合金中硅相和金属间化合物结构十分细小和均匀。由于快速凝固铝合金加工所能达到的精度与普通铸造铝合金没有多大差别，因此，适当地选择刀具材料，刀具磨损问题不会成为此类合金应用的障碍^{[18][30]}。

表1-1 部分快速凝固铝合金的化学成分及性能表^{[19][20]}

化学成分		Al-Si①	Al-Si-x②	Al-x③	Al-C④
性能		低膨胀、 高耐磨	低膨胀、 高耐磨	高强度	低膨胀、 高耐磨
制备方法⑤		PM	PM或SF	PM或SF	PM
延伸率(%)		0.5~4.0	0.5~3.0	3~15	9~15
洛氏硬度(HRB)		70~90	70~100	40~75	30~40
密度(g/m ³)		2.6~2.7	2.7~2.9	2.8~3.0	2.7~2.8
弹性模量(GPa)		83~100	90~105	85~88	80~83
热膨胀系数 ×10 ⁻⁶ /℃		15~18	16~21	18~22	23~25
抗拉 强度 (MPa)	常温	400~500	450~600	300~500	250~400
	100℃	350~450	350~550	250~450	200~350
	200℃	250~350	300~450	200~350	150~280
	300℃	80~100	80~150	200~300	120~230
	400℃	—	—	30~80	70~150

注：①Si含量为12%~35%；②Si含量为12%~35%，x表示Fe、V、Ni、Mn等元素，x含量为1%~10%；③x表示Fe、Ni、Cr、Mo、V等元素，x含量为1%~15%；④C含量≤3%；⑤PM表示快速凝固粉末冶金法，SF表示快速凝固喷射沉积法。

1.2.3 快速凝固高硅铝合金的应用及发展展望

高硅铝合金系是快速凝固铝合金中的主要系列之一,早已引起了各国的重视,许多国家进入了实际应用阶段。例如,日本、美国、荷兰、德国等,利用高硅铝合金的高弹性模量、低密度、高耐磨性(特别是抗咬合磨损性)和高强度,将该合金成功地用于制造汽车发动机、压缩机、空调机及电子行业的抗磨损件。仅日本用于制造压缩机部件的快速凝固高硅铝合金材料已达到600多吨^[3,5,6]。由此可见,这种材料具有巨大的应用潜力。

采用新的高性能铝硅合金材料制造发动机零部件,减轻发动机运动部件质量和传动阻力等,将有助于提高发动机性能。最近,马自达汽车公司采用了一种新型发动机,命名为Miller循环发动机^[17],该发动机的最大特点是高效节能。这种发动机采用的高效压缩机,即Lysholm压缩机,是高效节能的关键装置。该压缩机的内转子要求轻质,在高温下具有较好的强度和低的热膨胀,为此选用了快速凝固Al-Si-Fe-Cu-Mg合金,并采用了喷射沉积工艺。将这种2.3L的发动机装在原3.0L的汽车上,其油耗仅相当原2.0L的汽车,而效率却相当于3.0L的汽车,即节约燃油20%。投产后,预计这种材料在日本每月将以10t的用量用于制造这种发动机转子。1994年马自达公司已将这种发动机安装在新型KUNOS800型和XEDOS9型轿车上,供应日本、欧洲及北美市场。

应用快速凝固铝合金制造汽车空调器元件,可有效地减轻空调系统的质量。传统空调器的转子和叶片是由铸铁或烧结钢制成,其质量大、效率低。Al-Si-x系快凝合金无论是强度、硬度,还是刚性和热膨胀性均能满足转子和叶片的性能要求。为此,日本Sumitomo电子工业公司成功地用Al-Si-Fe系快凝合金取代了铸铁或烧结钢^[18],该合金中的Si含量为17%~20%,Fe含量为5.0%~7.5%,制造工艺一般采用粉末冶金法,应用这种合金后,

转子减轻质量 0.4kg。

快速凝固高硅铝合金中加入一定量的 Fe、Mn、Ni 后,还可用于制造汽车发动机的活塞和气缸套。由于这种材料含有大量的硅,所以热传导性、耐磨性较高,而热膨胀率却很低,该铝合金可以制造出高性能的发动机。此外,快速凝固 Al-Si 系和 Al-Fe-x 系合金,还成功地用于制造轻型汽车的连杆、压缩机外壳及同步器等零件^[16]。

我国这方面的工作只是近几年刚开始,基本处于实验室研究阶段,合金的种类也仅限于 Al-Si-Cu-Mg 系,与国外有较大的差距。

随着我国工业的发展,特别是汽车、航天、航空、兵器工业的发展,对这类材料的需求将越来越迫切。以汽车工业为例,我国的高级轿车发动机和配件基本依赖于进口,大大地制约了我国汽车工业的发展。因此,大力发展国产发动机材料及制造工艺(其中快速凝固高硅铝合金及其成型工艺是重点之一),对改变我国汽车工业现状意义是十分深远的。

目前,高硅铝合金存在的问题主要有两方面,一是韧性差;二是成本高。因此,研发低成本固结工艺的快速凝固高硅铝合金,应当是当今的研究方向。此外进一步提高该材料的耐热性,使其能应用于航空航天飞机的装备,也将是今后几年的工作重点^[30]。

1.2.4 快速凝固高硅铝合金在高功率密度发动机上的应用

在汽车技术的发展中,高功率密度发动机动力水平的发展是一项关键技术,并已成为各国竞争的制高点。降低燃油消耗、提高燃油经济性、缩小发动机体积与质量,以及提高发动机功率是高功率密度发动机动力技术的主要特点。发动机功率密度的提高有利于实现高紧凑整体式动力推进系统,这是世界先进发动机动力技术发展的主要方向,是未来汽车轻量化、快速化的核心技术之

— [1][2]。

当前,德国、法国以及乌克兰等国的高功率密度柴油发动机动力技术发展最快,德国MTU公司升功率为92kW/L的高功率密度柴油机(HPD—High Powder Diesel)技术已经成为当今世界柴油机动力技术发展的最高水平,其各项性能如表1-2、表1-3所示。

表1-2 德国MTU公司柴油发动机动力发展状况^[2]

代次	二代	三代	三代(I)	三代(II)	四代
功率(kW)	1103	1103	1210	2016	1103
升功率 (kW/L)	23.1	43.6	44.23	73.7	92

表1-3 各国柴油发动机动力装置性能对比^[2]

主战坦克	美国	中国	乌克兰	德国		法国
发动机	XAV-28	SL150	6TЯ-2	MT890V12 (HPD)	MT883	SCAMV8 X1500
升功率 kW/L	38.67	34.66	54.20	92.00	73.70	67.00
动力装置 体积/m ³	4.81			3.20	4.30	6.05
单缸 排量/L	2.30	2.83	1.36	1.00	<1.20	1.37

缸套是发动机的核心,决定着发动机的功能特性、寿命、可靠性以及制造成本,是发动机的关键核心构件。缩小缸套与活塞配缸间隙,是减小燃油消耗、提高做功效率以及降低震动噪声等的重要措施,而缸套材料的热物理性能对发动机活塞配缸的设计有着显著的影响。

耐磨高镍、高磷以及高硼铸铁等材料由于成本低、耐磨性能好

等特点是目前应用最普遍的发动机缸套材料,但该材料韧性低,因而缸套壁厚较大。除铸铁缸套外,俄罗斯还采用经氮化处理的38CrMoAl 钢制缸套。

随着发动机升功率指数的提高,燃油燃烧爆发压力也越来越高,达到26~32MPa。燃油爆发压力的提高,要求加大缸套壁厚,这样势必引起发动机质量的增加,加之铸铁、钢制缸套导热性能低,冷却能力差,因而缸内热负荷增高,这样,对活塞的耐热性能要求更加苛刻,超出了铝活塞的耐温极限,加剧了活塞烧顶的“热蚀”失效问题;另一方面,为提高燃油经济性以及做功效能,需要缩小配缸间隙,而铸铁、钢材与铝合金活塞材料膨胀系数差异较大,因而拉缸“咬合”失效问题也难于解决。

随着快速凝固+粉末冶金技术的不断成熟与应用开发,目前已经突破了高硅铝合金缸套材料的制造技术难关,使高硅铝合金材料优越的耐磨性能、热物理性能得到充分发挥。德国、美国、英国、日本、意大利等国已成功开发出高硅铝合金发动机缸套材料,代替铸铁缸套材料,可实现“无间隙配缸”设计,极大地提高了发动机升功率密度,已获得良好的技术经济效益与社会效益,其各项性能如表1-4所示。韩国、印度等国也正在大力开发之中;德国、日本已将该材料用于奔驰—戴姆勒及马自达汽车;美国通用动力公司以及英国等已用于4、6、8、12、16缸发动机动力机械;德国将其视为满足欧Ⅲ、欧Ⅳ排放标准的“法宝”,并取得了巨大的商业成功^{[1][2]}。

目前,我国发动机缸套材料技术已由过去的跟踪、引进发展到现在的自主创新阶段。在铸铁缸套材料技术方面,现在可以生产各种民用铸铁缸套材料,通过表面淬火技术(感应、激光)、离子注入技术以及表面改性与强化技术等(镀铬、喷钼以及陶瓷复合化),以提高铸铁缸套材料的使用性能。但大功率发动机缸套技术采用俄罗斯38CrMoA 钢制缸套技术以及国内外整机配套。38CrMoAl 钢

制缸套成本高、制造工艺复杂,制造周期长,已不能满足发动机动力发展的技术和经济性要求,因而迫切需要开发廉价的缸套材料;现阶段开发的 42MnCr52 钢制缸套,经表面高频淬火后性能得到很大提高,且成本也大幅度降低,但铸铁、钢制缸套材料与铝合金活塞材料间仍存在相容性问题,因而缩小配缸间隙的设计难度很大。可以看到,目前采用钢制缸套,其配缸间隙可以缩小为 0.28mm,但进一步缩小配缸间隙已不太可能。

采用快速凝固+粉末冶金技术制备高硅铝合金材料,经适当的变形及机械加工后,直接代用铸铁及钢制缸套材料,可以降低成本,缩短制造周期,获得减重、降低或减少电化学腐蚀的效应。

表 1-4 国外高硅铝合金缸套材料室温性能对比^[2]

合 金	E (GPa)	HRB	ρ (g/cm ³)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ %	备注
Al-17Si-6Fe-4Cu-Mg	95	96	2.81	560	470	1.0	日本
Al-20Si-Ni-Cu-Mg	99	92	2.82	480	440	1.0	德国
Al-20Si-Cu-Mg	88	93	2.65	420	360	1.0	英国
Al-25Si-4Cu-1Mg	91			415	390	1.3	美国
Al-20Si-5Fe-3Cu-1Mg	99			436	414	0.9	
Al-20Si-5Fe-2Ni	95		2.78	380	230	2.3	
38CrMoAl, 42MnCr52	210	229	7.80	980	835	15	俄(中)
铸铁材料(缸套)	200	190	7.80	≥ 275			欧、美

1.3 快速凝固铝硅合金块体材料制备工艺

快速凝固铝硅合金块体材料的制备工艺主要采用两种方式,即快速凝固粉末冶金工艺和快速凝固喷射沉积工艺^[21]。一般性的