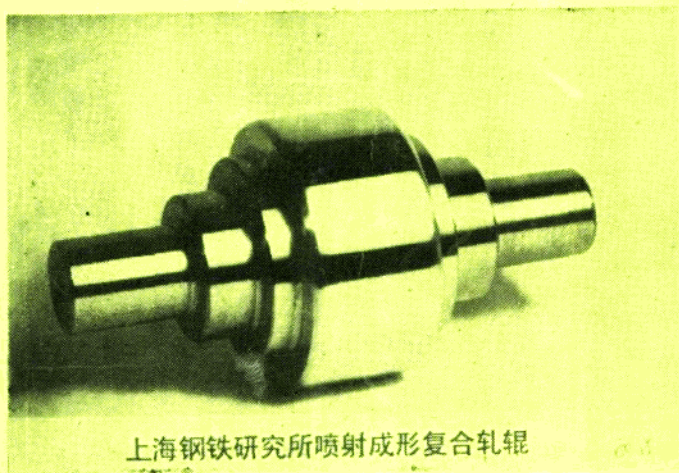


喷射成形技术在钢铁和 汽车工业中的应用译文集

章靖国 孙德生 陈付时 主编



上海钢铁研究所喷射成形复合轧辊

上海钢铁研究所

1997年

3
29

责任编辑：张海南 韩庆康

喷射成形技术在钢铁和汽车
工业中的应用译文集

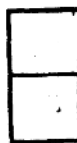
(内部资料)

编 辑：《上海钢研》编辑部

出 版：上海钢铁研究所

(上海宝山区泰和路1001号)

印 刷：杭州市余杭人民印刷厂



前 言

章靖国

第三届喷射成形国际会议 (ICSF3) 于 1996 年 9 月 9 日至 11 日在英国 Cardiff 举行。会议设十个分会：铝合金的加工及应用，高温合金的加工、组织和应用，特殊钢的加工及应用，一次及二次加工，镁及钛合金的加工和性能，铜合金的加工及应用，特殊钢的组织 and 性能，过程模型，室温下铝合金的组织 and 性能，以及在高温下使用铝合金的组织 and 性能等。笔者应邀与英国 SMP (特殊熔炼制品) 的 L. H. Shaw 共同担任第五分会——镁及钛合金的加工和性能的分会主席。很巧，美国 UCI (加州大学，欧文分校) 的 Lavernia 教授在这个分会作了“ γ 钛铝合金的喷射成形”的讲演。三年一次的喷射成形国际会议，英国的 Osprey Metals 是主要推动者之一。这届国际会议是由美国的 TMS，英国的威尔士发展署，和英国 Osprey Metals，德国 Mannesmann Demag Huttentechnik，以及日本住友重工共同组织的。第四届喷射成形国际会议将于 1999 年仍在威尔士举行，地点尚未定。

去年，我们曾经出了一本“喷射成形技术译文集”，其中大部分译文取自第二届喷射成形国际会议的论文集。今年这本译文集，主要也是取自第三届喷射成形国际会议。三年来，喷射成形技术，无论在应用基础研究，材料开发，一次及二次加工和相关技术，应用等方面都取得了不少进展，这可从第三届会议收录的 36 篇报告中略见一斑。应该说，喷射成形技术在上面提到的几方面都有明显的进展，不过，特别给人留下深刻印象的是这一技术在产业化方面进展。为此，在现在这个译文集中，我们着重收集了喷射成形技术在钢铁和汽车工业中应用方面的文章。

喷射成形技术实现产业化的第一个产品是日本住友重工制造的高铬铸铁和高碳高速钢轧辊，用于园钢、扁钢、线材和型钢轧机上。此后，英国 Forged Rolls (UK)，British Rollmakers，Sheffield 大学和 Osprey Metals 着手联合开发用于热轧和冷轧带钢轧机的复合大轧辊，它得到英国贸易和工业部的资助。本译文集中收集了他们在 ICSF3 上介绍该项联合开发项目近期进展的一篇报告。会后，笔者应 Forged Rolls (UK) 的 R. Price 先生的邀请去 Sheffield 参观了他们的工厂。通过会上报告和会下参观交谈，给人印象是用喷射成形技术制造轧制钢带用复合轧辊的初步试验结果十分令人鼓舞，但还有一些材料和工艺细节尚待进一步优化。记得在 Sheffield 时，Price 先生曾经与笔者讨论过高速钢的二次硬化过程。因为喷射成形过程的冷速明显快于传统工艺，因而喷射成形高速钢的二次硬化过程也不同于一般高速钢。八十年代笔者在美国曾研究过激光快速熔凝 M2 高速钢的二次硬化过程，Price 先生对此很感兴趣。看来，用喷射成形技术制造高速钢轧辊，要达到完全产业化水平，还应在调整化学成分和确

定热处理工艺等方面作细致的工作。用于轧制钢带轧辊的市场很大，特别是国内缺乏制造高档轧辊的先进技术，有相当部分还得依赖进口。我们现在利用喷射成形技术制造轧制钢带的复合大轧辊，实际上与国外几乎处于同一起跑线，只是在某些关键的核心技术掌握方面，还有一定差距。而令人担心的是，我们的投入太少。从 ICSF3 获悉，美、英等在这方面的投入和支持强度很高。利用喷射成形技术制造的另一个重要冶金产品是以 Sandvik 为代表的大口径不锈钢管和高合金复合管。本译文集也收集了这方面的报导。

在喷射成形技术实现产业化过程中，汽车工业将是另一个重要市场。在东京汽车博览会上曾展出日本 Mazda Eunos 800 汽车采用的节油 Miller cycle 发动机中的 Lysholm 压缩机，其中转子是由日本住友轻金属用喷射成形技术制造的 Al-Si 合金。从 ICSF3 获悉，欧州汽车工业将开始大量使用喷射成形技术制造的 Al 合金来取代钢铁制造某些汽车零部件。笔者在一次偶然机会听上海大众汽车有限公司的一位高级管理人员说起，德国曾有专家来沪谈到以铝代钢，但因在国内找不到合适的对口单位而没有进一步深谈。看来，国内产业部门与研究开发部门之间的及时沟通信息还应进一步加强。

在喷射成形技术实现产业化过程中，除了上面所说的市场需求及推动之外，在技术方面，一个是喷嘴的设计和制造，对此，我们在前一本译文集中作了较多报导；另一个是控制技术。这次，我们收集了由美国海军海战中心 (NSWC)，MTS 系统公司，和 Drexel 大学共同撰写的一篇报告，介绍喷射成形工艺的计算机辅助工艺设计和仿真。这篇报告很短，估计在公开发表时原来的报告作了很大简化，技术关键和核心恐怕都删去了，不过我们仍把它收集在译文集中，我们想通过报导这一进展说明我们曾反复指出的一点：喷射成形工艺过程是一个多变量输入、多变量输出的非线性过程，因此，没有先进控制技术的支持，要实现产业化是不可能的。今年三月，美国 MTS 系统公司的 Abul Sarah 博士曾来沪介绍材料的智能加工控制技术 (IPM Control Technology, IPM 是 Intelligent Processing of Materials 的缩写)，在录象上看到了他们开发的具有 5 个自由度的基板运动实况。采用这一技术可以用喷射成形技术制造形状不对称的零部件。

总之，无论从市场还是从技术方面，我们都对喷射成形技术实现产业化的前景充满信心，它将发展成为一个立足于高新技术的强大支柱产业。

最后，我们对上海市新材料研究中心，上海市科委业务四处，和上海冶金控股（集团）公司对喷射成形技术的研究与开发应用项目的支持和资助表示衷心感谢。本译文集的编译是该项目信息调研计划的一部分。

喷射成形技术在钢铁和汽车工业中的应用

译 文 集

目 录

前言 章靖国

1. 铝合金的加工和应用

1. 铝合金喷射成形的最新发展 N · Tokizane 等 (1)
2. 喷射成形铸态铝硅合金磨损特性分析 M · F · Amateau 等 (8)
3. Al-Si 共晶合金在喷射成形过程中显微组织变化 Yu Fuxiao 等 (14)
4. 喷射沉积 5803 铝的超塑性行为 Yue Wu 等 (22)

2. 特殊钢的加工和应用

5. 大直径特殊钢钢坯的喷射成形加工与评估 L · H · Shaw 等 (34)
6. 喷射成形金属复合管产品的市场、经济性和机遇 Peter F Chesney 等 (42)
7. 市政废物焚化炉用山德维克 Sanicro65 复合管 Urban Forsberg 等 (49)
8. 用 Osprey 法制造复合材料产品 Jim Forrest 等 (55)
9. 喷射成形技术在钢铁材料上的应用 伊丹哲 (66)
10. 喷射成形方法及其在轧辊生产中的应用 Yoshio Ikawa 等 (76)
11. Osprey 制辊专用设备 熊谷 宪 (86)

3. 一次和二次加工

12. 大型喷射成形装置设计和建造的运作方式 C · Madden Mike 等 (88)
13. 喷射铸造材料的半凝固加工: 机理、挑战和机遇 A · Zavaliangos 等 (92)

4. 镁和钛合金的加工和性能

14. 镁合金及其复合物的喷射成形 T · Ebert 等 (100)
15. 高性能材料的离心喷射沉积: 最近的结果和未来的发展 AL Dowson 等 (108)

5. 铜合金的加工和应用

16. 用喷射沉积制备的新型铜合金及其综合性能 J · P · Tardent 等 (119)
17. 喷射成形焊接用铜合金 D · Stock 等 (123)
18. 喷射沉积 Cu-15Ni-8Sn 合金力学性能的最优化 Ph. Hermann 等 (129)

6. 特殊钢的组织性能

19. 原位合金化和微合金化喷射沉积 1008 钢的显微组织和再结晶行为 C-Y · A · Tsao 等 (137)
20. 喷射铸造高速钢中共品碳化物的形成 Kyeong Ho Baik (145)

7. 工艺模型

21. 喷射成形工艺的计算机辅助工艺规划和仿真 R · Rebis 等 (150)
22. 气体雾化和喷射沉积最优化的工艺图 S · Hariprasad 等 (154)
23. 传热系数对喷射沉积材料中残余热应力的影响 S · Ho 等 (162)

8. 其它

24. Drexel 大学的喷射成形研究 R · Knight 等 (167)
25. 喷射成形进入实用阶段 (175)
26. 工业化生产促进了喷射成形工艺成熟 (181)

铝合金喷射成形的最新发展

N · Tokizane, Y · Ohkubo and K · Shibue

(住友轻金属工业公司研究开发中心日本、名古屋)

1. 引言

喷射成形工艺被认为是能代替传统粉末冶金的最有发展前景的工艺方法之一,这是因为它具有诸如工艺更简单、生产能力更高及污染更少等优点。另一方面,由于大量煤气消耗和产量不高造成的高成本问题尚未完全解决。在铝合金领域,喷射成形材料已进入批量生产阶段²⁾并不断扩大其应用范围,

进一步发展方向是合金设计和工艺改进。

本文论述我们对喷射成形铝合金的各种最新研究。

2. 合金开发

关于喷射成形合金的开发方面可概括三条指导路线,即取代工业化钢锭冶金合金,代替传统粉末冶金材料,及一种全新成分的设计。其中,利用喷射成形材料特有的优点打

表 1 SLM 高性能喷射成形合金

牌 号	成 分	E (GPa)	H _B	P (g/cm ³)	抗拉性能 (室温)			抗拉性能 (加热到 200 C 保温 100 小时)			应 用 (潜在和实现的)
					σ_B (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	σ_B (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	
PB420-T6	Al-20Si-Cu-Mg	88.0	83	2.65	420	360	1	—	—	—	VtR 汽缸
PB405-T6	Al-20Si-Ni-Cu-Mg	99.0	92	2.82	480	440	1	290	200	5	压缩机轮叶
PB416-T6	Al-17Si-Fe-Cu-Mg	95.5	96	2.81	560	470	1	300	205	9	压缩机轮叶和转子
PB105-T1	Al-8Fe-V-Mo-Zr	90.0	80	2.96	480	405	8	310	270	18	发动机部件

E: 弹性模数 ρ : 密度 σ_B : 极限抗拉强度 $\sigma_{0.2}$: 屈服应力 δ : 延伸率

入粉末冶金市场是最可靠的方法,在这方面某些实际应用已成现实。

表 1 示出最近开发的喷射成形合金的几个例子,它们的性能相当于或优于粉末冶金材料,相对于粉末冶金材料来说,这些喷射成形合金具有独特的设计。下面将就高性能喷射成形合金作详细论述。

2.1 耐磨材料

众所周知,快速凝固技术如喷射成形工艺能提高高 Si 含量相容性并能使初始晶粒细化且分布均匀,因此可获得良好的耐磨性

以及很好的可成形性和机械加工性能。

PB420 是 Al-20Si 基合金,适用于室温耐磨应用如 VTR 汽缸。图 1 示出了 T6 挤压件的显微组织^[2]。如曾报导过关于其它过共晶 Al-Si 合金的情况一样^[1,3],随气体与金属流量的比率的提高,即随平均冷却速率的提高,初始硅颗粒渐趋细化。另外,比较图 1 (b) 与图 1 (f),可看出在气体与金属流量比率相同情况下,浇注温度越低,挤压件的显微组织越细小。

图 2 示出销钉盘试验 (时间 1 小时,拉

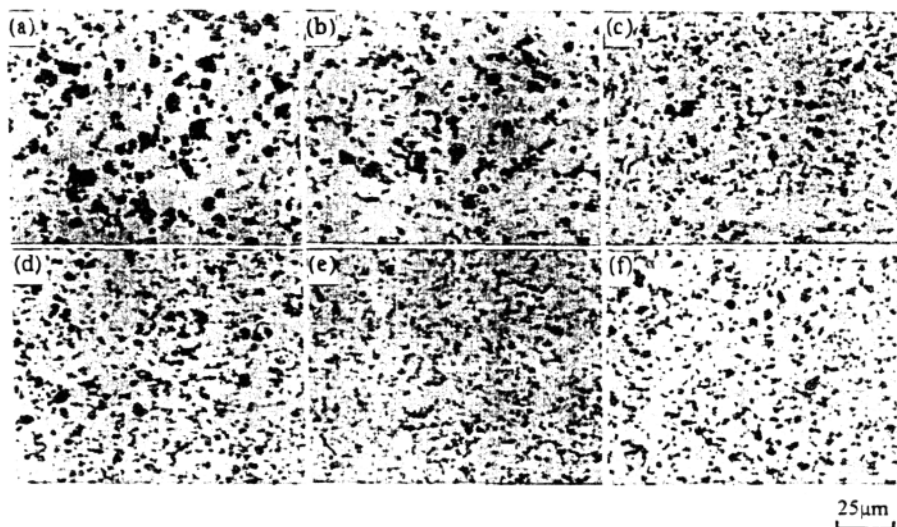


图1 喷射预成形坯经挤压制备的T6的显微组织, G/M比率分别为 (a) 2.9 (b) 3.3 (c) 3.7 (d) 4.0 (e) $4.4\text{m}^3/\text{kg}$, 770°C 和 (f) $3.3\text{m}^3/\text{kg}$, 755°C

力 4.9Mpa , 100°C) 所测得的磨损和极限拉伸强度与平均初始 Si 颗粒尺寸的函数关系。与以前所作的观测结果十分一致, 磨损与平

均初始 Si 颗粒尺寸呈负相关关系。极限抗拉强度随 Si 颗粒尺寸的增大而降低是因为冷却率降低的缘故。

由于喷射成形工艺具有这种控制显微组织的机动性, 所以可根据具体情况有意识地将 PB420 的机械性能调整到所需的强度和耐磨性的平衡。当硅颗粒尺寸相同时, 喷射成形材料具有与粉末冶金材料相等机械性能这点已得到证明。

2.2 高强度和耐磨损材料

给过共晶 Al-Si 合金添加 Fe、Ni 或其它过渡族金属, 除了提高合金的耐磨性外, 还提高了强度和刚度。由于材料具有这些显著的性能且热膨胀系数很低, 所以在喷射成形的早期阶段, 就有人急于开发这些主要应用于汽车工业的 Al-Si-X 合金。目前有些合金已经或者即将投入生产^[1,3,5-7]。

PB405 是一种 Al-20Si-Ni 系列合金, 已能用粉末冶金工艺批量生产车用空调机的

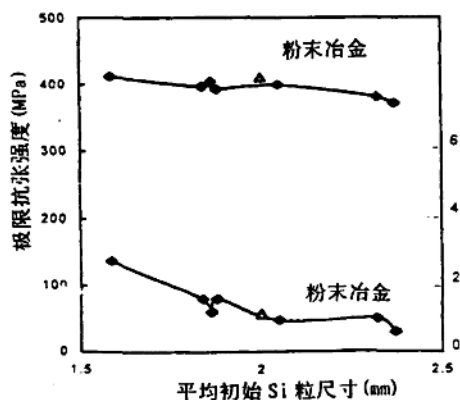


图2 机械性能与平均初始 Si 尺寸的关系 (喷射成形和粉末冶金加工的 T6 挤压件)

压缩机轮叶。喷射成形法生产这种相同成分的材料仍处开发之中,但在任何方面与粉末冶金相比具有相同或更好的性能。

PB416 是一种成分类似于用于车用压缩机转子材料的合金。PB416 合金的高温强度很高,不仅可用于压缩机部件,还可用于发动机部件如连接杆或活塞。

图 3 和图 4 分别示出了 PB405 和 PB416 两种合金的热膨胀系数和比弹性模量,并与传统铝合金(7075)以及其它材料作比较。从

图表明这两种喷射成形合金的热膨胀系数与不锈钢一样低,另外,它们的比弹性模量不仅比钢铎冶金 7075 的而且比钢和钛的高得多。

2.3 耐热材料

Al-Fe 系统是快速凝固领域内一种典型的耐热合金。与传统耐热铝合金如 2000 系列相比,这些材料的耐热性能提高了 150℃。在这温度范围内,弥散硬化合金的强度迅速下降,这是因为铜和镁激活扩散引起析出粗

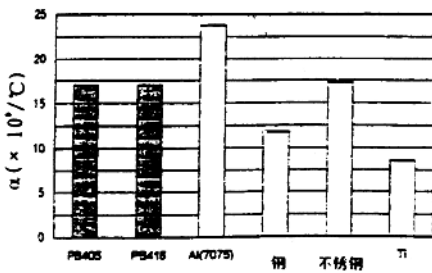


图 3 喷射成形合金与其它材料的热膨胀系数的比较

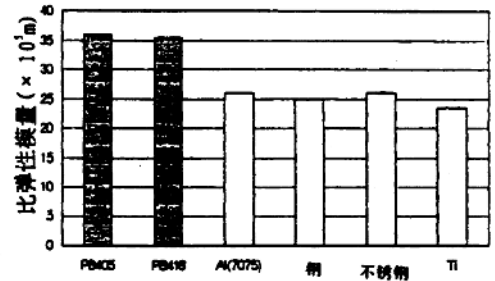
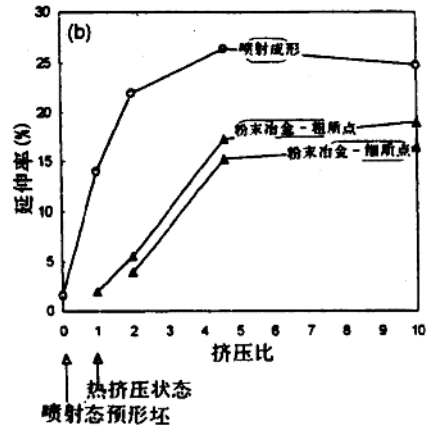
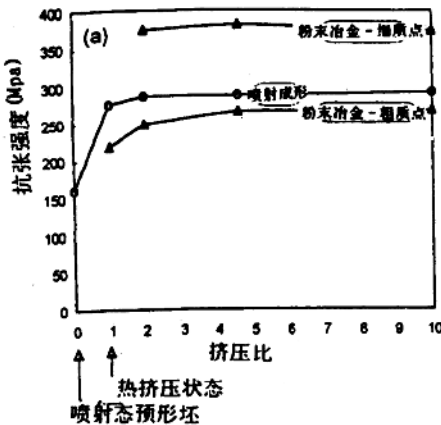


图 4 喷射成形合金与其它材料的比弹性模量的比较



(a) 极限抗拉强度

(b) 延伸率

图 5 Al-8Fe 合金的抗拉性能和挤压比的关系

化所造成的结果。相反,铁铝合金的抗拉性能直至 250℃时也未出现很大的改变,这是因为其抗拉性能是由细小和热性能稳定的 Al-Fe 金属间质点决定的。

喷射成形和粉末冶金 Al-8Fe 二元合金的极限抗拉强度变量和延伸率与挤压比的关系示于图 5^[8]。

图中“粉末冶金—粗质点”表示用平均粒径为 80μm 的氮气雾化粉末制成的粉末冶金挤压件,“粉末冶金—细质点”表示粒径 40μm 粉末制成的。挤压比 0 代表“喷射态”喷射成形预成形坯,1 代表“热挤压”状态。

从图 5 (b) 可见,喷射成形材料在挤压比为 2 时几乎达到最大延伸率,而粉末冶金材料所需的挤压比为 5。另外达到最大延伸率后,虽然一般会出现与抗拉强度负相关曲线,但喷射成形材料仍比粉末冶金粗质点材料的性能好得多,粉末冶金粗质点材料的强度比较低(见图 5 (a))。喷射成形材料的这些特性被认为与韧性氧化物数量较少有关,而粉末冶金材料中的粉末表面完全被韧性氧化物覆盖,因此需很高的压缩量才能使这覆盖层破裂。实际上,在惰性气体中熔融后已用红外线吸收法测量了喷射成形和粉末冶金材料的氧含量,它们分别为 0.01% 和 0.10%^[8]。

就极限抗拉强度的最大值而言,喷射成形材料并不比冷却速率很低的粉末冶金—粗质点材料高多少。然而与延伸率状况的趋势一样,喷射成形材料在很低的挤压比时,即热挤压 1 时,就达到了其本征性能。

利用这些仅需很低的压缩比的优点,如在钢坯尺寸相同的情况下,喷射成形材料可制成比粉末冶金材料断面大的挤压件。由此可望为解决传统的轧钢工艺不能生产大尺寸工件而开辟的新途径。

PB105 是一种含 V、Mo 和 Zr 的 Al-8Fe 基耐热合金,如图 6 所示,它在整个温度

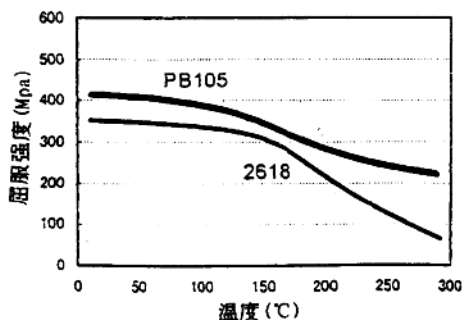


图 6 PB105 和 2618-T6 高温极限强度变化比较

范围内的强度均超过一种典型的传统耐热铝合金 2618-T6。如前所述,当温度超过 150℃、PB105 的优越性更突出。利用其在高温的显著性能, PB105 可望应用于发动机部件如连接杆。

3. 工艺改进

虽然喷射成形具有生产高性能材料的潜力而成为一种引人注目的工艺,但为今后扩大其应用范围必须改进一些工艺来降低成本。图 7 (a) 示出的是对目前喷射成形挤压件生产成本评估的一个例子。各个因素的具体大小随合金、挤压形状、所需性能等条件的变化而改变,但是很明显,降低生产成本的主要因素是减少材料和气体的消耗。

3.1 降低材料成本

合金成分确定后,材料成本由总的材料成品率(收得率)决定,即指成品重量与供料重量之比。为提高该比值,可考虑二种不同方法。一种方法是提高喷射收得率,那就是说减少非沉积材料(OSP: 过喷粉末),另一种是充分利用已形成的过喷粉末。

要限制过喷粉末的产生,缩小气体与金属流量的比率很有效。图 8 表示了 Al-Si-Fe 合金喷射收得率的变化和气体与金属流

量的比率之间的关系。问题是气体与金属流量的比率的减小一般会使抗拉性能降低,所以这种改变范围是有限的。因此,利用过喷粉末的重要性就显得更为突出。

Kriiger 等人报导过许多利用过喷粉末的方法^[8]。作为废料出售以及作为原料重熔是首先提出的两种设想,但第一种设想对工艺经济性毫无意义,第二种设想的做法很麻烦,即在入炉重熔前需将过喷粉末压实及/或用特殊助熔剂处理。将过喷粉末转用粉末冶金工艺加工是利用粉末冶金原有设备和市场的有效方法。直接回收过喷粉末,即将过喷粉末吹入喷射室,这是在早期喷射成形方法中提出的基本设想^[10],但至今尚未实际运用过。图 9 示出的是含 Al-4.5Cu 喷入料(作为过喷粉末的代用品,以氮气雾化粉末喷入)的 Al-Si-Fe 合金预型坯的显微组织。这证明了喷入的粉末确被预型坯基体俘获,而且粉末周围的表面结合力很高。预型坯的粉末含量经化学分析最大为 30%,那就是

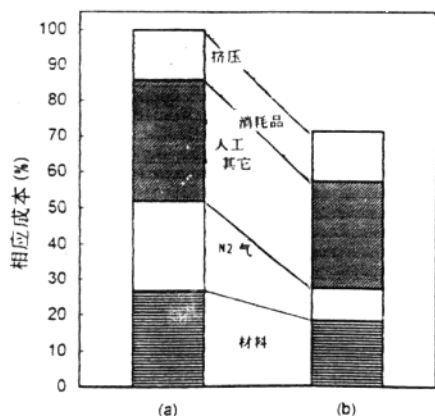


图 7 Al-Fe-Si 合金喷射成形挤压件的成本评估 (a) 正常工艺 (b) 应用过喷粉末喷射

说,以预形坯重量与熔融金属重量之比来定义喷射收得率可提高到 90%。同时冷注入的过喷粉末还起到了冷却熔融金属的介质的作

用,因此可望降低气体消耗。关于成本节省的总体估算示于图 7 (b)。注入相同合金(成

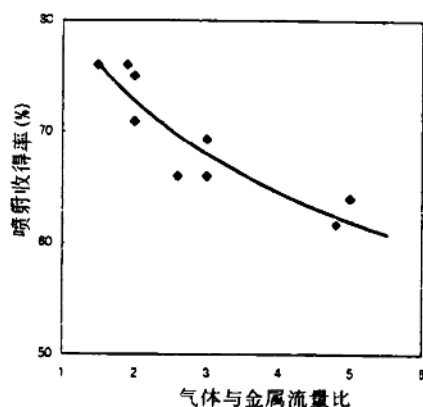


图 8 喷射收得率与气体与金属流量比率的关系

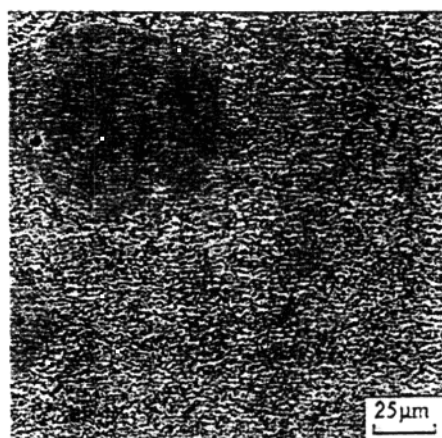


图 9 含 Al-4.5Cu 注入的 Al-Si-Fe 合金预形坯的显微组织。

分)过喷粉末的 Al-Si-Fe 和 Al-Si-Ni 合金挤压件的性能正在进行鉴定之中,但似乎与正常的“无注射过”材料的基本相同。

3.2 降低雾化气体成本

通过降低气体与金属流量的比率能容易地减少雾化气体的消耗。然而,为了弥补因

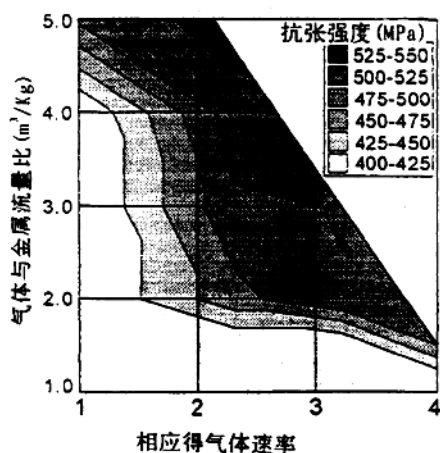


图 10 Al-Si-Fe 合金 T6 挤压坯的极限强度, 气体与金属流量的比率与气体速率的关系

此降低产品的性能, 需要对其他工艺参数作某些修改, 如 2.1 节中提到的降低金属温度。

图 10 示出的是 Al-17Si-Fe 合金 T6 挤压坯的极限抗拉强度图, 它随气体与金属流量之比率和相应的气体速率变化而改变。极限抗拉强度随气体与金属流量比率的增大而提高。同时当气体与金属流量之比率不变, 抗拉强度随气体速率的增高而提高。该现象可用雾化气体动能的增加引起较细小的液滴尺寸分布的观点来解释。

简言之, 要减少气体消耗又不降低抗拉强度, 较理想的做法是在气体与金属流量比率尽可能低以及气体速率尽可能高的条件下进行喷射。应该注意的是当喷射状况偏向如图 10 所示的右面和/或上面时, 由于强烈的气体紊流使得喷射稳定性变得很差。图 10 左边空白区域表示此刻不能实现的喷射条件。

3.3 提高生产率

铝合金喷射成形必须在全封闭保护气氛中进行, 因此它不可成为一种完全连续生产工艺。所以, 该工艺生产率主要依赖于最大

限度地扩大每炉的装料量以及将每批炉料之间的实际需要时间缩减到最少。

人们力求生产较大尺寸的预形坯来作为解决这个问题的一种途径, 现已能生产 500mm 直径的喷射预形坯。

4. 应用及其未来发展

喷射成形铝合金的第一次应用是 Ishikawajima Harima 工业 (IHI) 公司 1993 年开发的用于 MAZDA 牌型号为 EUNOS 800 (用于欧洲的型号为 Xedos 9 及美国的型号为 Millennia) Lysholm 压缩机转子材料。自那以后, 由于整个汽车行业的经济不景气, 故未开发其它方面的应用。但是可以说喷射成形材料在汽车领域仍具有最大的潜在市场, 因为对环境考虑的要求正变得一年比年强烈。减轻活动部件如发动机活塞或连接杆, 压缩机轮叶和转子的重量具有重要意义。

当人们认识到付出比传统的钢锭冶金材料略高的价格获得喷射成形材料优异的性能值得的话, 电子元件或运动器械市场同样具有广阔的应用前景。

如前所述, 喷射成形材料应用范围的扩大关键取决于成本降低的程度。尽管本文描述了已取得的各方面改进, 但要取得更大的成就, 还需在提高生产率和加工收得率方面进一步作出努力。

参考文献

- [1] H. Sano, N. Tokizane, K. Shibue and Y. Ohkubo; Proceeding of Second International Conference on Spray Forming, Swansea, UK (1993). pp363-375.
- [2] N. Tokizane, H. Sano, K. Shibue and Y. Ohkubo; Sumitomo Light Metal Technical Reports, 35 (1994), pp117-122.
- [3] T. Takahara; Proceedings of 1995 European Conference on Advanced PM Materials, Birmingham, UK (1995). pp143-149.
- [4] Y. Ohkubo, K. Shibue, Y. Yamauchi; Proceedings of The 73rd Conference of Japan Institute of Light

Metals (1987), pp103-104.

- [5] J. H. Zheng and W. Kahl; Proceedings of the International Conference on Light Metals, Amsterdam, Netherlands (1990), pp317-324
- [6] J. Zhou, J. Duszczky and B. M. Korevaar; J. Mater. Sci. 26 (1991), pp5275-5291
- [7] J. V. Sarabanda, E. R. A de Carvalho and K. Hummert; "The Application of Rapidly Solidified Alloys to Automotive Pistons", SAE paper 931661, Sao Paulo, Brasil (1993)
- [8] N. Tokizane, Y. Ohkubo, K. Shibue; Proceeding of The 89th Conference of Japan Institute of Light Met-

als (1995), pp195-196.

- [9] J. Kruger, T. Probst, R. Fuchs; Proceeding of First International Conference on Spray Forming, Swansea, UK (1990) .
- [10] A. Leatham, R. G. Brooks, J. Coombs; UK Patent GB2172827 (1986)

黄元恒 译自 "Proc. 3rd Inter.
conf. on. Spray
Forming" P. 37
-43

张 一 校

喷射成形铸态铝硅合金磨损特性分析

M. F. Amateau, D. S. Lee, J. C. Conway, Jr.

(宾夕法尼亚大学)

摘 要

对三种喷射成形的过共晶铝硅合金包括喷射态、挤压、固溶处理和时效(STA),以及过时效各种处理后的磨损特性进行了测定并与一种铸态铝硅合金相比较。对两种牌号的可热处理合金(Al-16Si-4.5Cu-13Fe-Mg和Al-19Si-7Ni-3Cu-Mg),以及一种非热处理合金(Al-20Si-5Fe-2Ni)成分进行了研究。在室温无润滑条件下,采用销钉盘轮廓仪测量磨损率。从磨损率看,Al-16Si-4.5Cu-1.3Fe-Mg合金和Al-20Si-5Fe-2Ni合金随过时效处理的增强而降低了耐磨性,而Al-19Si-7Ni-3Cu-Mg合金经过时效后却提高了耐磨性。试验结果发现,材料的磨损特性与合金的成分以及其产物相的显微组织有关。

1. 引 言

过共晶铝硅合金可用于汽车部件,如活塞、发动机组、集流管、气缸衬套、汽缸盖、及圆盘制动器。由于其具有良好的耐磨特性、高热传导和重量轻等特点,铝硅合金在用于高磨损环境的其它机械部件方面具有潜力^[1]。然而,用常规加工方法加工的铝硅合金,坯料中的初始硅颗粒较大且分布不均匀,使后加工性能受到限制。喷射成形过共晶铝硅合金有小的晶粒尺寸,锭料中一次和二次质点也很细小,可随即挤压到近终形^[2]。喷射成形过共晶铝硅合金可以进行挤压和锻造,加工后提高了强度、疲劳抗力,冲击性能和断裂韧性。

工业用铝硅合金含有各种添加成分,改善了显微结构和强度,因此对耐磨性能起到了重要作用。众所周知,初始硅颗粒的数量、

大小和形态对铝硅合金的耐磨性能产生影响^[3,4]。沉淀硬化对基体强度的作用也会影响耐磨性能^[5]。诸如 $Al_{12}Fe_3Si$, Al_9FeNi 和 $FeAl_3$ 等弥散硬化相不仅会产生弥散强化同样会提高耐磨性能。

本课题目的是评价显微结构对喷射成形过共晶铝硅合金耐磨性能的影响,对仅有弥散强化的以及除弥散强化外还有沉淀硬化的两类铝硅合金进行了研究。

2. 材料与加工

表1列出了三种喷射成形合金以及一种铸态合金的成分。所选合金即有可热处理和不可热处理Al-Si合金。390合金和PB405合金含铜或镁,因此可用固溶处理和时效处理来提高强度。PB405合金含镍而390合金含铁。S250合金只含Fe和Ni弥散强化元素。

表 1: Al-Si 合金成分

合 金	合金类型	名 义 成 分						
		Si	Fe	Ni	Cu	Mg	Mn	Zn
B390 ⁺	可热处理	17	1.3	—	4.5	0.5	0.5	1.5
390 [≠]	可热处理	16	1.3	—	4.5	0.5	0.1	—
PB405 ⁺	可热处理	19	—	7	3	1.4	—	—
S250 [‡]	非热处理	20	5	2	—	—	—	—

* 铸态合金, 由 Roth Brothers 冶炼公司提供

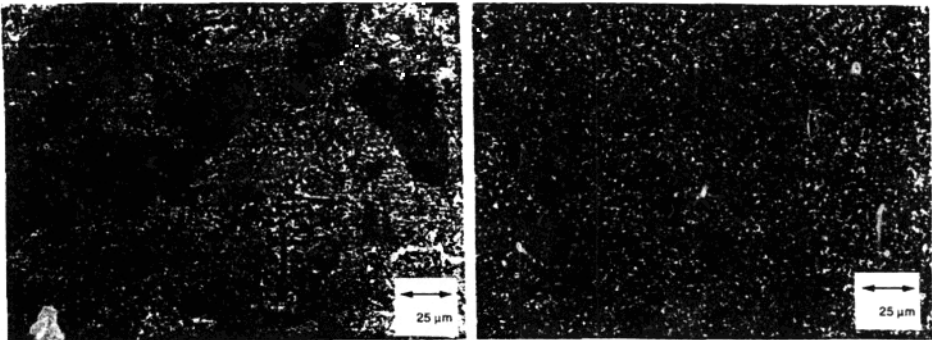
≠ 喷射成形材料, 由 Alcoa 技术中心提供

+ 喷射成形材料, 由住友轻金属工业公司提供

‡ S250 是 PEAK Werkstoff GmbH 规定品牌 (等级标识), 喷射成形材料, 由 Osprey 金属公司提供

喷射成形的 390 合金和 S250 合金在 450°C 进行挤压, 挤压比率为 16:1。喷射成形和挤压后的材料均作 STA 处理, 包括加热到 490°C 保温一小时, 经水淬后再加热到 175°C 保温 6 小时 (T6)。同样也将非热处理 S250 合金进行这样的处理, 以提供与可热处理合金相同的热处理过程。PB405 合金在 450°C 按 22:1 挤压后再进行 STA 处理。所有这些材料在 STA 处理后均进行“过时效”处理以模拟高温使用条件。过时效状态包括在 500°C 保温 100 小时, 500°C 保温 500 小时以及 550°C 保温 100 小时。做这些过时效处理的目的是使初生硅和弥散体颗粒长大。用阿基米德法对每种合金成分的密度作了测定, 并在每次热处理

和时效后进行布氏硬度测量。测量结果见表 2。喷射成形可热处理 390 合金的布氏硬度值为 90, 略低于喷射成形非热处理 S250 合金的布氏硬度值 99。经挤压后 390 和 S250 合金的硬度分别提高约 8% 和 13%。STA 处理大大提高了可热处理 390 合金的硬度 (54%), 但非热处理 S250 合金硬度的提高却很小 (7%), 与预期的结果一致。可热处理高温 Al-Si 合金 PB405 进行了 STA 处理。二种可热处理合金在 500°C 保温 100 小时后, 大大降低了硬度 (~50%), 而非热处理合金 S250, 在相同条件下硬度略降低 13%。在更苛刻的热暴条件下, 如 550°C 保温 100 小时以及 500°C 保温 500 小时, 对所有这些合金来说, 硬度值有



(a) 铸造 B390 合金

(b) 喷射成形 390 合金

图 1 铸造和喷射成形过共晶铝-硅合金的显微组织

适量的降低。

以铸态 B390合金为基线，图1示出了铸态 B390与喷射成形390显微组织的比较。图 1a 显示了典型的铸态组织中极大的初始硅和弥散颗粒尺寸，而图1b 显示了喷射成形后

颗粒尺寸有数量级的减小。

3. 磨损试验

磨损试验是采用销钉盘轮廓仪在室温无润滑条件下进行的。销钉试样直径约6mm。

表2 不同处理后磨损试样的性能

合 金	密 度 kg/m ³	硬 度 BHN					
		单喷射 成形的	再经 挤压的	再经 STA 处理	STA+500℃ 100小时	STA+550℃ 100小时	STA+500℃ 500小时
B390	2698	99	NA	NA	NA	NA	NA
390	2734	90	97	149	95	93	NA
PB405	2828	NA	NA	163	109	99	83
S250	2761	99	112	120	104	99	96

灰口铸铁圆盘（柱）试样直径为125mm，硬度为26RC。钉与盘之间的常压为4. 83MPa。滑动速率为4. 46m/s。每次滑动时限为9至12秒。这段时限足以试样产生可测量磨损而又不使销钉端产生过量的热聚集。每次滑动间隔将销钉试样进行称重，根据重量的减少计

算出材料磨损掉的体积。每次间隔后用240号（砂粒）SiC 砂纸蘸丙酮将粘附在铸铁环上的铝合金残迹尽量清除掉。知道试样磨损掉的体积数，速率和每次滑动时限，即可算出每种合金的磨损率。经50米滑动后，可获得稳态磨损条件。采用以二至四个销钉所测磨损条

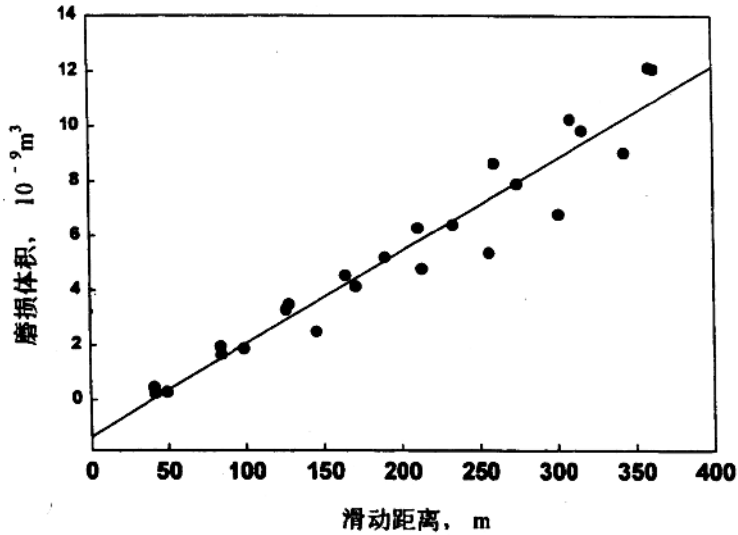


图2 S250合金经550℃保温100小时过时效处理后的稳态磨损特性

件为基础进行线性回归拟合可确定每种材料在各种条件下的平均稳态磨损率。图2示出典型的稳态磨损图。

4. 结果与讨论

表3和图3分别列出和例示了所有试样的磨损试验结果。从中可见,所有喷射成形合金经热处理和过时效后的磨损率均低于铸态合

金 B390。

对本研究采用的所有合金组成而言,不可能重复所进行过的工艺条件,不过,所有喷射成形合金在经挤压加工后进行 STA 处理和100小时过时效条件的试验。可热处理合金 390 (含铁) 和 PB405 (含 Ni) 相对于随后的热处理,表现出略有不同的磨损特性。

表3 Al-Si 过共晶合金的磨损特性

合 金	条 件	磨 损 率 $10^{-11} \text{m}^3/\text{m}$
B390	铸态	3.67
390	喷射成形+挤压	1.27
390	喷射成形+挤压+STA	2.11
390	喷射成形+挤压+STA+500℃保温100小时	3.08
390	喷射成形+挤压+STA+550℃保温100小时	2.96
PB405	喷射成形+挤压+STA	3.55
PB405	喷射成形+挤压+STA+500℃保温100小时	3.06
PB405	喷射成形+挤压+STA+550℃保温100小时	2.94
PB405	喷射成形+挤压+STA+500℃保温500小时	2.29
S250	喷射成形态	2.82
S250	喷射成形+挤压	2.43
S250	喷射成形+挤压+STA	2.65
S250	喷射成形+挤压+STA+500℃保温100小时	3.07
S250	喷射成形+挤压+STA+550℃保温100小时	3.44
S250	喷射成形+挤压+STA+500℃保温500小时	3.53

经喷射成形和挤压处理的390合金在所有合金中以及在试验加工条件下磨损率最低,仅为同材料铸态 B390合金磨损率的35%。经固溶和时效处理的390合金的磨损率高于挤压处理的。两种过时效处理(500℃或550℃保温100小时)后合金的磨损率增大的幅度相近。挤压后经 STA 处理的 PB405合金的磨损率最高,比相同条件下的390合金高40%,而这两种合金的显微组织相似,它们的初始硅体积百分数和颗粒尺寸近乎相同。然而,390合金中存在一种呈针状或片状的弥散相,估计是铁-硅-铝金属间化合物。PB405在 STA 条件下的硬度略显高些(163VS. 149BHN)。过时效处理后,两种合金

的硬度均大幅度降低(50%),磨损率非常相近。

与 STA 状态相比较,390合金大幅度地提高磨损率,而 PB405合金的磨损率却略有降低。在过时效状态下,两种合金具有相近的硅体积百分数和硅质点尺寸。但是,它们在弥散体相的数量和形态方面差异很大, PB405合金为等轴弥散体,而390合金呈针状弥散体。图4示出了两种合金经500℃保温100小时过时效处理后显微组织的比较。PB405合金经强过时效后又降低了磨损率。这两种可热处理合金磨损特性随热处理变化出现的差异,似乎与硅颗粒尺寸关系不大,而是与金属间化合物弥散体相的形态有关。

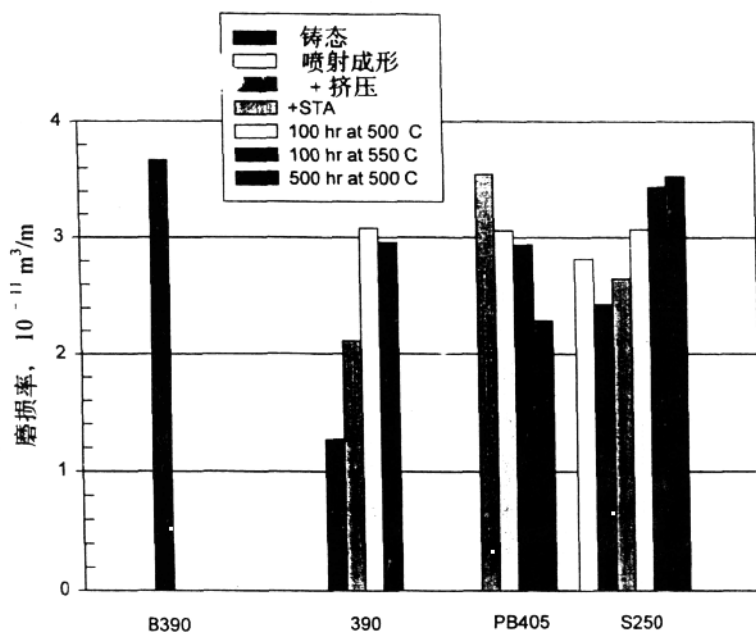


图3 Al-Si 合金稳态磨损率

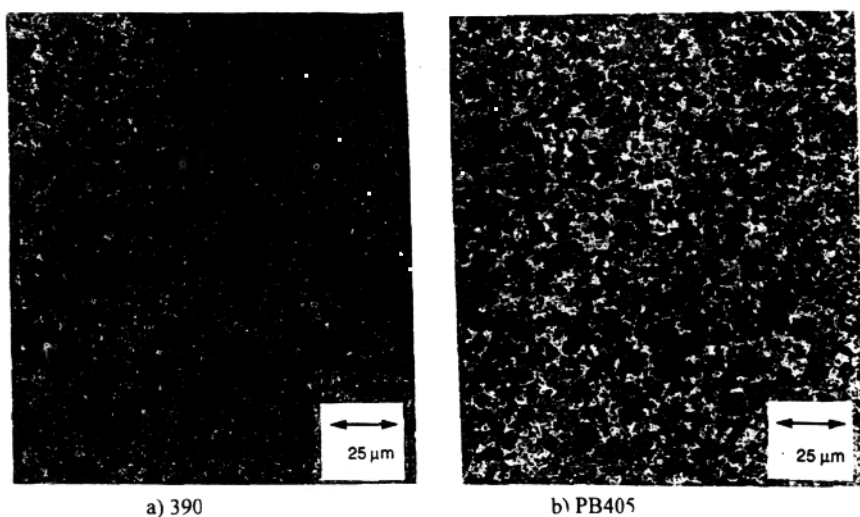


图4 可热处理 Al-Si 合金过时效 (500°C, 100小时) 后的显微组织

在所有处理条件下对非热处理 S250 合金的磨损特性进行了测定。如图3所示, 喷射